



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ANTÔNIO DE OLIVEIRA MALTA

ANÁLISE DOS ÍNDICES DE ADERÊNCIA E CUMPRIMENTO DOS PLANOS DE
LAVRA A CURTO PRAZO

OURO PRETO
2023

ANTÔNIO DE OLIVEIRA MALTA

ANÁLISE DOS ÍNDICES DE ADERÊNCIA E CUMPRIMENTO DOS PLANOS DE
LAVRA A CURTO PRAZO NA FERRO+ MINERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M261a Malta, Antônio de Oliveira.

Análise dos índices de aderência e cumprimento dos planos de lavra a curto prazo. [manuscrito] / Antônio de Oliveira Malta. - 2023.
41 f.: il.: color., gráf., tab.. + Quadro.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e recursos minerais - Planejamento. 2. Lavra de minas. 3. Desempenho - Indicadores - Mineração. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.014

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Antônio de Oliveira Malta

Análise dos índices de aderência e cumprimento dos planos de lavra a curto prazo

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 11 de julho de 2023

Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
Eng.º de Minas João Pedro Martins Mau - Ferro+ Mineração
Eng.º de Minas João Paulo Soares Pereira - GE21 Mineração

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/07/2023



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/07/2023, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0562836** e o código CRC **3CF71059**.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana Maria e Rogério, por todo amor e todo apoio necessário;

A todos meus amigos e familiares;

Aos membros da República Dominakana, por toda irmandade;

A minha namorada, Giovana, por todo carinho, força e companheirismo nos momentos difíceis e por acreditar em mim quando eu mesmo não pude;

A Ferro+, por todo conhecimento adquirido no meu estágio;

A todos os professores que contribuíram para a minha formação como profissional e pessoa, em especial ao Dr. Hernani.

RESUMO

A mineração busca o crescimento dos lucros e a redução de custos, sendo caracterizada pela exploração de recursos minerais finitos e não renováveis. A incerteza é uma característica intrínseca devido aos diversos fatores que influenciam na vida útil do empreendimento. Além do volume lavrado, a qualidade do minério e a redução da variabilidade dos teores são objetivos importantes para as empresas de mineração. O planejamento de lavra é dividido em longo, médio e curto prazo, visando otimizar o uso dos recursos disponíveis e maximizar o retorno financeiro. *Softwares* especializados auxiliam nesse processo, permitindo modificações no plano de lavra. O planejamento de lavra de longo prazo envolve estudos estratégicos para determinar as reservas, sequenciamento de lavra e vida útil da mina. Já o planejamento de médio prazo assegura a continuidade da operação e estabilidade das variáveis técnicas e econômicas. O planejamento a curto prazo é voltado para os aspectos operacionais e garante a especificação do material lavrado e o cumprimento da meta de produção. *Softwares* como o *Micromine®* são utilizados para a simulação da produção e análise de índices de desempenho. No estudo de caso realizado em uma mina de minério de ferro, foram analisados os índices de aderência, cumprimento, utilização física e disponibilidade física dos equipamentos, sem encontrar correlações significativas entre eles. Causas de impacto na lavra foram identificadas, como dificuldades operacionais relacionadas à litologia, retirada de material estéril para extrair minério rico, adequação da geometria da lavra, redução do custo de arrendamento e busca por minério adequado. Essas informações são fundamentais para evitar problemas futuros, ajustar os planos de lavra e garantir a efetividade da equipe de planejamento.

Palavras-chave: Mineração, planejamento de lavra, curto prazo, índices de desempenho, estudo de caso, aderência geométrica de lavra.

ABSTRACT

Mining industries seeks profit growth and cost reduction and is characterized by the exploitation of finite and non-renewable mineral resources. Uncertainty is an intrinsic characteristic due to various factors that influence the project's lifespan. In addition to the extracted volume, ore quality and reducing grade variability are important objectives for mining companies. Mine planning is divided into long-term, medium-term, and short-term, aiming to optimize the use of available resources and maximize financial return. Specialized *software* assists in this process, allowing modifications to the mining plan. Long-term mine planning involves strategic studies to determine reserves, mining sequencing, and the mine's lifespan. Medium-term planning ensures operational continuity and stability of technical and economic variables. Short-term planning focuses on operational aspects and ensures material specifications and the achievement of production targets. *Software* such as Micromine® is used for production simulation and analysis of performance indicators. In a case study conducted in an iron ore mine, adherence, fulfillment, physical utilization, and physical availability of equipment were analyzed, but no significant correlations were found among them. Causes of impact on mining operations were identified, such as operational difficulties related to lithology, removal of sterile material to extract rich ore, adjustment of pit geometry, reduction of leasing costs, and the search for suitable ore. This information is essential to prevent future problems, adjust mining plans, and ensure the effectiveness of the planning team.

Keywords: Mining, mine planning, short-term, operational aspects, performance index analysis, case study, adherence indicator

ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Modelo de blocos.....	9
Figura 2 — Blocos com as litologias provenientes do avanço.....	15
Figura 3 — Topografia realizada e avanço do plano de lavra mensal.....	20
Figura 4 — Seção de corte das topografias planejada, realizada e original.....	20
Figura 5 — Seção com o modelo de blocos cortado com o topografia planejada....	22
Gráfico 1 — Índices de aderência e comprimento.....	24
Quadro 1 — KPIs de utilização e disponibilidade física dos caminhões e escavadeiras	24
Tabela 1 — Correlação entre IA, IC e DF, UF dos caminhões e escavadeiras.....	26
Gráfico 2 — Gráfico de Pareto dos dados qualitativos.....	27
Gráfico 3 — Gráfico de normalidade da UF de caminhões	33
Figura 6 — Gráfico de normalidade da DF de escavadeira	33
Figura 7 — Gráfico de normalidade da IA	34
Figura 8 — Gráfico de normalidade da DF de caminhões	34
Figura 9 — Gráfico de normalidade da UF das escavadeiras.....	35
Figura 10 — Gráfico de normalidade do IC.....	35
Gráfico 4 — Gráfico de resíduos do IA.....	36
Figura 11 — Gráfico de resíduos do IC.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DF - Disponibilidade física
IA - Índice de aderência
IC - Índice de cumprimento
IE - Índice de efetividade
IK - Índice de Custo Operacional
KPI - Key Performance Indicators
MDS - Modelo digital de superfície
PI - Indicadores de desempenho
PNR - Planejado não realizado
PR - Planejado realizado
REM - Relação estéril/minério
RNP - Realizado não planejado
ROM - Run of mine
UF - Utilização física
VPL - Valor presente líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Objetivos	8
1.1.1	Objetivo Geral.....	8
1.1.2	Justificativa	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Modelo de Blocos	9
2.2	Topografia	11
2.3	Planejamento de Lavra	11
2.4	Softwares	12
2.5	Sequenciamento de Lavra	13
2.6	Reconciliação	14
2.7	KPI na Mineração	16
3	METODOLOGIA	18
3.1	Procedimento Para Cálculo de Volumes Topográficos	18
3.1.1	Movimentações nas Lavras Planejadas e Realizadas.....	18
3.2	Procedimento Para Obter Aderência	21
3.2.1	Aderência Geométrica.....	21
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	24
4.1	Classificação dos Índices de Desempenho	24
5	CONCLUSÃO	28
6	REFERÊNCIAS	30
7	ANEXO I - TESTE DE NORMALIDADE PARA OS KPIS	33

1 INTRODUÇÃO

A mineração se caracteriza pela exploração de recursos minerais, finitos e não renováveis, e, como toda indústria, tem como objetivos principais o crescimento dos lucros e a redução de custos. Outras características da mineração são os altos valores de investimento e manutenção de um projeto e as incertezas intrínsecas a si, uma vez que existem vários fatores que podem influenciar na vida útil do empreendimento, como a própria natureza finita dos corpos de minério. (CAMPOS, 2017).

Além disso, após o último ciclo de valorização da commodity de minério de ferro, as empresas de mineração começaram a objetivar não somente o volume de material lavrado e vendido, mas também o cumprimento das metas de qualidade do minério e redução da variabilidade dos teores. Dessa forma, somente o volume lavrado por si só não é mais garantia de lucro e geração de caixa para as empresas. (JUNIOR, ADEMAR, et al., 2019).

Portanto, seguindo essa tendência, cada vez mais o planejamento de lavra, programações de atividades a serem executadas conforme a produção a ser implementada, torna-se fundamental para o sucesso do negócio. E a partir disso, problemas e outras ocorrências podem ser antecipadas, e posteriormente, trabalhadas, mitigadas ou mesmo evitadas (BORGES, 2013). Ademais, o planejamento de lavra, tem por objetivo o aproveitamento máximo dos recursos disponíveis, otimizando financeira e tecnicamente o uso do recurso mineral e o lucro ótimo, por intermédio dos planos de lavra (CAMPOS, 2017).

Por ser uma simulação da produção de uma mina, é possível: fazer uma estabilização de variáveis, tirando o maior proveito dos equipamentos de carga e transporte; criar cronogramas de disposição de estéril; minimizar impactos ambientais quando houver rejeito seco; controlar a qualidade do minério - sendo este um dos fatores mais importantes (CHIMUCO, 2010).

Para Câmara et al. (2014), o planejamento de lavra tem como função mais importante, a decisão de onde deve ser lavrado e onde deve ser disposto o estéril. Já Rodovalho (2013) diz que é função do planejamento, a definição do ritmo de produção considerando todas as variáveis que podem existir, tais como a utilização física e a disponibilidade física de equipamentos, a distância média de transporte, tempos de carregamento, basculamento, tempo de manobra, padrões de acesso etc.

Para a melhor organização de como se dará essa simulação, é necessário que o planejamento de lavra se divida em espaços de tempo. Com isso, é comum a divisão em três períodos: longo, médio e curto prazo (CURI, 2014). O planejamento de lavra de longo prazo é responsável pelos estudos de cava final, planejamento de barragens e *sumps* permanentes, disposição final de estéril, procura por novos produtos e projetos de acessos permanentes.

O planejamento de longo prazo tem como objetivo determinar as reservas, elaborar o sequenciamento de lavra até a cava final, maximizando o retorno financeiro e a vida útil da mina (SOUZA, 2013). Segundo Silva (2008), o plano de lavra de longo prazo é um planejamento estratégico que leva em conta diversos fatores, ambientais, de segurança, operacionais, entre outras. Além disso, é uma atividade que deve ser feita periodicamente, adaptando-o para compreender novas informações que podem surgir posteriormente, como fatores econômicos, novos conhecimentos geológicos e novas tecnologias.

O planejamento de médio prazo fica responsável por assegurar que o processo de lavra seja continuado objetivando a estabilidade de determinadas variáveis técnicas e econômicas envolvidas nas rotinas da operação de mina (IBRAM, 1996). Para isso se concretizar, o planejamento de médio prazo divide os planos de longo prazo em planos anuais, em geral, para os próximos cinco anos (SOUZA, 2013).

