



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

---

## DISSERTAÇÃO

# ESTIMATIVA DA VARIÁVEL DENSIDADE E SEU IMPACTO NO PLANEJAMENTO DE LAVRA: ESTUDO DE CASO MINA DE SERRA AZUL

Autor: **Celso Henrique Miranda Reis**

Orientador: **Carlos Enrique Arroyo Ortiz**

Coorientador: **Adilson Curi**

OURO PRETO

2019

Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral

Celso Henrique Miranda Reis

**ESTIMATIVA DA VARIÁVEL DENSIDADE E SEU IMPACTO NO  
PLANEJAMENTO DE LAVRA: ESTUDO DE CASO MINA DE SERRA AZUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Lavra de Minas  
Orientador: Carlos Enrique Arroyo Ortiz

OURO PRETO

2019

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375e Reis, Celso Henrique Miranda .  
Estimativa da variável densidade e seu impacto no planejamento de lavra  
[manuscrito]: estudo de caso mina de Serra Azul. / Celso Henrique Miranda Reis. -  
2019.  
71 f.: il.: color., gráf., tab., mapa..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.  
Coorientador: Prof. Dr. Adilson Curi.  
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral.  
Área de Concentração: Lavra de Minas.

1. Lavra de minas. 2. Minas e recursos minerais - Planejamento. 3.  
Geoestatística. I. Reis, Celso Henrique Miranda . II. Curi, Adilson. III. Ortiz, Carlos  
Enrique Arroyo. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 622.014

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


**“ESTIMATIVA DA VARIÁVEL DENSIDADE E SEU IMPACTO NO  
PLANEJAMENTO DE LAVRA: ESTUDO DE CASO MINA DE  
SERRA AZUL”**

**AUTOR: CELSO HENRIQUE MIRANDA REIS**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 31 de outubro de 2019, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (Orientador) – UFOP**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Alizeibeck Saleimen Nader (Membro) – UFMG**

  
\_\_\_\_\_  
**XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX**  
**Prof. Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi (Membro) – USP**  
(Participação por videoconferência)

*Dedico este trabalho aos meus familiares, em especial aos meus pais, Celso Rodrigues e Margaret Miranda, e minha esposa Fernanda Freire. Grandes incentivadores que sempre acreditaram no meu potencial e contribuíram com essa conquista.*

## AGRADECIMENTOS

À empresa ArcelorMittal por permitir o desenvolvimento deste projeto, além do apoio e fornecimento de toda infraestrutura necessária para realização desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto, em especial aos professores e corpo administrativo do programa por proporcionarem fornecimento de um ensino de qualidade.

Ao orientador Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz pelos ensinamentos, disponibilidade e direcionamento na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Adilson Curi pela coorientação e contribuição na elaboração desta dissertação.

A todos os amigos e profissionais da ArcelorMittal, Brasil e Canadá, pelas inúmeras discussões técnicas que contribuíram para a minha formação profissional e me incentivaram na realização deste projeto.

Ao geólogo Marcelo Zangrandi pelas discussões, sugestões e contribuições no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas do PPGEM pela convivência e experiência compartilhada e a todos os demais que colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Esse trabalho visa mensurar e minimizar os riscos e incertezas associados às etapas de avaliação de recursos e reservas minerais por meio da incorporação da variabilidade da densidade no planejamento de lavra. Na prática, a maioria dos projetos de mineração utilizam um valor de densidade média para cada um dos diferentes tipos litológicos presentes no depósito mineral. As determinações de densidade de minério e estéril requerem atenção especial, pois afetam diretamente a conversão de volumes em toneladas e teores em quantidades de metal. Um estudo de caso foi desenvolvido em uma mina de ferro localizada na região do quadrilátero ferrífero, onde os efeitos da incorporação das incertezas da variável densidade em um plano de lavra foram investigados. Para realização dessa análise dois cenários foram estudados e os seus resultados comparados. O primeiro consiste em estimar as reservas minerais para o depósito a partir da utilização do atributo densidade determinado pela média das amostras, enquanto o segundo cenário analisa as reservas minerais a partir do atributo densidade estimado para cada bloco do modelo mediante aplicação das ferramentas geoestatísticas. No desenvolvimento do estudo de caso a metodologia de planejamento de mina convencional foi utilizada. O impacto de se considerar ou não a variabilidade da densidade na definição dos valores aos blocos foi avaliada e, conseqüentemente, sua influência na definição dos limites da cava ótima e no sequenciamento de lavra foi investigado. Ao comparar os cenários estudados observa-se que os resultados dos trabalhos desenvolvidos utilizando a média do atributo densidade são consistentemente menores do que os resultados dos trabalhos onde o atributo densidade foi estimado. Uma diferença de 3 % na avaliação dos recursos minerais foi encontrada, enquanto o impacto na avaliação das reservas minerais chegou a 5%. A influência na vida útil do empreendimento foi de aproximadamente um ano, impactando o VPL do projeto em 2%. A reconciliação mássica para um intervalo de cinco anos de produção também foi realizada indicando o modelo onde a densidade é estimada bloco a bloco como o mais aderente.

**Palavras-chave: Densidade, Planejamento de lavra, Avaliação de Recursos e Reservas Minerais.**

## ABSTRACT

This study aims to measure and minimize the risks and uncertainties associated with the mineral resource and mineral reserve estimation steps, incorporating bulk density variability into the mine planning. In practice, most mining projects use an average bulk density value for each of the different lithological types present in the mineral deposit. Ore and waste density determinations require special attention as they directly affect the conversion of volumes to tonnages and ore grades to metal contents. A case study was developed in an iron ore mine located in the region of the Iron Quadrangle, MG, Brazil. In this study, the effects of incorporating bulk density uncertainties in a mining plan were investigated. In order to perform this analysis two scenarios were studied and their results were compared. The first one estimate the mineral reserves for the deposit using the bulk density determined by the samples mean, while the second scenario analyzes the mineral reserves from the estimated bulk density for each block of the model by applying the geostatistical tools. In the development of the case study the conventional mine planning methodology was used. The impact of whether or not to consider the bulk density variability in the definition of the economic blocks values was evaluated and, consequently, its influence on the definition of the optimal pit boundaries and the mining scheduling was investigated. When comparing the studied scenarios, it is observed that the results of the works developed using the bulk density average are consistently lower than the results of the works where the bulk density was estimated geostatistically. A 3% difference in the mineral resources estimation was found, while the impact on the mineral reserves estimation reached 5%. The influence on the life of mine project was approximately one year, impacting the project's NPV by 2%. Mining reconciliation for a five year production interval was also performed indicating the model where bulk density is estimated block by block as the most adherent.

**Keywords: Bulk Density, Mine Planning, Estimation of Mineral Resources and Mineral Reserves.**



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Etapas do planejamento de lavra convencional .....	12
<b>Figura 2.2:</b> Distribuição percentual dos custos de mina. Fonte: Bozorgebrahimi et al, 2003 .....	14
<b>Figura 3.1:</b> Fluxograma apresentando a metodologia e as etapas realizadas no trabalho. ....	17
<b>Figura 3.2:</b> Procedimentos de ensaios de densidade: a) materiais necessários (parafina certificada, balança calibrada/nivelada e estufa na temperatura); b) secagem em estufa; c) parafina certificada; d) selagem das amostras com parafina; e) esquema de pesagem das amostras seladas em água; f) pesagem das amostras seladas em água .....	18
<b>Figura 3.3:</b> Correlação / Regressão linear entre os teores de Fe e a densidade para o Itabirito Compacto (69 amostras) .....	19
<b>Figura 3.4:</b> Visualização de cava final utilizando o software <i>Whittle</i> .....	21
<b>Figura 3.5:</b> Visualização de cava final operacionalizada utilizando o software Surpac. ....	22
<b>Figura 3.6:</b> Layout principal do Software MineSched. ....	23
<b>Figura 3.7:</b> Visualização do sequenciamento de lavra do Software MineSched.....	23
<b>Figura 4.1:</b> Localização e vias de acesso do empreendimento. ....	24
<b>Figura 4.2:</b> Vista panorâmica da mina de Serra Azul. ....	25
<b>Figura 4.3:</b> Representação dos litotipos carimbado no modelo de blocos, Mina Serra Azul .....	28
<b>Figura 4.4:</b> Histograma das amostras de ferro e densidade .....	29
<b>Figura 4.5:</b> Mapa de amostras IC e curva de correlação Fe vs densidade.....	30
<b>Figura 4.6:</b> Histograma das amostras densidade completada via regressão linear. ....	31
<b>Figura 4.7:</b> Histograma dos teores de Fe das amostras de densidade e dos teores de Fe para todo banco de dados.....	32
<b>Figura 4.8:</b> Q-Q Plot para os teores de Fe e para os valores de densidade.....	33

<b>Figura 4.9:</b> Variogramas experimentais e ajustados para as direções principais do depósito de Serra Azul.....	34
<b>Figura 4.10:</b> Variogramas ajustados para a variável densidade. ....	34
<b>Figura 4.11:</b> Parâmetros usados para estimativa de densidade por KO .....	36
<b>Figura 4.12:</b> DENS_OK – Seção vertical longitudinal mostrando a densidade estimada por KO utilizando as amostras medidas em laboratório (105 dados).....	37
<b>Figura 4.13:</b> DENS_OK_REGRESS – Seção vertical longitudinal mostrando a densidade estimada por KO utilizando os dados de densidades medidos em laboratório mais os dados calculados via regressão linear (1090 dados).....	37
<b>Figura 4.14:</b> DENS_REGRESS – Seção vertical longitudinal mostrando a densidade definida pela regressão linear com a variável teor de ferro aplicada diretamente no modelo de blocos para todos os dados estimados de Fe.....	38
<b>Figura 4.15:</b> DENS_OK-Validação cruzada para a estimativa da densidade por KO. ..	39
<b>Figura 4.16:</b> DENS_OK_REGRESS-Validação cruzada para a estimativa da densidade por KO.....	39
<b>Figura 4.17:</b> Análise de deriva para o eixo x. (DENS_OK_REGRESS, DENS_REGRESS e a média das 1090 amostras).....	40
<b>Figura 4.18:</b> Análise de deriva para o eixo y. (DENS_OK_REGRESS, DENS_REGRESS e a média das 1090 amostras).....	41
<b>Figura 4.19:</b> Análise de deriva para o eixo z. (DENS_OK_REGRESS, DENS_REGRESS e a média das 1090 amostras).....	41
<b>Figura 4.20:</b> Histograma para as amostras de densidade. (DENS_OK_REGRESS, DENS_REGRESS e a média das 1090 amostras).....	42
<b>Figura 4.21:</b> Gráfico Tonelagem x Teor para os quatro métodos de determinação das densidades.....	43
<b>Figura 4.22:</b> Cavas aninhadas geradas pelo Whittle no processo de otimização. ....	45
<b>Figura 4.23:</b> Cavas otimizadas para os dois cenários investigados.....	45
<b>Figura 4.24:</b> Cava final operacionalizada.....	46

<b>Figura 4.25:</b> Diferenças percentuais de tonelagens de Itabirito Compacto entre os dois cenários de estimativa de Reservas Minerais. ....	47
<b>Figura 4.26:</b> Seção vertical X = 562450 e gráfico de tonelagens estimada por banco – Área Oeste .....	47
<b>Figura 4.27:</b> Seção vertical X = 563250 e gráfico de tonelagens estimada por banco – Área Central.....	48
<b>Figura 4.28:</b> Seção vertical X = 563400 e gráfico de tonelagens estimada por banco – Área Leste .....	48
<b>Figura 4.29:</b> Milawa NPV - Sequência de extração gerada para o cenário Dens Média	50
<b>Figura 4.30:</b> Milawa NPV - Sequência de extração gerada para o cenário Dens KO ....	51
<b>Figura 4.31:</b> Fluxograma de movimentação de materiais – Software Geovia MineSched .....	52
<b>Figura 4.32:</b> Seções verticais, sul-norte (Y = 7774275) e oeste-leste (X = 563350), representando a programação de produção segundo simulação com a densidade média (seções da direita) e densidade estimada (seções da esquerda).....	54
<b>Figura 4.33:</b> Seções verticais, sul-norte (Y = 7774275) e oeste-leste (X = 563350), representando a programação para os primeiros cinco anos de produção.....	54
<b>Figura 4.34:</b> Vista panorâmica representando o sequenciamento de lavra para os primeiros cinco anos de produção .....	55
<b>Figura 4.35:</b> Variação percentual do volume lavrado entre os cenários analisados .....	56
<b>Figura 4.36:</b> Porte dos equipamentos de carregamento e transporte da mina de Serra Azul .....	57
<b>Figura 4.37:</b> Horas requeridas para produção (Perfuração + Carregamento + Transporte) .....	60
<b>Figura 4.38:</b> Quantidade total de equipamentos dimensionada para os primeiros cinco anos de produção. ....	61
<b>Figura 4.39:</b> Blocos de lavra gerados para cálculo de reconciliação.....	62
<b>Figura 4.40:</b> Reconciliação anual para os itabiritos compactos de Serra Azul.....	63

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 4.1:</b> Descrição dos equipamentos de lavra da mina de Serra Azul .....	26
<b>Tabela 4.2:</b> Dimensões do Modelo de Blocos .....	29
<b>Tabela 4.3:</b> Medidas estatísticas das amostras de densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) e densidade após regressão linear ( $\text{g/cm}^3$ ). .....	32
<b>Tabela 4.4:</b> Parâmetros do modelo variográfico para ajuste da variável densidade.....	34
<b>Tabela 4.5:</b> Comparação de estatísticas das estimativas KO usando os dados provenientes de densidades medidos em laboratório mais os dados calculados via regressão linear...38	
<b>Tabela 4.6:</b> Tonelagens e teores cubadas no modelo de blocos para os quatro métodos de determinação das densidades. ....	43
<b>Tabela 4.7:</b> Parâmetros operacionais para o desenho de mina. ....	46
<b>Tabela 4.8:</b> Resultados do sequenciamento de lavra operacional pelo software MineSched .....	53
<b>Tabela 4.9:</b> Resultados do sequenciamento mostrando o volume lavrado para os primeiros cinco anos de produção. ....	55
<b>Tabela 4.10:</b> Distâncias Médias de Transporte, DMTs, para os primeiros cinco anos de produção. ....	57
<b>Tabela 4.11:</b> Premissas para estimativas das horas de operação.....	58
<b>Tabela 4.12:</b> Resultado das estimativas de produtividade das operações de carregamento e transporte. ....	58
<b>Tabela 4.13:</b> Horas requeridas para atingir a produção necessária por período .....	60

**LISTA DE ABREVIATURAS**

DENS	Refere-se a média das amostras de densidade
DENS_REGRESS	Refere-se aos valores de densidade calculados por regressão linear com a variável teor de ferro.
DENS_OK	Refere-se aos valores de densidade estimados por KO das amostras medidas em laboratório.
DENS_OK_REGRESS	Refere-se aos valores de densidade estimados por KO das amostras medidas em laboratório mais os dados calculados via regressão linear.
DMT	Distância Média de Transporte.
KO	Krigagem Ordinária.
MIL	Minas Itatiaiuçu Ltda.
IC	Itabirito Compacto.
IDF	Índice de Disponibilidade Física
IU	Índice de Utilização
SEDAR	Sistema Eletrônico para Análise e Recuperação de Documentos.
VPL	Valor Presente Líquido.

**SUMÁRIO**

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	x
CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Meta .....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organização do trabalho .....	4
CAPÍTULO 2 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Densidade.....	5
2.2 Estimativas geoestatísticas para a variável densidade .....	8
2.3 Planejamento de lavra e influência da variável densidade.....	10
2.3.1 Planejamento de lavra convencional .....	10
2.3.2 Dimensionamento de frota.....	13
2.3.3 Reconciliação.....	15
CAPÍTULO 3 : METODOLOGIA.....	16
3.1 Determinação da densidade .....	18
3.2 Modelagem geoestatística .....	20
3.3 Planejamento de lavra .....	20
CAPÍTULO 4 : ESTUDO DE CASO.....	24
4.1 Caracterização geral do empreendimento .....	24
4.2 Geologia e mineralização.....	26

4.3	Análise exploratória dos dados .....	29
4.4	Modelagem geoestatística .....	33
4.4.1	Análise dos resultados das estimativas .....	37
4.5	Estimativa de Reservas Minerais .....	44
4.5.1	Otimização de cava.....	44
4.5.2	Sequenciamento de lavra .....	49
4.5.3	Dimensionamento de frota.....	56
4.5.4	Reconciliação.....	61
CAPÍTULO 5 : CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....		64
5.1	Conclusões.....	64
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	65
REFERÊNCIAS .....		67

## CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO

---

A definição dos limites da cava final de um projeto de mineração, bem como as etapas de sequenciamento de lavra que indicam os avanços a serem lavrados para alcançar a cava definida como ótima, fazem parte das etapas do planejamento de lavra de um empreendimento mineral. O objetivo desse processo é geralmente maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto, atendendo às restrições operacionais, geométricas, legais e ambientais.

Historicamente, esses processos de otimização e sequenciamento se baseiam na premissa de conhecimento exato de variáveis que possuem alto grau de incertezas, como por exemplo as incertezas relacionadas à geologia do depósito mineral, características geotécnicas, operacionais e econômicas (Dominy et al., 2004). Conseqüentemente, os trabalhos de planejamento de lavra de longo prazo podem apresentar resultados bastante distantes da realidade, levando a baixos índices de aderência entre o material lavrado e o planejado, impactando no valor econômico da operação, podendo até mesmo comprometer a viabilidade de um projeto de mineração.

Nesse sentido, com o objetivo de realizar planos de lavra mais eficazes e aderentes à realidade, esse trabalho buscará caracterizar e minimizar os riscos e incertezas associados às etapas de avaliação de recursos e reservas minerais. Existe um grande número de variáveis que precisam ser consideradas, e nesse estudo será abordado a aplicação das incertezas da variável densidade no planejamento de lavra.

A densidade é uma característica importante da rocha e do minério usada para transformar volumes medidos em toneladas. Ela é um dado essencial tanto para a avaliação dos recursos minerais como para o planejamento de mina. As estimativas de recursos minerais são determinadas como o produto do volume do corpo mineralizado, teor do minério e densidade. Enquanto que nas atividades de planejamento de mina, a estimativa da quantidade de material a ser detonado, carregado, transportado e processado envolve estimativas de massas de minério e estéril que, da mesma forma, são determinados como o produto do volume pela densidade da rocha.

Desse modo, a densidade deve ser considerada como parte fundamental para se obter valores precisos, próximos à realidade de volume e massa. No entanto, observa-se frequentemente que na prática essa variável não é empregada adequadamente nas etapas de estimativas de recurso mineral e planejamento de lavra. Usualmente, um valor médio simples de densidade para um dado domínio litológico é usado a partir de um pequeno número de amostras. Essa metodologia desconsidera a variabilidade da densidade ao longo do depósito que depende de fatores como porosidade, umidade e litologia da rocha (Sinclair e Blackwell, 2002).

O impacto dessa prática pode causar erros de subestimação ou superestimação das toneladas de um depósito mineral, visto que, ao considerar a variação espacial nos valores de densidade, amostras com teores de mineral de interesse diferentes apresentarão valores de densidade distintos para uma mesma litologia do depósito, gerando resultados diferentes para as quantidades de metal no processo de estimativa.



