

RAFAEL GIBELLI

**ANÁLISE DE ADERÊNCIA DO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO EM UMA MINA
DE DRAGAGEM DE AREIAS MINERAIS**

SÃO PAULO

2018

**ANÁLISE DE ADERÊNCIA DO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO EM UMA MINA
DE DRAGAGEM DE AREIAS MINERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
curso de Engenharia de Minas da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Giorgio Francesco Cesare de
Tomi

SÃO PAULO

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

TF-2018
635a
Aprovado

H2018t



Escola Politécnica - EPMI



31700000810

Gibelli, Rafael

ANÁLISE DE ADERÊNCIA DO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO
EM UMA MINA DE DRAGAGEM DE AREIAS MINERAIS / R. Gibelli -- São Paulo,
2018.

48 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. Planejamento de lavra 2. Dragagem 3. Areias minerais 4. Melhoria
contínua I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.

Departamento de
Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Sandra e Eduardo, pelo exemplo de dedicação ao longo da vida, confiança, paciência com as idas e vindas e apoio dado durante todos esses anos. Sem seu suporte jamais teria sido capaz de chegar até aqui. As minhas irmãs, Fernanda e Giovana, pelo companheirismo e apoio que sempre demonstraram. Espero um dia poder retribuir a altura tudo o que fizeram por mim. Muito obrigado!

Aos meus amigos politécnicos que estiveram comigo nesta caminhada, na dedicação as matérias, nas festas, no tempo gasto jogando conversa fora, do primeiro ao último ano, nos anos de intercâmbio, muito obrigado por terem feito parte desta história!

Aos meninos da vila, molecada do colégio, obrigado pelo apoio e fé em mim, desde os tempos de criança, que sempre possamos manter a irmandade que temos hoje! Tamo junto!

Ao pessoal da Datamine África, obrigado pela oportunidade de fazer parte deste time, pelos ensinamentos passados, tanto de mineração quanto de vida, pela oportunidade de poder participar do projeto que deu origem a este trabalho. Devo grande parte de meus conhecimentos em mineração a vocês.

Ao pessoal da Austrália, muito obrigado por terem feito parte de uma experiência inesquecível na minha vida.

Ao meu orientador, Tomi, e toda a equipe do LAPOL, pelo auxílio e orientação prestados ao longo deste projeto.

RESUMO

Areias minerais são de grande importância econômica mundial, sendo as maiores fontes de elementos como titânio e zircônio. Tendo em vista o contexto econômico da indústria mineral atual, é de grande importância para as empresas do setor que se siga o planejamento estratégico definido e, para tanto, é necessário que o planejamento de curto prazo reflita de maneira realística os objetivos da operação e que sua execução seja aderente ao planejado. O presente trabalho teve como objetivo a análise da aderência do planejamento de curto prazo em uma mina de dragagem de areias minerais, através da análise da metodologia de planejamento utilizada na operação bem como o grau de influência e desvio dos principais fatores operacionais. Foram analisados o planejamento inicial para o período de 1 ano, o primeiro semestre de produção e o replanejamento para o segundo semestre. A massa total de minério concentrada produzida no primeiro semestre foi 8,5% inferior ao planejado inicialmente. Entretanto, mensalmente, a massa produzida desviou em média 23% do planejado, não apresentando desvio inferior a 20%. Entre as causas identificadas para o desvio, destaca-se a utilização de um modelo de planejamento que possui alta dependência do teor do minério in situ, e dá pouco peso as variáveis operacionais, como tempo de operação da draga, enquanto a análise dos dados de produção mostra a alta dependência da massa de concentrado obtida em relação a este parâmetro. A análise do replanejamento mostra a reutilização de premissas, replicando um processo de planejamento inicial – que não se mostrou aderente - e indicado a ausência de utilização de metodologias de melhoria contínua na operação.

Palavras-chave: Planejamento de lavra. Dragagem. Areias Minerais. Melhoria contínua

ABSTRACT

Heavy mineral sands have a great economic importance, being the biggest source of elements such as titanium and zirconium. In the mineral industry current economic environment, being able to follow strategic planning is an important competitive factor for mining companies, and to accomplish that, it is vital for these companies that the short-term planning at the mines are developed with realistic ways to achieve the planned goals. This study had as focus the analysis of short term planning adherence at a heavy mineral sands dredge mine operation, through the analysis of its planning methodology and the weights and deviations of the main operational factors involved in planning and execution. Conducted through the analysis of a 1-year plan along with data relative to the first semester of its execution and a revision of the plan, developed for the second semester. The total tonnes of concentrate produced on the first the semester were 8.5% under the plan. However, monthly, the concentrate tonnes had an average deviation of 23%, being always higher than 20%. From the possible causes of deviation identified, a highlight is the use of a planning model with high reliance with the ore grade in situ, giving less importance to operational factors such as dredge utilization, while analysis of production data shows the high correlation between the concentrate tonnes produced and dredge utilization. The analysis of the revision plan shows use of same planning assumptions, with the revision being similar to the original plan – which showed low accuracy – indicating the lack of continuous improvement methodology uses at the operation.

Keywords: Mine Planning. Dredge Mining. Heavy Mineral Sands. Continuous Improvement

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Retorno sobre capital Investido por indústria	14
Figura 2: Esquematização do transporte de minerais pesados.....	16
Figura 3: Esquema de ambientes de deposição de minerais pesados	17
Figura 4: Lavra em tiras	18
Figura 5: Lavra com dragline.....	18
Figura 6: Canhão d'água de mineração hidráulica	19
Figura 7: Esquematização de draga bucket ladder	20
Figura 8:Dragas hidráulicas.....	20
Figura 9: Fluxograma simplificado do planejamento de lavra	21
Figura 10: Fluxograma das etapas de trabalho	23
Figura 11: Linhas de base e linha central.....	26
Figura 12: Linhas de base	26
Figura 13: Exemplo de lago artificial criado no software	26
Figura 14: Sequência de Lagos artificiais.....	27
Figura 15: Corte lateral dos lagos artificiais	27
Figura 16: Planejamento realizado no Excel	28
Figura 17:Concentrado – planejado vs produção realizada	32
Figura 18: Desvio produto final executado vs planejado	32
Figura 19: Correlação concentrado vs parâmetros operacionais – planejado.....	33

Figura 20: Correlação concentrado vs parâmetros operacionais – produção realizada	33
Figura 21: Recuperação mássica - planejado vs produção realizada	34
Figura 22: Teor do concentrado - planejado vs produção realizada.....	34
Figura 23: Concentrado vs produção mensal – comportamento da curva de planejamento	35
Figura 24: Concentrado vs teor – comportamento da curva de planejamento	35
Figura 25: Concentrado vs produção mensal – comportamento da curva de produção realizada.....	35
Figura 26: Concentrado vs teor – comportamento da curva de produção realizada .	35
Figura 27:Concentrado vs tempo de operação, teor e taxa de produção da draga...	36
Figura 28:Produção mensal vs tempo de operação e taxa de produção da draga ...	37
Figura 29: Desvio relativo dos parâmetros operacionais.....	38
Figura 30: Tempo de operação – replanejamento.....	39
Figura 31:Taxa de produção da draga – replanejamento.....	39
Figura 32: Teor do minério - replanejamento	39
Figura 33: Concentrado - replanejamento.....	39
Figura 34: Massa de concentrado - produção acumulada	40
Figura 35: Ciclo de planejamento com melhoria contínua.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Principais minerais de HMS e suas densidades.....	13
Tabela 2: Produção mundial de ilmenita, rutilo e zzircônio, 2014.....	14
Tabela 3: Lista de parâmetros do modelo de blocos.....	25
Tabela 4:Parâmetros de saída do Studio OP	28
Tabela 5: Produção mensal planejada para 2016	29
Tabela 6: Produção mensal executada e replanejada em 2016.....	29
Tabela 7: Matriz de correlação dos dados de planejamento	32
Tabela 8: Matriz de correlação dos dados da produção realizada	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 A operação analisada	10
1.2 Objetivos	11
2. DESENVOLVIMENTO	12
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1.1 Areias minerais pesadas – principais usos e produtores.....	12
2.1.2 Areias minerais pesadas – características geológicas dos depósitos	15
2.1.3 Métodos de lavra.....	18
2.1.4 Planejamento de lavra.....	21
2.1.5 Melhoria contínua	22
2.2 METODOLOGIA	23
2.2.1 Coleta de dados	23
2.2.2 Análise do ciclo de planejamento.....	24
2.2.3 Análise dos resultados.....	24
2.2.4 Discussão e conclusão	24
2.3 RESULTADOS.....	24
2.3.1 Modelo de blocos	24
2.3.2 Avaliação dos avanços operacionais	25
2.3.4 Planejamento e produção mensal.....	29
2.4 DISCUSSÃO	30
2.4.1 Parâmetros de planejamento.....	30

2.4.2 Correlação entre os parâmetros.....	31
2.4.3 Análise de aderência.....	37
2.4.4 Replanejamento	38
3. CONCLUSÃO.....	41
4. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

As areias minerais, assim denominadas por possuírem em sua composição minérios de elevada densidade (Van Gosen *et al.* 2014), possuem importância econômica no cenário mundial por serem fonte de minerais que possuem diversas aplicações em variadas indústrias, de fabricação de pigmentos a utilização na indústria aeroespacial. São, por exemplo, a principal fonte mundial de titânio e zircônio.

Empreendimentos mineiros que lavram areias minerais apresentam, em média, retornos aos investimentos superiores quando comparados a outros minerais, de acordo com Tyler (2004). Estes empreendimentos, apesar de serem encontrados em múltiplos países, têm grande concentração de valor gerado em três destes: China, Austrália, África do Sul.

Devido ao processo de formação geológico dos depósitos de areias minerais, estes costumam se apresentar de dois principais modos: em depósitos costeiros ou aluvionários (Hou *et al.* 2016). De acordo com as características do depósito e dos recursos disponíveis em sua região, a lavra pode ser realizada em dois principais modos: a seco ou a úmido.

A lavra a seco pode ser realizada através de uma variedade de métodos de lavra, como lavra em tiras, utilizando *Draglines*, caminhões e pás carregadoras, *Bucket Wheel Excavators* e até escavadoras (Darling, 2011). Nas minas onde a lavra é realizada a úmido, a dragagem é o método de lavra mais comum, principalmente em ambientes costeiros, sendo este o objeto de estudo deste trabalho.

No planejamento da operação das minas de dragagem, assim como para minas que utilizam outros métodos de lavra ou mineram outros tipos de minério, podem ser utilizados softwares de planejamento de lavra, em conjunto com outras ferramentas, cuja eficácia é medida através da aderência da produção realizada perante o planejado.

No contexto da indústria mineira cada vez mais competitiva e focada em redução de custos, destaca-se a necessidade de se cumprir o planejamento de modo a manter a competitividade das empresas no mercado (Vanek et al., 2015).

1.1 A operação analisada

A mina objeto deste estudo possui uma operação costeira de dragagem de areias minerais, operando em draga única, localizada na costa do continente africano. Sua distância em relação ao mar varia entre 0,5 km e 4 km, dependendo da localização do corpo de minério. Seus principais produtos são ilmenita e zircônio, gerando também como coprodutos rutilo e leucoxênio.