Já o planejamento de curto prazo integra os aspectos operacionais, começando dos planos de médio prazo, de forma anual, semestral, trimestral, mensal, semanal e em alguns casos diários (SOUZA, 2013; RODOVALHO, 2013). Sendo assim, é aplicado para intervalos de tempo menores, objetivando garantir as especificações do material a ser lavrado, a liberação de minério e assegurar a meta de produção (XIMENES, 2018). Outras atribuições do curto prazo são programação das pilhas de ROM, programação da disposição de estéril; controle de qualidade de produtos e de pilhas de ROM, atualização topográfica da mina, estudos de acessos temporários ou secundários, amostragem de frente de lavra, quantificação de estoques no final do mês, entre outras atividades (CHIMUCO, 2010).

Para ajudar nas atividades de planejamento de lavra, existem muitos *softwares* utilizados a nível operacional, permitindo que o plano de lavra seja modificado com o intuito de ser cada vez mais assertivo (SILVA, 2014). Para o trabalho em questão será abordado e utilizado o *Micromine®*, usado para estimar os valores de massa das

movimentações ocorridas na mina e, assim, analisar os índices de aderência e cumprimento dos planos de lavra de curto prazo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Análise dos controles dos índices de aderência e cumprimento dos planos de lavra de curto prazo.

1.1.2 Justificativa

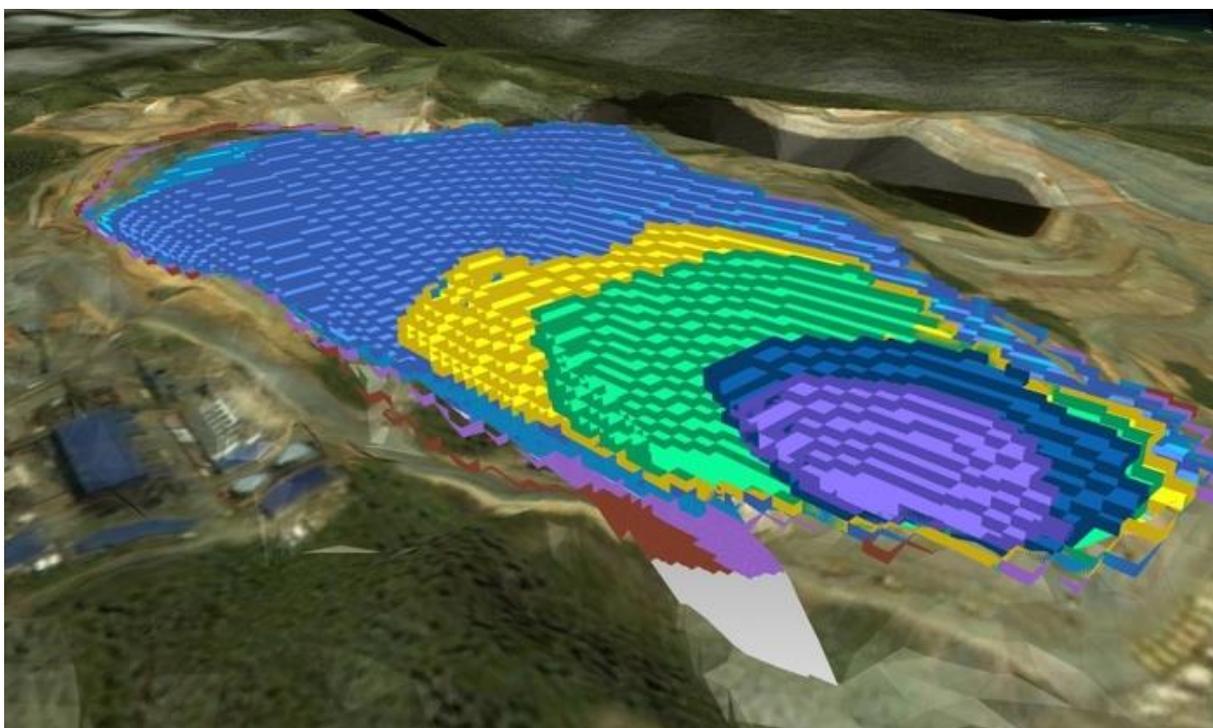
Os índices de aderência e cumprimento de lavra medem a eficiência do sistema produtivo na mineração, sendo importantes ferramentas para verificar setores da produção que estão com performance abaixo do planejado. Uma aderência geométrica baixa pode interferir no orçamento do custo operacional de lavra. Este tema foi escolhido considerando que muitos planos de lavra em algumas minas não são aderentes ou cumpridos como planejados, fazendo com que metas dos índices de desempenho do planejamento de lavra não sejam cumpridos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelo de Blocos

De acordo com Booch et al. (1999), um modelo de blocos pode ser caracterizado como uma simplificação da realidade encontrada abaixo da topografia. De forma mais detalhada, Rumbaugh (1991) diz que é a representação do contexto de um problema a ser resolvido, construído com foco nas variáveis interessantes e retirando as irrelevantes para a resolução do mesmo.

Figura 1 — Modelo de blocos



Fonte: Instituto Minere, 2018.

Segundo Perroni (2002), a definição dos limites do corpo mineral e a avaliação da quantidade e a qualidade dos parâmetros de interesse são grandes problemas enfrentados por geólogos e engenheiros de minas. O modelo de blocos é um dos métodos utilizados para a representação dos limites de um corpo mineral, dividindo-o em um conjunto de pequenos blocos.

Dentro do modelo de blocos existem os seguintes parâmetros técnicos de um depósito: teores estimados, coordenadas, densidades, umidade, recuperação, litologia e informações sobre interpretações geológicas dos testemunhos de sondagem. Adicionando essas informações a parâmetros econômicos, tais como, preço de venda do produto e custos de lavra e beneficiamento, torna-se possível encontrar o valor de cada bloco através da utilização de uma função benefício Rumbaugh (1991).

Deve-se, ao elaborar uma função benefício, tentar retratar todas as fases de desenvolvimento do produto. Na qual devem ser inseridos custos fixos e variáveis, além de receitas obtidas pela comercialização do produto. Por isso, o grau de sofisticação da função benefício depende de condicionantes inerentes ao projeto. Uma simplificação da função benefício proposta por Halatchev (1999) é apresentada nas equações 1 e 2.

$$F_b = [\text{benefícios} - \text{custos}] / t \dots\dots\dots(1)$$

$$F_b = [(V.R) - (C_i) - (C_r) - (C_p) - (C_g)] / t \dots\dots\dots(2)$$

onde:

F_b: benefício do bloco (U\$/t);

V: valor do produto final (U\$);

R: recuperação do bloco;

C_i: custo de lavra (U\$);

C_r: custo de recuperação ambiental (U\$);

C_p: custo de processo do bloco (U\$);

C_g: custos gerais (administração, vendas etc.) (U\$);

t: tonelagem lavrada (t).

Com isso, um valor líquido (positivo ou negativo), é atribuído a cada bloco pela função, considerando a receita e subtraindo os custos. Assim, o modelo carimbado economicamente é o que sustenta os métodos computacionais e algoritmos de otimização de cava.

É importante ressaltar que o modelo deve cobrir todas as regiões de uma mina, não somente o minério, mas também as regiões de estéril. Isso se dá porque a cava matemática estimada também se desenvolverá nas porções de estéril para que a cava possa se aprofundar para as zonas de maior valor econômico.

2.2 Topografia

A topografia tem como objetivo representar, em uma superfície denominada plano topográfico, diversas características do terreno, como relevo, contornos, superfícies, vegetações, entre outras. Através do uso de instrumentos topográficos, é possível medir distâncias horizontais e verticais, bem como ângulos, a fim de se obter uma representação precisa do terreno.

Na mineração, a topografia exerce um papel fundamental para garantir a segurança dos processos de uma mina. Ela é utilizada para o acompanhamento da estabilidade dos taludes, drenagens de mina e construção de rampas, permitindo que as dimensões definidas previamente nos projetos sejam adequadamente atendidas. Além disso, a topografia também auxilia na demarcação de limites de lavra, na identificação de depósitos de minério e estéril, bem como no acompanhamento e atualização das bancadas.

Por meio de trabalhos topográficos integrados com levantamentos geológicos, que controlam os teores e definem o corpo de minério, é possível planejar o desenvolvimento do *pit* de mina, buscando o traçado que permita uma otimização do transporte e aproveitamento do minério. A topografia também é utilizada para planejar questões relacionadas à locação de equipamentos, como correias transportadoras, britagem primária e secundária, bem como questões de segurança e drenagem, entre outras. (NETO, 2013)

2.3 Planejamento de Lavra

De acordo com Curi (2014), conhecer a jazida é a fundação de todo empreendimento mineiro, pois assim se permite realizar os estudos que determinarão a viabilidade técnico e econômica do projeto. Em seguida, é necessário estabelecer a maneira mais econômica e rentável de como se deve programar a lavra, estabelecer as produções, estimar os custos envolvidos e determinar a viabilidade do projeto.

A partir do planejamento de lavra, é possível antecipar problemas, conhecer e controlar as variáveis e fazer o melhor aproveitamento dos equipamentos, além de minimizar o impacto ambiental. A fase de planejamento também oferece a

oportunidade de minimizar custos e maximizar a eficiência operacional e lucratividade do empreendimento, (CHIMUCO, 2010).

Conforme Curi (2014), essa fase requer atenção, pois um planejamento inadequado pode causar desastres técnicos, financeiros, sociais ou ambientais levando à inviabilidade de projetos ou ao abandono de reservas minerais. O maior desafio é projetar a lavra e otimizar o sequenciamento de extração, reduzindo a remoção de estéril, garantindo a segurança de equipamentos e pessoas e maximizar o valor presente líquido do minério. (SILVA, 2008).

O plano de lavra é uma programação das atividades da mina nas frentes de lavra, que informa sobre a produção a ser implementada em cada uma dessas frentes e contribui para o planejamento e controle da produção, além de monitorar questões de segurança e da vida útil da mina (BORGES, 2013).

Cada frente de lavra possui características distintas em relação à qualidade do material, contribuindo para a quantidade de minério a ser lavrado e para a adequação às especificações da planta de beneficiamento (COSTA et al., 2010). O planejamento permite a identificação antecipada de fatores que influenciam a qualidade do minério, determinação do melhor aproveitamento dos equipamentos de desmonte, carregamento e transporte, e a programação da disposição do estéril da mina e rejeito de beneficiamento, visando a minimização do impacto ambiental e a maximização do aproveitamento (CHIMUCO, 2010).