Uma alternativa para tratar esse problema consiste na aplicação de métodos geostatísticos para estimativa da variável densidade, da mesma maneira que essas técnicas são utilizadas na definição de teores em um depósito mineral (Abzalov, 2013). Utilizando essa abordagem, valores de densidade podem ser estabelecidos para cada bloco de um modelo, de forma que a variabilidade desse atributo ao longo do depósito mineral seja representada. Assim, informações mais precisas e acuradas podem ser fornecidas ao planejamento da lavra, de modo que os processos subsequentes do projeto de mineração tais como desenho de mina, sequenciamento de lavra, dimensionamento de equipamentos e desempenho operacional, possam ser melhor avaliados e planejados.

Arseneau (2014) fez um levantamento em 50 relatórios técnicos arquivados publicamente junto ao SEDAR (sistema eletrônico para análise e recuperação de documentos). Nessa pesquisa foi observado que a maioria das empresas calcula suas tonelagens de recursos minerais através da média de todas as medições de densidade. Poucas empresas analisam as informações coletadas de forma a gerar uma estimativa mais robusta da densidade. Arseneau também destaca que a construção de um modelo confiável de densidade requer o desenvolvimento de um bom entendimento de como a densidade varia com os teores e a geologia. Um banco de dados confiável de densidade é essencial na determinação da técnica de modelagem apropriada para minimizar os erros nas declarações de recursos minerais.

Erros no processo de determinação da variável densidade podem levar a problemas significativos na avaliação dos recursos e reservas minerais. Como exemplo, Crawford (2013) destaca que levantamentos realizados em minas de ouro que operam no Canadá e na Austrália mostram que muitas minas nunca atingem as metas de produção que foram estimadas durante a fase de exploração com base na densidade e nos resultados dos ensaios de seus respectivos programas de sondagem. Os principais problemas identificados estão relacionados com a metodologia inadequada para determinação da densidade nessas operações.

Nesse contexto, o presente trabalho investiga os impactos da variável densidade nas etapas do planejamento de mina. Um estudo de caso foi realizado na mina de Serra Azul, localizada no complexo minerador Serra Azul município de Itatiaiuçu – MG, de propriedade da ArcelorMittal, onde foi avaliado a aplicação da variabilidade da densidade ao longo do depósito mineral nas estimativas de recursos e reservas. Os principais estudos que estão sendo realizados nessa região são referentes ao aproveitamento econômico dos itabiritos compactos (IC), que representam um potencial significativo (Vasconcelos et al., 2012).

O banco de dados utilizado consiste em valores de densidades de rochas e teores de ferro das amostras de testemunhos de sondagem provenientes da cava central da mina de Serra Azul. As densidades foram estimadas através da aplicação de ferramentas geostatísticas que permitiram interpolar os dados das amostras para os blocos, dessa maneira, a variabilidade observada nas amostras pôde ser representada. O modelo de blocos resultante dessa etapa serviu como base para os projetos de lavra que compreendem a determinação da superfície de cava final, sequências de extração e criação de planos de produção, contendo projeções dos resultados financeiros.

Os resultados deste cenário foram comparados com os obtidos utilizando valores de densidade constante para a litologia dos itabiritos compactos. A influência dessa metodologia nos trabalhos de reconciliação mássica dos planos de lavra anual da operação de Serra Azul também foi avaliada.

## 1.1 Meta

Analisar a influência da variável densidade nas etapas do planejamento de lavra através de um estudo de caso na mina de ferro de Serra Azul da ArcelorMittal localizada no estado de Minas Gerais, Brasil.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é contribuir na linha de pesquisa de planejamento de lavra mediante investigação das incertezas da variável densidade nas etapas da avaliação de recursos e reservas minerais. Dois cenários utilizando métodos diferentes para incorporação da densidade no planejamento de mina foram avaliados e os seus resultados foram comparados. Para esse propósito, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Avaliar a variabilidade da densidade ao longo do depósito mineral, investigando a sua correlação com as propriedades químicas e físicas da rocha;
- Incorporar a variabilidade da densidade nas etapas de otimização e sequenciamento de lavra, avaliando o seu impacto na estimativa da vida útil da mina e no valor econômico do projeto;
- Analisar a influência da variável densidade nos trabalhos de dimensionamento dos equipamentos de lavra e estimativa dos custos operacionais;
- Investigar o impacto de se considerar a variabilidade da densidade nos trabalhos de reconciliação do planejamento de lavra.

### 1.3 Organização do trabalho

O trabalho está organizado de acordo com os seguintes capítulos:

- O capítulo 1 apresenta uma introdução do tema, juntamente com as metas, objetivos e estrutura do trabalho;
- O capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica dos trabalhos e projetos que forneceram uma fundamentação teórica para condução da pesquisa e do estudo de caso proposto nesta dissertação. São abordados aspectos relativos a aplicação da densidade na definição de recursos e reservas minerais, assim como uma abordagem sobre a influência dessa variável nas etapas do planejamento de lavra;
- O capítulo 3 expõe a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, assim como os dados e recursos que foram utilizados na elaboração desta pesquisa;
- O capítulo 4 apresenta um estudo de caso em que se aplicam duas metodologias para estimativas de recursos e reservas minerais. A primeira utiliza a média das amostras de densidade, enquanto a segunda utiliza a densidade estimada bloco a bloco por krigagem ordinária;
- O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas no estudo de caso e às recomendações.

## CAPÍTULO 2 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Neste capítulo foram referenciados trabalhos e pesquisas que serviram de base para o desenvolvimento do tema em questão, discutindo as definições existentes de densidade, mapeando os principais métodos e teorias envolvidas na avaliação geoestatística da variável densidade, e ainda, abordando os processos e conceitos do planejamento de lavra que serão aplicados no estudo de caso desta dissertação.

### 2.1 Densidade

A densidade é uma propriedade básica de um material e é definida como a relação entre a massa e o volume que ele ocupa. Embora a definição seja simples, na indústria da mineração, a densidade pode ser expressa de várias maneiras e um cuidado deve ser tomado para garantir que a medição correta seja usada (Lipton, 2001). As seguintes terminologias podem ser destacadas:

#### *Densidade específica*

É definida como uma proporção ou quantidade de massa (m) por unidade de volume (v) dada pela expressão 1:

$$\rho_{\text{específica}} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (1)$$

Corresponde a massa que tem um determinado volume, expresso em unidades como (g/cm<sup>3</sup>, kg/dm<sup>3</sup>, t/m<sup>3</sup>) essa medida de densidade não considera a porosidade das amostras.

#### *Densidade Relativa*

A relação entre a densidade do material e a densidade da água a 4°C dada pela expressão 2:

$$\rho_{\text{relativa}} = \frac{\text{massa da amostra}_v}{\text{massa de água}_v} \quad (2)$$

Densidade relativa é uma grandeza adimensional,

### *Densidade Aparente*

É definida pela relação entre a massa e o volume que contém essa massa levando em consideração os possíveis espaços vazios presentes nesse volume. Duas medidas podem ser realizadas para essa propriedade: Densidade úmida quando esses espaços estão preenchidos por água e densidade seca quando a umidade natural é excluída:

$$\rho_{aparente} = \frac{massa}{volume\ dos\ vazios + volume\ do\ sólido} \quad (3)$$

Expresso em unidades como (g/cm<sup>3</sup>, kg/dm<sup>3</sup>, t/m<sup>3</sup>).

A densidade de maior interesse para a indústria de mineração é a densidade aparente e consequentemente esta será a terminologia adotada nesse estudo. Como simplificação apenas o termo densidade será mencionado nesse trabalho. A definição quanto a presença ou não de água nos poros será citado dependendo de cada situação.

A densidade úmida é considerada no planejamento de mina para realização de estimativas de tonelagem de rocha a ser transportada, estocada e processada, enquanto que a densidade seca é aplicada na avaliação de recursos e reservas sendo incorporada na conversão volume-massa ao se estimar a tonelagem de minério e determinar a quantidade de metal contido.

Lipton (2001), ressalta que a densidade pode ser altamente variável, de modo que a coleta de dados de densidade e a extrapolação desses dados em todo o depósito devem ser controlados por um conhecimento sólido da geologia do depósito. Os fatores que influenciam na determinação da densidade de rochas foram estudados por Dias (2012) e Lisboa (2018). Esses autores destacam que a densidade de rochas varia de acordo com sua composição mineralógica, sobretudo pela densidade individual de cada mineral constituinte da rocha. Outros fatores que influenciam essas variações são porosidade, umidade e variações dos constituintes da rocha.

Existe uma variedade de métodos para estimar a densidade. As principais técnicas são discutidas em Lisboa (2018) sendo divididas em três seções:

- Métodos recomendados para materiais compactos - realizados em amostras de testemunhos de sondagem. O mais comum é baseado no princípio de Arquimedes (princípio do deslocamento da água). Outra técnica realizada são as medições realizadas através de paquímetro (*Caliper method*);
- Métodos recomendados para materiais friáveis - realizados em rochas pouco competentes geomecanicamente e que não permitem a obtenção de amostras por testemunhos de sondagem. Os principais métodos são a técnica do frasco de areia, técnica do meio denso por preenchimento de água e a técnica do gabarito retangular;

- Métodos indiretos de medição - realizados a partir de proporção de minerais em rochas e densidades conhecidas. Método conhecido como estequiométrico ou cálculo normativo mineralógico. Outras técnicas realizadas são perfilagem geofísica Gama-Gama, equação de correlação entre densidade e teor do mineral minério de interesse.

Existem variações do método que tem como base o princípio de Arquimedes (deslocamento da água). Essas variações são descritas em Lipton (2001) e dependem das características físicas da amostra e do tipo de equipamento de pesagem disponível. As amostras devem ser competentes e não absorver água para realização dessa técnica. No caso de amostras de rochas porosas, antes de serem imergidas na água elas devem ser impermeabilizadas com substâncias como cera de parafina ou cera de abelha (*beeswax*) ou embalada a vácuo em plástico, prevenindo a entrada de água na amostra.

Dentre as técnicas mencionadas acima, quatro foram examinadas por Crawford (2013) usando sete tipos diferentes de rochas. Esses métodos foram o método de medição direta do volume por paquímetro, método instantâneo de imersão em água, método de imersão com cera e imersão embalada a vácuo em plástico. Segundo Crawford, o resultado dos testes determinou o método de imersão em cera como o método mais preciso. A capacidade das ceras líquidas de se moldarem intimamente a superfície da amostra, resultou em uma estimativa mais precisa do volume da amostra. Segundo Crawford esse método funciona bem, já que o revestimento de cera veda os poros externos da rocha e impede a infiltração da água nos poros e a absorção na amostra de rocha.

Outro importante trabalho foi realizado por Makhuvha, Arellano e Harney (2014), que estudaram as formas de determinação da densidade para diferentes tipos de depósitos e destacam que não há uma metodologia preferencial única para aplicar. Cada corpo de minério é diferente e pode exigir uma abordagem um pouco diferente para medir a densidade. A seleção de um método apropriado depende do tipo de depósito mineral e das características de material associadas para as diversas litologias. Lipton, (2001) recomenda o uso de pelo menos dois métodos para obter resultados confiáveis.

No entanto, Hopper (2018) aponta os métodos de determinação de densidade como bastante trabalhosos e propensos a possíveis erros humanos devido sua natureza manual, existindo também a necessidade de garantir a secagem completa das amostras antes da medição, o que, no caso de amostras grandes, podem levar um tempo significativo e ser difícil para o controle de qualidade.

Em contrapartida, Hopper (2018) propõe estimar a densidade seca em furos de sonda utilizando medições de densidade úmida (*in-situ*) e medições de porosidade por ressonância magnética. A combinação dessas duas medições pode ser usada para estimar a densidade seca para estimativa de recursos minerais sem a necessidade do testemunho de sondagem. A densidade úmida pode ser medida com precisão a partir de perfilagem geofísica gama-gama em furos de sondagem, enquanto a ressonância magnética de furos de sonda fornece medições da quantidade de água presentes nas rochas por litologia.

Em síntese, fundamentado pelas referências descritas acima, é essencial obter valores precisos para a variável densidade, visto que esses dados serão aplicados nas etapas de avaliação de recursos e reservas minerais. É fundamental o conhecimento das características do depósito para seleção do método mais apropriado. O estudo de caso desenvolvido para esse trabalho na mina de Serra Azul definiu valores de densidade para amostras de itabirito compacto utilizando o método de imersão em água com cera de

parafina. Determinação indireta de novos valores de densidade foram feitos por meio da correlação existente entre densidade e o teor de Ferro. Informações detalhadas da metodologia aplicada nesse estudo serão apresentados no capítulo 3.

## 2.2 Estimativas geoestatísticas para a variável densidade

Os métodos geoestatísticos foram desenvolvidos no início dos anos 1960, Matheron (1963) Journel e Huijbregts (1978), fundamentado na teoria das variáveis regionalizadas que busca descrever fenômenos naturais como variações espaciais e ou temporais.

Esses métodos, são rotineiramente utilizados para a estimativa de teores de recursos minerais. Os métodos geoestatísticos visam a criação de modelos 3D não enviesados das variáveis estudadas, geralmente teores de metais, com estimativa quantitativa das incertezas do modelo (erros de estimação) para desenvolver uma classificação não subjetiva de recursos minerais Blackwell (1998) Abzalov (2013). No entanto, a aplicação das técnicas geoestatísticas para a modelagem de valores de densidades de rochas atualmente não é tão comum quanto para a estimativa dos teores de minério.

Na prática, a maioria dos projetos de mineração utilizam um valor de densidade média simples para os domínios de litologia na avaliação de recursos minerais. Embora esta estimativa possa funcionar para alguns tipos de depósito, essa simplificação pode causar sérios erros nas estimativas de tonelagem levando a uma subestimação ou superestimação do conteúdo metálico Arseneau (2014).

Uma análise feita por Makhuvha et al. (2014), sugere que, idealmente, as medições de densidade sejam determinadas para todas as amostras, sendo assim, tratada de maneira semelhante aos teores. Dessa forma, os resultados das medições podem ser utilizados para estimar valores de densidade para cada bloco no modelo de recursos, ao invés de aplicar valores médios aos tipos litológicos. Sob mesmo ponto de vista, Vallé e Coté (1992 apud Dias, 2012), em um guia para avaliação de depósitos de ouro, sugere amostragem sistemática da densidade para realização dos métodos de estimativa.

Em decorrência da aplicação dessa metodologia, um modelo de densidade pode ser obtido por meio da interpolação dos dados utilizando as técnicas geoestatísticas como por exemplo a Krigagem. Esse processo pode ser evidenciado no trabalho desenvolvido por Laine (2003), onde, em um estudo de caso, foi utilizado a técnica da Krigagem para estimar a densidade de um depósito de níquel localizado na Finlândia. Esse estudo revelou que o uso da densidade média para aquele depósito levou a uma subestimação da quantidade de metal. Ao comparar o modelo de densidade krigado com aquele onde os valores de densidade são constantes, as quantidades de níquel contidas nos blocos foram maiores.

Abordagem semelhante para o tratamento da densidade foram desenvolvidos nos trabalhos de Madani et al. (1996) em um depósito de barita no Iran, Dias (2012) em um depósito de cobre no estado do Pará, e Lisboa (2018) em um depósito de ferro do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, Brasil.

Em todos os trabalhos mencionados acima as densidades foram estimadas por krigagem ordinária (KO), que é uma técnica de regressão linear para minimizar a variância envolvida no processo de estimação definida a partir de um modelo para correlação

espacial, Journel e Huijbregts (1992 apud Laine, 2003). A correlação espacial é geralmente descrita e modelada pelo cálculo de variogramas experimentais:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (x_i - y_i)^2 \quad (4)$$

Onde  $\{(x_i, y_i | i = 1 \dots N)\}$  são os pares de pontos separados por uma distância  $h$  numa orientação específica.

Outra técnica geoestatística que pode ser utilizada para estimar a variável densidade no modelo de blocos é a cokrigagem (Salinas, Emery 2012). De acordo com Dias (2012) esse procedimento é utilizado para situações em que a densidade não é amostrada em todos os pontos onde foram amostrados o atributo de interesse (banco de dados heterotópico), e caso exista uma correlação entre o atributo e a densidade.

Diferentes cenários para a estimativa da densidade em um modelo de blocos foram investigados no trabalho de Lisboa (2018), dentre eles a cokrigagem da variável densidade em função da variável teor de ferro. Os demais cenários avaliados envolveram os métodos da krigagem ordinária apenas com as densidades do banco de dados, uso da média e KO usando dados adicionais de densidade gerados por regressão ou por cálculo normativo. Ao comparar os resultados desses diferentes métodos foi concluído que a quantidade de dados disponíveis de densidade e como elas estão distribuídas espacialmente afeta a qualidade dos resultados e principalmente a quantidade de blocos estimados. O melhor percentual de blocos estimado do modelo foi encontrado para os métodos KO que usam regressão linear e cálculo normativo para gerar indiretamente novos dados. Essas técnicas proporcionam uma melhora na distribuição espacial fazendo com que o número de blocos a serem estimados aumente em função das regras da definição das vizinhanças de estimativa. Demais métodos obtiveram baixo número de blocos estimados devido principalmente ao pequeno número de valores medidos de densidade disponíveis.

Paralelamente a essa situação Lisboa (2018) analisou duas formas para conversão de teor em tonelagem, método direto e indireto. Enquanto o método indireto estima separadamente as variáveis teor e densidade nos blocos para realizar posteriormente o produto entre elas (acumulação), no método direto as estimativas das variáveis acumuladas (produto do teor pela densidade) são feitas diretamente nos blocos. Ambos os métodos forneceram resultados próximos, indicando que qualquer técnica pode ser utilizada.

Uma importante abordagem foi apresentada no trabalho de Dias (2012), onde a densidade foi considerada na regularização de amostras e aplicada como variável acumulada nas estimativas de teores e na determinação de um modelo de densidade interpolado. Impactos dessa metodologia foram avaliados nos trabalhos de reconciliação dos planos de lavra que indicaram uma melhor aderência dos teores de metal e diferenças relativamente grandes nas massas lavradas quando comparado ao modelo que considera densidade média. O autor ainda aponta essa prática como a mais adequada para o tratamento da variável densidade na avaliação de depósitos em que existe uma variabilidade desse atributo.

Outra interessante aplicação foi levantada por Abzalvov (2013), onde foi proposto utilização do modelo de densidade de rochas estimado como uma abordagem suportada



matematicamente para a escolha de grids de amostragem ideais para amostras de densidade. O autor ressalta a necessidade de definir grids de amostragem de densidade ótimas tanto para a definição dos recursos e reservas quanto para o propósito de controle de teores. Os estudos de caso apresentados mostraram que os erros de estimativa das densidades de rochas são consistentemente menores que os estimados para os teores de metais, indicando que a estimativa precisa de densidades de rochas requer consideravelmente menos amostras do que as necessárias para a modelagem dos teores de metal nos mesmos depósitos.

## 2.3 Planejamento de lavra e influência da variável densidade

No contexto do planejamento de lavra, as incertezas da variável densidade podem afetar significativamente os projetos mineiros nos aspectos técnicos e financeiros. Atividades relacionadas a definição de reservas minerais como desenho de mina, sequenciamento de lavra e dimensionamento de equipamentos são diretamente afetadas por esse atributo. Nessa seção serão discutidos conceitos e processos que utilizam informações da variável densidade como dado de entrada.