Utiliza-se um método de lavra misto, com utilização de um canhão d'água para desmonte hidráulico que facilita a operação da draga hidráulica, sendo esta a única draga da mina, constituindo a única frente de lavra. Esta funciona de maneira convencional, montada em um lago artificial que se move de acordo com o avanço da lavra, levando consigo uma usina de concentração densitária, cujos rejeitos são lançados imediatamente atrás da mesma.

Para enchimento do lago artificial, funcionamento da usina de concentração por métodos densitários e utilização do canhão de desmonte hidráulico, utiliza-se água disponível em dois aquíferos próximos à região da mina.

O planejamento da produção é realizado utilizando o software Studio OP, da empresa Datamine Software, através da criação de sólidos matemáticos que representam o lago artificial no qual a draga e a usina operam. O resultado da interpretação geológica gerado por estes sólidos é então analisado no Microsoft Excel, onde o planejamento é finalizado.

São utilizados também no planejamento dados operacionais da usina – recuperação mássica e teor do concentrado - a fim de se estimar a massa de concentrado produzidas pelo conjunto de operações de lavra e passagem pela usina.

Além de planejar o avanço da lavra, é necessário que a equipe de planejamento também inclua em suas análises planos para a execução de outras tarefas que dão suporte à execução da lavra, como: movimento da infraestrutura (movimentação e manutenção de bombas d'água, rede elétrica, abertura de estradas, etc.), limpeza do terreno a ser lavrado, disposição do rejeito (curto e longo prazo), reabilitação das áreas lavradas, tempo de manutenção dos equipamentos, etc.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar, para uma mina de dragagem de areias minerais em um depósito costeiro, localizada na costa oeste africana, a aderência da execução perante o planejamento de curto prazo, a fim de se verificar para este tipo de operação, se o método de planejamento utilizado se adequa ao fim proposto.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Areias minerais pesadas – principais usos e produtores

As areias minerais, conhecidas em inglês como *heavy mineral sands (HMS)*, são fonte de diversos tipos de mineral, com aplicações em variadas indústrias. Recebem esse nome por conter minerais com densidade superior a 2,85 g/cm³ (Van Gosen et al. 2014).

São a principal fonte mundial de titânio e zircônio, com mais de 75% da produção mundial de titânio sendo originada de HMS (Tyler, 2004). ilmenita, leucoxênio, rutilo e zircônio são os principais produtos das areias minerais (Van Gosen et al. 2016). Em alguns depósitos de HMS, monazita também é recuperada como coproduto por conter tório e elementos de terras raras (Van Gosen et al. 2014), assim como cassiterita.

A maior parte da ilmenita, rutilo e leucoxênio não é utilizada para consumo do titânio como metal puro, mas sim como TiO₂. Quando em formato de pó, o TiO₂ é utilizado como pigmento branco em tintas, papéis e plásticos por prover branura, brilho, alta refratividade e opacidade. Outros usos do titânio, quando em sua forma metálica, são na indústria aeroespacial, joalheria, marca-passos, mísseis teleguiados e na fabricação de soldas. De 2000 a 2014, a produção total de concentrados de ilmenita cresceu 30%, passando de 4,3 Mt a 5,57 Mt (Van Gosen et al. 2016).

Já o zircônio, obtido como coproduto durante a separação dos minerais de titânio, é usado principalmente em cerâmicas (mais de 50%) e materiais refratários, sendo também usado pela indústria farmacêutica. A produção mundial de zircônio subiu 37% de 2000 a 2014, saindo de 1,04 Mt para 1,42 Mt. Os principais países produtores de zircônio são Austrália e África do Sul, respectivamente (Van Gosen et al. 2016). Os principais minerais extraídos de areias minerais são apresentados na tabela 1.

Tabela 1:Principais minerais de HMS e suas densidades

Densidade	Mineral	Composição ideal
Minerais pesados		
5.3	Hematita	Fe_2O_3
5.2	Magnetita	Fe_3O_4
5.0	Pirita	FeS_2
4.8	Pirolusita	MnO_2
4.6 – 5.4	Monazita	$(\text{Ce},\text{La},\text{Y},\text{Th})\text{PO}_4$
4.7	Ilmenita	FeTiO_3
4.7	Zirconita	$(\text{Zr},\text{Hf},\text{U})\text{SiO}_4$
4.4 – 5.1	Xenótimo	YPO_4
4.4	Goethita	$\alpha\text{FeO}\cdot\text{OH}$
4.2 – 4.3	Rutilo	TiO_2
4.0	Coríndon	Al_2O_3
3.8 – 4.2	Leucoxênio	FeTiO_3 to mostly TiO_2
3.7 – 3.8	Estaurolita	$\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{SiO}_4)_4(\text{O},\text{OH})_2$
3.6 – 4.0	Limonita	$\text{FeO}\cdot\text{OH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$
3.5 – 4.1	Espinela	MgAl_2O_4
3.4 – 3.6	Titanita	$\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$
3.4 – 3.5	Epídoto	$\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$
3.1 – 4.3	Granada	$(\text{Mg},\text{Fe},\text{Mn},\text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
3.6 – 3.7	Cianita	Al_2SiO_5
3.2	Sillimanite	Al_2SiO_5
3.2	Andalusita	Al_2SiO_5
3.0 – 3.3	Turmalina	$(\text{Na},\text{Ca})(\text{Li},\text{Mg},\text{Al})(\text{Al},\text{Fe},\text{Mn})(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$
2.85 – 3.6	Anfibólio	$\text{W}_{0-1}\text{X}_2\text{Y}_5\text{Z}_8\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F})_2$ (general formula)
Minerais leves		
2.8 – 3.2	Biotita	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
2.8 – 2.9	Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
2.65	Quartzo	SiO_2
2.6	Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
2.56 – 2.76	Feldspato	$(\text{K},\text{Na},\text{Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8$

Fonte: Adaptado de Van Gosen et. al, 2016

Dados referentes a produção mundial de ilmenita, rutilo e zircônio em 2014 são apresentados na tabela 2.

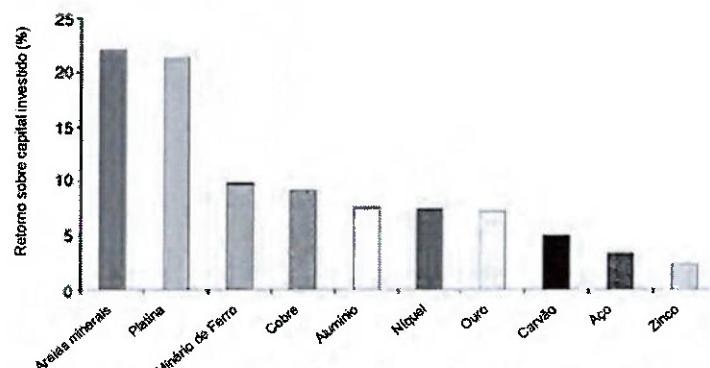
Tabela 2: Produção mundial de ilmenita, rutilo e zircônio, 2014

País	Tipo de depósito	ilmenita (kt)	Rutilo (kt)	zircônio (kt)
China	Areias minerais	960		150
Austrália	Areias minerais	720	190	551
África do Sul	Areias minerais	600	53	387
Vietnã	Areias minerais	560		
Moçambique	Areias minerais	510		51
Madagascar	Areias minerais	300	9	
Ucrânia	Areias minerais	250	63	
Índia	Areias minerais	190	17	40
Quênia	Areias minerais	100	22	
Brasil	Areias minerais	100		
Estados Unidos	Areias minerais	100		
Senegal	Areias minerais	60		
Serra Leoa	Areias minerais		100	
Indonésia	Areias minerais			110
Canadá	Rocha competente	480		
Noruega	Rocha competente	440		
Rússia	Rocha competente	110		
Outros países		90	17	130
Total mundial		5570	471	1419

Fonte: Adaptado de Van Gosen et. al, 2016

De acordo com Tyler (2004), minas de areias minerais apresentam retornos de investimento superiores quando comparados com outras indústrias, como mostrado na figura 1:

Figura 1: Retorno sobre capital Investido por indústria



Fonte: Tyler, 2004

2.1.2 Areias minerais pesadas – características geológicas dos depósitos

Depósitos de areias minerais são conhecidos por ocorrer em vários lugares do mundo, havendo dois tipos de depósitos principais: depósitos costeiros, comumente ocorrendo ao longo da praia (incluindo dunas costeiras) ou zonas rasas ao interior, e depósitos aluvionários, onde podem ser encontrados ouro e diamantes (Hou et. al 2016).

Depósitos costeiros, mais especificamente, possuem uma série de características em comum, que trazem a eles vantagens competitivas quando comparados com outras fontes de titânio e zircônio, como por exemplo:

- Depósitos geralmente volumosos, cobrindo largas áreas e com alguns depósitos individuais contendo mais de 10 Mt de minério, com alguns depósitos contendo teores superiores a 2% de HMS (Hou et. al 2016)
- Geralmente localizados em baixas profundidades, cobertos apenas por solos ou rochas sedimentares (Hou et. al 2016)
- Geralmente são de fácil escavação devido à natureza de baixa coesão das areias permitindo alta mecanização da operação. (Hou et. al 2016)
- Além do titânio, outros minerais costumam estar associados neste tipo de depósito. (Hou et. al 2016)
- Os minerais pesados costumam representar até 15% do peso total do depósito (Van Gosen et al. 2016), entretanto, segundo Tyler, esta proporção pode variar entre 10% e 35% do peso (Tyler,2004)
- Depósitos econômicos tem espessura variando entre 3 e 45m (Van Gosen et al. 2014)
- A largura varia usualmente entre 0,4 km e 4 km (Van Gosen et al. 2014)
- O comprimento pode variar bastante, podendo ir de 5 km até 100 km. (Van Gosen et al. 2014)
- Os corpos em sua maioria apresentam direção paralela à praia (Hou et. al 2016).

- Em corte transversal, os corpos de minério possuem o formato de lentes convexas, enquanto ao se obter uma vista superior, possuem um formato alongado (Hou et. al 2016).

Materiais formadores de areias minerais têm sua origem em rochas frescas ígneas ou metamórficas, que, após a ação de intemperismo e erosão, são transportadas fluvialmente até as zonas costeiras onde são depositadas, e, por acumulação, dão origem aos depósitos de areias minerais. Existe a possibilidade de rochas sedimentárias serem intermediárias na formação das areias minerais, ao se originarem das ígneas ou metamórficas, porém sendo intemperizadas posteriormente (Hou et. al 2016).