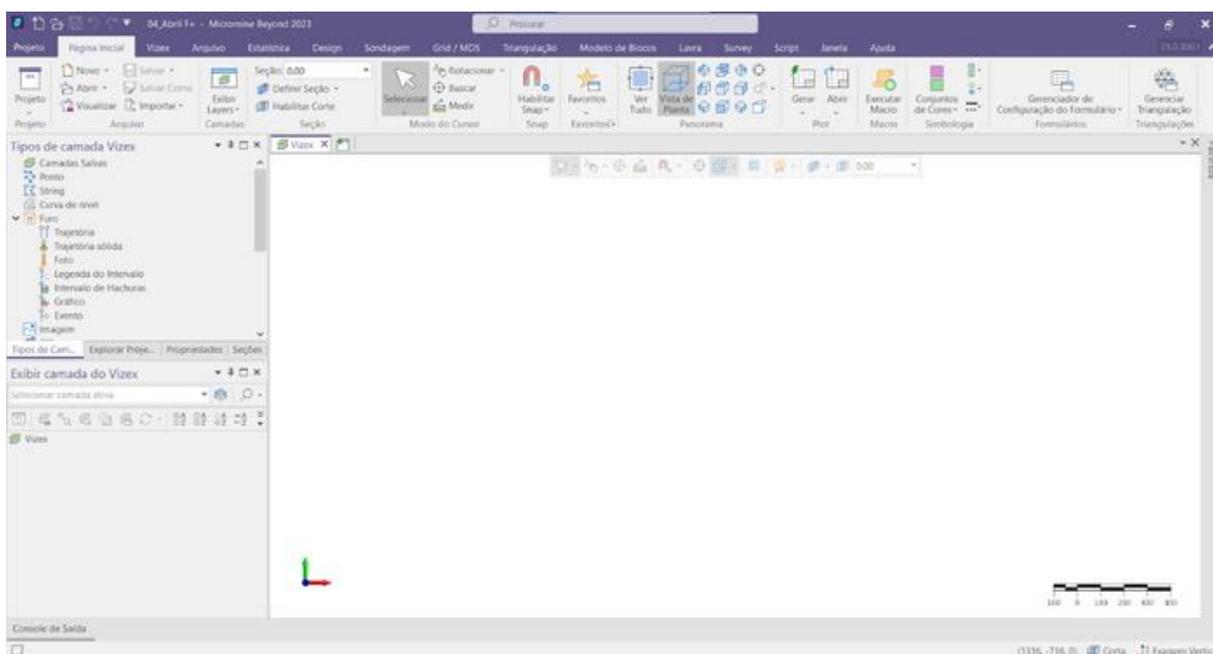
2.4 Softwares

Os *softwares* são ferramentas muito importantes que auxiliam no planejamento da lavra da mina, visto que permitem planejar e sequenciar a lavra com maior agilidade e precisão, contribuindo para a segurança das operações. A necessidade cada vez maior de recursos para solucionar problemas de forma ágil e a crescente dificuldade de se conseguirem minérios com teores elevados têm feito com que as empresas desenvolvam cada vez mais tecnologias capazes de otimizar o planejamento de uma mina, acelerando assim o processo de tomada de decisão.

As principais funções dos *softwares* no auxílio das atividades de planejamento são: a visualização tridimensional da mina, a construção do modelo de blocos, o gerenciamento de bancos de dados geológicos e históricos de produção, a estimativa

da reserva mineral, o projeto de cava final ótima e o sequenciamento da produção. Segundo Silva (2014), existem muitas ferramentas para a solução de problemas da mina, sendo que a maioria delas está na área de planejamento e são importantes para definir a sequência da lavra de forma mais precisa.

Figura 2 - Tela inicial do Micromine®



Fonte: Ferro+ Mineração, 2023.

2.5 Sequenciamento de Lavra

Halatchev (2002) discute que, do ponto de vista tecnológico, o sequenciamento de lavra está relacionado a dois principais fatores: espaço e tempo. Após a definição da cava final, o próximo passo é determinar uma sequência adequada de extração dos blocos, ou seja, como ocorrerá o desenvolvimento da mina. Durante o processo de sequenciamento, é possível determinar a vida útil da mina com base na produção necessária. A cava ótima fornece a máxima lucratividade, mas não é lavrada de uma só vez. Dessa forma, várias técnicas de pesquisa operacional são aplicadas para encontrar rapidamente a sequência ótima de extração para as premissas requeridas.

O sequenciamento de lavra é dividido em vários avanços operacionais, também conhecidos como *pushbacks*, que, posteriormente, são divididos ano a ano. Durante a fase de sequenciamento, é planejada a estratégia de extração, incluindo a produção

de minério, os teores e a relação estéril/minério (REM), que podem ser crescentes, decrescentes ou constantes durante os anos de operação.

Durante o sequenciamento de lavra, existem restrições básicas que devem ser respeitadas, como a flutuação do volume de minério/estéril, restrições de pilhas para estocagem, capacidade da mina e usina, restrições geotécnicas e restrições logísticas (CHIMUCO, 2010). Das técnicas existentes para o desenvolvimento mineiro, a mais utilizada nas grandes minerações é a produção por agrupamentos de cavas correspondentes, com variações de teores e minerais, conservando a ideia de atingir a qualidade especificada pelo planejamento (SILVA, 2014).

Dessa forma, um sequenciamento eficaz é de grande importância para atingir metas e garantir o uso eficiente dos recursos no atual ambiente competitivo (PINEDO, 2008). No entanto, a dificuldade de sequenciamento em minas a céu aberto consiste em encontrar a sequência ideal em que os blocos devem ser removidos, de forma a maximizar o lucro total descontado, geralmente expresso pelo Valor Presente Líquido (VPL), sujeito a uma variedade de restrições técnicas e econômicas (ANDRADE, 2014).

2.6 Reconciliação

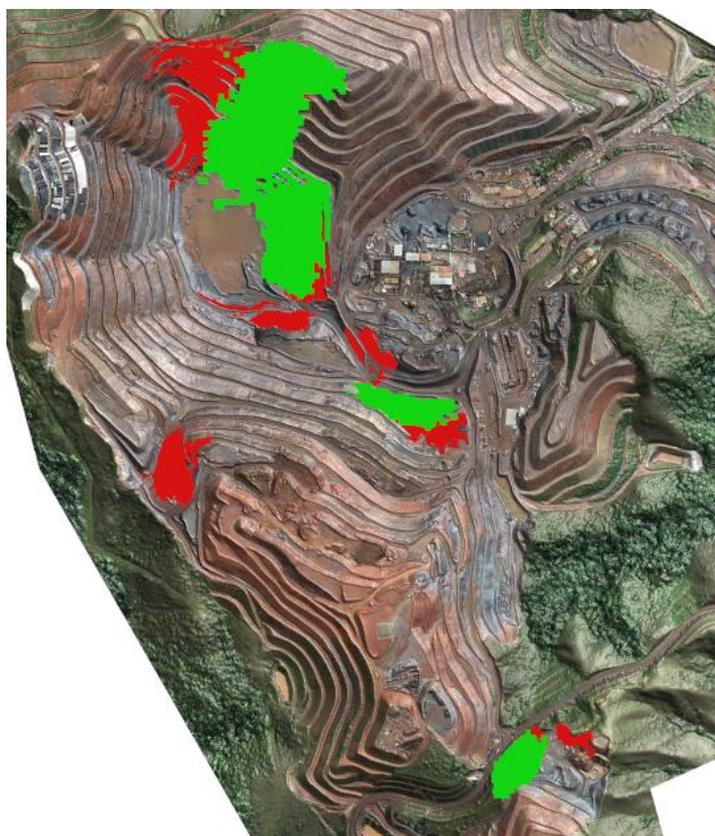
Atualmente, a grande maioria das empresas de mineração realiza a atividade de reconciliação, que consiste em comparar uma estimativa com uma medição. Essa atividade envolve a comparação dos teores de minério estimados pelos modelos da jazida (modelo de blocos) com os teores alimentados na usina de beneficiamento. De acordo com Chierigati et al. (2008), grandes discrepâncias entre esses valores são comuns em diversas minas de ouro e de metais básicos no mundo, o que torna necessária a adoção de estratégias para minimizar esse problema.

A reconciliação permite corrigir imprecisões em estimativas futuras e otimizar métodos e equipamentos de amostragem. Estudos mostram que mesmo pequenas melhorias na amostragem podem resultar em melhorias significativas nos resultados de uma operação. Portanto, avaliar os teores lavrados e/ou a realização e cumprimento dos planos de lavra são ações reativas na busca da melhoria contínua (CHIEREGATI et al., 2008).

De acordo com Rodrigues (2013), é necessário tomar ações corretivas quando a análise do KPI indica uma divergência acima do máximo permitido. Na reconciliação da mineração, se houver uma divergência superior a 10% na qualidade química entre o modelo de blocos e o resultado da usina, serão solicitadas sondagens intermediárias para fornecer mais conhecimento geológico e químico aos modelos de blocos a fim de eliminar essas divergências.

Durante a reconciliação, são considerados os volumes e as áreas lavradas, bem como o viés entre a qualidade planejada e a qualidade obtida no cliente (planta de beneficiamento). Os principais indicadores de eficiência do planejamento de lavra gerados pela reconciliação são a aderência ao plano de lavra e o viés da qualidade. A aderência ao plano de lavra é dada pela interseção entre o que foi planejado e o que foi efetivamente lavrado, incluindo aquilo que foi planejado e não foi lavrado, e aquilo que foi lavrado sem ter sido planejado. O viés da qualidade é dado pela diferença percentual entre a qualidade esperada pelo plano e a qualidade obtida no produto após o fim da execução do plano de lavra mensal. A figura 3 ilustra a verificação da aderência ao plano de lavra mensal (CHIEREGATI et al., 2008).

Figura 3 — Blocos com as litologias provenientes do avanço



Fonte: O autor (2023).

2.7 KPI na Mineração

Nader, Tomi e Passos (2012) falam sobre a relação entre o indicador-chave de desempenho (KPI) e os benefícios da integração dos processos produtivos na tomada de decisões de investimento. Ao medir o impacto por meio do KPI, pode-se obter benefícios da integração da cadeia de valor mineral. A cadeia de valor é um sistema em que atividades interdependentes afetam umas às outras e devem estar conectadas por ligações operacionais que afetam os custos e a eficiência de outras atividades (SACH, 2009).

Os mesmos autores ainda apresentam os resultados de pesquisa de campo de empresas de mineração brasileiras na forma de indicadores de desempenho (PI) em atividades como pesquisa mineral, geologia de mina, planejamento de lavra, operação de mina, beneficiamento de minério e desempenho econômico. A partir desses PI, são escolhidos os principais indicadores que se tornarão KPIs. Os PI estudados para o planejamento de lavra foram: inclinação máxima de rampas, percentual de atendimento do plano estratégico, reconciliação de lavra, custo do minério antes da britagem (ROM), aderência ao orçamento, relação estéril/minério (REM), aderência da lavra ao planejamento, fator de recuperação de lavra e fator de diluição total.

Grandes empresas de mineração como a Barrick, BHP Billiton e Rio Tinto, que têm negócios em áreas como ouro, ferro, alumínio, potássio, titânio, manganês, níquel, cobre, petróleo e carvão, possuem indicadores de desempenho que avaliam e controlam a eficiência de suas operações. A reconciliação de lavra é um KPI muito utilizado por essas mineradoras e consiste em comparar o material lavrado para averiguar se a massa executada de minério e estéril das minas está de acordo com a massa lavrada de minério e estéril apontada pelo despacho eletrônico. Por meio desse KPI, também é verificado se a massa lavrada de minério e as suas concentrações químicas estão de acordo com os resultados das concentrações químicas fornecidas pelas plantas de concentração. Em geral, a divergência máxima permitida nos valores medidos é de 10%. A frequência com que esses indicadores são analisados é, em geral, trimestral, semestral e anual (RODRIGUES, 2013).