### 2.3.1 Planejamento de lavra convencional

Inicialmente, é interessante ressaltar que desde a década de 60 várias técnicas de otimização e sequenciamento de cavas a céu-aberto vem sendo desenvolvidas. De acordo com Curi (2014) algoritmos específicos para a mineração foram sendo desenvolvidos e aperfeiçoados desde então, em razão, principalmente, da evolução da informática e da Geomatemática.

A definição da geometria ótima de minas a céu aberto objetiva encontrar máxima lucratividade e maximização do VPL. Lerchs e Grossman (1965) apresentaram um algoritmo baseado na teoria dos grafos para resolver esse problema, garantindo encontrar uma solução ótima para os limites de cava a céu aberto. O algoritmo Lerchs e Grossman obteve grande aceitação na indústria mineral e é a técnica padrão utilizada em grande parte dos softwares de planejamento de mina.

Esse algoritmo utiliza o modelo de blocos para realizar o processo de otimização. Baseado nos teores estimados dos blocos, o valor econômico de cada unidade é determinado a partir de uma função benefício que pode ser definida simplesmente pela diferença entre receitas e custos:

$$\textit{Função Benefício} = \textit{Receitas} - \textit{Custos} \quad (5)$$

A receitas são provenientes da venda do minério recuperado em cada bloco, enquanto os custos são referentes às etapas de lavra (perfuração, desmonte, carregamento e transporte) e beneficiamento. Custos indiretos envolvidos no empreendimento mineiro também serão contabilizados na valorização dos blocos como por exemplo salários, custos administrativos, manutenção, etc.

Entretanto, existem muitas incertezas no processo de determinação dos valores dos blocos, desde que eles são calculados em uma função do preço do minério e dos custos de processo e de lavra que sofrem mudanças com o passar do tempo. Soma-se ainda as incertezas associadas aos teores e densidade dos blocos, que estão relacionados com a quantidade de metal, impactando diretamente no benefício de cada bloco a ser otimizado. Changanane (2017) fornece uma revisão bibliográfica sobre o assunto, onde os principais parâmetros envolvidos na determinação da função benefício são discutidos.

Após definição da cava ótima, a sequência de lavra e de desenvolvimento da mina é definida. Flores (2008) ressalta que existem numerosas formas de se lavar os recursos dentro da cava para atingir o pit final, o que levaria a diferentes cenários econômicos. Em face disso, técnicas de parametrização dos valores econômicos dos blocos são utilizadas para obter uma série de cavas intermediárias ao pit final, chamados de pits aninhadas (*nested pitshells*). A geração dos pits aninhados consiste em variar o preço de venda, os custos ou os teores de corte gradualmente. Esses pits são agrupados formando as fases ou pushbacks, Whittle (1988 apud Quigley, 2016). A definição desses pushbacks é fundamental para orientar a sequência de extração a ser realizada de forma que o VPL do projeto seja maximizado. Essa sequência de extração determina a vida útil do projeto.

Com o objetivo de atender às capacidades operacionais, uma série de restrições relacionadas à programação de produção da mina precisam ser atendidas. As principais considerações foram apontadas por Flores (2008) e estão listados abaixo:

- Capacidades de mina e usina de beneficiamento;
- Restrições geotécnicas;
- Restrições físicas de lavra: precedências de blocos;
- Alimentação constante do minério às unidades de processamento;
- Restrições referentes a mistura de minérios;
- Restrições relacionadas às pilhas de estoque.

Existem várias técnicas de programação matemática que são utilizadas para encontrar soluções ótimas para esse complexo problema. Essas técnicas visam a determinação da produção de minério, estéril e quantidade de metal, em um determinado período de tempo, de forma a otimizar os fluxos de caixa descontados enquanto as capacidades operacionais são atendidas Quigley (2016).

Uma das ferramentas mais utilizadas no mercado para gerar soluções a esses problemas é o software *Whittle*. Esse software usa o algoritmo de Lerchs-Grossman para o processo de otimização de cava e oferece dois algoritmos para definir a sequência de extração da mina, o primeiro conhecido como Milawa e o segundo chamado de Fixed Lead. O algoritmo Milawa pode ser configurado de duas formas, uma com o objetivo de encontrar uma solução que maximize o VPL (Milawa NPV) e uma segunda configuração que visa maximizar as instalações de produção, otimizando a extração dos recursos mineiros (Milawa balance). Já no algoritmo Fixed lead, devem ser especificados o número mínimo de bancos a serem lavrados por pushback antes de passar para o seguinte, Delgado (2009).

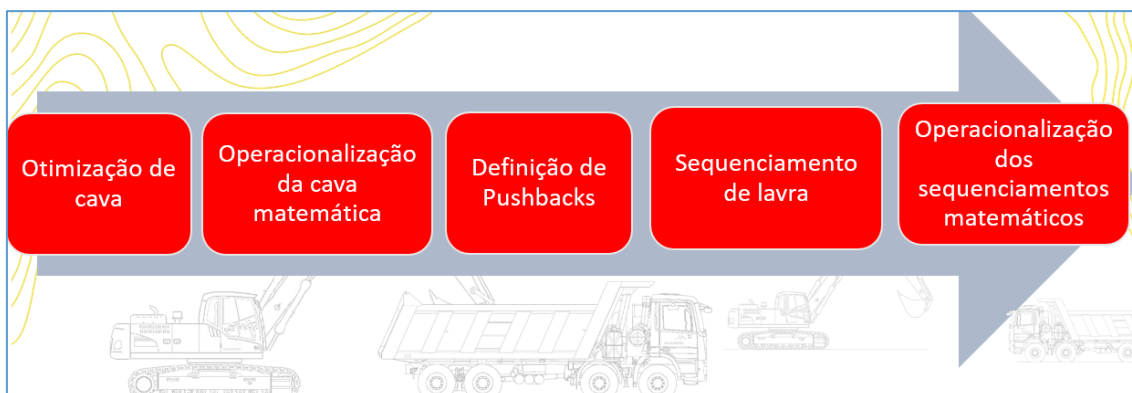
Uma vez definida a sequência de extração ótima para o empreendimento, a etapa de operacionalização desses cenários é essencial para o desenvolvimento de planos de lavra realistas e exequíveis operacionalmente. Segundo Eccles (2013) os algoritmos otimizadores devem auxiliar os engenheiros a entender o valor potencial dos projetos, no entanto, para realmente avaliar a viabilidade econômica de um empreendimento mineral,

superfícies de lavra operacionalizadas devem ser utilizadas. As seguintes características são destacadas por Eccles (2013) para a elaboração de um bom desenho de mina:

- Rampas de acesso as bancadas;
- Tamanho mínimo para as praças de serviço;
- Consideração de acessos para as fases subsequentes;
- Adesão aos critérios geotécnicos;
- Tamanho mínimo para fundo de cava.

Ao desconsiderar os parâmetros acima mencionados, planos de lavra excessivamente otimistas estarão sendo reportados, visto que, desvios entre as massas de minério e estéril obtidas pelas cavas matemática e operacionalizada podem existir.

Assim sendo, a sequência de operações descritas até aqui, caracterizadas pela determinação de cava final seguido pela definição de pushbacks e sequenciamento da lavra, é bem difundida na indústria mineral e consiste na base da maioria dos pacotes de softwares comerciais de planejamento de mina, (Figura 2.1). Segundo Dagdelen (2001), Whittle (2004), Osaloon et al. (2008), esse conjunto de técnicas pode ser chamado como técnicas convencionais para o planejamento de lavra.



**Figura 2.1:** Etapas do planejamento de lavra convencional

No entanto, sabe-se que deficiências importantes existem nessa metodologia que acarreta grandes riscos ao empreendimento. A principal desvantagem dessa metodologia segundo Goodfellow (2014) é o fato dela analisar as etapas de forma sequencial e não simultânea. Essa crítica também é ressaltada por Farmer (2016) visto que, ao analisar cada etapa planejamento de mina separadamente, cada fase envolverá sua própria otimização individual, comprometendo a otimização global do sistema. Outro aspecto apontado por Souza (2016) como nocivo ao processo é referente a suposição de que todos os blocos devem ser extraídos dentro do mesmo período na definição dos limites de cava final, ignorando as restrições operacionais e a variação do valor econômico dos blocos com o tempo. O fato das abordagens convencionais não incorporarem as incertezas geológicas nas etapas de planejamento de lavra também é apontado por Dimitrakopoulos (2011) como fonte de risco ao planejamento de lavra podendo levar a expectativas de produção irrealistas.

Os avanços dos recursos tecnológicos e computacionais, alinhados com o desenvolvimento de estudos que abordam conceitos estocásticos para resolução desses

problemas tem proporcionado avanços na elaboração de algoritmos mais complexos. Centros de pesquisas estão focando no desenvolvimento dessas técnicas, incorporando nos softwares modelos estocásticos de planejamento de mina baseados em conceitos probabilísticos. Torres et al. (2018) revisaram as principais técnicas referentes ao planejamento de mina convencional e estocástico, onde as vantagens e desvantagens referentes a essas metodologias são apresentadas e discutidas. Os mencionados autores se mostraram otimistas com relação ao desenvolvimento da metodologia estocástica e com a futura aplicabilidade operacional dessas técnicas na indústria mineral.

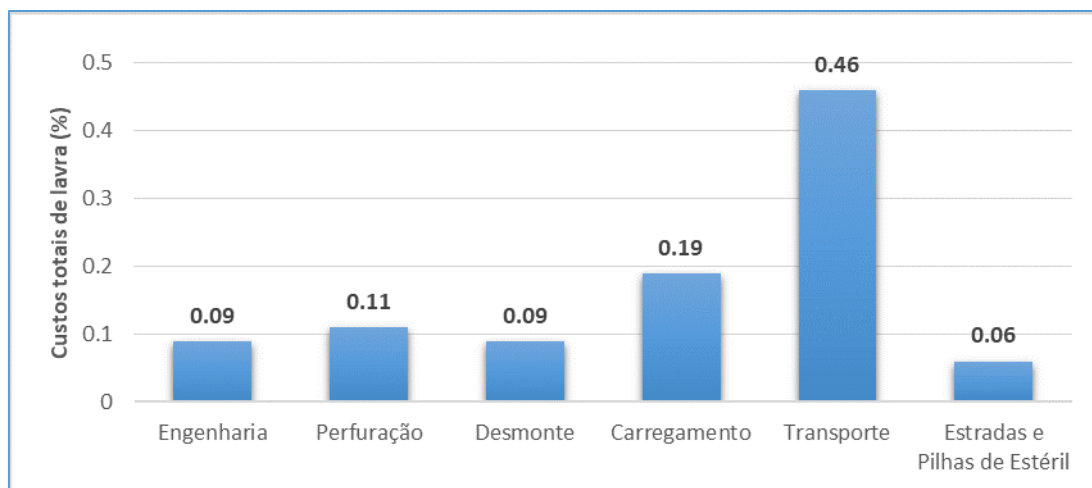
Para o desenvolvimento do estudo de caso deste trabalho, a metodologia de planejamento de mina convencional é utilizada. O impacto de se considerar ou não a variabilidade da densidade na definição dos valores aos blocos é avaliada e, conseqüentemente, sua influência na definição dos limites da cava ótima e no sequenciamento de lavra é investigado. Como ferramentas computacionais foram utilizados os softwares *Whittle* 4.5, *Surpac* 6.7 e *MineSched* 9.0. Maiores informações a respeito da metodologia aplicada neste estudo são apresentadas na seção 3.3.

### 2.3.2 Dimensionamento de frota

A escolha da frota ideal dos equipamentos de mina e o seu correto dimensionamento são fatores chave para a otimização das operações de lavra à céu aberto, proporcionando o aumento da produtividade e a minimização do tempo de produção e custos em um projeto mineral. Os tipos e números de equipamentos devem estar vinculados com o sequenciamento de produção determinado pelo planejamento de mina, atendendo as múltiplas origens e destinos, além das quantidades de material minério e estéril por período que devem ser perfurados, desmontados, carregados e transportados.

De acordo com Borges (2013) os elevados gastos envolvidos na operação de uma mina se devem principalmente aos altos custos de capital na aquisição dos equipamentos e alto custo operacional referentes as despesas com mão de obra, combustível e manutenção. Segundo o autor, com um correto dimensionamento de frota de equipamentos os recursos financeiros e humanos da operação de mina podem ser melhor alocados e otimizados, melhorando o desempenho econômico do empreendimento, reduzindo o tempo de retorno do capital investido.

Em um trabalho realizado por Bozorgebrahimi et al (2003) foram discutidos e investigadas as principais variáveis que influenciam na seleção e dimensionamento dos equipamentos, quantificando seus impactos nas operações de mina. O tipo, tamanho e quantidade de equipamentos são considerações importantes e fortemente interdependentes. Para os equipamentos de carga por exemplo, o aumento do tamanho do equipamento aumenta a sua produtividade mas diminui a sua flexibilidade e seletividade na lavra, aumentando a diluição. Ademais, o tamanho dos equipamentos de transporte deve ser compatível com o tamanho dos equipamentos de carga e a sua escolha influencia diretamente o layout e o design da mina. Bozorgebrahimi et al (2003) destacam também que os custos de transporte são geralmente o dobro do custo de carregamento, conseqüentemente, qualquer melhoria e otimização que possa ser feito na etapa de dimensionamento desses equipamentos resultará em economias substanciais. A Figura 2.2 mostra a distribuição percentual desses custos nas operações de lavra a céu aberto.



**Figura 2.2:** Distribuição percentual dos custos de mina. Fonte: Bozorgebrahimi et al, 2003

Existem vários estudos que apresentam técnicas e métodos para encontrar a melhor solução para a seleção e dimensionamento de frota, minimizando os custos e proporcionando uma melhor combinação entre os equipamentos de carga e transporte. Uma revisão das principais abordagens e modelos desenvolvidos foi descrito por Burt e Caccetta (2014), onde são descritas soluções baseadas desde análises mais simples que incorporam análises de VPL e custo do ciclo de vida do equipamento, a soluções mais complexas com uso de técnicas heurísticas, programação linear, e técnicas probabilísticas que consideram as incertezas dos parâmetros operacionais.

Um modelo de dimensionamento de equipamentos baseado nos indicadores de produção foi desenvolvido por Racia (2016). Nesse modelo, os indicadores de produtividade, taxas de utilização, disponibilidade, eficiência de operação e horas totais programadas são utilizados para determinar a produção da frota e o número de equipamentos requeridos para cumprir o plano de produção. O autor destaca que a estimativa desses indicadores de produção deve ser fundamentada em estudos de campo, dados históricos e manuais de fabricantes dos equipamentos, de maneira a proporcionar uma maior aderência entre as estimativas calculadas e a produção realizada. Essa metodologia foi a aplicada na estimativa de frota da mina de Serra Azul desenvolvida neste trabalho. O desdobramento dos cálculos, premissas e formulas utilizadas nessa estimativa dos equipamentos foram abordados diretamente na aplicação do estudo de caso apresentado na seção 4.

O dimensionamento de frota desenvolvido neste trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da variabilidade do atributo densidade nesta etapa do planejamento de mina. Modificações nos indicadores de produtividade e na quantidade de equipamentos podem ocorrer, haja vista que as estimativas das massas de rocha a serem manuseadas são determinadas como o produto do volume e da densidade da rocha. Uma demonstração desse impacto pode ser exemplificada na primeira etapa de um ciclo de carregamento, onde o número de passes para encher o equipamento de transporte é influenciado pelo volume da caçamba do equipamento de carga, que é dependente da densidade solta do material a ser carregado.

De acordo com Gontijo (2009 apud Junior, 2012), para se estabelecer um bom equilíbrio um número de passes entre três a cinco deve ser considerado. Um número maior de passes eleva o tempo necessário para encher a caçamba do caminhão, podendo gerar filas, necessidade de uma maior frota de caminhões para cumprir a produção e consequente

aumento dos custos. Em contrapartida, um número menor de passes diminui o tempo de carregamento, no entanto, o equipamento de carga pode ficar mais tempo ocioso. Dessa forma, como a densidade impacta no número de passes, conseqüentemente ela impactará no tempo de carregamento dos equipamentos de carga, assim como no tempo ciclo dos equipamentos de transporte, que também é composto pelo tempo de carga, bem como os tempos de descarga e de manobras.

Portanto, a aplicação das incertezas da variável densidade na estimativa da frota de equipamentos de mina contribui para realização de um correto dimensionamento garantindo uma maior aderência ao plano de lavra colaborando também para realização de cálculos mais assertivos dos custos operacionais. Erros nessa etapa do planejamento de mina podem conduzir a uma superestimação ou subestimação dos equipamentos necessários podendo impactar na viabilidade do projeto.

### 2.3.3 Reconciliação

De acordo com Sinclair e Blackwell (2002) a validade prática de qualquer técnica de estimativa de recursos e reservas pode ser resumida em uma comparação das estimativas realizadas com a produção real. Os autores destacam que esse procedimento é geralmente referido como um estudo de reconciliação.

Segundo Câmara et al. (2014), a reconciliação é um processo amplo de verificação dos resultados de produção contra os resultados previstos a partir de modelos, sendo uma importante ferramenta para auxiliar na verificação do grau de confiabilidade dos modelos de blocos estimados, permitindo definir medidas corretivas para otimizar a produção e o planejamento de lavra. No entanto, para que o processo de reconciliação possa ser realizado de maneira fidedigna, é importante que as ferramentas utilizadas para medir os resultados da produção real, tanto na lavra quanto na usina de beneficiamento, sejam eficazes e confiáveis, permitindo o correto gerenciamento das informações. Nesse ponto de vista, El Hajj et al (2013) ressaltam que a confiabilidade dos resultados de reconciliação depende da representatividade das amostras que os geraram, indicando que erros nas práticas de amostragens podem levar a resultados de reconciliação ilusórios.

A importância da reconciliação como um método para calibração das estimativas e modelos é abordado em um guia feito por Morley (2014). Segundo o autor, a reconciliação aponta o quão aderente é um modelo para, em seguida, os profissionais de mineração determinarem quais ações são necessárias para que as previsões sejam calibradas e melhoradas continuamente.

As principais técnicas utilizadas no setor da mineração para avaliar a reconciliação de tonelagens, teores e a quantidade de metal foram descritas por Richard (2015). O autor chama a atenção para as minerações que apresentam frequentemente baixos resultados, indicando discrepâncias que podem ser originadas por diversos problemas como:

- Utilização de metodologia inadequada para estimativa dos recursos minerais;
- Perda e diluição na lavra;
- Banco de dados não representativo ou enviesado;
- Controle de qualidade ineficiente;

- Premissas inadequadas referentes a seletividade da lavra; e
- Incorreta aplicação de valores de densidade.

Parker (2014) aponta a falta de conhecimento do corpo mineral e falhas na execução do plano de lavra como fatores mais críticos para pobres reconciliações na maioria das minas. Em muitos estudos de casos analisados pelo autor, a realização de campanhas de sondagem de curto-prazo se fez necessária para aumentar o conhecimento geológico do depósito e melhorar a confiabilidade gerada nas previsões de lavra. Adicionalmente, sugere que metas de reconciliação sejam aplicadas como um indicador-chave de desempenho para minas bem executadas.

Estratégias para minimizar os problemas de reconciliação entre a mina e a usina também são discutidas por Pittard (2014). O autor apresenta uma série de técnicas que permite identificar as causas da variabilidade, baseada em amostragem precisa e avaliações estatísticas que permitem o fornecimento de dados confiáveis e de qualidade. Através dessa metodologia decisões proativas podem ser tomadas de maneira minimizar os desvios do processo de reconciliação, possibilitando redução ou eliminação de muitos custos e riscos considerados por Pittard como invisíveis.