Figura 2: Esquematização do transporte de minerais pesados

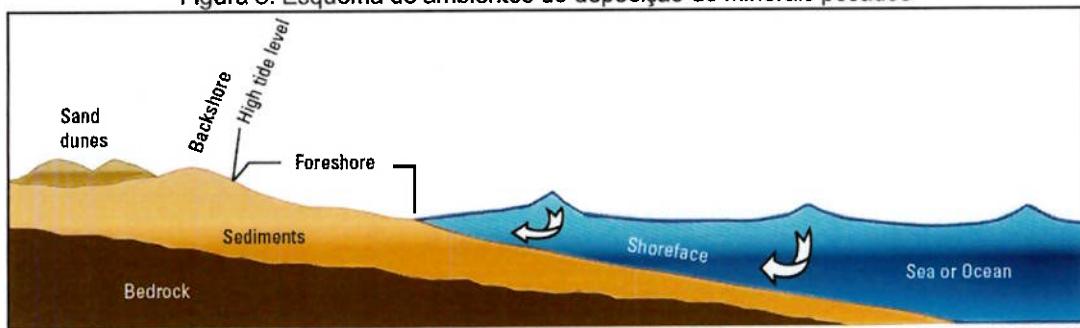


Fonte: Hou et. Al, 2016

Após a deposição dos minerais pesados nas áreas costeiras, os sedimentos contendo minerais pesados podem ser redistribuídos para diversos ambientes, como deltas de rios, *foreshore*, *backshore*, *shoreface*, dunas e lagoas de maré (figura 3). Ao longo da

costa, a ação de ondas, ventos e marés separa mecanicamente os grãos minerais, separando os minerais pesados dos leves. Estudos recentes indicam que os depósitos mais significativos de areias minerais ocorrem em dunas eólicas, *foreshore*, *shoreface* e lagoas. Os minerais que geram as areias minerais pesadas são pouco reativos quimicamente, permitindo que completem esta longa jornada.

Figura 3: Esquema de ambientes de deposição de minerais pesados



Fonte: Van Gosen et. al, 2014

Segundo Roy (1999), o amadurecimento de um depósito de areias minerais é guiado por quatro pontos principais:

- Taxas baixas de deposição de novos sedimentos
- Longos períodos de erosão
- Movimento forte e contínuo de ondas que possa mover areia para dentro da costa e ao longo dela
- Flutuações no nível do mar

Estes seriam os principais mecanismos para que ocorra a deposição dos minerais, a concentração e classificação dos grãos se daria por outros mecanismos. A força das ondas, aliada à das marés, seria responsável pela remoção dos detritos leves, favorecendo a acumulação dos minerais pesados.

2.1.3 Métodos de lavra

De acordo com Van Gosen (2014), há duas classificações principais em relação aos métodos de lavra de areias minerais: a seco e úmido. Já segundo o Darling (2011), depósitos do tipo costeiros são minerados principalmente por dragas.

Minas preferencialmente operam à seco quando o material é consolidado, os corpos são pequenos, descontínuos e de alto teor. Segundo Tyler (2004), mineração a seco é uma alternativa em áreas onde não há grande disponibilidade de água. Os equipamentos utilizados incluem pás carregadores, escavadoras, caminhões, scrapers e por vezes *draglines* e *bucket wheel excavators*.

De acordo com Darling (2011), há dois métodos principais de mineração a seco, exemplificados nas figuras 4 e 5:

Figura 4: Lavra em tiras

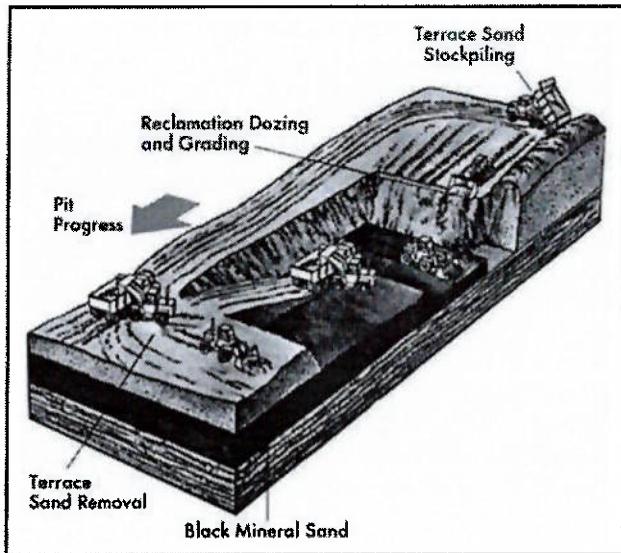
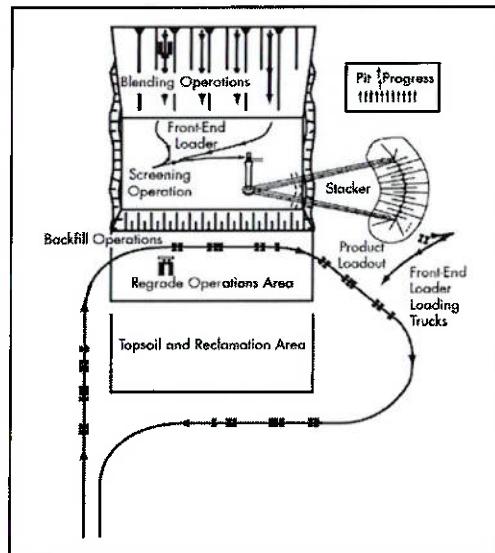


Figura 5: Lavra com dragline



Fonte: Darling, 2011

Fonte: Darling, 2011

Na figura 5, ilustra-se um método similar a lavra em tiras. Após a remoção do estéril acima do minério, abre-se um pit. As areias são removidas em uma direção preferencial e então são processadas numa usina portátil e acumulados numa pilha pulmão. O rejeito da usina é recolocado de volta no pit.

Na figura 4, um processo similar, utilizando outros tipos de equipamento. A recuperação da mina ocorre em paralelo à mineração (Darling,2011).

Já nas operações a úmido, preferencialmente se usam dragas. Podem ser utilizados também, dependendo do tipo de minério, mineração hidráulica, com o uso de jatos da água, disparados pelo canhão d'água. A água é bombeada até a face, sendo disparada pelo canhão, o material desmontado é então recolhido na forma de polpa e bombeado de volta. A água deve ser reciclada.

Figura 6: Canhão d'água de mineração hidráulica

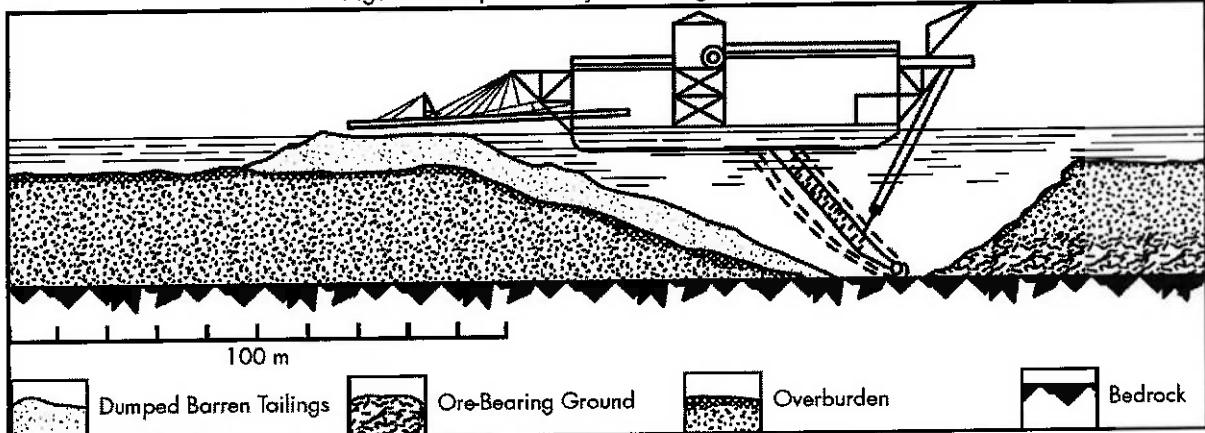


Fonte: Darling, 2011

Segundo Tyler (2004), as dragas apresentam um meio de mineração mais barato e de maior capacidade, chegando até 3000t/h. Para que operem, um lago artificial deve ser criando, onde a draga irá flutuar acoplada à uma usina de concentração flutuante.

Pode-se apresentar para as dragas a seguinte definição (Darling ,2011): dragagem é a recuperação de materiais submersos. Há dois tipos principais de dragagem, mecânica e hidráulica, que se diferem pelo método de transporte do material a superfície.

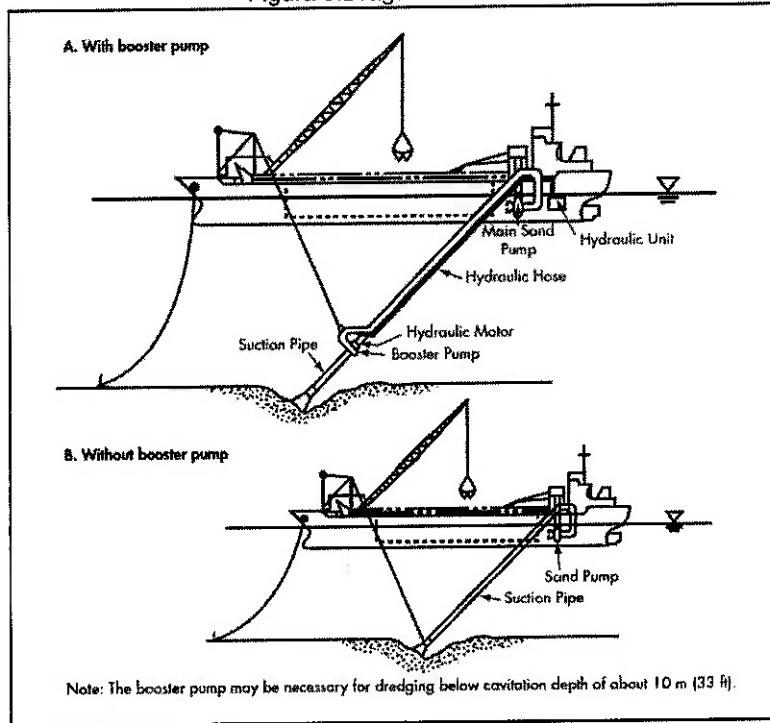
Figura 7: Esquematização de draga bucket ladder



Fonte: Darling, 2011

Dragas mecânicas transportam o material do depósito através da utilização de caçambas ou correias transportadoras. Os tipos principais de dragas mecânicas são *draglines*, *bucket wheel*, *bucket ladder*, *continuous line*. Uma esquematização de draga bucket ladder é apresentada na figura 7.

Figura 8: Dragas hidráulicas



Fonte: Darling, 2011

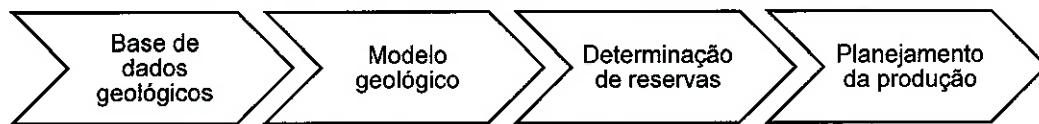
Já as dragas hidráulicas operam baseados na sucção do minério, havendo dois tipos principais de dragas hidráulicas: com bomba intermediária e sem bomba intermediária, como mostra a figura 8. A bomba intermediária pode ser necessária dependendo da profundidade e das características do minério. Sua função é bombear a areia até a bomba principal.

2.1.4 Planejamento de lavra

Segundo Fuykschot (2009), pode-se definir planejamento de lavra como o processo de se obter o material certo na hora certo, ao menor custo unitário possível do produto final da commodity de modo a contemplar o plano de negócio da empresa.

De acordo com Sharma (2011), o processo de planejamento de lavra pode ser resumido de acordo com o fluxograma da figura 9, no qual a base do planejamento se inicia com a obtenção dos dados geológicos, que dão origem ao modelo geológico, utilizado na quantificação e determinação de reservas, que por fim, aliados ao planejamento estratégico da companhia, são utilizados no planejamento da produção.