De acordo com Rodrigues (2013), uma métrica de desempenho usada por diversas empresas é a reconciliação entre os recursos e as reservas de uma mineradora, comparando os modelos de blocos de curto prazo com os de longo prazo.

No entanto, essa métrica é mais difícil de ser analisada em minas que possuem estoques, como minerações de ferro e ouro. Segundo Câmara et al. (2014), nem sempre o planejado para a lavra é cumprido, e às vezes ocorrem discrepâncias entre o planejamento de lavra e a produção. Uma maneira de avaliar os resultados de produção em relação aos resultados previstos pelo planejamento de lavra é comparar as estimativas de modelagem com a medição do que foi realmente extraído e beneficiado na usina. Essa atividade é conhecida como reconciliação de lavra e é um KPI a ser monitorado na mineração, pois indica problemas entre a estimativa original e fornece uma análise das operações. Geralmente, a frequência de monitoramento dessa métrica é mensal, e as medições são feitas no local onde ocorreu a lavra, independentemente de estar no plano de lavra ou não.

Outros indicadores que demonstram a real reconciliação de lavra e se o planejamento está sendo seguido são o índice de aderência, o índice de cumprimento e a efetividade de lavra. O índice de aderência volumétrico ou de massa (IA) é obtido dividindo a massa total planejada e realizada (PR) pela soma das massas planejada e realizada (PR) e a que foi realizada sem planejamento prévio (RNP). Esse índice mede o desvio da operação de lavra. O índice de cumprimento volumétrico ou de massa (IC) é obtido dividindo a massa planejada e realizada (PR) pela soma das massas planejada e realizada (PR) e a que foi planejada, mas não realizada (PNR). Esse índice mede o quanto foi executado em relação ao planejado. O índice de efetividade (IE) mede a efetividade da lavra e é calculado pela média aritmética do IA e do IC (CÂMARA et al., 2014).

Algumas empresas de mineração usam indicadores de desempenho para manutenção de equipamentos. Indicadores como disponibilidade física e utilização de equipamentos são KPIs utilizados para comparar os valores previstos pela manutenção e os usados pelo planejamento de mineração na otimização de frotas em um plano de mineração. A comparação é feita entre os valores executados e os fornecidos pelo despacho eletrônico da mina (RODRIGUES, 2013).

3 METODOLOGIA

Com base na revisão bibliográfica apresentada, foram selecionados indicadores de desempenho para um estudo de caso específico, com o objetivo de compreender sua efetividade no planejamento de lavra. Para isso, foram realizadas análises geométricas de aderência e cumprimento de lavra de planos mensais de uma mina de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero. Além disso, foram analisados os índices de utilidade física e disponibilidade física no mesmo período. Na mina estudada, os índices de desempenho utilizados pelo planejamento de lavra são o Índice de Aderência (IA) e o Índice de Cumprimento (IC), enquanto o Índice de Custo Operacional (IK) não é utilizado.

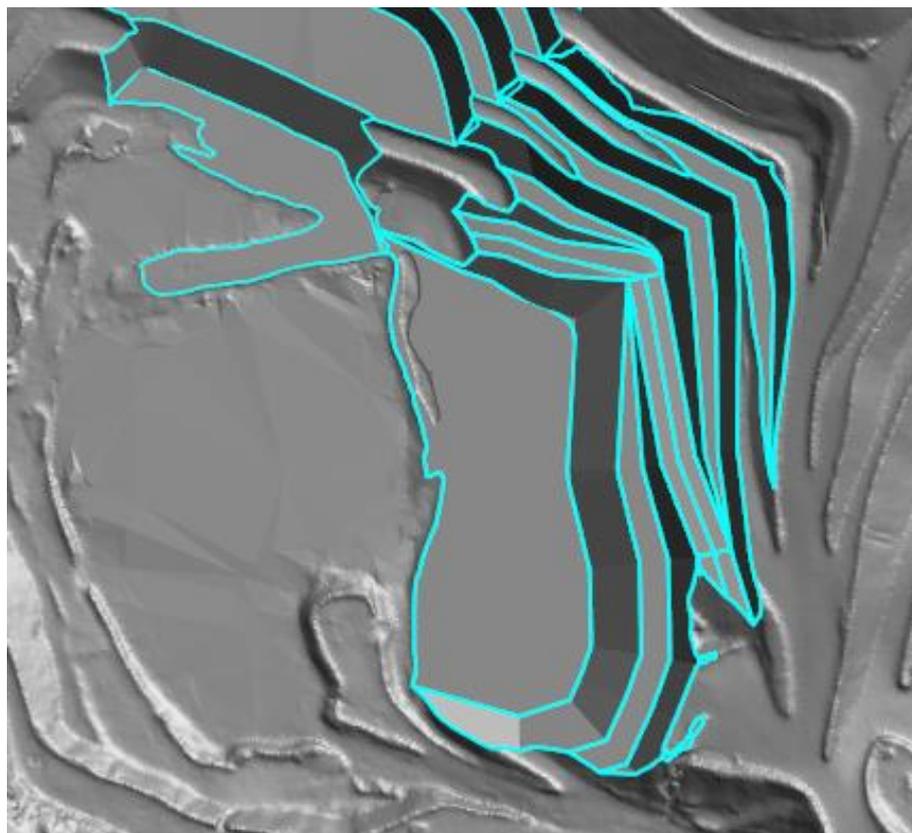
3.1 Procedimento Para Cálculo de Volumes Topográficos

3.1.1 Movimentações nas Lavras Planejadas e Realizadas

Define-se como Planejado Realizado (PR) a movimentação de minério e estéril que foi realizada dentro dos limites do plano de lavra. Já a movimentação de minério e estéril que estava planejada, mas não foi realizada no tempo entre o levantamento das topografias, é chamada de Planejado Não Realizado (PNR). Por fim, a movimentação realizada fora do plano de lavra é denominada Realizado Não Planejado (RNP).

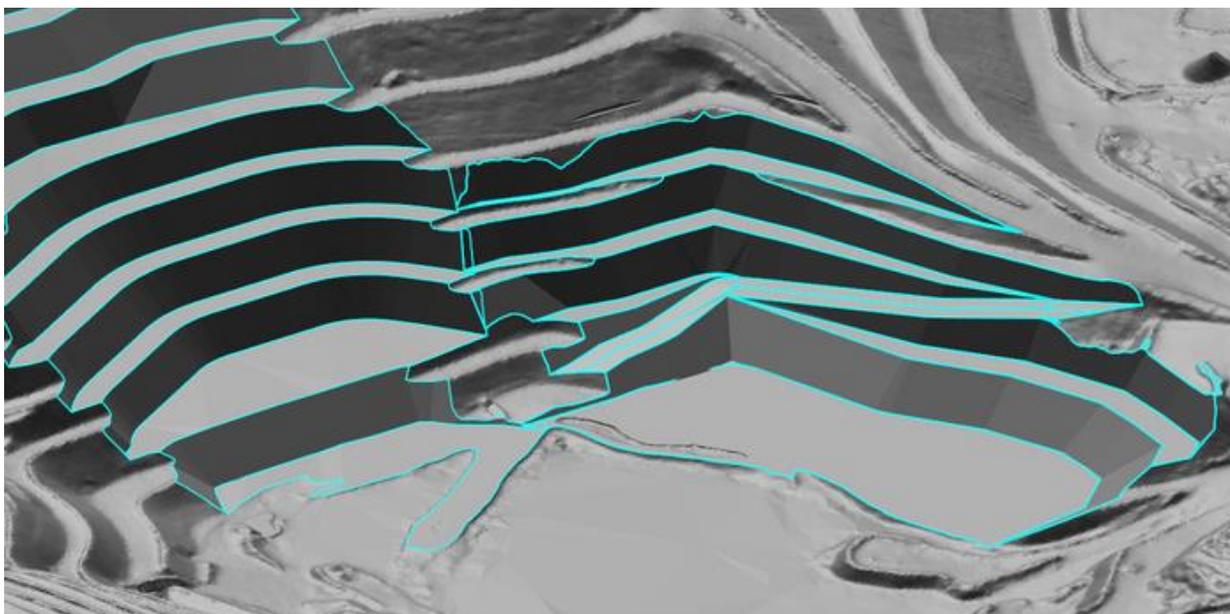
Para calcular as três massas relativas a essas movimentações, é necessário ter três topografias: a topografia original (ou primitiva) usada como base para fazer o plano mensal, a topografia realizada (ou levantada) ao fim do período pós execução do plano de lavra mensal e a topografia planejada, que nada mais é que a topografia do mês anterior (primitiva) atualizada com a cava planejada para aquele mês. Já a topografia realizada é a última topografia levantada depois do mês do plano de lavra vigente.

Figura 4 - Topografia original e um avanço de um plano mensal de lavra



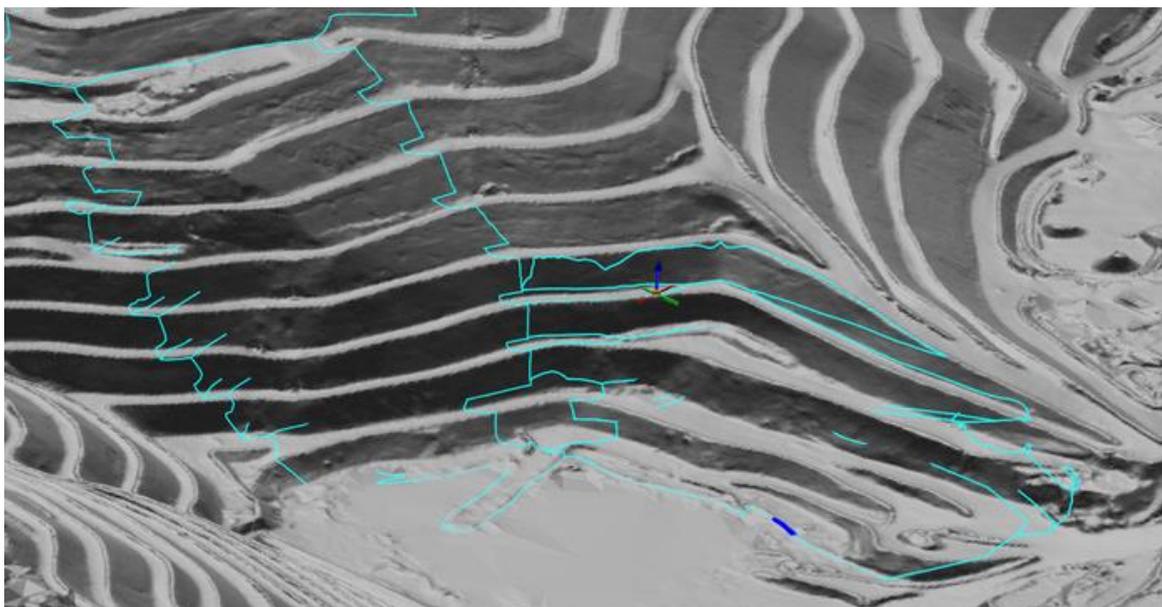
Fonte: O autor (2023).