Diante das considerações descritas nessa seção é notável a importância da reconciliação como uma ferramenta de melhoria da cadeia de valor mineral. Assim, com o objetivo de avaliar o desempenho das estimativas geradas para a variável densidade neste trabalho, são realizadas reconciliações das massas previstas para a litologia itabirito compacto nos planos de lavra de longo-prazo com as massas lavradas para as mesmas áreas nos últimos cinco anos no depósito mineral de Serra Azul.

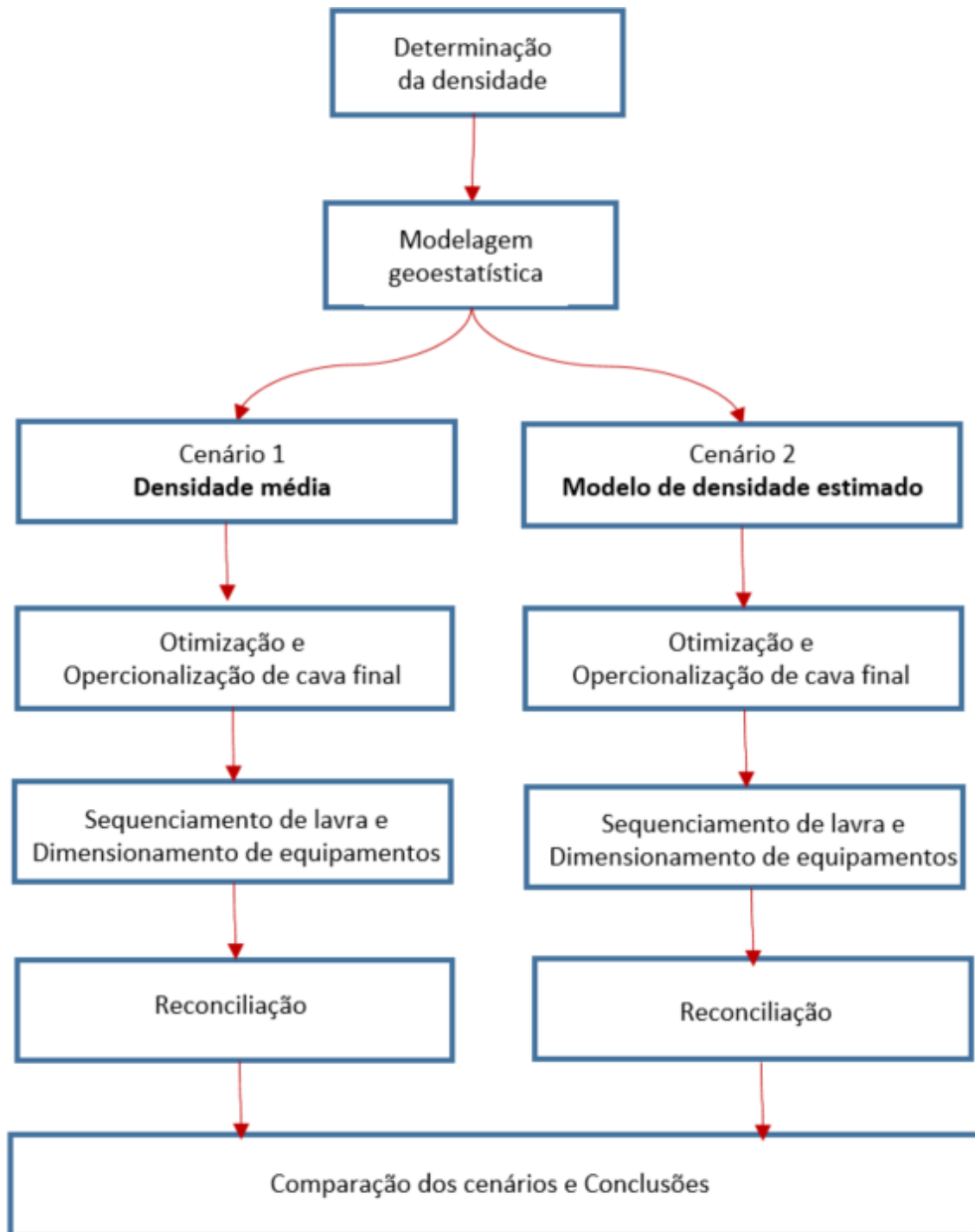
### **CAPÍTULO 3 : METODOLOGIA**

---

Com o objetivo de avaliar o impacto da variável densidade nas etapas do planejamento de lavra, dois cenários foram estudados e os seus efeitos na avaliação econômica do empreendimento de mineração foram investigados.

No primeiro cenário a avaliação dos Recursos e Reservas minerais foi realizada utilizando um valor de densidade média em domínios de litologia do depósito mineral estudado. Em contrapartida, a metodologia utilizada para o segundo cenário consiste na aplicação de um modelo de densidade estimado, por meio da utilização de krigagem ordinária, para posterior conversão de volumes em massa e definições dos Recursos e Reservas.

Informações de densidade provenientes da mina de ferro de Serra Azul da ArcelorMittal foram usadas para um estudo de caso. A litologia trabalhada nesse estudo é a do itabirito compacto. As principais etapas para o desenvolvimento desse trabalho e as suas metodologias são apresentadas no fluxograma da Figura 3.1 e estão descritos nos subitens a seguir.



**Figura 3.1:** Fluxograma apresentando a metodologia e as etapas realizadas no trabalho.



### 3.1 Determinação da densidade

Os ensaios de densidade foram executados para todos os furos da campanha de sondagem 2017-2018 realizada na Mina de Serra Azul. Optou-se por escolher duas amostras de itabiritos compactos por furo, com cerca de 20 cm de comprimento, de forma a representar qualitativamente os itabiritos definidos para o depósito.

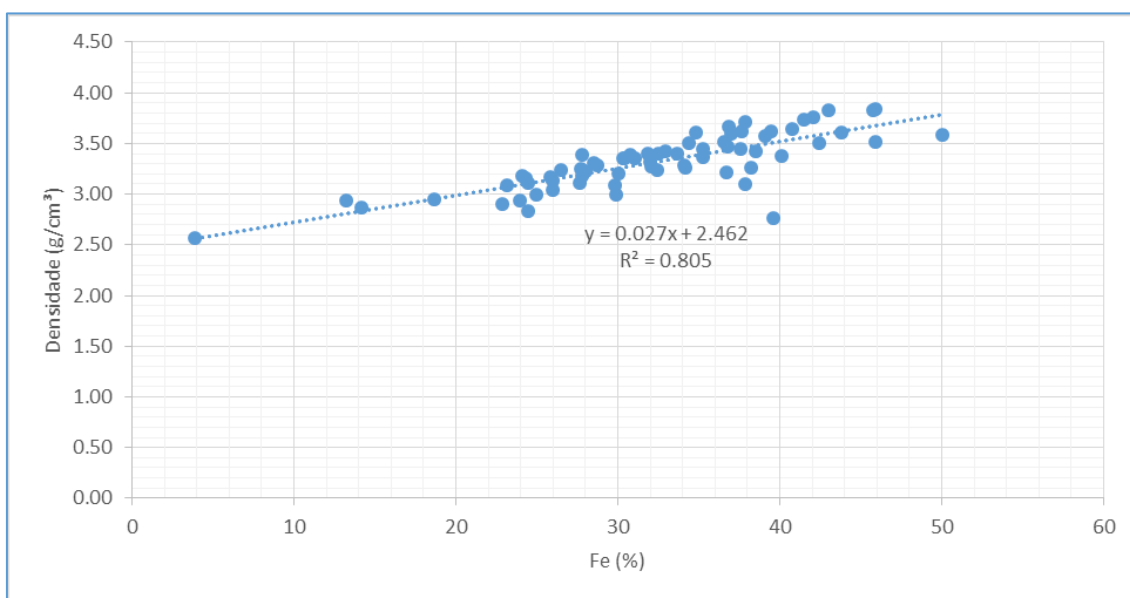
O procedimento foi baseado no trabalho de Lipton (2001) “*Water Displacement Method 4*”. Neste método, a densidade é calculada a partir da relação entre o peso da amostra e o deslocamento de água provocado pelo mergulho da amostra em recipiente graduado. Neste caso a massa  $m$  é determinada numa balança de precisão e o volume  $V$  da amostra do testemunho – amostra impermeabilizada com parafina - é determinado através de deslocamento de água em proveta. A Figura 3.2 mostra os registros fotográficos referentes aos procedimentos dos ensaios de densidade.



**Figura 3.2:** Procedimentos de ensaios de densidade: a) materiais necessários (parafina certificada, balança calibrada/nivelada e estufa na temperatura); b) secagem em estufa; c) parafina certificada; d) selagem das amostras com parafina; e) esquema de pesagem das amostras seladas em água; f) pesagem das amostras seladas em água

Em depósitos que possuem associações de minerais relativamente simples e baixa porosidade, como o depósito de Serra Azul, correlações fortes são comumente observadas entre a densidade e a química das amostras. De acordo com Lipton (2003) isto é esperado, uma vez que os minerais do minério são frequentemente de densidade muito maior do que os minerais de ganga na rocha. Dessa forma, as correlações podem ser suficientemente fortes para permitir que a densidade seja estimada diretamente a partir de valores das amostras. Portanto, a determinação indireta de novos valores de densidade foi feita para a litologia IC por meio da correlação existente entre densidade e o teor de Ferro no depósito da mina de Serra Azul.

A correlação existente entre a densidade e o teor de Fe para a litologia IC é ilustrada na Figura 3.3 baseada no número de 69 amostras.



**Figura 3.3:** Correlação / Regressão linear entre os teores de Fe e a densidade para o Itabirito Compacto (69 amostras)

Existe uma correlação clara entre densidade e teor de Fe, o que permitiu a atribuição de densidades a todas as amostras em que a análise química foi realizada, mas a densidade não foi amostrada. Assim, a seguinte equação de regressão será utilizada para calcular valores de densidade a partir dos teores de Fe:

$$Densidade = 0.027 * Fe\% + 2.462 \quad (6)$$

Todos os dados foram exportados e implementados em um pacote de software de modelagem padrão do setor (*Vulcan*) e foram utilizados na avaliação geoestatística, gerando um modelo de densidade estimado.

### 3.2 Modelagem geoestatística

O Modelo de blocos fornecido pela ArcelorMittal para o desenvolvimento do trabalho já possui informações referentes as estimativas da variável teor de Ferro, e com o atributo densidade determinado pela média da densidade das amostras.

De posse desses dados as seguintes etapas foram realizadas para incorporar a variabilidade da densidade no modelo:

**Etapa 1:** Uma análise exploratória dos dados foi feita, com o objetivo de verificar a consistência e qualidade do banco de dados, o conhecimento das características geológicas e sua distribuição espacial no depósito;

**Etapa 2:** Nessa etapa foi realizada a análise estrutural para a definição dos modelos de variogramas e foram definidos os métodos de estimativas utilizados para a determinação das densidades. Quatro abordagens serão realizadas e comparadas:

- Valor médio;
- Regressão linear com a variável teor de ferro (Fe);
- Krigagem ordinária das densidades medidas;
- Krigagem ordinária das densidades calculadas via regressão linear.

Para definição dos modelos de variogramas informações adicionais foram introduzidas ao banco de dados referentes a 36 testes de densidade feitos para a litologia IC em campanhas de sondagem anteriores realizadas na mina de Serra Azul. Dessa forma, pode-se obter variogramas mais bem estruturados. Esses 36 dados não foram incorporados na regressão linear da seção 3.1 pois não possuem informações químicas correspondentes a amostra em que o teste de densidade foi feito.

Assim, a análise estrutural será baseada em um total de 105 amostras referentes a litologia IC mais as os dados calculados utilizando a equação de regressão linear.

**Etapa 3:** Validação das estimativas e escolha do método a ser utilizada nas etapas de planejamento de lavra.

É importante salientar que não foram calculadas variáveis acumuladas (teor x densidade) para realização das estimativas. As estimativas de teor e densidade são realizadas separadamente, sendo a acumulação (produto entre elas), efetuada posteriormente. De acordo com estudo realizado por Lisboa (2018) também para uma mina de ferro dessa região, qualquer uma dessas duas técnicas pode ser utilizada, visto que elas fornecem resultados próximos.

### 3.3 Planejamento de lavra

O desenvolvimento da etapa de planejamento de lavra teve como dados de entrada o modelo de blocos resultante da etapa anterior, superfície topográfica e os dados operacionais da mina de Serra Azul. Dois cenários foram analisados. O primeiro consiste em estimar as reservas minerais para o depósito de Serra Azul a partir da utilização do

atributo densidade determinado pela média da densidade das amostras, enquanto o segundo cenário analisa as reservas minerais a partir do atributo densidade estimado para cada bloco do modelo.

Para cada um desses cenários as seguintes etapas foram desenvolvidas:

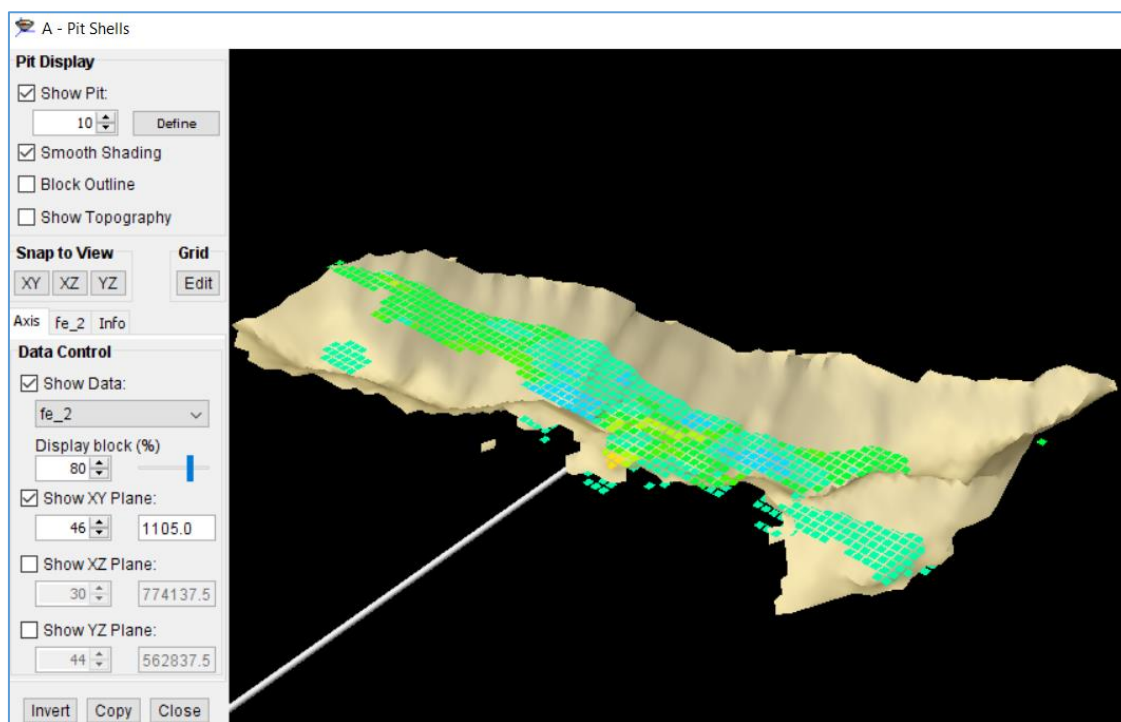
**Etapa 1:** A primeira etapa consiste na Otimização de pit que define os limites da cava final. Com o auxílio de uma função benefício, responsável por valorizar todos os blocos com base nos custos e receitas previstos para a mina de Serra Azul, os limites da lavra foram determinados.

Para a validação dos dados e manipulação do modelo de blocos foi utilizado o software *Geovia Surpac* versão 6.7. Para geração dos cenários econômicos foi utilizado o software *Gemcom Whittle* versão 4.5. Além da função benefício, os parâmetros geológicos, geotécnicos, ambientais e operacionais foram considerados como dados de entrada no software para determinação da cava ótima.

Os cenários econômicos foram gerados pelo software *Whittle* considerando a lavra instantânea, sem influência do tempo, e utilizando-se o algoritmo Lersch-Grossmann. Este algoritmo encontra a solução matemática que maximiza o valor presente líquido (VPL) da reserva. Para cada cenário foi gerada uma família de cavas aninhadas a partir do recurso do *Whittle* de variação do fator de receita “Revenue Factor”. Esse fator foi variado de 0.5 a 1.5 com incrementos de 0.01.

Como resultado dessa etapa uma cava matemática foi gerada, servindo de base para definição de uma geometria de lavra de longo prazo.

A título de ilustração, a Figura 3.4 mostra a ferramenta de visualização do *Whittle* onde o design da cava matemática pode ser analisado em conjunto com o modelo de blocos.

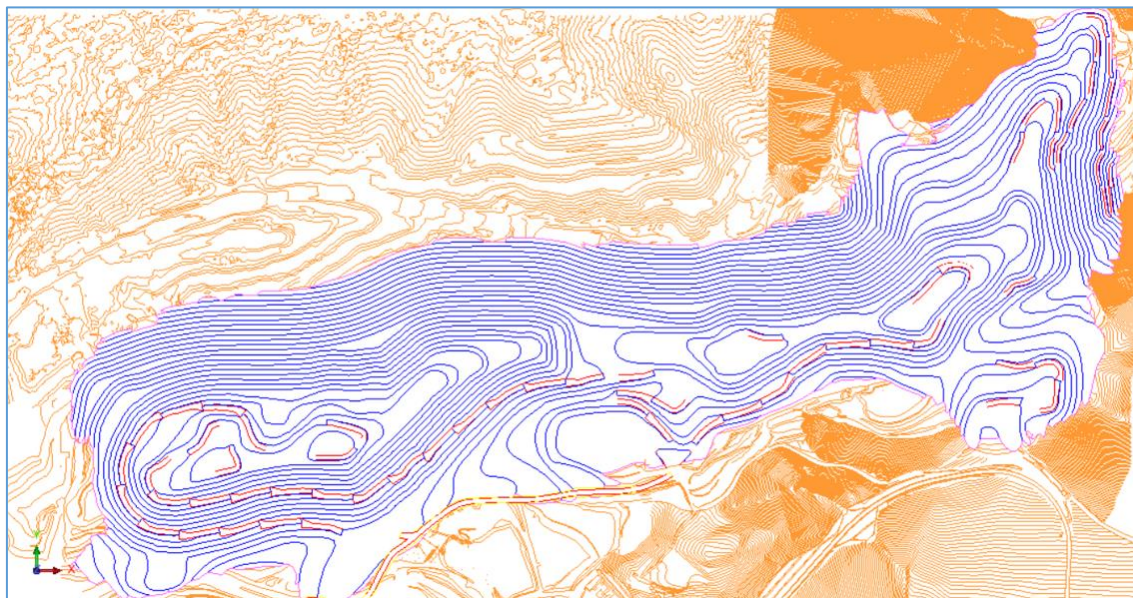


**Figura 3.4:** Visualização de cava final utilizando o software *Whittle*.



**Etapa 2:** A segunda etapa consiste na seleção dos equipamentos de lavra e operacionalização de cava a partir do pit final escolhido na etapa 1. Foram projetados todos os bancos com pés e cristas, fundos de cava e rampas, sempre respeitando os parâmetros geotécnicos e objetivando boa aderência à cava otimizada.