Figura 9: Fluxograma simplificado do planejamento de lavra



Fonte: Adaptado de Sharma, 2011

O planejamento de lavra pode ser subdividido em três níveis (Fuykschot, 2009):

Planejamento de longo prazo: Alinhado com as expectativas corporativas da empresa. Este plano inclui definição de reservas, capacidade de produção, necessidade de infraestrutura e investimento ao longo da vida da mina (Steffen, 1997).

Planejamento de médio prazo: Derivado do planejamento de longo prazo, é um plano que costuma abranger um período de 5 anos, tendo como objetivo a melhor utilização das reservas de minério, de modo a maximizar a vida da mina e o valor gerado aos investidores, enquanto minimiza o risco para estes (Steffen, 1997).

Planejamento de curto prazo: Plano que deriva do planejamento de médio prazo, costuma cobrir o período de 1 ano, sendo dividido em meses, semanas e por vezes até dias. Inclui majoritariamente detalhes operacionais relacionados aos controles de teor, custo, utilização de equipamentos e produtividade da mão de obra.

2.1.5 Melhoria contínua

Segundo Vanek et al. (2015), na atual indústria da mineração, as empresas são orientadas por objetivos tais como lucro, valorização do capital, posição no mercado, entre outros. Neste contexto, caracterizado por competição e mudanças, o atingimento dos objetivos é dificultado sem a utilização de técnicas de gerenciamento que permitam a melhoria contínua da operação.

Ainda segundo Vanek et al. (2015), a melhoria contínua se torna crucial em um mercado onde a competição é exigente e o menor custo prevalece, sendo difícil para uma empresa manter sua posição no mercado sem a utilização de metodologias de melhoria contínua.

A melhoria contínua pode ser descrita como um conjunto de atividades planejado para trazer uma melhoria gradual, porém contínua, ao um processo de mineração através da constante revisão do mesmo (Barr, 2009).

Entre as metodologias de melhoria contínua disponíveis, uma das mais utilizadas é o PDCA (*Plan, Do, Check, Act*). A utilização do PDCA se mostra mais efetivo do que métodos de planejamento sem margem para erros (Sokovic, 2010). Seu ciclo compreende quatro etapas, repetidas de forma cíclica (Moen, 2006):

Planejar: Definição de passos para atingimento do objetivo do planejamento, aplicando, quando cabível, mudanças definidas na etapa de correção (Moen, 2006).

Executar: Execução do plano e coleta dos dados necessários para análise (Moen, 2006).

Analisar: Analisar os resultados das mudanças efetuadas. O que deu certo? O que deu errado? Quais as oportunidades de melhoria? (Moen, 2006)

Corrigir: Propor ações corretivas e inseri-las no novo ciclo de planejamento (Moen, 2006).

2.2 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consistiu na análise do planejamento realizado pelos engenheiros da mina e a comparação com os resultados obtidos através de dados da produção realizada, a fim de se verificar a eficácia da metodologia aplicada no planejamento da operação.

Neste trabalho, são utilizados os dados reais de operação da mina, com uma análise do ciclo de planejamento, de modo a compreender a origem dos dados, possibilitando então, a análise dos resultados e discussão. A figura 10 apresenta um fluxograma das etapas de trabalho adotadas.

Figura 10: Fluxograma das etapas de trabalho



Fonte: Elaboração própria

2.2.1 Coleta de dados

Obtenção, junto aos engenheiros da mina, dos dados utilizados na realização do planejamento e replanejamento do período analisado, além da produção realizada no

período que antecede o replanejamento. Os dados consistem no modelo geológico e projeções de avanço de lavra, teor do minério lavrado, tempo de operação da draga, produção mensal em toneladas, recuperação mássica, teor do concentrado e massa de concentrado.

2.2.2 Análise do ciclo de planejamento

Consiste na replicação e compreensão das etapas utilizadas no ciclo de planejamento de curto prazo da operação, com o objetivo de gerar compreensão da metodologia aplicada e dar suporte as análises posteriores, fornecendo os insumos necessários para identificação das potenciais causas de desvio de aderência.

2.2.3 Análise dos resultados

Com os dados de planejamento, replanejamento e produção realizada, são feitas análises de aderência e correlação entre os parâmetros utilizados no planejamento e replanejamento, gerando insumos para as discussões realizadas posteriormente.

2.2.4 Discussão e conclusão

Consiste na interpretação dos dados obtidos através da análise dos resultados, apontando as possíveis causas de divergência entre a produção realizada e o plano de operação.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Modelo de blocos

Como parâmetro de entrada no software de planejamento de lavra Studio OP, é necessário que se utilize o modelo de blocos com os parâmetros geológicos do depósito. Os parâmetros do modelo de blocos são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Lista de parâmetros do modelo de blocos

Parâmetro	Tipo de parâmetro	Descrição
XC	Numérico	Coordenada X do centro da célula
YC	Numérico	Coordenada Y do centro da célula
ZC	Numérico	Coordenada Z do centro da célula
XINC	Numérico	Dimensão em X (m) da célula
YINC	Numérico	Dimensão em Y (m) da célula
ZINC	Numérico	Dimensão em Z (m) da célula
IJK	Numérico	Número único identificador da célula
HM	Numérico	Teor de Areias Pesadas (% massa)
RES	Numérico	-
DENSITY	Numérico	Densidade
LOC	Alfanumérico	Localização da célula em coordenadas locais
SLIMES	Numérico	Teor de lodo (% massa)
ZONE	Numérico	Tipo de minério
PEAT	Numérico	Teor de turfa (% massa)
XMORIG	Numérico	Coordenada X da origem do modelo de blocos
YMORIG	Numérico	Coordenada Y da origem do modelo de blocos
ZMORIG	Numérico	Coordenada Z da origem do modelo de blocos
NX	Numérico	Número de células na direção X
NY	Numérico	Número de células na direção Y
NZ	Numérico	Número de células na direção Z

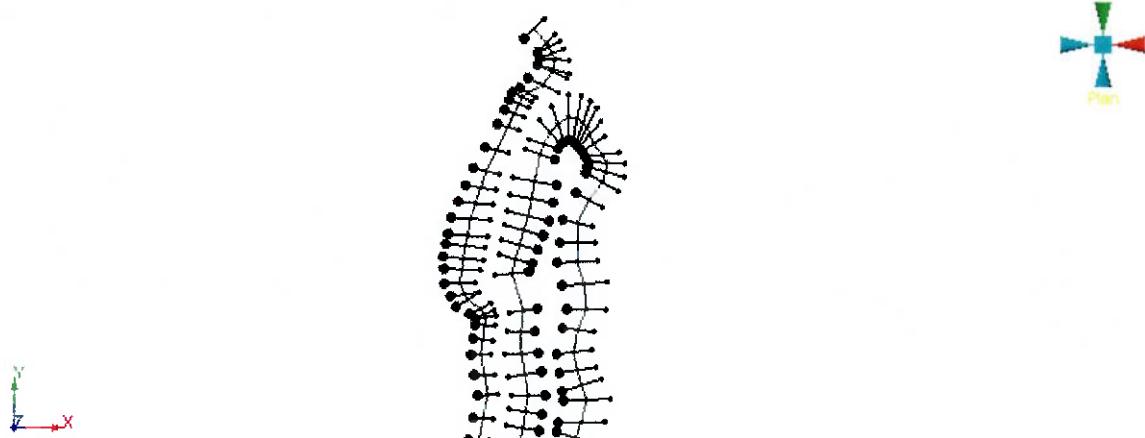
Fonte: Arquivo próprio

2.3.2 Avaliação dos avanços operacionais

A geração dos lagos artificiais envolve a utilização de linhas planares denominadas linhas de base. Estas linhas representam a base do lago artificial, ou a face da frente de lavra onde a draga atuará. Entre as linhas, traça-se a linha central, que auxiliará na criação dos lagos artificiais.

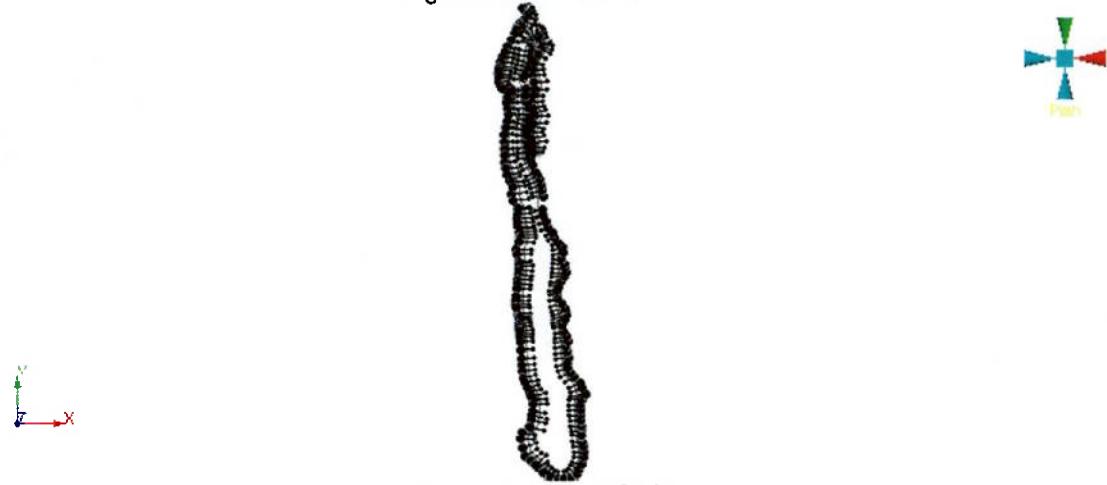
A figura 11 mostra um *zoom in* das linhas de base e do lago artificial. Cada linha possui entre 150 e 200m de comprimento, distanciadas aproximadamente 80m entre si. A figura 12 mostra centenas de linhas, que representam a posição planejada do lago artificial por alguns quilômetros de praia.

Figura 11: Linhas de base e linha central



Fonte: Arquivo próprio

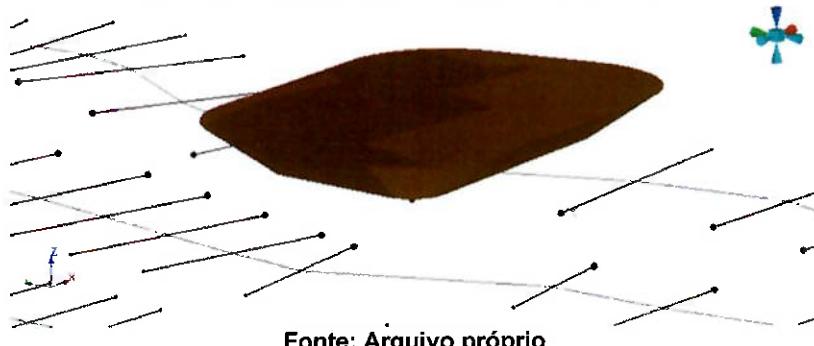
Figura 12: Linhas de base



Fonte: Arquivo próprio

Através do script, o software reproduz o lago artificial em um modelo como o mostrado na figura 13. A figura 14 mostra como os lagos artificiais são criados em sequência e se intersectam, enquanto a figura 15 mostra um corte lateral dos lagos artificiais.