Figura 5 — Topografia original rotacionada e os dois avanços de lavra planejados



Fonte: O autor (2023)

Figura 6 — Topografia realizada e avanço do plano de lavra mensal

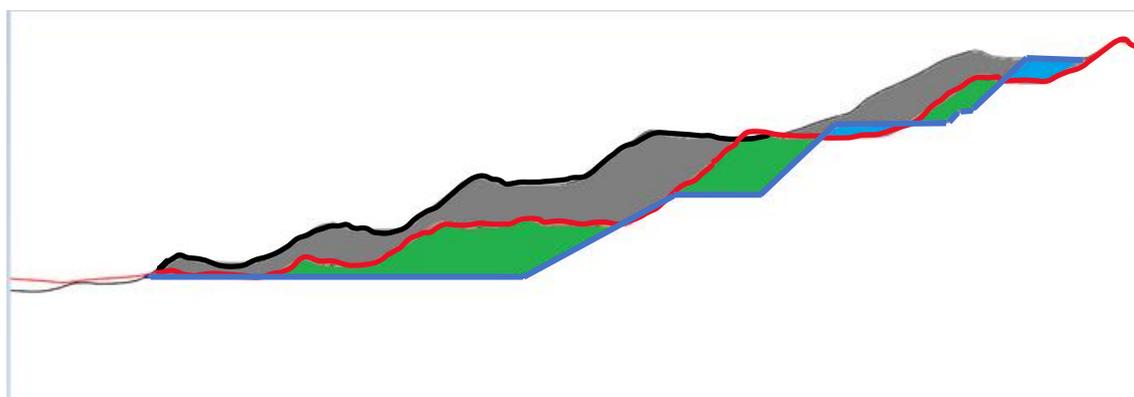


Fonte: O autor (2023)

3.1.2 Topografia Original, Planejada e Realizada

Na figura 7, pode-se observar três diferentes topografias em seção vertical, que são utilizadas para o cálculo dos volumes de PR, PNR e RNP. A linha preta representa a topografia original, enquanto as linhas vermelha e azul representam a topografia realizada em um mês e a topografia planejada, respectivamente. As áreas hachuradas cinza, azul e verde correspondem aos volumes de PR, RNP e PNR.

Figura 7 — Seção de corte das topografias planejada, realizada e original



Fonte: O autor (2023).

Para calcular o RNP, é necessário medir o volume entre a topografia planejada e a topografia realizada, enquanto o valor PNR é obtido a partir do volume entre a topografia realizada e a topografia planejada. Já o valor de PR é definido pela medição do volume entre a topografia original e a topografia realizada, subtraindo-se o volume de RNP.

É possível utilizar *softwares* de planejamento de lavra, como o Micromine®, para realizar esses cálculos de forma simples, utilizando modelos de blocos ou cálculos entre superfícies. No entanto, é importante definir os limites das movimentações de lavra para evitar a inclusão de volumes que não fazem parte da lavra de minério ou estéril nos cálculos.

Para isso, é necessário identificar a área de influência, definida como o limite de aderência, que delimita as condições de contorno para o cálculo. As movimentações de mina que não visam a extração de minério ou estéril, como a manutenção de acessos, preparação para períodos de chuva e disposição de estéril nas pilhas de disposição, não devem ser consideradas nos cálculos. Qualquer outra movimentação fora dos limites definidos não será considerada nos cálculos de PR, PNR e RNP.

3.2 Procedimento Para Obter Aderência

3.2.1 Aderência Geométrica

Para obter uma aderência geométrica é necessário que se utilize um *software* de planejamento de lavra e geologia. Além disso, serão utilizadas as três topografias citadas como premissa.

O método utilizado para calcular as massas movimentadas e que deveriam ter sido movimentadas foi o seguinte:

1. Utiliza se o modelo de bloco já cortado com a topografia original e que foi usado para fazer o plano do mês anterior.
2. Corta se o modelo de blocos, com a topografia original desconsiderando-se o que está abaixo dela e assim se obtém o total realizado no mês.

3. Corta-se o modelo de blocos com a topografia planejada, desconsiderando-se o que se encontra abaixo e assim é obtido o planejado total daquele mês.

4. Utilizando o modelo de blocos do realizado total, é feito novamente um corte com a topografia planejada, desconsiderando os dados acima da topografia e assim se obtém o que foi realizado e não planejado (RNP).

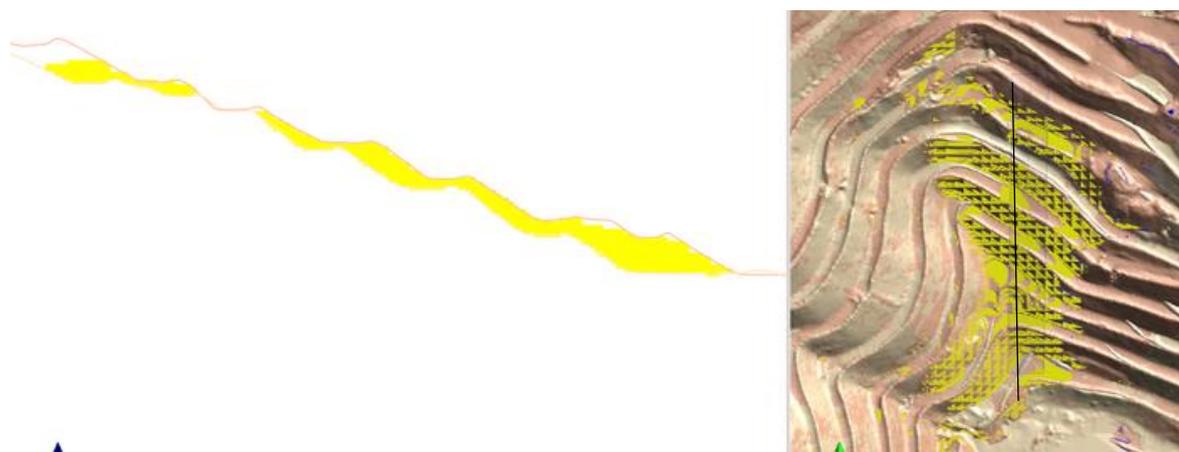
5. Com o planejado total, é cortado com a topografia atualizada (recente) desconsiderando os dados abaixo da topografia e assim gera-se o realizado planejado (RP).

6. A partir do processo anterior, com os mesmos dados, porém desconsiderando os dados acima da topografia, se obtém o que foi planejado, mas não realizado (PNR).

Todos os cortes foram feitos utilizando a ferramenta de *DTM Assign*, ou atribuir modelo de blocos ao MDS (modelo digital de superfície), em português.

Depois de gerado os modelos RP, RNP e PNR, são criados polígonos circulando as áreas que aconteceram movimentação verdadeiramente, pois devido a diferenças nos arquivos de topografia pode haver blocos que não indicam lavra. Esses polígonos são carimbados no modelo de bloco e a partir disso se cria um filtro para eliminar essas interferências.

Figura 8 — Seção com o modelo de blocos cortado com a topografia planejada



Fonte: O autor (2023).

Os valores IA e IC são obtidos pelos valores dos volumes RNP, PNR e PR.

$$IA = \frac{PR}{(RNP + PR)} \dots\dots\dots(3)$$

$$IC = \frac{PR}{(PNR + PR)} \dots\dots\dots(4)$$

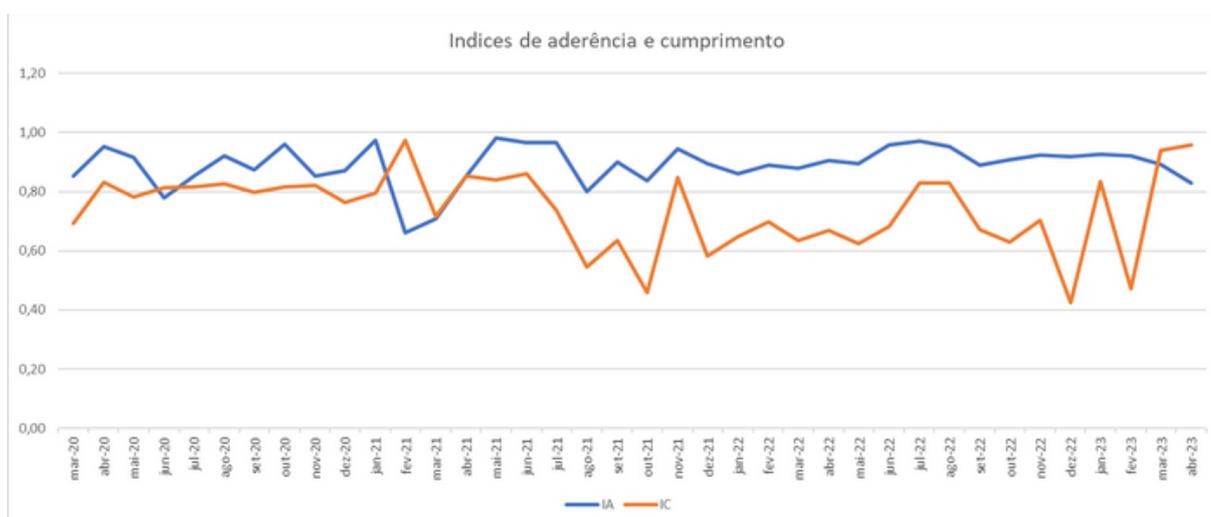
O resultado é um número entre 0 e 1 que multiplicado por 100 representa a porcentagem cumprida dentro de um plano de lavra.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Classificação dos Índices de Desempenho

Os resultados de IA e IC, gráfico 1, foram comparados com os KPIs de utilização física (UF) e disponibilidade física (DF) tanto das escavadeiras quanto de caminhões para avaliar se existe alguma correlação entre ambos.

Gráfico 1 — Índices de aderência e cumprimento



Fonte: O autor (2023).

Os dados de UF e DF foram retirados a partir do sistema de despacho, Smartmine®.

O quadro 1 mostra os valores por data dos KPIs.

Quadro 1 — KPIs de UF e DF dos caminhões e escavadeiras.

DATA	DF Caminhões	DF Escavadeira	UF Caminhões	UF Escavadeira
mar-20	0,85	0,84	0,66	0,69
abr-20	0,88	0,94	0,64	0,67
mai-20	0,82	0,94	0,70	0,69
jun-20	0,79	0,91	0,74	0,71

jul-20	0.82	0.89	0.74	0.81
ago-20	0.86	0.88	0.68	0.79
set-20	0.89	0.83	0.65	0.81
out-20	0.81	0.86	0.69	0.75
nov-20	0.85	0.88	0.63	0.76
dez-20	0.85	0.92	0.60	0.71
jan-21	0.82	0.94	0.64	0.70
fev-21	0.84	0.92	0.65	0.78
mar-21	0.83	0.88	0.76	0.74
abr-21	0.82	0.85	0.81	0.76
mai-21	0.80	0.91	0.82	0.73
jun-21	0.82	0.94	0.77	0.72
jul-21	0.86	0.92	0.76	0.77
ago-21	0.87	0.95	0.78	0.79
set-21	0.85	0.92	0.77	0.82
out-21	0.83	0.95	0.66	0.75
nov-21	0.84	0.91	0.66	0.78
dez-21	0.87	0.83	0.62	0.72
jan-22	0.86	0.82	0.55	0.63
fev-22	0.82	0.91	0.59	0.65
mar-22	0.84	0.87	0.71	0.67
abr-22	0.83	0.84	0.76	0.70
mai-22	0.83	0.87	0.71	0.71
jun-22	0.81	0.88	0.79	0.76
jul-22	0.68	0.88	0.75	0.77
ago-22	0.85	0.92	0.70	0.72
set-22	0.82	0.89	0.75	0.79

out-22	0.77	0.91	0.76	0.79
nov-22	0.81	0.76	0.64	0.63
dez-22	0.81	0.85	0.68	0.64
jan-23	0.84	0.85	0.65	0.66
fev-23	0.75	0.89	0.81	0.86
mar-23	0.77	0.82	0.81	0.83

Fonte: O autor (2023).