Para realização do desenho de mina foram utilizadas as ferramentas de “*Pit Design*” do software *Surpac*. Uma visualização dessa etapa de operacionalização é representada na Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Visualização de cava final operacionalizada utilizando o software Surpac.

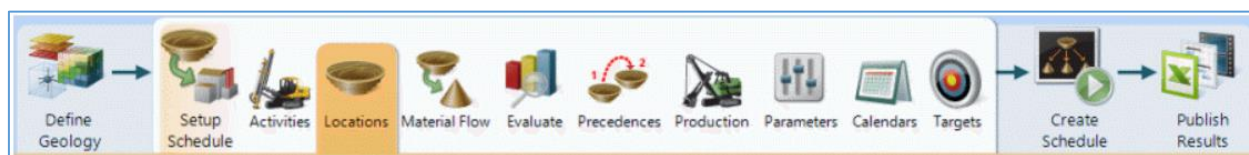
**Etapa 3:** Nessa etapa foi desenvolvido o sequenciamento de lavra. Esse estágio define a extração nas diversas áreas para a composição dos estoques homogêneos de mina, que por sua vez irão compor a alimentação da planta de beneficiamento mineral.

O sequenciamento de lavra foi realizado usando o software *Geovia MineSched* versão 9.0, que tem a capacidade de programar virtualmente qualquer cenário de mineração, incluindo metas de teores e de quantidade de minério e estéril.

O *MineSched* consiste em uma série de planilhas e pasta de dados onde os parâmetros do sequenciamento são inseridos. Essas áreas de trabalho incluem:

- Parâmetros do modelo de blocos “*Define Geology*” - onde as informações do modelo de blocos a ser trabalhado são adicionadas.
- Parâmetros das frentes de trabalho “*Locations*” - onde são definidas as características das frentes de lavra, bem como a maneira que essas áreas serão extraídas. Pode-se modelar e manipular pilhas de estoque e de processos. Pilhas de estéril podem ser modeladas através de blocos e podem ter estratégias de preenchimento definidas.
- Parâmetros de Produção - onde a taxa de extração, disposição das frentes de lavra e frota de equipamentos de produção podem ser definidos.

O layout principal do *MineSched* é mostrado na Figura 3.6 abaixo.

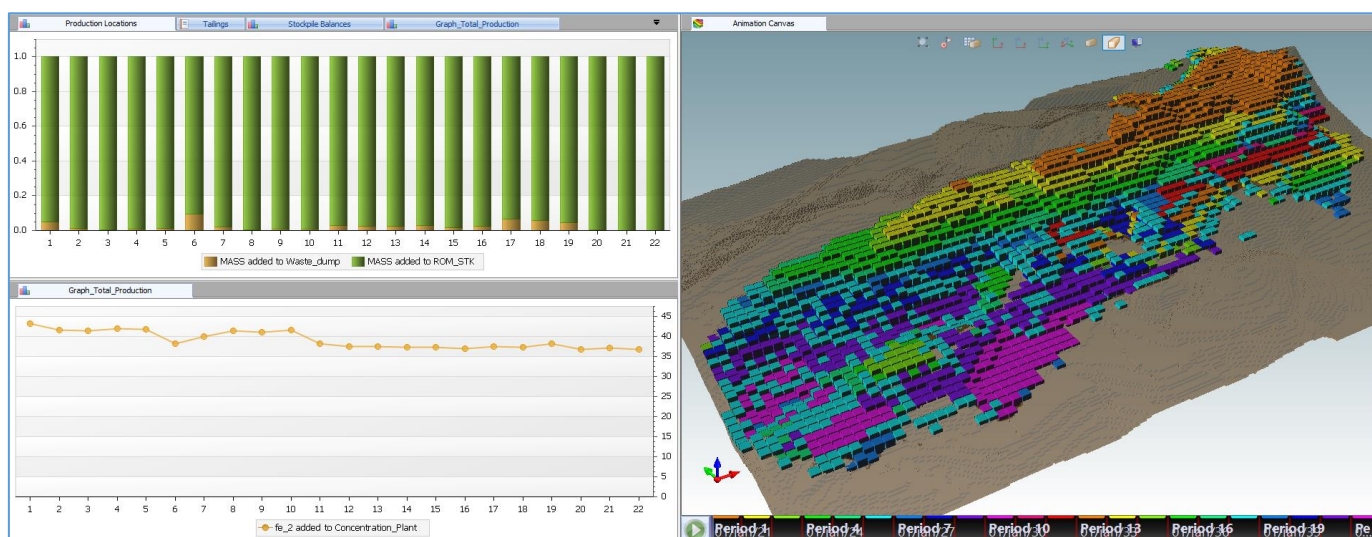


**Figura 3.6:** Layout principal do Software *MineSched*.

Algumas regras de dependência são definidas. Basicamente, isso define as restrições da lavra, ou seja, o bloco inferior não pode ser extraído até que os blocos no topo dele sejam extraídos, direções de lavra, limites da bancada e polígonos, destinos atribuídos a cada tipo de material, etc.

Uma vez definidas as prioridades e restrições, o software *MineSched* escolhe os blocos a serem lavrados, de maneira a otimizar uma função objetivo, satisfazendo as restrições especificadas. Esses parâmetros de produção também podem mudar a qualquer momento, de acordo com as metas de produção estabelecidas pelo usuário.

A estrutura de menus e interface gráfica do software *MineSched* possibilita visualizar a sequência de extração, cálculo das massas e estimativas de teores por período, proporcionando melhor acompanhamento dos avanços de lavra e dos resultados de produção por meio da interface gráfica, conforme exemplificado na Figura 3.7.



**Figura 3.7:** Visualização do sequenciamento de lavra do Software *MineSched*.

**Etapa 4:** A quarta etapa consiste na realização dos planos de produção contendo projeções das massas de minério e estéril a serem lavradas. Nesse estágio as distâncias média de transporte (DMT) foram definidas e calculadas de acordo com as geometrias fornecidas pelo sequenciamento de lavra. Também é considerado nessa etapa o dimensionamento dos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte, onde a produtividade e horas requeridas para executar o plano de produção foram estimadas.

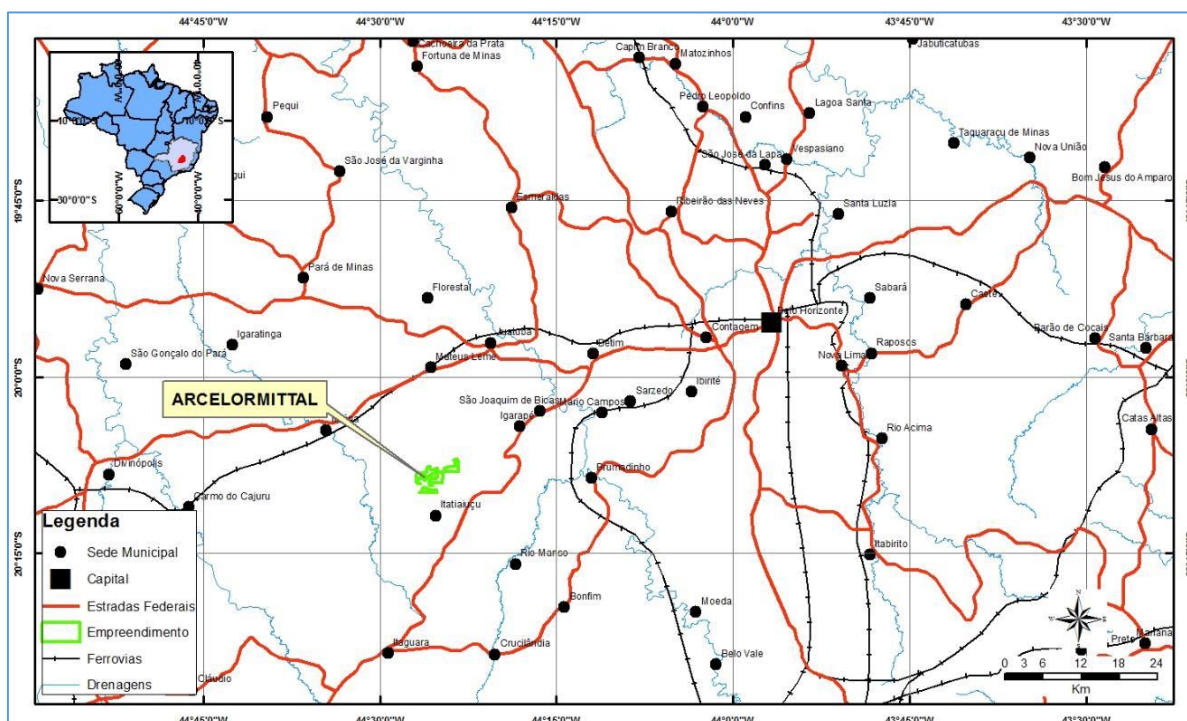
Assim, após conclusão das etapas descritas acima, o impacto da variável densidade no planejamento de lavra foi avaliado por meio da comparação dos resultados obtidos com a utilização ou não da densidade nos métodos de estimativa. Também foram avaliados cálculos de reconciliação, comparando as informações reais das massas lavradas na cava central da mina de Serra Azul com as massas previstas pelos modelos estimados para as mesmas áreas.

## CAPÍTULO 4 : ESTUDO DE CASO

### 4.1 Caracterização geral do empreendimento

O empreendimento de propriedade da empresa ArcelorMittal Brasil S.A., se encontra posicionado no local denominado “Serra Azul”, situado na porção oeste da Serra do Curral, nos municípios de Itatiaiuçu e Mateus Leme.

A mina de Serra Azul é uma mina de minério de ferro a céu aberto e está situada a aproximadamente 70 km da cidade de Belo Horizonte. A Figura 4.1 apresenta o mapa de localização e vias de acesso do empreendimento.



**Figura 4.1:** Localização e vias de acesso do empreendimento.

Minas Itatiaiuçu Ltda. (MIL) iniciou as operações de mineração na propriedade em 1946. Em 2007, a London Mining Brazil Mineração Ltda. (London Mining) comprou os direitos minerários da MIL. Desde junho de 2008, a ArcelorMittal está encarregada da operação, após a aquisição da propriedade da London Mining (SEC, 2018).



Trata-se de uma mina que opera há muitos anos representada por uma atividade que tem passado por grande dinamismo nos últimos anos, notadamente com relação a ampliação de escalas de produção e aperfeiçoamento no processo de recuperação dos minérios extraídos. A Figura 4.2 apresenta uma vista panorâmica da mina de Serra Azul.



**Figura 4.2:** Vista panorâmica da mina de Serra Azul.

A lavra é realizada a céu aberto, em encosta, com bancadas regulares descendentes. A área utilizada neste estudo de caso apresenta dimensões aproximadas de 2.000 m de extensão, 450 m de largura e desnível máximo da ordem de 130 m, cobrindo uma área de aproximadamente 66 hectares, constituída por bancos com alturas médias de 10 m.

Nos trabalhos de desmonte do material “*in situ*”, o equipamento típico utilizado para perfuração é uma perfuratriz Sandvik DX800, para posterior detonação com explosivos. Desmontado, o minério é carregado através de escavadeira ou pá mecânica em caminhões basculantes, que por sua vez se encarregam do transporte até a usina de beneficiamento. Para escavação são utilizadas escavadeiras hidráulicas do porte da Liebherr 954, com 4 m<sup>3</sup> de capacidade, realizando escavações até uma profundidade máxima de 5 m, e carregadeiras Liebherr L580, com caçamba de 4,5 m<sup>3</sup>.

O material que não apresenta condições de aproveitamento, denominado estéril, é transportado para pilha do gênero com as operações de carga e transporte semelhantes ao trabalho com o minério. Para o transporte do minério e do estéril é utilizada uma frota de caminhões convencionais, tipo Scania 8 x 4, com capacidade para o transporte de 34 t. Adicionalmente são também utilizados caminhões Randon de 30 t, que, em virtude de sua maior robustez, são mais utilizados nos trabalhos de remoção do estéril.



Para apoio às atividades de lavra são utilizados tratores de esteiras do porte do D6T Caterpillar, Motoniveladora Caterpillar 140M, Carregadeiras 966H, Caminhões Pipa de 30.000 L e retroescavadeiras Caterpillar 416E. Estes equipamentos são utilizados na manutenção de acessos e bermas, suporte aos trabalhos da escavadeira, manutenção da pilha de estéril, construção da pilha de estoque e trabalhos ambientais. Um resumo com a descrição dos equipamentos de lavra utilizados na mina em estudo está apresentado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Descrição dos equipamentos de lavra da mina de Serra Azul

Equipamentos de lavra			
Atividade	Modelo	Capacidade	Aplicação
Perfuração	Sandvik DX 800	3" a 5"	Perfuratriz hidráulica utilizada nas operações de perfuração de rochas
Carregamento	Libherr 954	4 m <sup>3</sup>	Retroescavadeira hidráulica utilizada no carregamento do minério e estéril
	Libherr L580	4.5 m <sup>3</sup>	Pá carregadeira hidráulica utilizada no carregamento do minério e estéril
Transporte	Scania 8x4	34 t	Caminhões utilizados para o transporte de material estéril e minério
	Randon RK430	30 t	Caminhões utilizados para o transporte de material estéril
Auxiliares	CAT D6	200 HP	Trator utilizado na manutenção de acessos, bermas e pilha de estéril.
	CAT 140M	183 HP	Motoniveladora utilizada para p nivelamento de acessos e praças.
	Libherr L580	4.5 m <sup>3</sup>	Pá carregadeira utilizada no estoque de ROM e alimentação do Britador
	Scania 8x4	30.000 L	Caminhão Pipa para controle de poeira na mineração
	CAT 416	86 HP	Retroescavadeira para os trabalhos de infraestrutura de mina

Os processos de beneficiamento do empreendimento estão ajustados para o processamento dos Itabiritos friáveis, que são levados para uma planta de britagem, onde se separa o granulado (material mais grosso) do restante. Este material passa por uma planta de concentração onde são gerados mais dois produtos (Sinter Feed e Concentrado). Os rejeitos desse processo passam por um espessador, posteriormente são bombeados e empilhados em cavas exauridas (FEAM, 2016).

## 4.2 Geologia e mineralização

A área da mina de Serra Azul, localiza-se na porção meridional do Cráton do São Francisco, e insere-se no contexto evolutivo da porção oeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), uma região geologicamente importante do Pré-Cambriano brasileiro devido a suas riquezas minerais. Enquadra-se, em relação aos seus domínios estruturais, na Serra de Itatiaiuçu, um trecho de serra que se prolonga até a Serra do Curral (Mohallem, 2018).

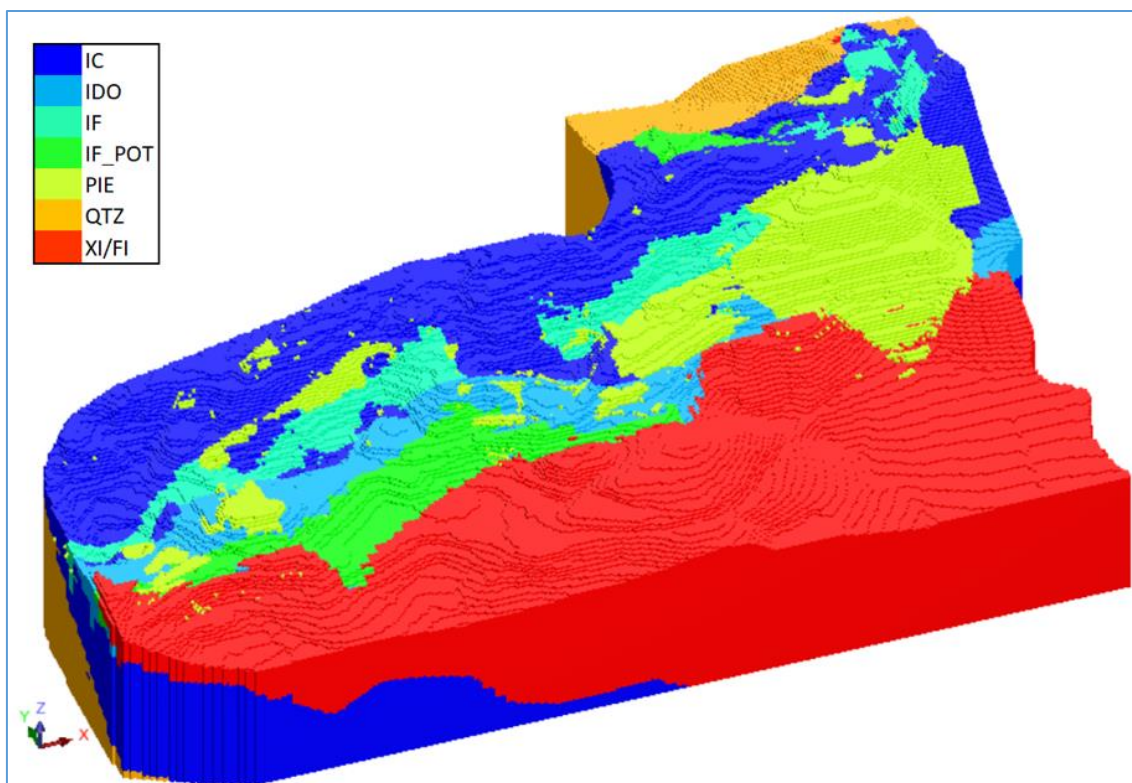
Os principais litotipos encontrados na região da mina de Serra Azul são itabiritos (friável, compacto e dolomítico), quartzito, filito e rocha intrusiva. As litologias que possuem os teores de ferro mais elevados e que são consideradas como minério são os itabiritos friáveis e compactos. As principais características dessas litologias são descritas a seguir:

- Itabirito Compacto (IC): tem granulação fina a média, é bandado, com intercalação de níveis milimétricos a centimétricos de sílica, localmente recristalizada, e níveis pouco mais espessos, geralmente decimétricos, compostos de óxidos de ferro. Cristais milimétricos euédricos de magnetita podem ser observados localmente sobrecrescidos nos planos de foliação. É o litotipo com

maior compacidade, dificilmente desagregado mesmo com o uso do martelo geológico, liberando pouca ou nenhuma sílica.

- Itabirito Friável (IF): caracteriza-se por uma granulação fina, bandado, com níveis de sílica milimétricos intercalados com níveis decimétricos de óxidos de ferro. A sílica é facilmente liberada da rocha, já estando totalmente lixiviada em muitas porções. Quando composto essencialmente de óxidos de ferro, (sílica já lixiviada), o IF apresenta-se foliado, com coloração cinza a azul, caracterizando o itabirito friável rico (IFR).
- Itabirito Dolomítico (IDO): encontra-se intensamente intemperizado, friável, apresenta granulação fina e bandas milimétricas de sílica, óxidos de ferro. As bandas de material carbonático (dolomita) são mais espessas, decimétricas a métricas, com aspecto terroso intensamente intemperizado, descritas como “borra de café”.
- Quartzito (QTZ): Rocha de granulação média, foliada, coloração cinza. É composta essencialmente por quartzo, localmente microconglomerático, com níveis micáceos e contribuição de material ferruginoso. Descrito como quartzito ferruginoso.
- Rocha intrusiva: fortemente intemperizada, amarela a laranja, aparentemente de textura afanítica, maciça. Foi descrita na região da “Vaca Morta” cortando os itabiritos de maneira discordante.
- Filito (FI): rocha de granulação fina e coloração cinza escura. Apresenta conteúdo ferruginoso, sujando a mão ao tato.