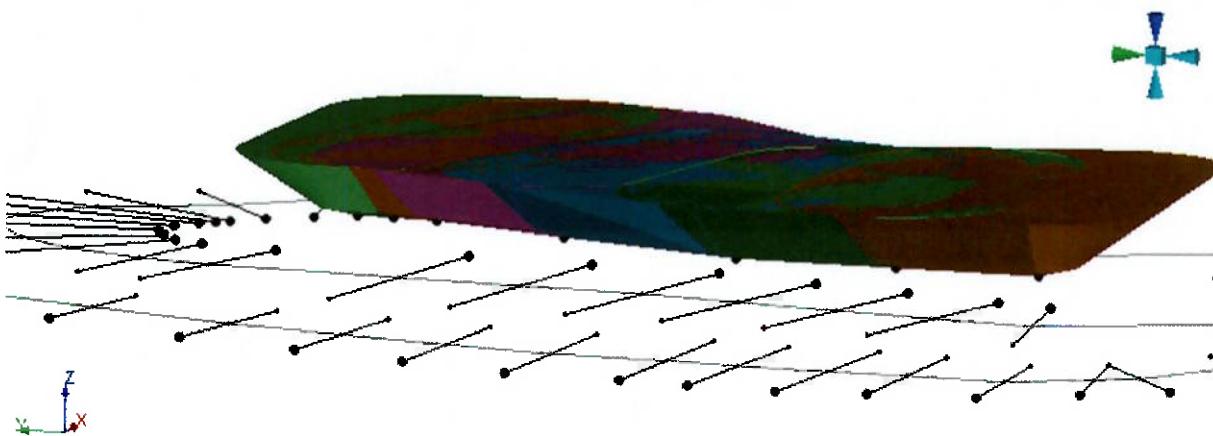
Figura 13: Exemplo de lago artificial criado no software



Fonte: Arquivo próprio

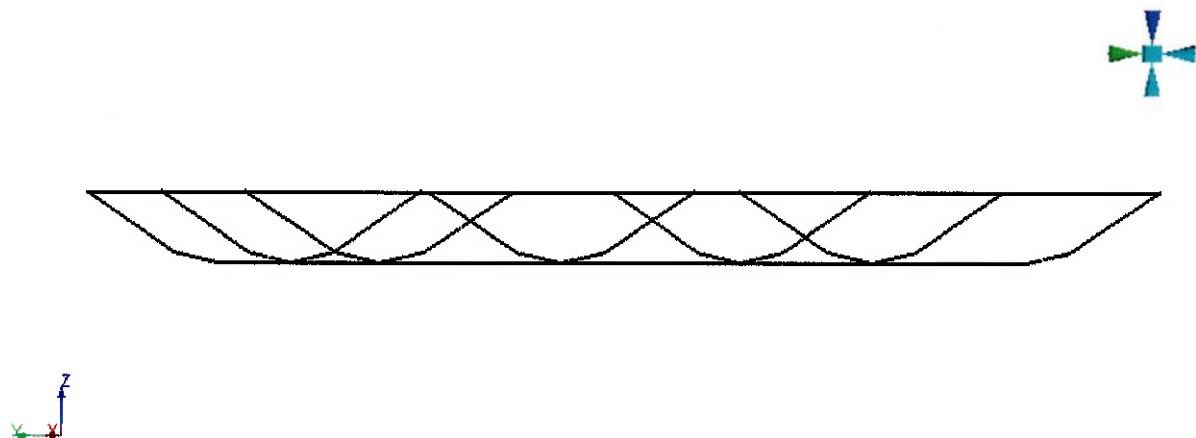
A intersecção entre os lagos artificiais é gerada de maneira proposital, pois estes intersectam o modelo de blocos, e os blocos contido entre dois lagos artificiais serão sempre únicos, recebendo um identificador relacionado ao lago artificial e à linha de base que o criou. O modelo de blocos é então avaliado e o resultado é exportado para o Excel.

Figura 14: Sequência de Lagos artificiais



Fonte: Arquivo próprio

Figura 15: Corte lateral dos lagos artificiais



Fonte: Arquivo próprio

O resultado dessa avaliação gera um arquivo com os parâmetros listados na tabela 4, que serão usados posteriormente no arquivo de Microsoft Excel para finalização do planejamento, cuja representação encontra-se na figura 16.

Tabela 4: Parâmetros de saída do Studio OP

Parâmetro	Descrição
ID	ID do sólido
TONNES	Toneladas
VOLUME	Volume
DENSITY	Densidade
HMT	Toneladas de areia mineral
HM	Teor de areia mineral (% massa)
SLIMEST	Toneladas de Lodo
SLIMES	Teor de lodo (% massa)
PEATT	Toneladas de turfa
PEAT	Teor de turfa (% massa)
PSD	Turfa arenosa (% massa)
PCY	Turfa argilosa (% massa) 5
RES	-
POS	Posição inicial do sólido (m)
LENG	Comprimento do lago (m)

Fonte: Arquivo próprio

Figura 16: Planejamento realizado no Excel

		jul-17	ago-17	set-17	out-17	nov-17	dez-17
Teórico Planejado	Mt Mt	1,10 1,00	1,03 0,97	1,11 1,06	1,12 1,09	1,01 0,99	1,14 0,91
Lodo	%	1,23	1,36	1,10	0,82	1,18	1,16
Turfa	%	1,23	1,36	1,10	0,82	1,18	1,16
Turfa arenosa	%	5,98	3,20	2,48	1,59	1,02	12,27
Turfa argilosa	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Turfa total	%	5,98	3,20	2,48	1,59	1,02	12,27
Minerais pesados	%	1,27	1,56	1,92	2,20	1,37	1,87
Minerais pesados	kt	12,62	15,14	20,34	23,88	13,59	16,99
Recuperação mássica	%	81,5%	81,5%	81,5%	81,5%	81,5%	81,5%
Teor do concentrado	%HM	88,5%	88,5%	88,5%	88,5%	88,5%	88,5%
Concentrado	kt	11,63	13,94	18,73	22,00	12,52	15,65
Areias minerais% max	%	1,38	1,80	2,34	2,34	2,07	2,15
Areias minerais % 90 Percentil	%	1,36	1,78	2,27	2,31	1,96	2,10
Fator de redução - turfa		0,90	0,95	0,96	0,97	0,98	0,80
Primeiro sólido		135	137	139	141	142	144
Último sólido		137	139	141	142	144	146
Comprimento do último sólido		82	91	99	129	64	52
% do último sólido		37%	12%	11%	77%	27%	97%
Posição inicial	m	712.697	712.872	713.017	713.199	713.386	713.558
Posição final	m	712.872	713.017	713.199	713.386	713.558	713.705
Avanço mensal	m	175	144	182	187	172	147
Avanço diário	m	7	6	7	7	7	6

Fonte: Arquivo próprio

2.3.4 Planejamento e produção mensal

Utilizando os dados e metodologia descritos previamente, o planejamento para o ano de 2016 foi realizado como mostrado na tabela 5:

Tabela 5: Produção mensal planejada para 2016

Mês	Tempo de operação	Taxa de produção da draga (t/h)	Recuperação mísica	Teor do concentrado	Produção mensal (t)	Teor do minério	Concentrado Total (t)
jan-16	77%	1.669	82%	89%	955.994	1,8%	14.285
fev-16	77%	1.669	82%	89%	894.317	1,5%	12.753
mar-16	78%	1.670	82%	89%	989.134	1,3%	11.399
abr-16	78%	1.670	82%	89%	937.872	1,5%	13.042
mai-16	78%	1.550	82%	89%	899.496	1,4%	11.553
jun-16	79%	1.550	82%	89%	881.640	1,6%	13.037
jul-16	80%	1.440	82%	89%	856.888	0,7%	5.291
ago-16	75%	1.374	82%	89%	770.374	2,4%	17.175
set-16	82%	1.539	82%	89%	908.645	2,2%	18.335
out-16	83%	1.675	82%	89%	1.034.348	1,7%	15.821
nov-16	84%	1.676	82%	89%	1.013.796	1,8%	16.613
dez-16	85%	1.676	82%	89%	1.060.061	1,6%	15.425

Fonte: Arquivo próprio

A tabela 6 contém a produção realizada no primeiro semestre de 2016, de Janeiro a Junho, com os dados do replanejamento realizado em Julho de 2016, para o resto do ano.

Tabela 6: Produção mensal executada e replanejada em 2016

Mês	Tempo de operação	Taxa de produção da draga (t/h)	Recuperação mísica	Teor do concentrado	Produção mensal (t)	Teor do minério	Concentrado Total (t)
jan-16	87%	1.496	80%	83%	969.729	1,8%	17.501
fev-16	71%	1.385	80%	85%	687.569	1,4%	9.158
mar-16	69%	1.429	77%	87%	738.432	1,3%	8.519
abr-16	68%	1.625	77%	87%	791.410	1,5%	10.324
mai-16	70%	1.708	79%	88%	889.117	1,8%	14.064
jun-16	87%	1.837	82%	85%	892.321	1,2%	10.326
jul-16	87%	1.670	79%	89%	1.078.555	1,4%	13.519
ago-16	86%	1.305	79%	89%	833.653	1,7%	12.414
set-16	84%	1.632	79%	89%	985.945	2,1%	18.134
out-16	85%	1.606	80%	89%	1.013.613	1,9%	17.430
nov-16	77%	1.619	80%	89%	895.422	1,8%	14.313
dez-16	88%	1.687	80%	89%	1.099.725	1,6%	16.320

Fonte: Arquivo próprio

2.4 DISCUSSÃO

2.4.1 Parâmetros de planejamento

O ciclo de planejamento realizado pode ser consolidado e expressado através de sete variáveis, listas com suas premissas de obtenção a seguir:

- i. **Tempo de operação:** Estimado através de dados históricos e atividades programadas, como tempo de manutenção de bombas, movimentação da ponte de acesso à draga, movimentação da rede elétrica, inspeções de segurança nos acessos, falhas não programadas, entre outros.
- ii. **Taxa de produção da draga:** Baseia-se na combinação de dados históricos e do modelo geológico, com uma estimativa inicial da performance da draga baseada na obtida em regiões prévias com geologia similar, aplicando-se a esta estimativa um fator de redução, obtido através da quantidade de lodo, turfa, e minérios de alta densidade presentes na área lavrada de acordo com o modelo de blocos.
- iii. **Produção mensal:** Produto do tempo de operação e taxa de produção da draga, levando-se em conta a quantidade de dias do mês
- iv. **Teor do minério:** Teor estimado do minério in situ, obtido através da interpretação do modelo geológico.
- v. **Recuperação mássica:** Percentual de recuperação mássica dos minerais pesados contidos na areia lavrada após beneficiamento via métodos densitários na usina. Estimado através de dados históricos de geologia e recebido como premissa no planejamento.
- vi. **Teor do concentrado:** Teor de minerais pesados contido no produto da concentração, estimado através de dados geológicos históricos e recebidos como premissa no planejamento.
- vii. **Concentrado:** Concentrado de minerais pesados final, expresso em toneladas como mostrado na Equação 1.