Utilizando o *software* de estatística Minitab[®], foram realizadas as seguintes etapas (i) teste de normalidade para todas as variáveis, a fim de se verificar se as causas são comuns e previsíveis, (ii) análise de resíduos, para se checar *outliers* (arquivos em anexo), e em seguida, (iii) calculada a correlação entre os dados. O resultado encontra-se abaixo:

Tabela 1 — Correlação entre IA, IC e DF, UF dos caminhões e escavadeiras

Correlação	IC	Correlação	IA
UF Escavadeira	0.028	UF Escavadeira	-0.138
P-value	0.875	P-value	0.429
UF Caminhões	-0.094	UF Caminhões	0.089
P-value	0.592	P-value	0.613
DF Escavadeira	0.13	DF Escavadeira	0
P-value	0.457	P-value	0.999
DF Caminhões	0.198	DF Caminhões	-0.119
P-value	0.254	P-value	0.496

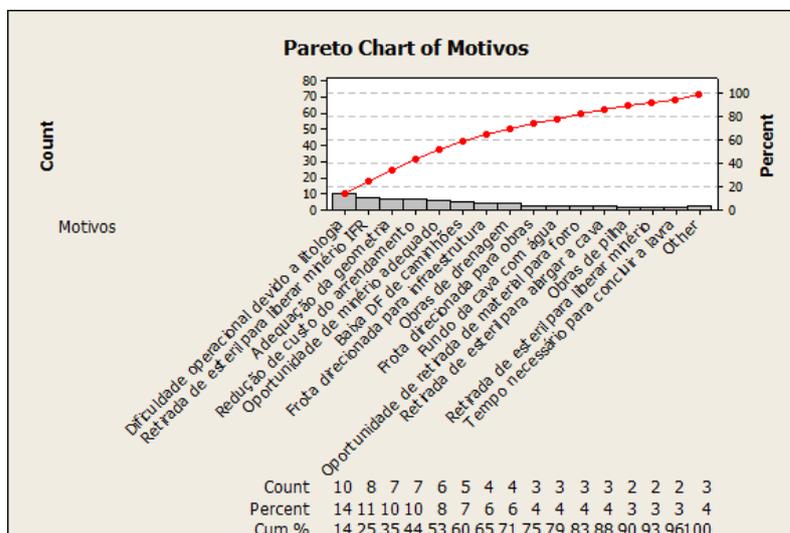
Fonte: O autor (2023).

Resultados de correlação com o *P-value* acima de 0.05 indicam que não existe correlação, ou seja, uma variável não afeta a outra.

Assim, foi feita uma análise qualitativa de dados retirados das apresentações de planos de lavra mensais, onde se pontua as causas levantadas pela equipe de planejamento de lavra de curto prazo em conjunto com a equipe de operação de mina

e infraestrutura. Os dados foram colocados em um gráfico de Pareto, a fim de se analisar melhor os principais agentes de impacto que impediram a aderência e o cumprimento da lavra planejada.

Gráfico 2 — Gráfico de Pareto dos dados qualitativos



Fonte: O autor (2023).

Foram levantadas 72 causas de impacto no cumprimento dos planos ao longo de 22 meses. Agrupando todas elas obtiveram-se que a maior causa é a dificuldade operacional relacionada à litologia do local de lavra, normalmente vinculada com a granulometria muito fina. Como exemplo, é possível se destacar a pilha de rejeito que necessita ter um tráfego de caminhões tanto para ter a recorrência, lavra de material anteriormente descartado como estéril e que poderia ser considerado minério ou movimentação de material para acessar bancos mais profundos, do local como para acessar outras frentes.

5 CONCLUSÃO

Na análise dos planos mensais não foram encontradas correlações entre os índices IA, IC e UF, DF para todo o período estudado, uma vez que o *P-value* é maior que 0,05 em todas as análises. Apesar de serem KPIs utilizados normalmente com funções distintas, é possível se pensar em um paralelo entre ambos, pois não possuir equipamentos disponíveis para serem utilizados ou não sendo utilizados quando disponíveis, em uma mina onde o desmonte é feito de forma mecânica e, por isso, altamente dependente de equipamentos de carga, poderia atrapalhar a execução plena dos planos de lavra.

No caso da mina estuda, foi possível provar que essa correlação não existe e não explica as variações dos índices de aderência. Um possível motivo para explicação desse fato, portanto, é que a disponibilidade e utilização física dos equipamentos se mantêm relativamente constantes e altas ao longo do ano. No entanto, não significa que estes KPIs podem ser ignorados, uma vez que pontualmente a falta de equipamentos ou problemas relacionados a UF, tais como absenteísmo e paradas na mina, podem sim afetar o cumprimento efetivo dos planos de curto prazo, como mostrado no gráfico de Pareto, gráfico 2.

Todo KPI deve ser colocado no devido contexto e quando utilizado para tomada de decisões deve ser feito com cautela.

Por último, foi feita uma análise qualitativa dos indicadores mensais, buscando assim causas para a lavra ter acontecido fora dos polígonos planejados ou mesmo não ter sido realizada conforme planejado. Essas causas foram levantadas em reuniões entre a equipe de operação de mina e a equipe de planejamento de curto prazo e posteriormente repassadas aos interessados nas apresentações de planos de lavra mensais. Com isso, foi possível identificar que 53% das razões do não cumprimento do plano de lavra são:

- Dificuldade operacional relacionada ao material dos acessos: ligado principalmente à granulometria fina do material in situ, como filitos e de pilha de rejeito. Em períodos chuvosos, os acessos criam-se lama com uma profundidade considerável, ocasionando riscos para os equipamentos transitarem;

- Lavra de material estéril para lavar minério rico: ligada à estratégia da empresa de lavar itabirito friável com alto teor de ferro e baixa sílica;
- Adequação da geometria da lavra: relacionada à geometrização da cava de acordo com parâmetros geotécnicos, como ângulo de talude, rampas e drenagem, além de encaixes de rampa e acessos secundários;
- Redução do custo de arrendamento: estratégia da empresa para reduzir custos com a lavra em locais de propriedade de terceiros;
- Oportunidade de minério adequado: como não existe modelo de bloco perfeito, é possível que uma região planejada não tenha o minério com as características desejadas para alimentar a usina de beneficiamento, e, por isso, é necessário buscar outras frentes de lavra conhecidas.

Nota-se com isso que as causas estão mais relacionadas a fatores locais e características geológico-geotécnicas e da adequação das mesmas.

Fatores relacionados a maquinários ficaram em segunda instância. Em uma segunda análise, é possível, também, ligar os fatores, em especial, ambientais aos períodos chuvosos, que criam uma série de impeditivos à lavra.

Entender todos esses fatores se faz importante na elaboração de um plano de lavra bem-sucedido, pois apenas conhecendo-se os riscos é possível se preparar e evitar problemas futuros, como falta de minério liberado, minério com especificação incorreta sendo enviado à usina, além de problemas ligados a segurança, como tombamentos e atolamentos. E conhecer o IC e IA, mostra a efetividade dos planos, possibilitando o ajuste dos planos para os meses seguintes.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. Q. Sequenciamento e Programação de Lavra com Alocação de Equipamentos de Carga; São Paulo 2014.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. The Unified Modeling Language User Guide. Reading Mass.: Addison-Wesley, 1999.

BORGES, T. C. Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BORGES, T. C. Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

CÂMARA, T. R., et al. Reconciliação: Ferramentas de Avaliação do Fator Mina / Usina. 8º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto / 8º Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. 6 a 8 de agosto de 2014. Belo Horizonte.

CAMPOS, P. H. A., Um Comparativo de Metodologias no Planejamento de Lavra: Sequenciamento direto de Blocos Vs. Planejamento Tradicional. Ouro Preto 2017.

CHIEREGATI, A. C.; DELBONI, H.; COSTA, J. F. C. L.; CARNEIRO, F. B. Reconciliação pró-ativa em empreendimentos mineiros. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, MG, v. 61, n. 3, p. 297-302, 2008.

CHIMUCO, J. P. J., Metodologia de Planejamento de Mina Para Retomada Das Operações de Lavra Das Jazidas de Kassinga Norte – Angola. Ouro Preto 2010.

COUZENS, T. R. Aspects of production planning: Operating layout and phase plans. Open Pit Mine Planning and Design, New York, SME-AIME, p. 219-213, 1979.

CURI, A. Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

HALATCHEV, R. The Time Aspect of the Optimum Long-Term Open Pit Production Sequencing. 30th. Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Littleton, SME. 2002.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. Introductory Mining Engineering. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração. Workshop “Planejamento De Mina: Práticas e Experiências de Empresas de Mineração”, Módulo I e II. Belo Horizonte, 1996.

JÚNIOR, A.L.S; JÚNIOR, G.P; COTA, L.P; SOUZA, M.J.F. Planejamento de Lavra: um estudo de caso. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, [s. l.], 27 dez. 2019.

MANDARINO, M. F., Análise de Métodos Para Planejamento de Curto Prazo: Uma Abordagem Para o Line Up. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

NADER, B.; TOMI, G.; PASSOS, A. O. Indicadores-chave de Desempenho e a Gestão Integrada da Mineração. Revista da Escola de Minas - REM, Ouro Preto, out. dez. 2012.

PERRONI, R. L., Análise Da Sensibilidade Do Sequenciamento De Lavra Em Função Da Incerteza Do Modelo Geológico Porto Alegre 2002.

PINEDO, M. L. Scheduling: Theory, Algorithms, And Systems 3.Ed. New York. Springer, 2008.

RODOVALHO, E. C. Aplicação de Ferramentas de Simulação em Operações Mineiras para Determinação de Índices Operacionais Utilizados em Planos de Lavra Adaptados ao Estudo de Caso da Mineração Casa de Pedra - CSN. 2013. 111 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RUMBAUGH J. Object-oriented modeling and design. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1991.

SACH, P. F. T. Cadeia de Valor Mineral e Tecnologia da Informação: alinhamento estratégico como gerador de eficácia em empresas de mineração. 2009. 169 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, N. C. S. Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais. Tese de doutorado em engenharia mineral da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 128 p.