Para o estudo de caso, apenas a litologia Itabirito Compactos é trabalhada. Conforme ilustrado na Figura 4.3, essa litologia é a mais predominante e representativa do banco de dados existente, e será alvo principal dos estudos de expansão que serão realizados no empreendimento.



**Figura 4.3:** Representação dos litotipos carimbado no modelo de blocos, Mina Serra Azul

Existe uma região com ocorrência de afloramento de itabiritos friáveis que não são vistos nos furos de sonda. Este material foi descrito na Figura 4.3 como Itabirito Potencial (IF\_POT). Além disso, a sigla PIE é referente a pilha de estéril, onde os Itabiritos compactos que não possuem benefício econômico na rota metalúrgica atual são estocados visando o seu aproveitamento no futuro.

O Modelo de blocos fornecido para o desenvolvimento do trabalho foi modelado através da triangulação das principais amostras usando os logs do testemunho de sondagem e o software Vulcan. Os blocos apresentam dimensões 25m x 25m x 10m segundo as direções X, Y e Z do modelo de blocos, e apresentam dimensões mínimas de sub-blocos de 6.25m x 6.25m x 5m codificado para refletir a topografia da superfície e os domínios de mineralização com a maior precisão possível. O modelo fornecido contém informações estimadas dos teores de Fe, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P e Perda ao Fogo /LOI.

As dimensões do modelo de blocos estão listadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Dimensões do Modelo de Blocos

Dimensões do modelo de blocos			
	X	Y	Z
<b>Coordenadas Min.</b>	561750	7773400	650
<b>Coordenadas Max.</b>	563950	7774900	1350
<b>Dimensões dos blocos</b>	25	25	10
<b>Dimensões Min. dos blocos</b>	6.25	6.25	5
	Bearing	Dip	Plunge
<b>Rotação</b>	0	0	0

### 4.3 Análise exploratória dos dados

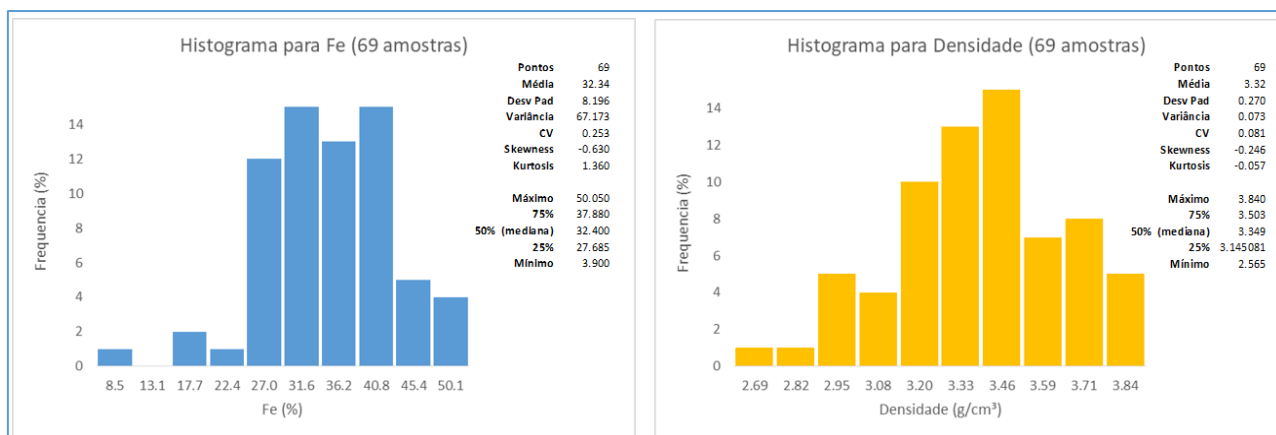
As amostras de densidade que compõe o banco de dados utilizado no trabalho são provenientes de duas recentes campanhas de sondagem realizadas na mina central da ArcelorMittal Serra Azul no período de 2012 a 2018. As amostras foram coletadas por sondagem diamantada com recuperação de testemunho e passaram por programas de controle de qualidade padrões da indústria mineral QA/QC (Quality Assurance / Quality Control) para garantir que os dados sejam confiáveis e adequados para compor o banco de dados que suportará as estimativas de recursos e reservas minerais.

O banco de dados é munido dos valores relacionados à densidade, análise química (Fe, Si, Al, P, Mn, CaO, TiO<sub>2</sub> e Perda ao Fogo/LOI) e análise granulométrica (4 frações) das alíquotas global e em quatro frações granulométricas das amostras de testemunhos de sondagem.

A base de dados para a litologia dos Itabiritos compactos é composta por 105 amostras.

69 amostras são referentes a campanha de sondagem 2018 e tiveram a análise química correspondente a amostra de densidade. Enquanto que 36 amostras são referentes a campanha de sondagem 2012, e não possuem informações químicas correspondentes a amostra em que o teste de densidade foi feito, sendo assim essas 36 amostras serão apenas utilizadas na análise variográfica do depósito mineral.

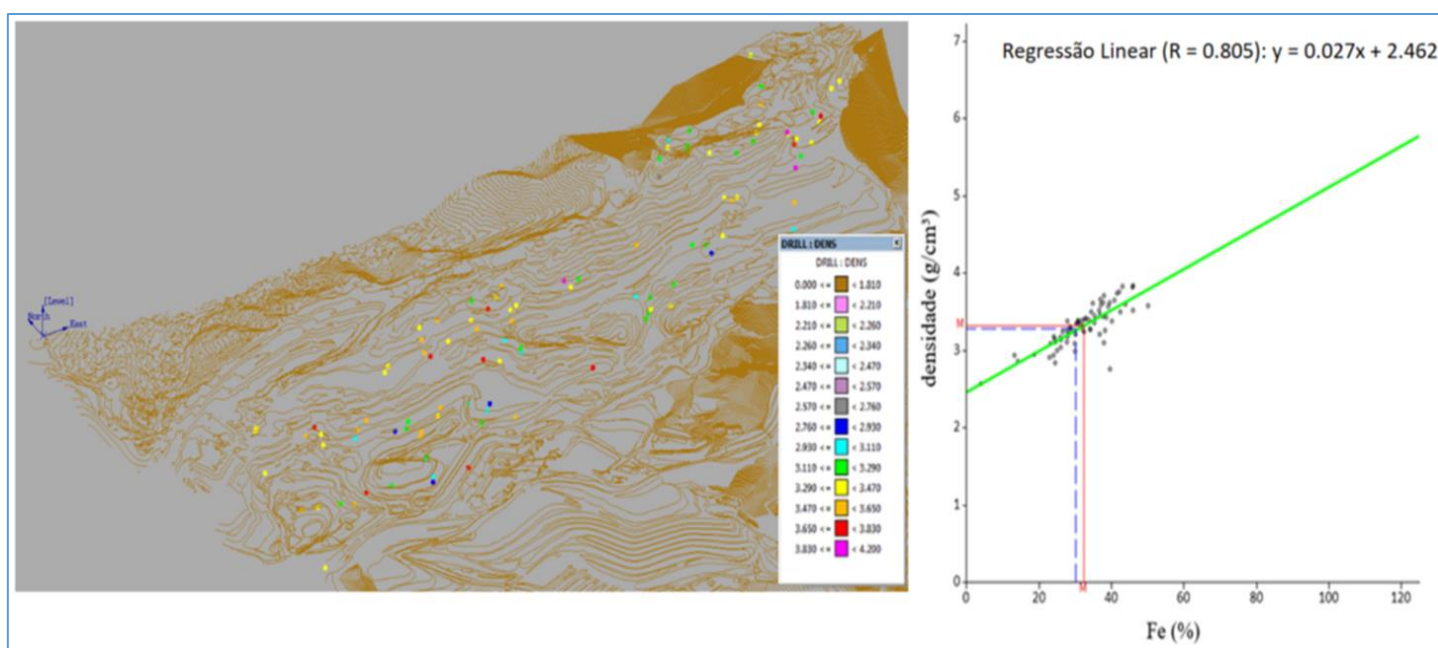
A Figura 4.4 apresenta os histogramas dos dados de densidade (g/cm<sup>3</sup>) e ferro (%) para as 69 amostras.

**Figura 4.4:** Histograma das amostras de ferro e densidade

Como a densidade não foi determinada para todas as amostras de ferro, a alternativa foi atribuir a cada amostra de teor de ferro, da qual não se tinha densidade determinada, a densidade obtida pela regressão linear da mesma com o teor em cada domínio em que a amostra se encontrava.

Conforme demonstrado na seção 3.1, para a litologia IC, existe forte correlação entre a densidade e o teor de ferro das amostras da mina de Serra Azul. Além disso, a porosidade nula das amostras de itabirito compacto permite que a regressão linear seja aplicada diretamente a partir de valores das amostras para determinação da densidade. De acordo com Suckau (2018) essa consideração para a porosidade dos Itabiritos compactos de Serra Azul ocorre especialmente devido a silificação (recristalização do quartzo no cimento da matriz das bandas de quartzo da formação ferrífera) dos mesmos por processos hidrotermais posteriores à deposição da formação ferrífera.

A Figura 4.5 mostra o mapa base das 69 amostras de itabirito compacto e a curva de correlação entre teor de ferro e a densidade.



**Figura 4.5:** Mapa de amostras IC e curva de correlação Fe vs densidade

Outra forma de se obter valores para densidade onde ela não foi amostrada é via cálculo estequiométrico ou cálculo normativo. Nesse método as proporções moleculares de cada mineral são calculadas dividindo a porcentagem em peso de seu óxido pelo seu peso molecular. Arroyo (2014) aplicou com sucesso esta metodologia para gerar novos valores de densidade em uma mina de ferro do Quadrilátero ferrífero. O autor apresenta um algoritmo utilizado para realização do cálculo normativo aplicado ao minério de ferro indicando a necessidade de determinação da análise geoquímica da variável FeO, para execução da técnica.

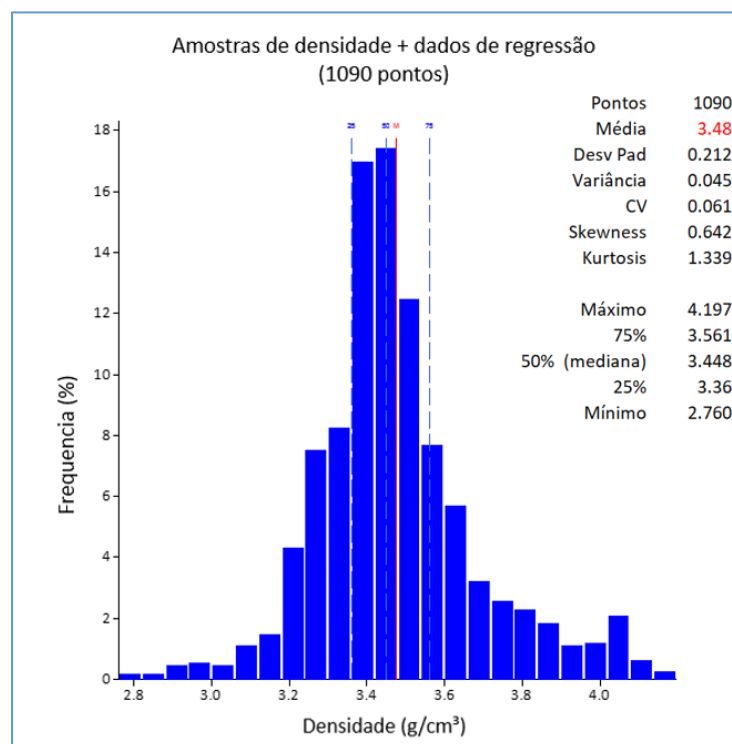
Contudo, no estudo de caso realizado para a mina de Serra Azul não será possível gerar indiretamente novos dados de densidade via cálculo estequiométrico devido à falta de informação referente a variável FeO no banco de dados da ArcelorMittal. No entanto, de

acordo com estudo realizado por Lisboa (2018) tanto a regressão linear quanto o cálculo normativo apresentaram resultados muito próximos para as estimativas da densidade mineralógica, indicando que qualquer um dos métodos pode ser empregado.

Dessa maneira, a equação proveniente da regressão linear foi utilizada.

$$\text{Densidade} = 0.027 * \text{Fe\%} + 2.462$$

A Figura 4.6 apresenta o histograma para dados de densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) após a etapa de regressão. Assim, um total de 1090 pontos com informações de densidade serão utilizados para as avaliações geoestatísticas.



**Figura 4.6:** Histograma das amostras de densidade completada via regressão linear.

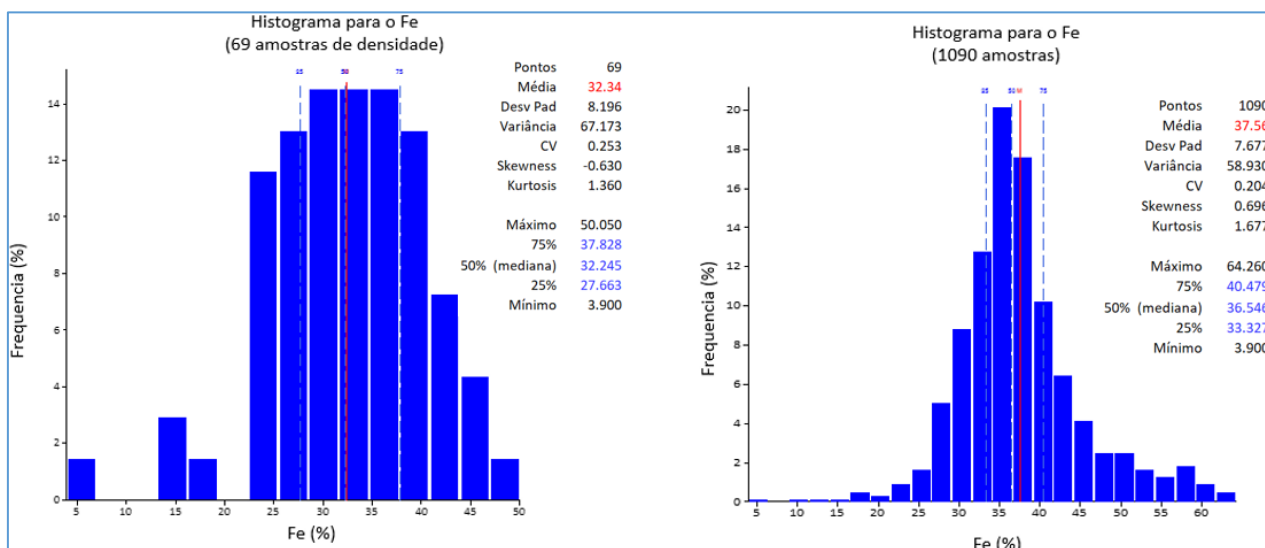
A Tabela 4.3 apresenta as medidas estatísticas para os dados de densidade original comparadas com os dados de densidade após regressão.

**Tabela 4.3:** Medidas estatísticas das amostras de densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e densidade após regressão linear ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

	Densidade Original ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Densidade Completada via regressão ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
<b>Pontos</b>	69	1090
<b>Média</b>	3.320	3.476
<b>Desv Pad</b>	0.270	0.212
<b>Variância</b>	0.073	0.045
<b>CV</b>	0.081	0.061
<b>Skewness</b>	-0.246	0.642
<b>Kurtosis</b>	-0.057	1.339
<b>Máximo</b>	3.840	4.197
<b>75%</b>	3.503	3.561
<b>Mediana</b>	3.349	3.448
<b>25%</b>	3.15	3.36
<b>Mínimo</b>	2.57	2.76

Observa-se diferenças entre a distribuição original da densidade e a distribuição após regressão. Houve um aumento de 4.6% na média e 3% na mediana, sendo observado também um aumento nos valores dos quantis. Porém, uma diminuição nas medidas de dispersão pode ser observada. Em face disso, o motivo para essas alterações foi investigado.

Essas diferenças estão relacionadas ao processo de regressão linear que, estabelece a relação que existe entre os teores de Fe e os valores existentes de densidade. Ao observar os histogramas da Figura 4.7, o primeiro para os teores de Fe referentes as amostras de densidade medidas no laboratório e o segundo referente aos teores de Fe medidos em laboratório para todo o banco de dados, pode-se constatar as diferenças entre ambas populações.

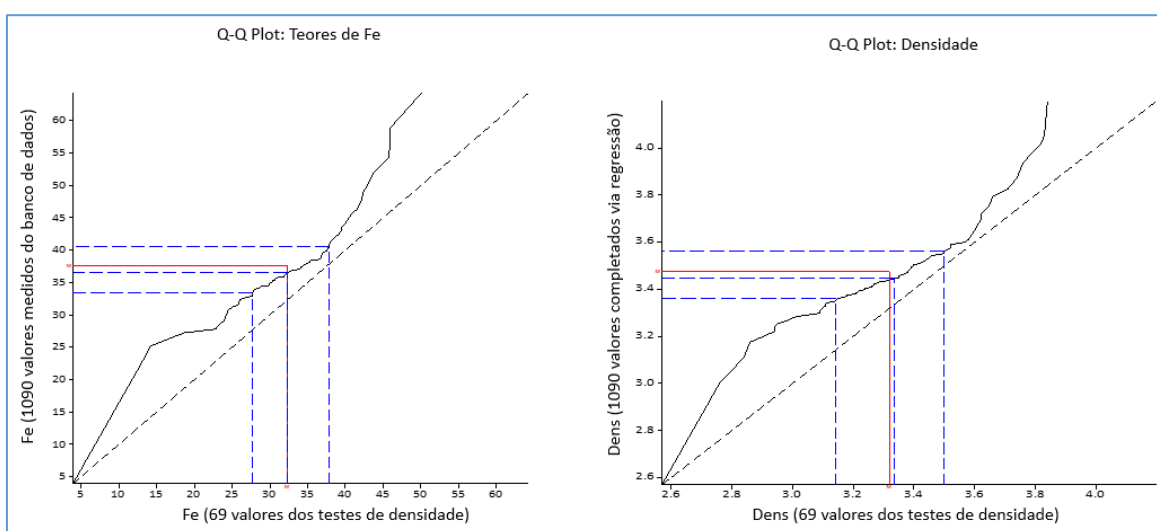


**Figura 4.7:** Histograma dos teores de Fe das amostras de densidade e dos teores de Fe para todo banco de dados.



Pode-se concluir que para a litologia itabirito compacto os testes de densidade realizados não analisaram amostras correspondentes aos altos teores presentes no depósito ( $Fe > 50\%$ ). Provavelmente esse fato ocorreu devido à dificuldade de se encontrar amostras mais ricas de IC que atendessem aos requisitos para realização do teste de densidade por deslocamento de volume (comprimento entre 10 e 18 cm não fragmentada). Assim sendo, ao calcular a densidade para os teores mais elevados usando a fórmula de regressão, obtém-se como resultado valores de densidade maiores que os presentes no banco de dados medido no laboratório.

Para averiguar as diferenças entre a distribuição original da densidade e a distribuição após regressão foi determinado um diagrama de dispersão entre os quantis das duas distribuições. O primeiro gráfico Q-Q da Figura 4.8 é referente aos teores de Fe das amostras, enquanto o segundo gráfico Q-Q é referente aos dados de densidade. É observado novamente as formas diferentes para essas distribuições e, como esperado, semelhanças entre os dois gráficos Q-Q.