Com os dados apresentados, o primeiro passo foi a tentativa de construção de um modelo utilizando-se uma regressão linear múltipla, a fim de se estabelecer a relação entre as variáveis de influência no resultado da operação.

No entanto, a análise apresentou como resultado um modelo com correlação (r) perfeita. Análises posteriores mostraram que relação dos dados, tanto para o planejamento quanto para o executado, pode ser descrita pela Equação 1:

Equação 1: Concentrado final em função de parâmetros operacionais

$$\text{Concentrado } (t) = \frac{\text{Produção mensal } (t) \times \text{Teor do minério } (\%) \times \text{Recuperação mássica } (\%)}{\text{Teor do concentrado } (\%)}$$

Enquanto a produção mensal é descrita pela Equação 2:

Equação 2: Produção mensal

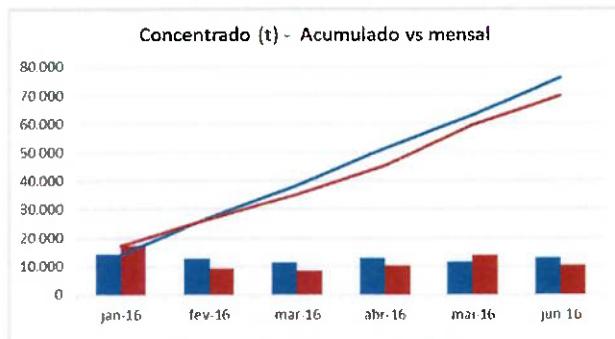
$$\text{Produção mensal } (t) = \text{Taxa de produção da draga } \left(\frac{t}{h} \right) \times \text{Tempo de operação } (\%) \times \text{Horas operacionais } (h)$$

Notando-se a linearidade da relação, procurou-se estabelecer dentre os parâmetros apresentados, quais apresentam maior peso em relação ao resultado final esperado: massa de concentrado.

2.4.2 Correlação entre os parâmetros

Comparando a massa de total de concentrado produzida perante a planejada de maneira acumulada (figura 17) obtém-se um desvio ao fim do período de 8,5%. Esta análise de maneira individual, no entanto, pode levar a uma percepção equivocada da aderência da produção perante o planejamento, pois ao se analisar de maneira isolada cada mês nota-se a grande variabilidade da massa de concentrado produzida em relação ao planejado, como mostra a figura 18:

Figura 17: Concentrado – planejado vs produção realizada



Fonte: Elaboração própria

Figura 18: Desvio produto final executado vs planejado



Fonte: Elaboração própria

Buscando-se entender as causas da falta de aderência foram realizadas análises de correlação entre as variáveis, analisando os dados de planejamento e produção realizada, como mostram as tabelas 7 e 8

Tabela 7: Matriz de correlação dos dados de planejamento

	Tempo de operação	Taxa de produção da draga	Recuperação mássica	Teor do concentrado	Produção mensal	Teor do minério	Concentrado Total
Tempo de operação	1,0						
Taxa de produção da draga	-0,7	1,0					
Recuperação mássica	0,0	0,0	1,0				
Teor do concentrado	0,0	0,0	1,0	1,0			
Produção mensal	-0,3	0,7	0,0	0,0	1,0		
Teor do minério	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,4	1,0	
Concentrado Total	-0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0

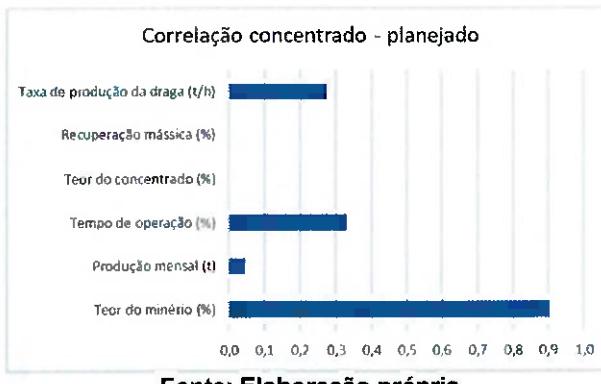
Fonte: Arquivo próprio

Tabela 8: Matriz de correlação dos dados da produção realizada

	Tempo de operação	Taxa de produção da draga	Recuperação mássica	Teor do concentrado	Produção mensal	Teor do minério	Concentrado total
Tempo de operação	1,0						
Taxa de produção da draga	-0,4	1,0					
Recuperação mássica	0,2	0,4	1,0				
Teor do concentrado	-0,8	0,3	-0,6	1,0			
Produção mensal	0,6	0,6	0,4	-0,3	1,0		
Teor do minério	0,7	-0,1	-0,1	-0,2	0,6	1,0	
Concentrado total	0,8	0,1	0,2	-0,4	0,9	0,9	1,0

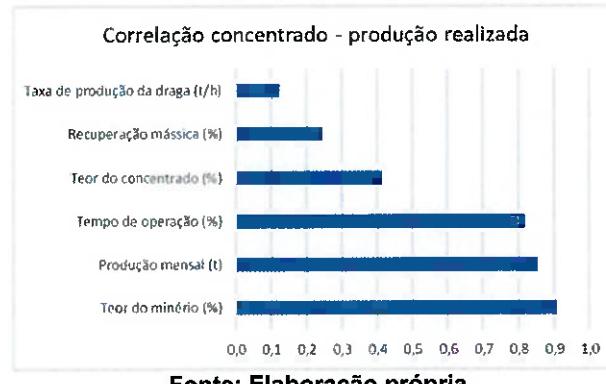
Fonte: Arquivo próprio

Figura 19: Correlação concentrado vs parâmetros operacionais – planejado



Fonte: Elaboração própria

Figura 20: Correlação concentrado vs parâmetros operacionais – produção realizada



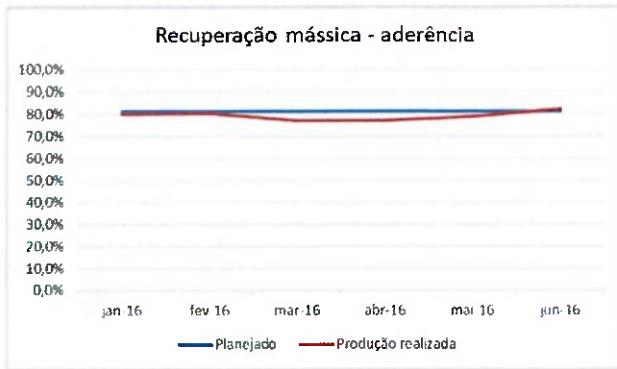
Fonte: Elaboração própria

Ajustando-se os parâmetros negativos, e analisando a correlação do concentrado obtido com os demais parâmetros operacionais, obtém-se as figuras 19 e 20, que mostram as correlações de planejado e produção realizada, respectivamente.

Pode-se notar, em ambos os cenários, a alta correlação da quantidade de concentrado obtido com o teor do minério in situ. No entanto, há uma grande alteração na correlação dos demais parâmetros, destacando-se a correlação nula dos parâmetros recuperação mássica e teor do concentrado, enquanto o parâmetro de produção mensal varia de uma correlação próxima de zero, a próxima de um, mais coerente com a realidade.

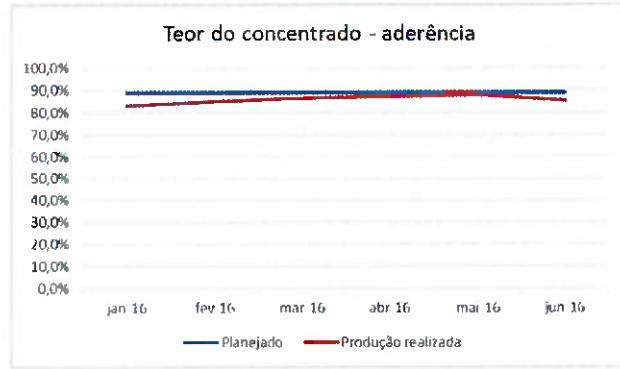
A baixa correlação dos parâmetros de recuperação mássica e teor do concentrado no modelo de planejamento pode ser explicada pelo fato de terem sido adotadas como constantes, não influenciando, portanto, no valor final de concentrado obtido. As figuras 21 e 22 mostram que não há grande variação nos valores de recuperação e teor de concentrado obtidos, mostrando uma boa aderência perante o planejado e justificando a baixa correlação dos parâmetros com a massa final de concentrado obtida pela produção realizada.

Figura 21: Recuperação mássica - planejado vs produção realizada



Fonte: Elaboração própria

Figura 22: Teor do concentrado - planejado vs produção realizada



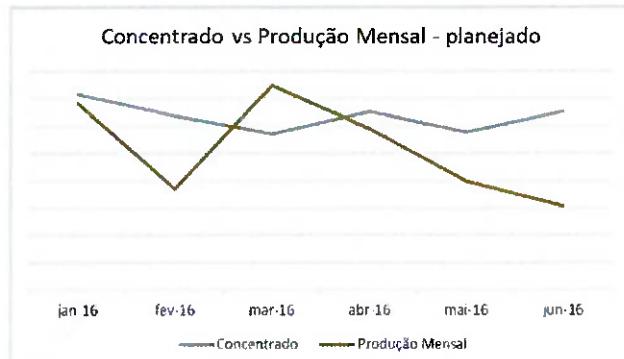
Fonte: Elaboração própria

Observa-se também a falta de aderência do modelo com a realidade ao dar pouca relevância ao tempo de operação e a produção mensal – dois dos fatores de maior correlação – ao passo em que aumenta o peso da taxa de produção da draga, que se mostra menos relevante ao analisar os dados da produção realizada.

As figuras 23 e 24, mostram, sem escala, como se comportam as curvas de produção mensal, teor de minério e massa de concentrado obtidas mensalmente, mostrando a falta de correlação entre a produção mensal e toneladas de concentrado obtidos, e uma grande dependência do modelo de projeção em relação ao teor do minério estimado no modelo geológico.

No entanto, como mostram as figuras 25 e 26, ambas também fora de escala, apesar de o comportamento da curva de teor do minério acompanhar o da curva de concentrado como previsto no modelo, há também um comportamento muito parecido quando se compara o concentrado obtido com a produção mensal, explicando a alta correlação entre os parâmetros.