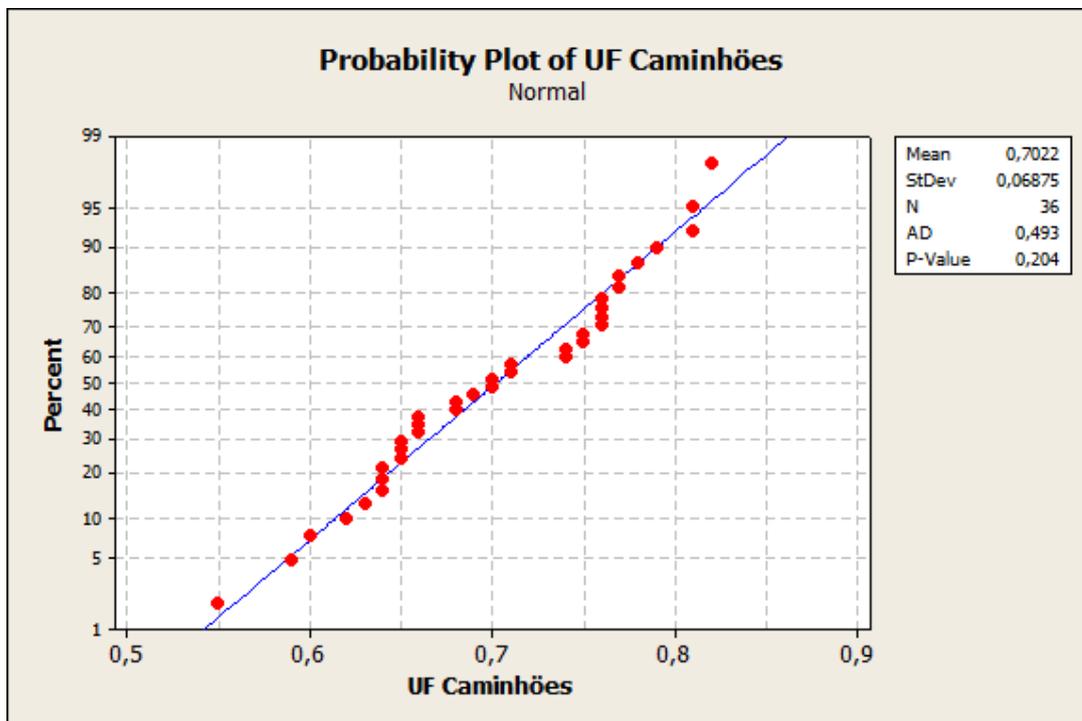
SOUZA, R. A. Análise e Controle dos Índices de Aderência e Cumprimento para Planos de Lavra. 2013. 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013.

XIMENES, G. F. Plano mensal de lavra de uma mina de ferro localizada no quadrilátero ferrífero: um estudo de caso. 2018. 41 f. (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CORRÊA, Amanda. Modelagem Geológica e a sua relação com o Planejamento de Lavra. Instituto Minere, 2018. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/modelagem-geologica-e-a-sua-relaao-com-o-planejamento-de-lavra>. Acesso em 19 de maio de 2023.

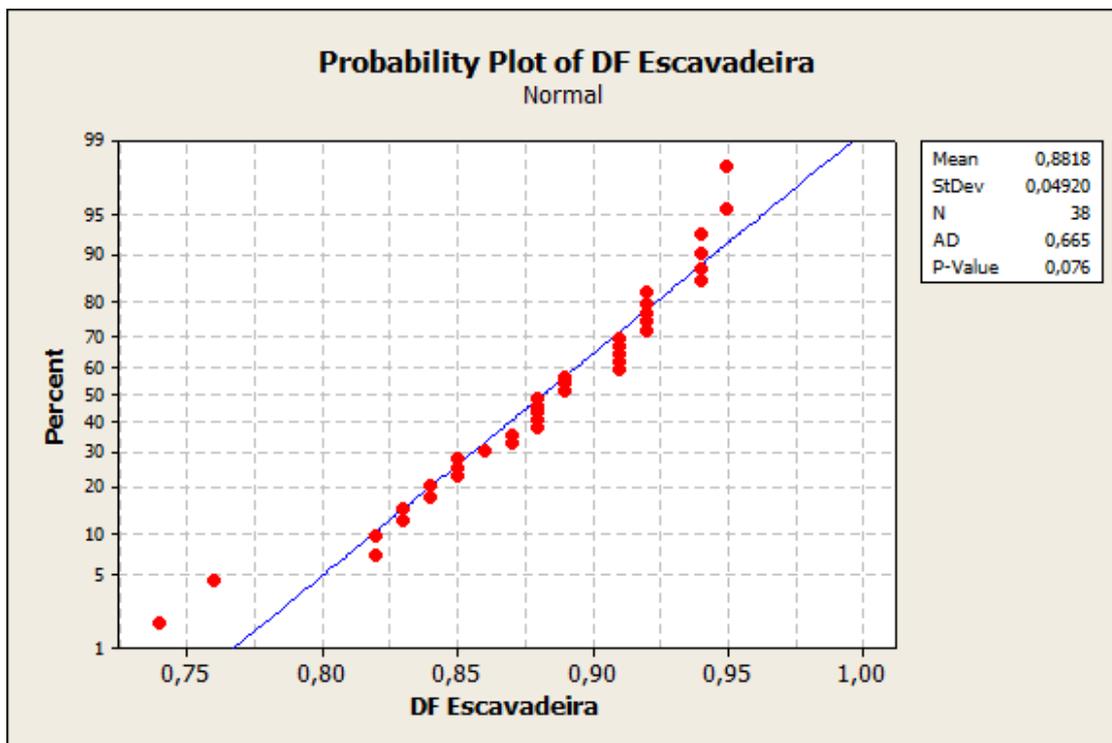
7 ANEXO I - TESTE DE NORMALIDADE PARA OS KPIS

Gráfico 3 — Gráfico de normalidade da UF de caminhões



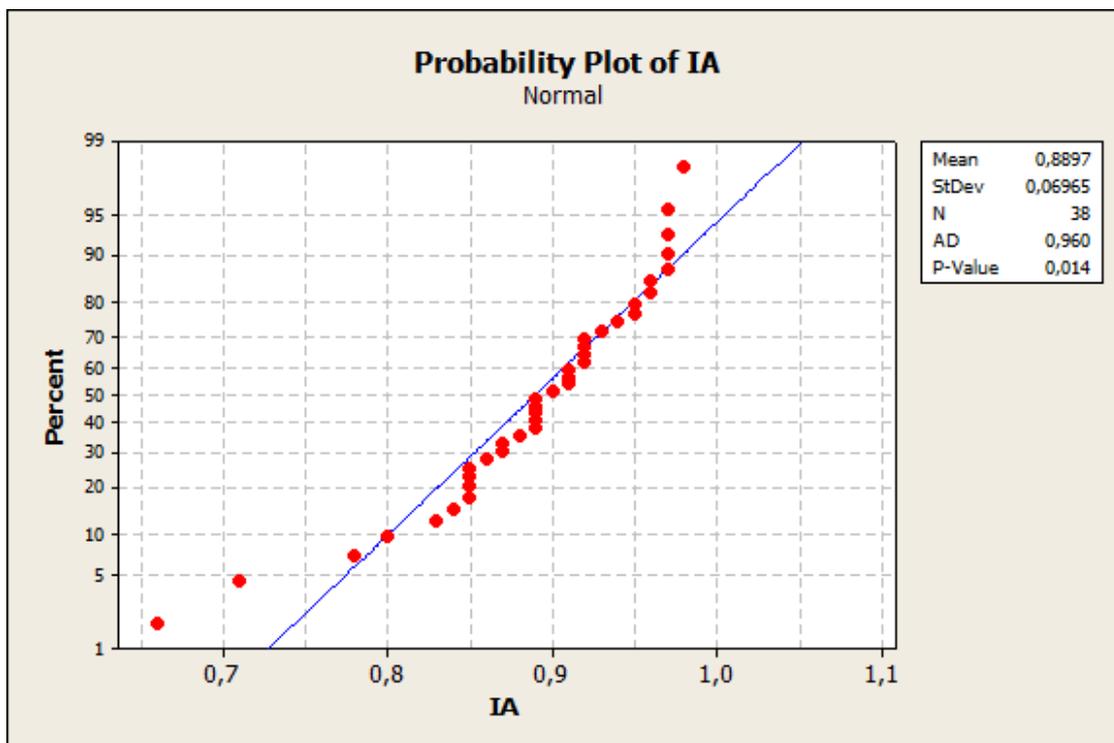
Fonte: O autor (2023).

Gráfico 4 — Gráfico de normalidade da DF de escavadeira



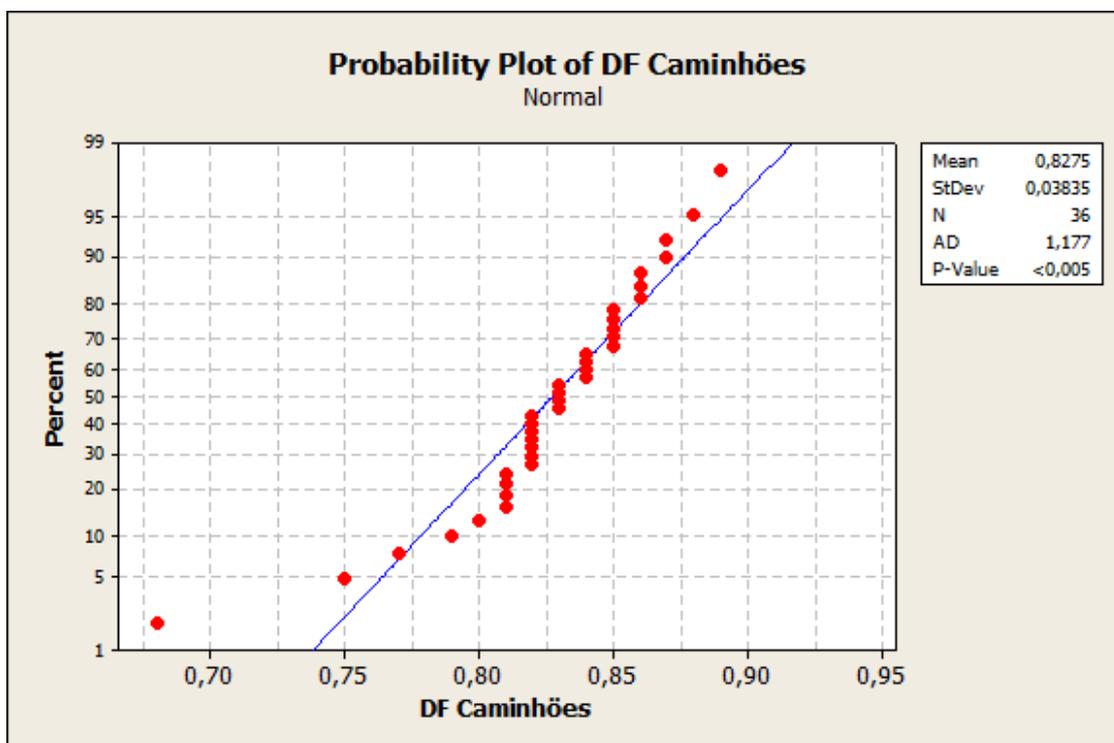
Fonte: O autor (2023).