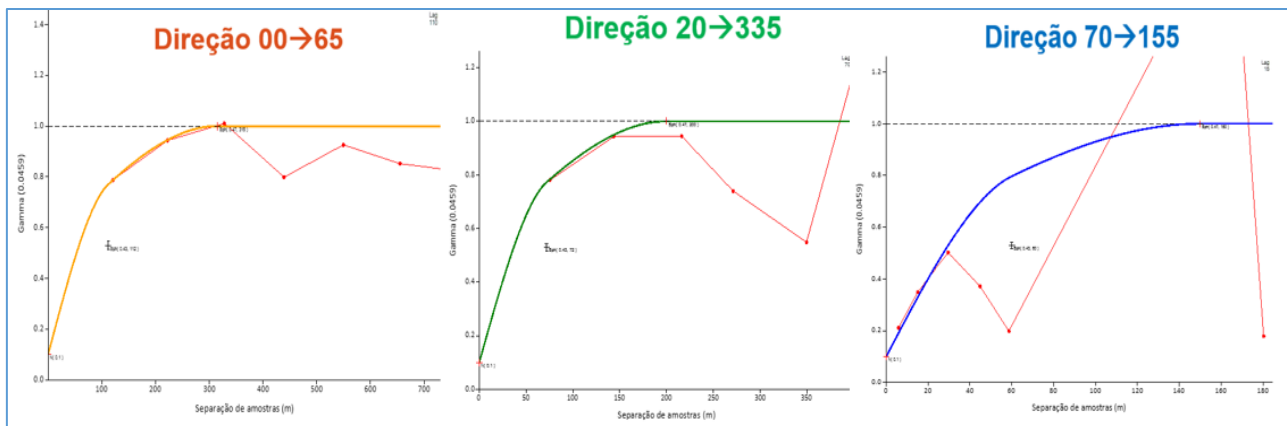
**Figura 4.8:** Q-Q Plot para os teores de Fe e para os valores de densidade.

#### 4.4 Modelagem geoestatística

Inicialmente, uma análise estrutural foi realizada para obter informações sobre o grau de dependência ou correlação espacial entre o valor do atributo densidade medido em dois pontos  $x$  e  $x+h$ , sendo  $h$  a distância numa orientação específica.

Os variogramas experimentais foram calculados e modelados para a população de dados, incluindo todas as amostras de densidade medidas e os valores de densidade calculados usando a fórmula de regressão linear. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram os variogramas experimentais e ajustados para as direções principais do depósito de Serra Azul. Os variogramas foram normalizados pela variância dos dados de densidade (0.045), essa mudança de escala facilita visualização de cada uma das estruturas. A Tabela 4.4 mostra os parâmetros do modelo variográfico para ajuste da variável densidade.

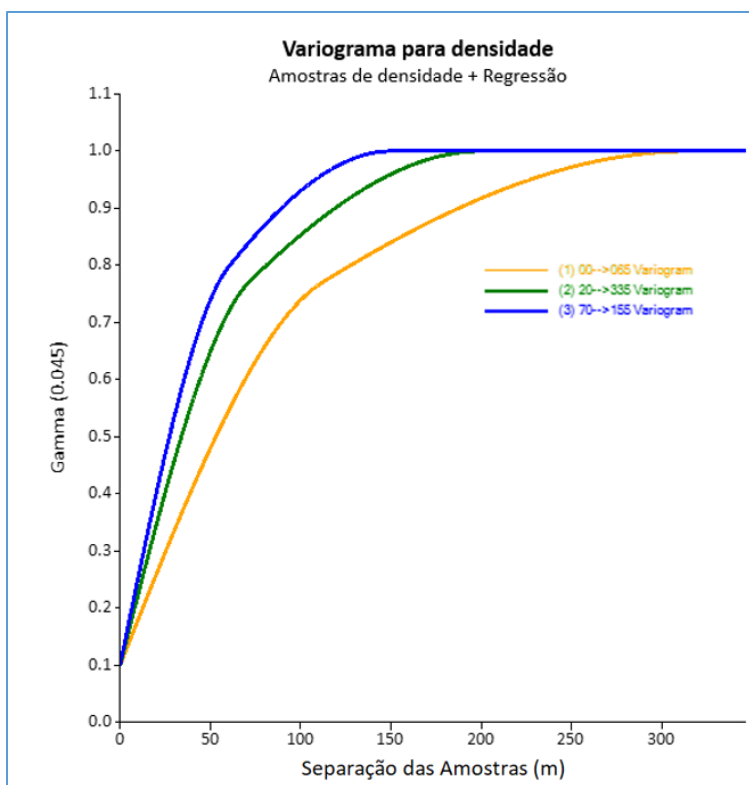




**Figura 4.9:** Variogramas experimentais e ajustados para as direções principais do depósito de Serra Azul.

**Tabela 4.4:** Parâmetros do modelo variográfico para ajuste da variável densidade.

Direção	Nugget	Estrutura 1 (esférica)		Estrutura 2 (esférica)	
		Patamar	Amplitude	Patamar	Amplitude
000 → 065	0.1	0.43	112	0.47	315
020 → 355			72		200
070 → 155			60		150



**Figura 4.10:** Variogramas ajustados para a variável densidade.

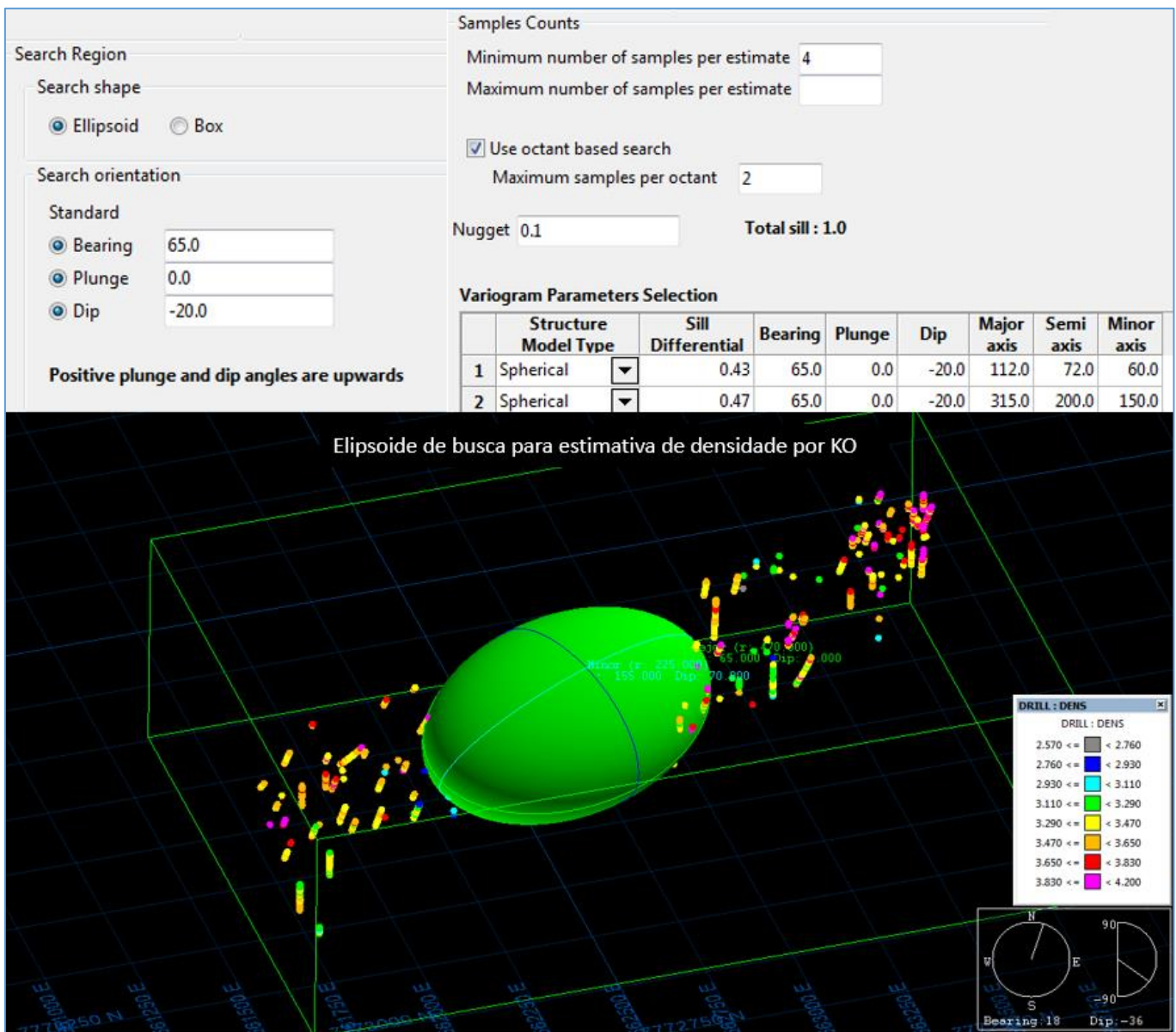
A curva laranja representa a direção principal, ou seja, a direção de maior continuidade para as amostras de densidade em uma estrutura esférica de alcance de aproximadamente 315 metros. A curva verde representa a direção secundária apresentando alcance de aproximadamente 200 metros, enquanto a curva azul representa a direção de menor continuidade espacial alcance de aproximadamente 150 metros.

Assumindo que a anisotropia da variável densidade segue uma forma elipsoidal, as informações geradas na análise estrutural serão utilizadas para construção de uma elipse de busca anisotrópica. Essa análise é realizada com o objetivo de determinar o modelo de variabilidade espacial dos dados, que será utilizado em seguida na estimativa por meio de krigagem ordinária.

Conforme mencionado na seção 3.2, quatro abordagens para a determinação das densidades serão realizadas e comparadas. As seguintes denominações serão utilizadas para identificação de cada um dos métodos:

- DENS - Utilização da densidade média para domínio IC;
- DENS\_REGRESS - Regressão linear com a variável teor de ferro aplicada diretamente no modelo de blocos para todos os dados estimados de Fe;
- DENS\_OK - Krigagem ordinária das amostras de densidades medidas em laboratório (105 dados);
- DENS\_OK\_REGRESS - Krigagem ordinária dos dados de densidades medidos em laboratório mais os dados calculados via regressão linear (1090 dados).

A realização de todas as estimativas foi feita utilizando o software *Vulcan*. A Figura 4.11 apresenta os parâmetros adotados para realização das estimativas no software, conforme dados apresentados na Tabela 4.4.



**Figura 4.11:** Parâmetros usados para estimativa de densidade por KO

O campo “*Search region*” da Figura 4.11 mostra as direções utilizadas para o elipsoide de busca, de acordo com as informações retiradas da análise estrutural da amostra. Azimute igual a 65 graus, Plunge 0 graus e Dip -20.0 graus. Indicando a direção Nordeste como de maior continuidade espacial para a variável densidade.

O campo “*Sample Counts*” mostra o número mínimo e máximo de amostras utilizado para estimar os valores em um ponto, assim como o número máximo de amostras a serem utilizadas por octante, evitando que o software selecione muitas amostras em apenas uma direção.

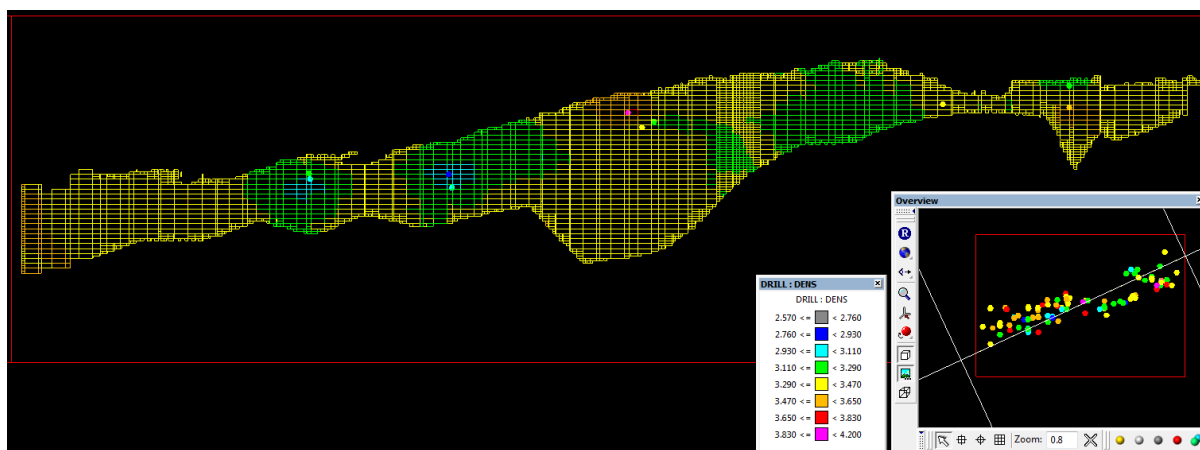
Também está representado na Figura 4.11 os parâmetros do variograma, efeito pepita (*nugget*), alcance (*range*) e platô (*sill*).

O mesmo variograma, vizinhança e parâmetros de busca foram usados para ambas as estimativas de krigagem ordinária (DENS\_OK e DENS\_OK\_REGRESS), exceto para o número mínimo de amostras utilizadas para as estimativas. Para o método

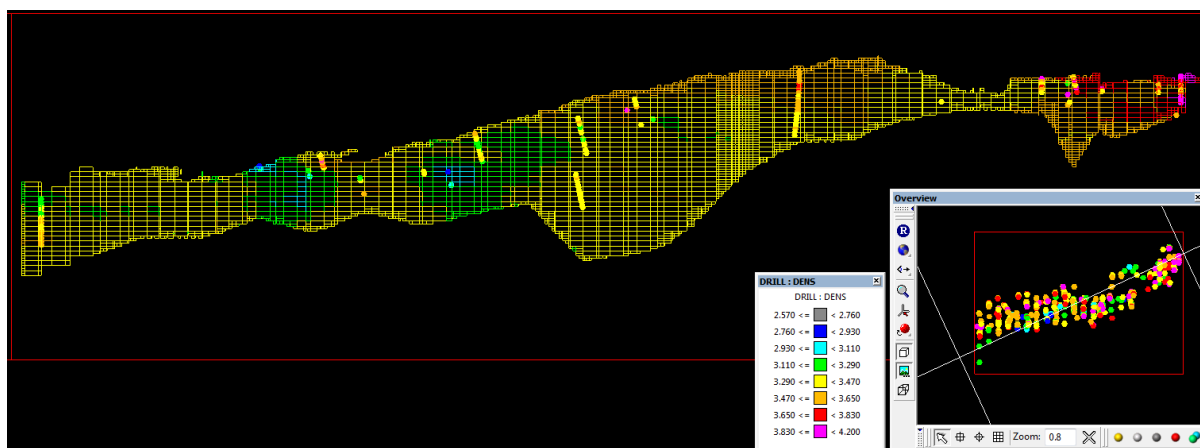
DENS\_OK\_REGRESS o número mínimo de 4 amostras foi utilizado, enquanto no método DENS\_OK, o número mínimo de 2 amostras foi utilizado, devido a menor quantidade de amostras possibilitando assim que todos os blocos do depósito possam ser estimados.

#### 4.4.1 Análise dos resultados das estimativas

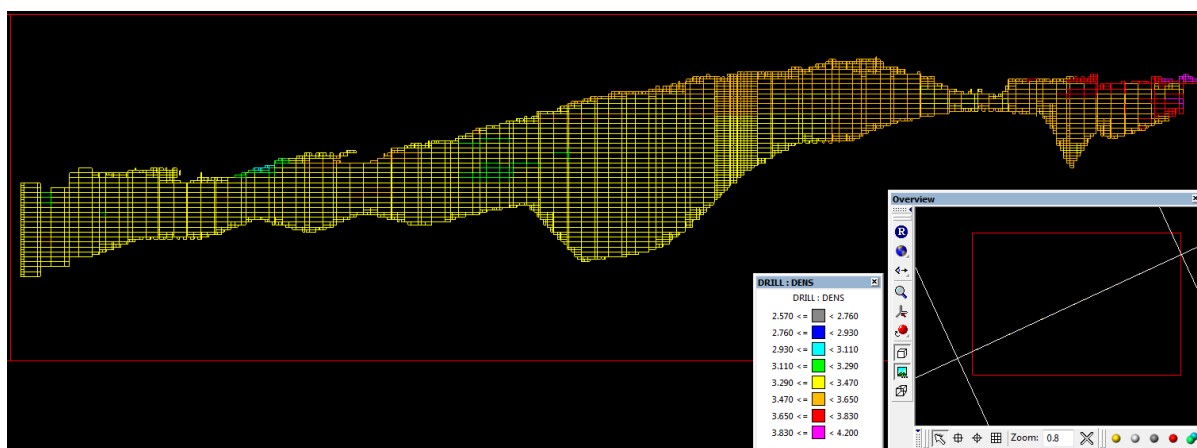
Os resultados obtidos por cada um dos métodos foram validados usando diferentes metodologias, incluindo ferramentas gráficas e estatísticas. As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, representam visualmente um exemplo da distribuição espacial dos valores de densidade após o processo de estimativa. A mesma seção do modelo de blocos foi representada nessas figuras para cada um dos métodos DENS\_OK, DENS\_OK\_REGRESS e DENS\_REGRESS, respectivamente.



**Figura 4.12:** DENS\_OK – Seção vertical longitudinal mostrando a densidade estimada por KO utilizando as amostras medidas em laboratório (105 dados).



**Figura 4.13:** DENS\_OK\_REGRESS – Seção vertical longitudinal mostrando a densidade estimada por KO utilizando os dados de densidades medidos em laboratório mais os dados calculados via regressão linear (1090 dados).



**Figura 4.14:** DENS\_REGRESS – Seção vertical longitudinal mostrando a densidade definida pela regressão linear com a variável teor de ferro aplicada diretamente no modelo de blocos para todos os dados estimados de Fe.

Ao analisar as seções observa-se que as maiores diferenças se encontram no setor leste e na superfície do depósito mineral, onde os teores de ferro mais elevados estão localizados. Visto que os teores de ferro diminuem em profundidade, a densidade também diminuirá, uma vez que a correlação entre densidades e teores de ferro para a mina de Serra Azul é alta. Como a maioria das amostras de densidade foram extraídas de setores mais profundos ou intermediários do depósito, em profundidade os valores obtidos pelas estimativas (DENS\_OK e DENS\_OK\_REGRESS) são mais parecidos com a média das amostras.

A Tabela 4.5 compara o resultado das estimativas com os 1090 dados provenientes de densidades medidos em laboratório mais os dados calculados via regressão linear, evidenciando que as médias e demais estatísticas são semelhantes e a não existência de um viés na estimativa.

**Tabela 4.5:** Comparação de estatísticas das estimativas KO usando os dados provenientes de densidades medidos em laboratório mais os dados calculados via regressão linear.

Estadísticas	Amostras medidas Laboratório + Regressão	Dados Estimados "DENS_OK"	BlockData "dens_ok" Vs Sample%Diff	Dados Estimados "DENS_OK_REGRESS"	BlockData "dens_ok_regress" Vs Sample%Diff	Dados Estimados "DENS_REGRESS"	BlockData "dens_regress" Vs Sample%Diff
Pontos	1090	65756	-	65984	-	65986	-
Média	3.48	3.38	-2.70	3.45	-0.84	3.45	-0.60
Máximo	4.20	3.89	-7.41	4.09	-2.61	4.08	-2.86
75%	3.56	3.44	-3.28	3.52	-1.25	3.51	-1.28
50%	3.45	3.40	-1.50	3.44	-0.21	3.44	-0.18
25%	3.36	3.32	-1.12	3.37	0.39	3.38	0.47
Mínimo	2.76	2.91	5.41	2.96	7.20	2.95	6.84

Com o objetivo de verificar a eficácia do método de estimativa aplicado para DENS\_OK e DENS\_OK\_REGRESS foi realizado uma validação cruzada sobre o conjunto de dados. As

Figuras 4.15 e 4.16 mostram os gráficos de correlação e da distribuição de erros que são gerados ao realizar a validação cruzada.