Figura 23: Concentrado vs produção mensal – comportamento da curva de planejamento



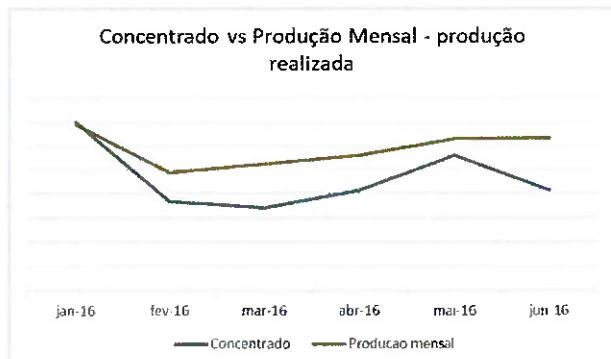
Fonte: Elaboração própria

Figura 24: Concentrado vs teor – comportamento da curva de planejamento



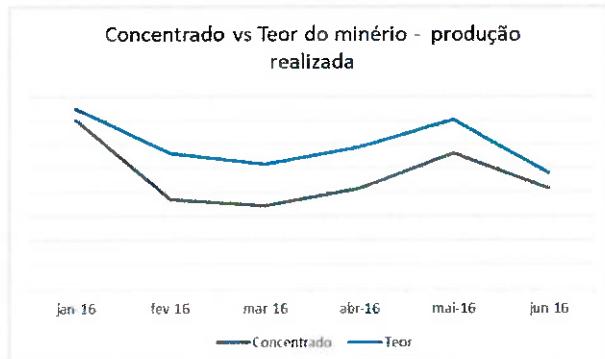
Fonte: Elaboração própria

Figura 25: Concentrado vs produção mensal – comportamento da curva de produção realizada



Fonte: Elaboração própria

Figura 26: Concentrado vs teor – comportamento da curva de produção realizada



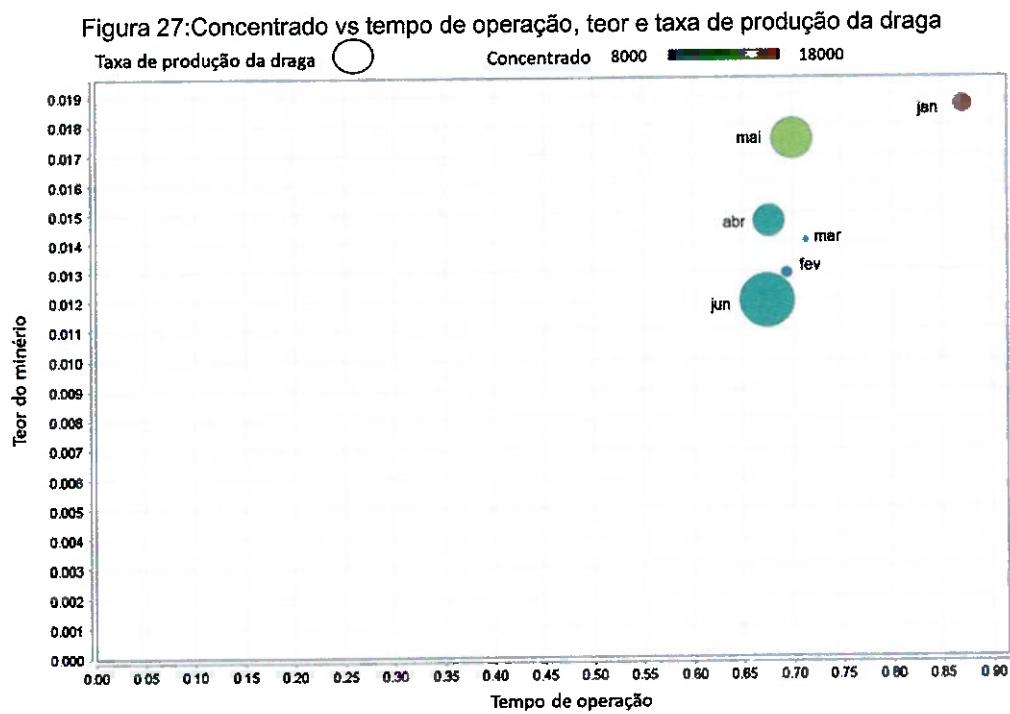
Fonte: Elaboração própria

No entanto, apesar do grande peso da produção mensal, esta variável não pode ser projetada diretamente, sendo produto dos parâmetros tempo de operação e taxa de produção da draga, conforme a Equação 2. Realizando sua substituição pelos parâmetros dos quais depende, e, excluindo das análises a recuperação mássica e teor do concentrado, devido a sua baixa variação e correlação com o resultado final, chegamos ao gráfico da figura 27.

Percebe-se que, de fato, há uma correlação entre a massa de concentrado obtida, tempo de operação e teor do minério, sendo a maior quantidade de concentrado alcançada quanto maiores são os valores de tempo de operação e teor. No entanto,

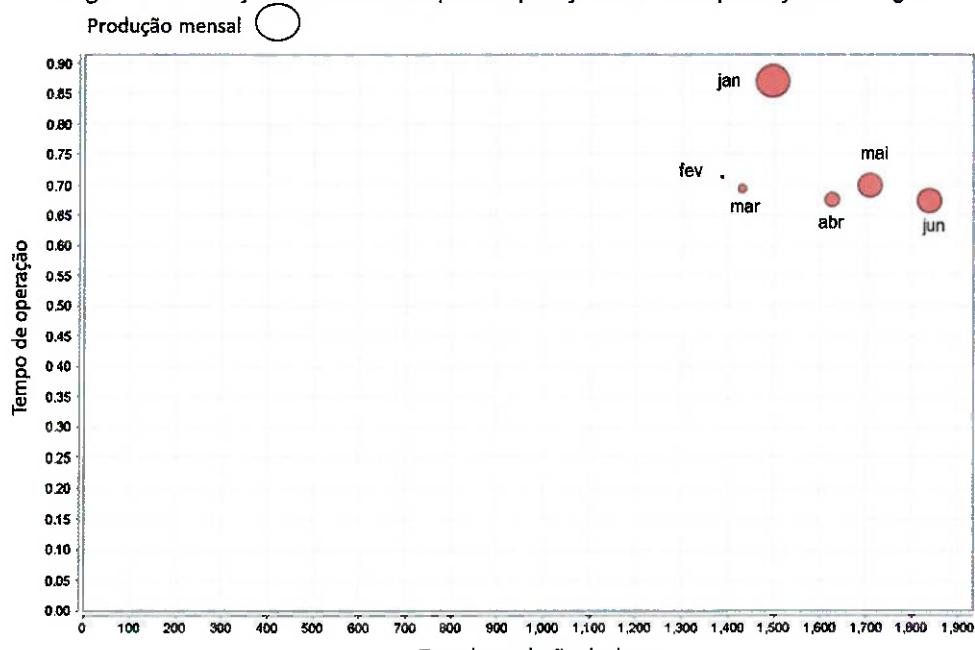
a mesma relação não é observada na taxa de produção da draga, cujo aumento não implica em aumento de concentrado total produzido.

Considerando-se ainda que a produção mensal é de grande importância para a aderência do planejamento devido à sua grande correlação com a massa de concentrado obtida, cabe a análise do gráfico mostrado na figura 28, que mostra em conjunto, tempo de operação, produção mensal e taxa de produção da draga. É observável que o tempo de operação possui, de fato, maior peso sobre o total produzido mensalmente do que a taxa de produção da draga.



Fonte: Elaboração própria

Figura 28:Produção mensal vs tempo de operação e taxa de produção da draga



Fonte: Elaboração própria

2.4.3 Análise de aderência

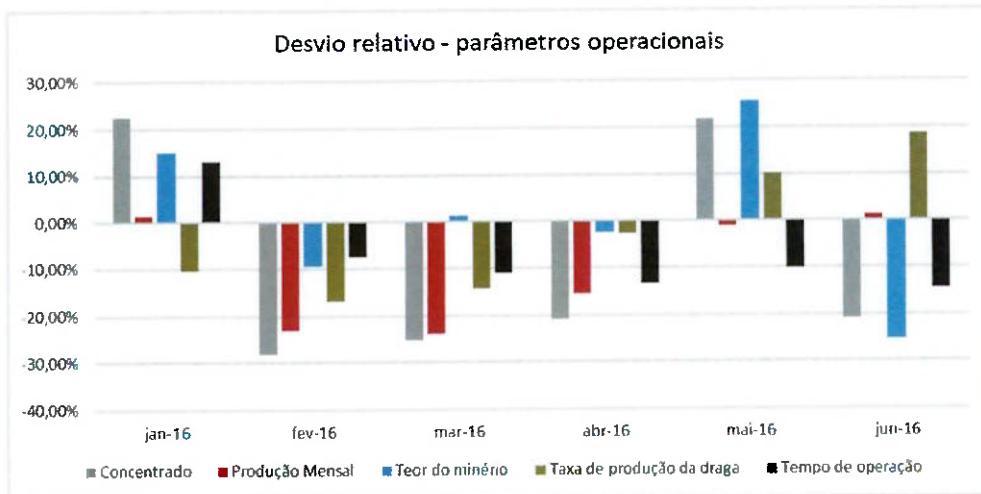
Após a análise de correlação entre os parâmetros, pode-se analisar a aderência dos parâmetros individualmente através da medida do desvio relativo da produção realizada em relação ao planejado, conforme apresentado na figura 29.

Nota-se, conforme observado anteriormente pela análise de correlações, que a variação do teor do minério in situ afeta diretamente a quantidade de concentrado obtida, destacando-se os meses de Janeiro, Maio e Junho quando desvios expressivos do teor - acompanhados de uma produção mensal aderente a planejada - levaram a uma massa final de concentrado com alto desvio em relação a inicialmente planejada.

Nos meses de Fevereiro, Março e Abril, ocorreram baixos desvios relativos do teor do minério e, portanto, poderia se esperar uma maior aderência do concentrado nestes meses. No entanto, este período apresenta uma sequência de meses em que a produção mensal planejada não foi atingida, acarretando nos baixos valores de

concentrado obtidos, destacando-se também que neste mesmo período ambos os fatores que compõe a produção mensal apresentaram valores abaixo do planejado.

Figura 29: Desvio relativo dos parâmetros operacionais



Fonte: Elaboração própria

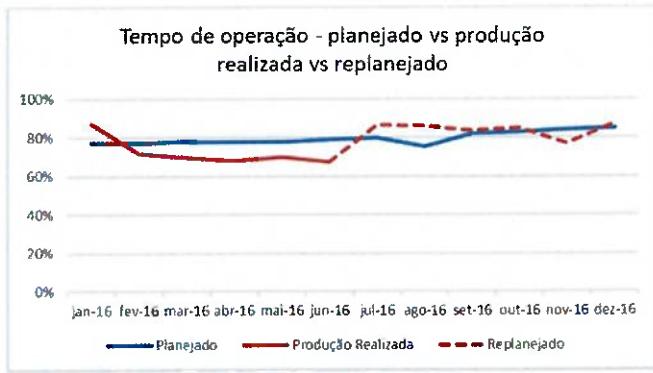
Há de se destacar também o baixo desvio da produção mensal nos meses de Janeiro, Maio e Junho, que poderiam ser considerados pontos positivos em relação a aderência do planejamento se desconsiderados os desvios dos fatores que compõe este parâmetro, conforme apresentado na Equação 2: tempo de operação e taxa de produção da draga.

Isolando-se os três fatores da figura 29, obtém-se desvios de produção mensal próximos a zero, enquanto tempo de operação e taxa de produção da draga apresentam desvios de mesmos magnitude e sentidos opostos, sendo um negativo e outro positivo. A aderência da produção mensal foi obtida, portanto, da compensação do desvio destes dois fatores.