Gráfico 5 — Gráfico de normalidade da IA



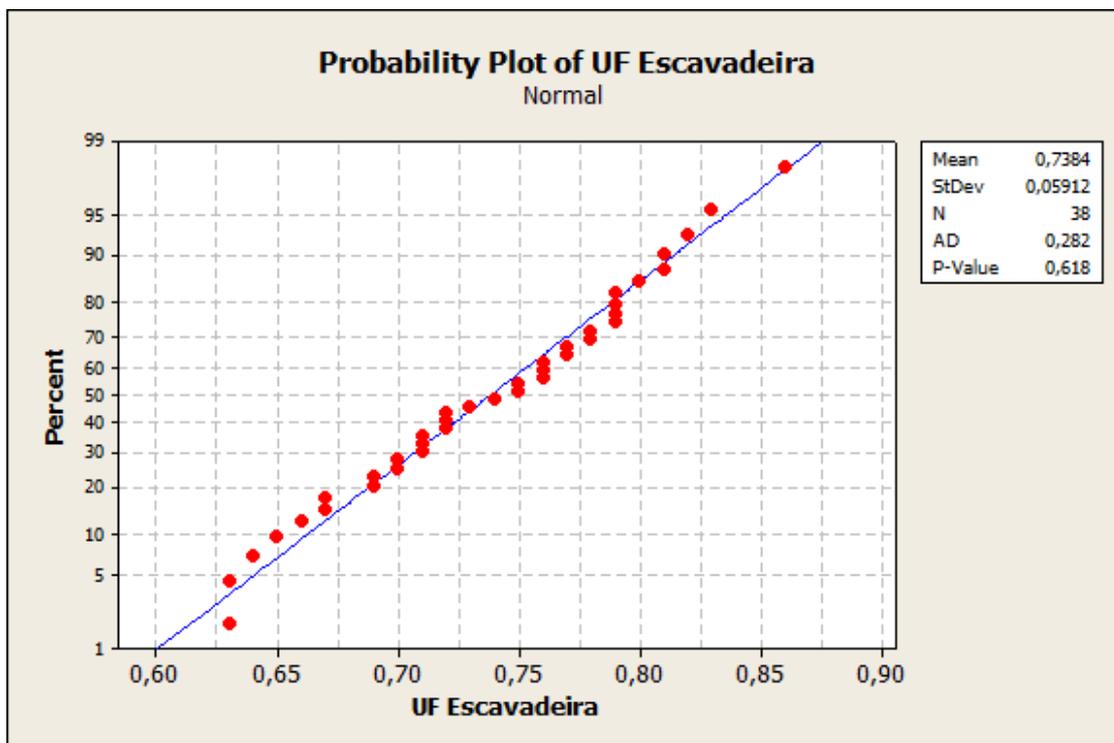
Fonte: O autor (2023).

Gráfico 6 — Gráfico de normalidade da DF de caminhões



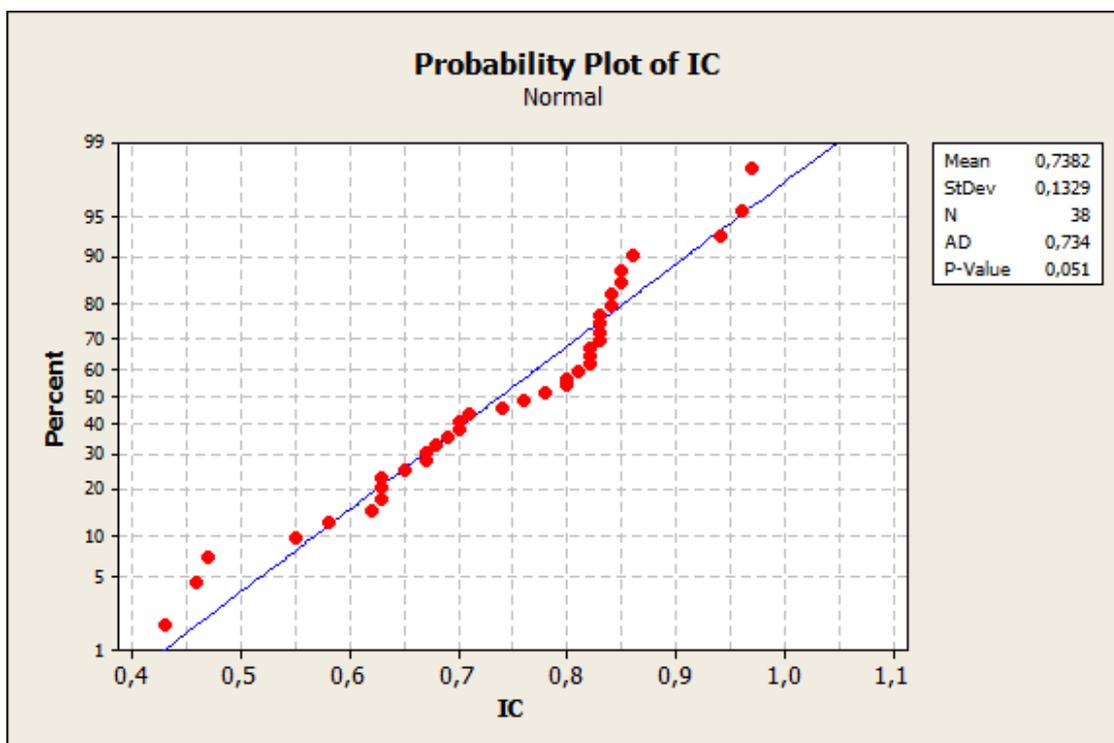
Fonte: O autor (2023).

Gráfico 7 — Gráfico de normalidade da UF das escavadeiras



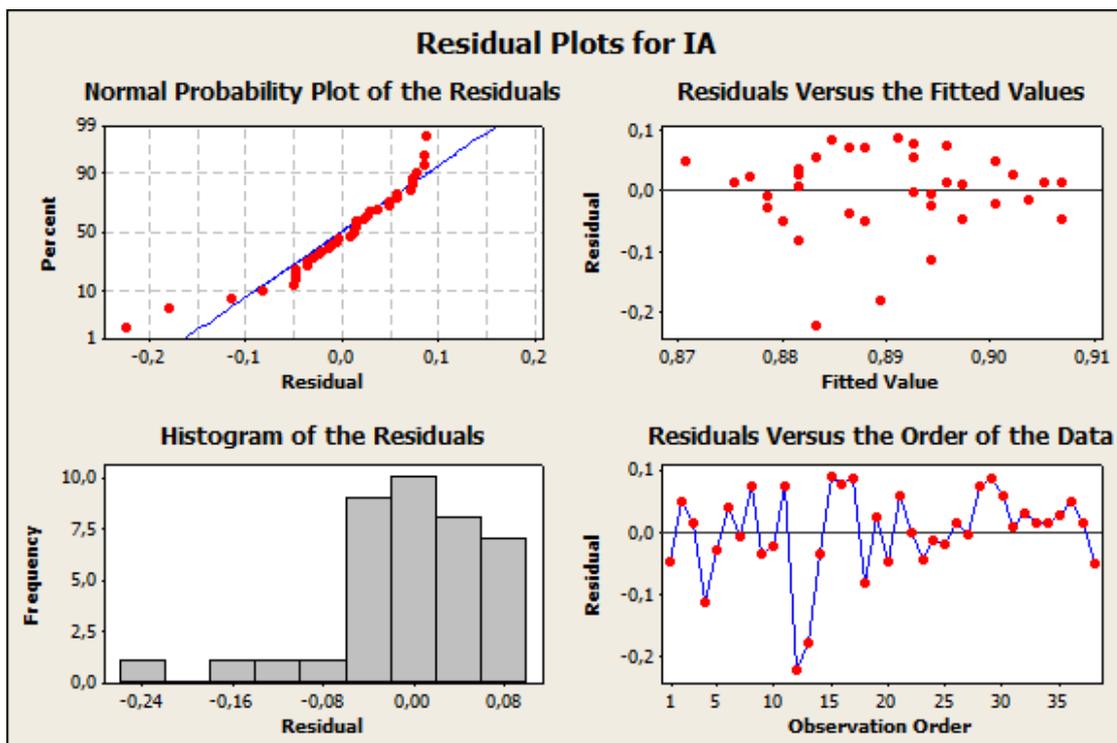
Fonte: O autor (2023).

Gráfico 8 — Gráfico de normalidade do IC



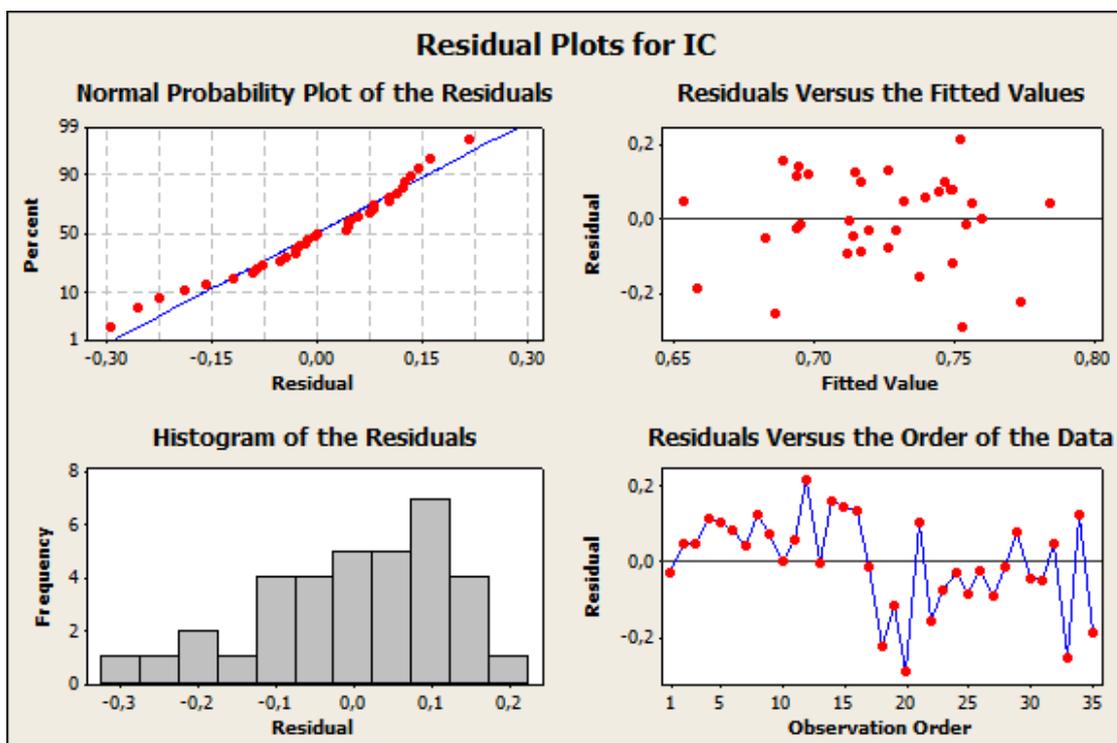
Fonte: O autor (2023).

Gráfico 9 — Gráfico de resíduos do IA



Fonte: O autor (2023).

Gráfico 10 — Gráfico de resíduos do IC



Fonte: O autor (2023).