2.4.4 Replanejamento

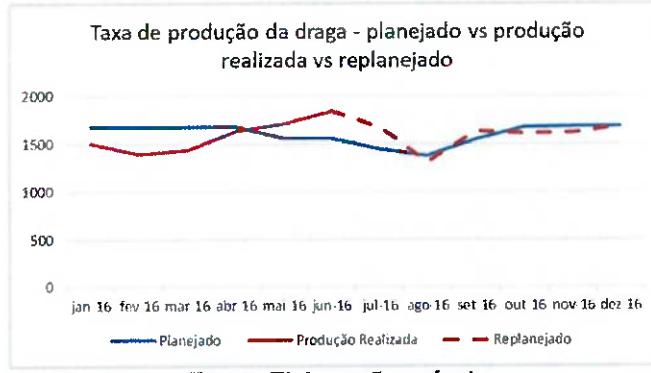
Considerando a baixa aderência observada no primeiro semestre do período analisado, espera-se, naturalmente, uma revisão das premissas adotadas no replanejamento realizado para os meses subsequentes de modo a refletir a realidade da operação. No entanto, não é o que se observa quando os dados são analisados.

Figura 30: Tempo de operação – replanejamento



Fonte: Elaboração própria

Figura 31: Taxa de produção da draga – replanejamento



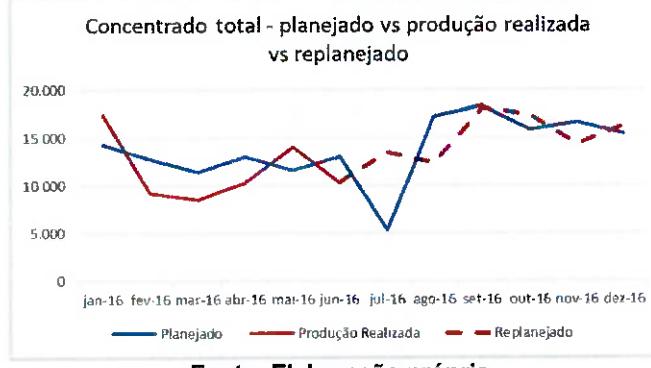
Fonte: Elaboração própria

Figura 32: Teor do minério - replanejamento



Fonte: Elaboração própria

Figura 33: Concentrado - replanejamento



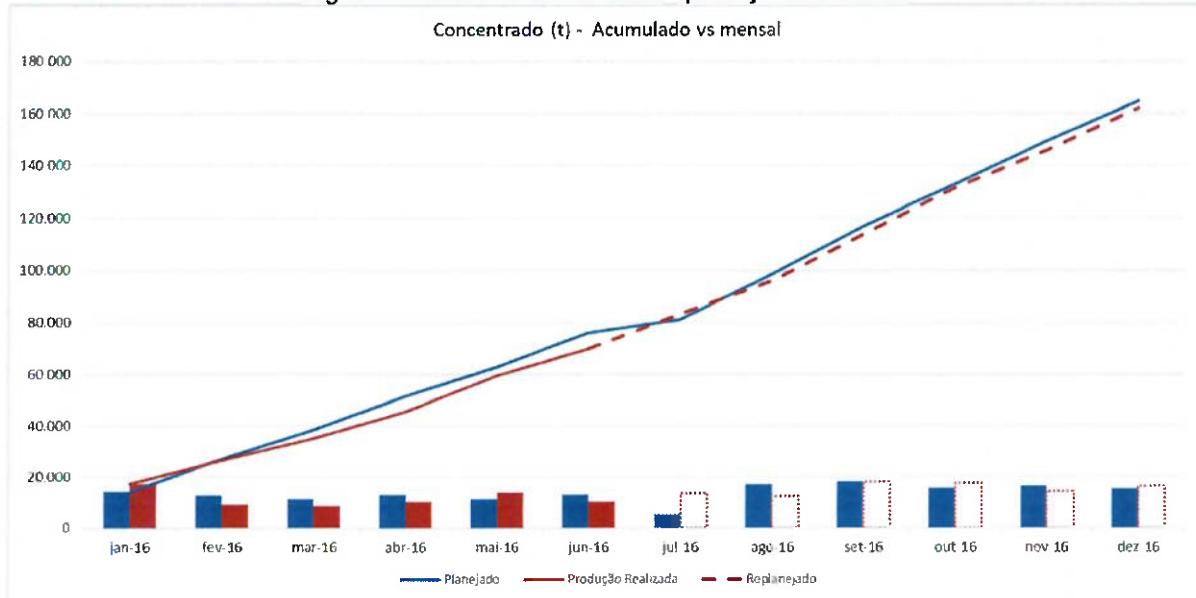
Fonte: Elaboração própria

Analisando as tabelas 5 e 6, nota-se que não houve grandes variações entre o inicialmente planejado para o ano e o replanejamento realizando em Julho, após reconciliação do primeiro semestre. As variações podem ser melhor observadas nas figuras 30, 31, 32 e 33, que mostram os valores replanejados de tempo de operação, taxa de produção da draga, teor do minério e concentrado, respectivamente.

Teor do minério e tempo de operação sofrem reavaliações nos seus valores planejados para Julho e Agosto, enquanto a taxa de produção da draga sofre alteração significativa apenas em Julho. Nos meses posteriores, os valores replanejados são muito próximos aos planejados inicialmente, não levando em consideração os dados e performance obtidos nos meses anteriores.

Como resultado da pouca variação dos parâmetros adotados o replanejamento de concentrado, os meses posteriores a Agosto apresentam valores próximos aos estimados inicialmente (figura 34), levando a uma produção acumulada ao fim do período 2% menor do que a planejada inicialmente.

Figura 34: Massa de concentrado - produção acumulada



Fonte: Elaboração própria

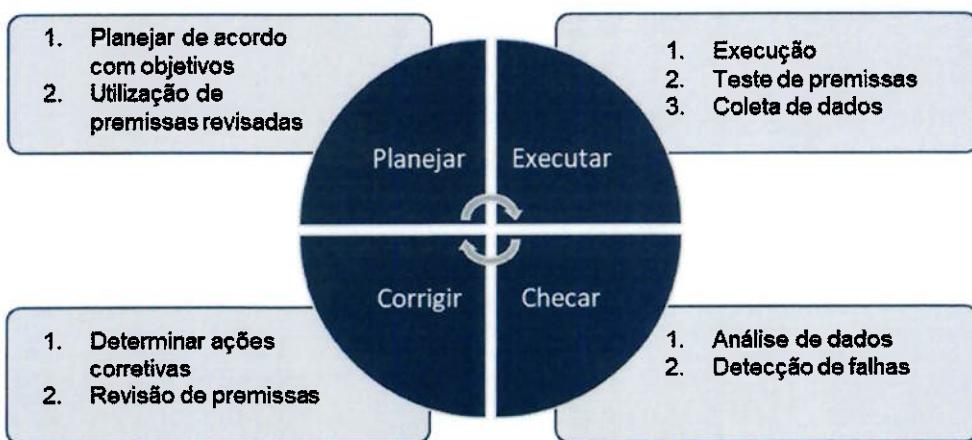
3. CONCLUSÃO

Ao final da análise, pode-se concluir que a metodologia de planejamento aplicada hoje resulta em baixa aderência da produção realizada perante o planejado, utilizando um modelo cuja assertividade depende altamente do teor do minério in situ, fator que carrega uma variabilidade e incerteza natural. Também se conclui que há oportunidade de melhoria no processo de replanejamento, tendo em vista que este gera resultados muito similares ao processo de planejamento original, com baixa revisão de premissas.

Com o objetivo de aumentar a aderência do planejamento, sugere-se a realização de esforços em melhorar a assertividade dos fatores sobre os quais o ciclo de planejamento pode exercer influência e que possuem maior impacto sobre o objetivo do planejamento, neste caso, atuando em maior aderência do tempo de operação.

Sugere-se também a implementação de processos de melhoria contínua, com acompanhamento da execução do planejamento e coleta de dados que permitam identificação das causas raízes da falta de aderência e correção de premissas e métodos de execução, quando aplicável.

Figura 35: Ciclo de planejamento com melhoria contínua



Fonte: Elaboração própria

4. REFERÊNCIAS

Barr, R. & Cook, R.E. 2009. **Mining for operational excellence**. Mining Engineering, Performance Measurement Group, Invensys Systems Inc., Vol 1, 2009, p. 26-31. Disponível em:

<http://iom.invensys.com/EN/pdfLibrary/NewsArticle_Invensys_MiningforOperational_Excellence_11-09.pdf> Acesso em 18 Novembro 2018

Darling, P., **Hydraulic Mining**. In:Darling, P. SME Mining Engineering Handbook 3rd editon. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011. cap.11, p.1047-1055.

Darling, P., **Placer Mining and Dredging**. In:Darling, P. SME Mining Engineering Handbook 3rd editon. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011. cap.11, p.1057-1072.

Fuykschot,J. **Flexible mine planning to meet changes in the business environment**. In: Minex Conference, Moscou, 2009. **Anais eletrônicos...** Moscou:

SRK Consulting, 2009, Disponível em:

<<http://www.srk.ru.com/files/File/SRK%20UK/Publisher%20Articles/Minex%202009%20FUYK.pdf>> Acesso em 18 Novembro 2018

Hou et al, **Geological and Exploration Models of Beach Placer Deposits**, Integrated From Case-Studies of Southern Australia. Ore geology reviews, 2016, p. 438 – 458. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.016>> Acesso em 10 Junho 2018

Roy, P.S, **Heavy mineral beach placers in southeastern Australia – Their nature and genesis**: Economic Geology, v.94, no 4,1999, p.567 – 588. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article-pdf/94/4/567/3492838/567.pdf>> Acesso em: 10 Junho 2018

Sharma, P. D. **Mine Planning and Scheduling – Smart Practices**. Bangalore, 2011. Disponível em <<https://miningandblasting.wordpress.com/2011/08/30/mine-planning-and-scheduling-smart-practices/>> Acesso em: 18 Novembro 2018

Sokovic, M. et al., **Quality Improvement Methodologies – PDCA Cycle, RADAR Matrix, DMAIC and DFSS.** Journal of achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 43, Issue 1, Nov 2010, p. 476 – 483. Disponível em: < http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol43_1/43155.pdf >. Acesso em: 18 Novembro 2018>

Steffen, O.K.H, **Planning of open pit mines on a risk basis.** Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 97, Issue 2, Mar 1997, p. 47 – 56. Disponível em: < https://journals.co.za/content/saimm/97/2/AJA0038223X_2432 >. Acesso em: 18 Novembro 2018>

Tyler, R. et al, **A review of sub-Saharan heavy mineral sand deposits : implications for new projects in southern Africa.** Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 104, Issue 2, Mar 2004, p. 89 – 99. Disponível em: <https://journals.co.za/deliver/fulltext/saimm/104/2/2900.pdf?itemId=/content/saimm/104/2/AJA0038223X_2869&mimeType=pdf&containerItemId=/content/journal/saimm>. Acesso em: 04 Maio 2018

Van Gosen et. al, **Coastal deposits of heavy mineral sands; Global significance and US resources.** Mining Engineering Magazine, Oct 2016, p. 36 – 43. Disponível em:<<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/coastal-heavy-mineral-sands.pdf>>. Acesso em: 10 Junho 2018

Van Gosen et. al, **Deposit Model for Heavy-Mineral Sands in Coastal Environments.** Mineral Deposit Models for Resource Assessment, Chapter L, U.S Geological Survey, 2014. Disponível em:< <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/l/pdf/sir2010-5070l.pdf> >. Acesso em: 10 Junho 2018

Vanek et al., **Continuous improvement management for mining companies.** Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 115, Issue 2, Fev 2015, p. 119 – 124. Disponível em:

<http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532015000200007>.

Acesso em: 18 Novembro 2018>