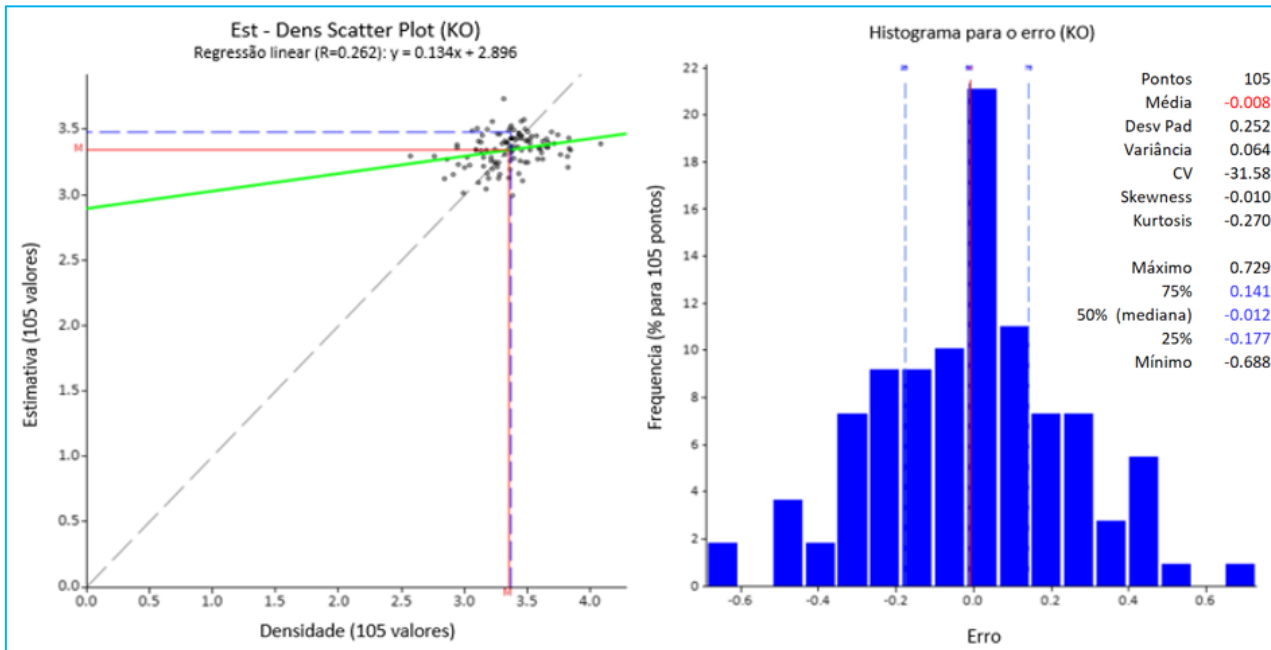


Figura 4.15: DENS\_OK-Validação cruzada para a estimativa da densidade por KO.

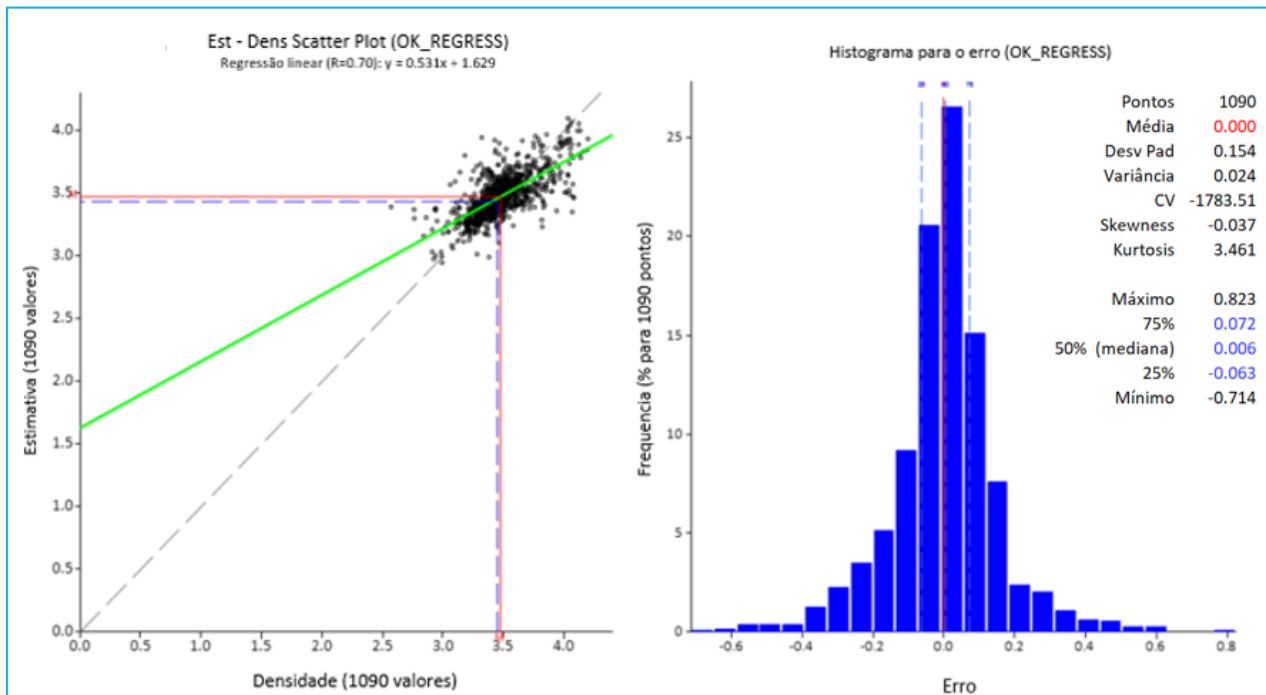
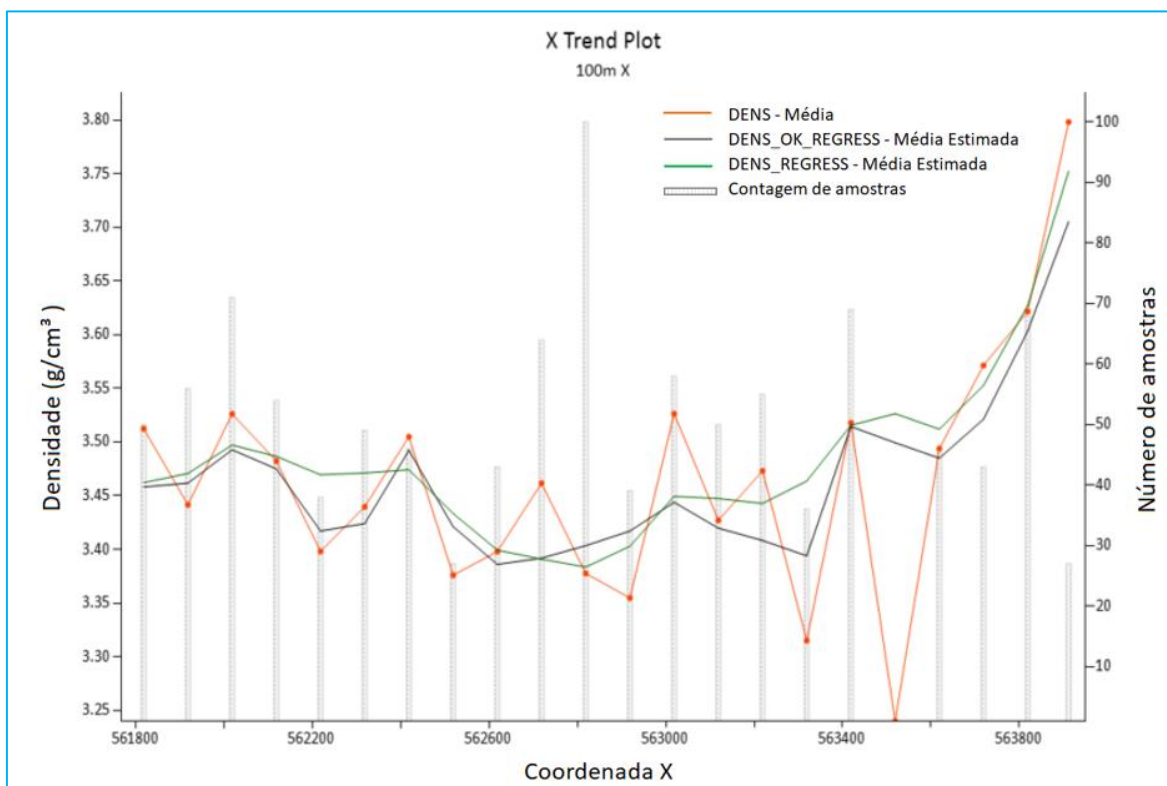


Figura 4.16: DENS\_OK\_REGRESS-Validação cruzada para a estimativa da densidade por KO.

Os gráficos “Scatter Plot” das Figuras 4.15 e 4.16 mostram a correlação dos valores reais da densidade com os valores estimados por krigagem ordinária. O coeficiente de correlação varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, melhor é a correlação e, portanto, mais eficaz a estimativa. Já os histogramas representam a distribuição dos erros, onde dois parâmetros devem ser observados com atenção, a média dos erros e o seu desvio (espalhamento).

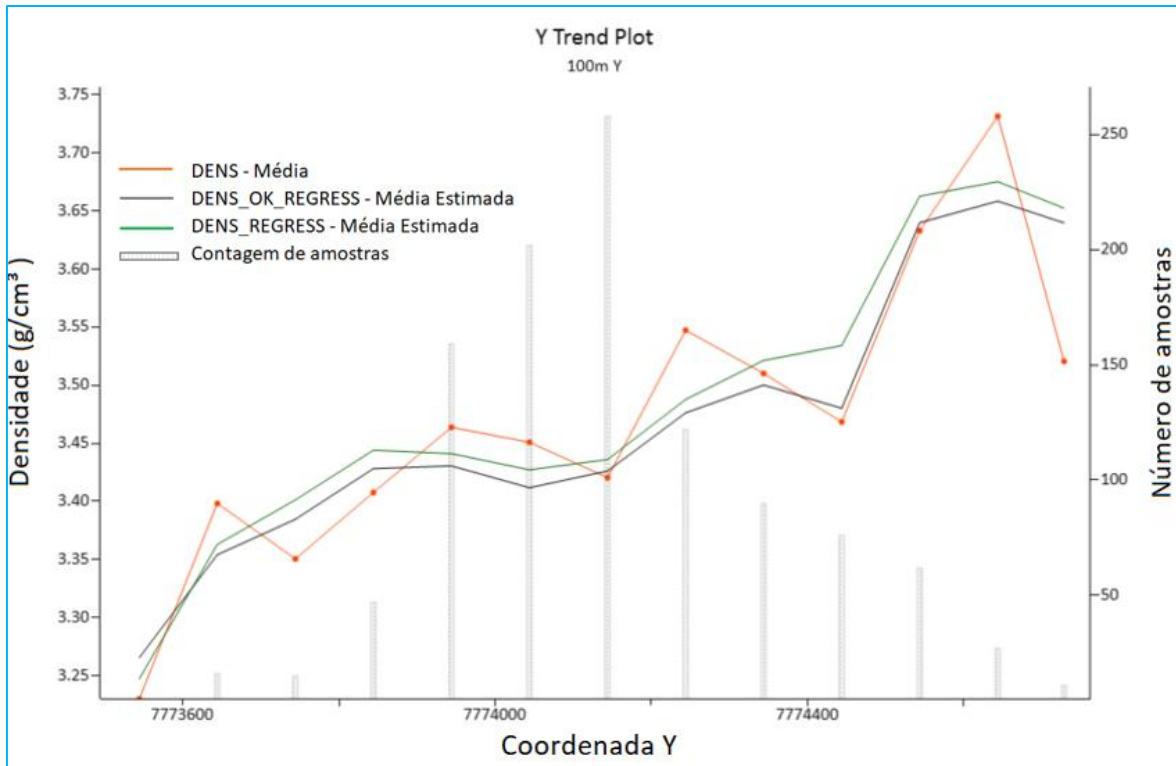
Ao analisar os gráficos é notável que a melhor correlação foi obtida pelo método DENS\_OK\_REGRESS com um valor de 0.70. A baixa correlação do método DENS\_OK pode ser explicada pelo pequeno número de amostras utilizadas na estimativa. Em relação à média dos erros o ideal é que esse valor seja igual a zero.

Outra metodologia utilizada para verificar a eficácia do método de estimativa é a análise de deriva ou “Trend Plots”. As Figuras 4.17 a 4.19 mostram o comportamento da variável densidade em diferentes direções (X, Y, Z) para as estimativas DENS\_OK\_REGRESS, DENS\_REGRESS e a média das 1090 amostras. O eixo y dos gráficos representa os valores de densidade nas amostras, enquanto o eixo x apresenta as coordenadas do modelo de blocos em que os dados medidos foram comparados com os resultados estimados. Na sequência, a Figura 4.20 mostra um histograma representando essas três distribuições.

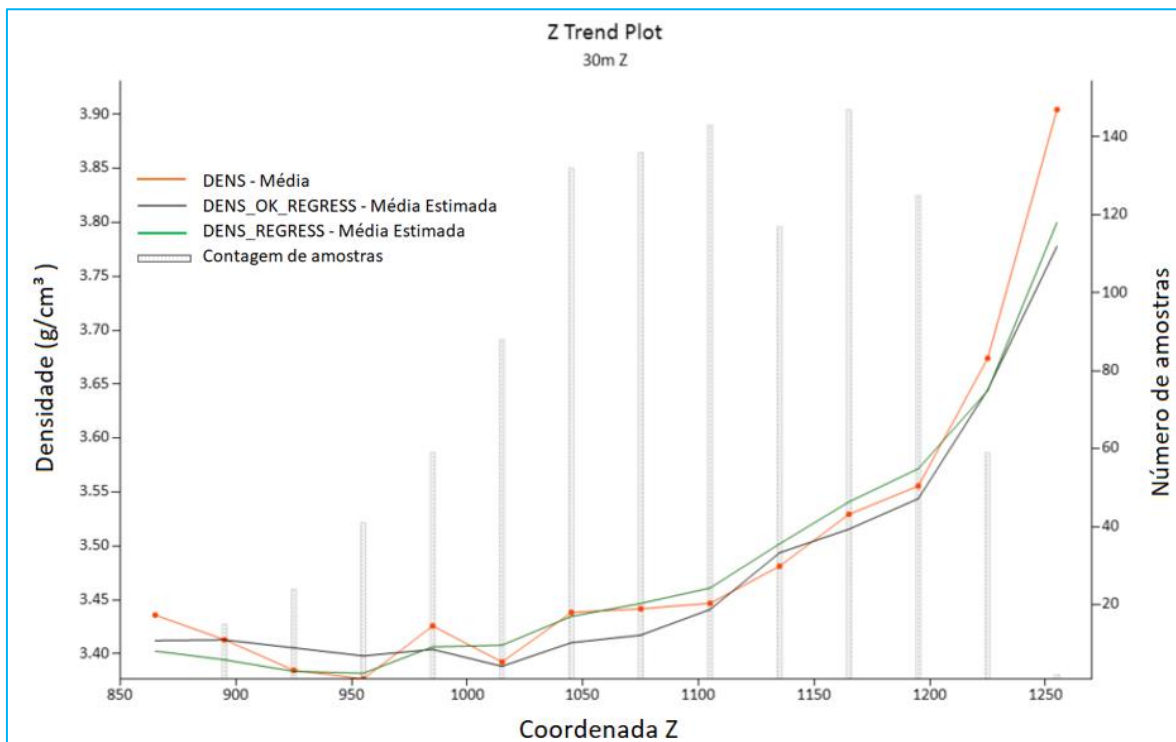


**Figura 4.17:** Análise de deriva para o eixo x. (DENS\_OK\_REGRESS, DENS\_REGRESS e a média das 1090 amostras).



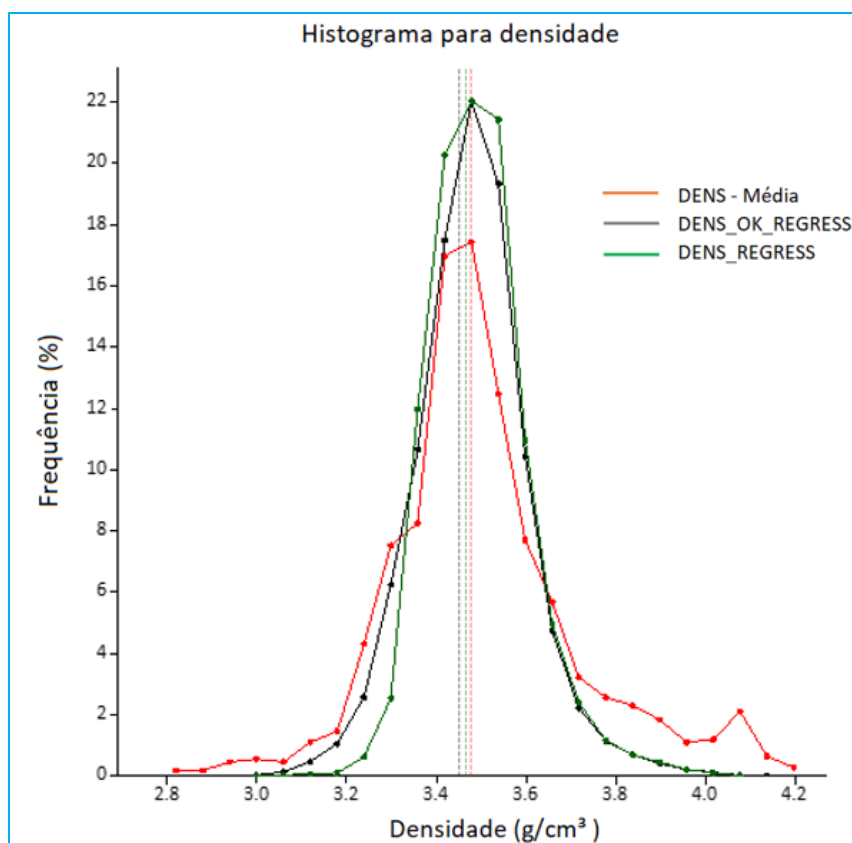


**Figura 4.18:** Análise de deriva para o eixo y. (DENS\_OK\_REGRESS, DENS\_REGRESS e a média das 1090 amostras).



**Figura 4.19:** Análise de deriva para o eixo z. (DENS\_OK\_REGRESS, DENS\_REGRESS e a média das 1090 amostras).





**Figura 4.20:** Histograma para as amostras de densidade. (DENS\_OK\_REGRESS, DENS\_REGRESS e a média das 1090 amostras).

As linhas vermelhas plotadas nos gráficos representam os dados reais (1090 pontos), enquanto as curvas preta e verde representam os métodos DENS\_OK\_REGRESS e DENS\_REGRESS respectivamente. Uma maior sobreposição das linhas significa uma maior proximidade entre dado reais e estimados, ou seja, uma melhor qualidade na estimativa.

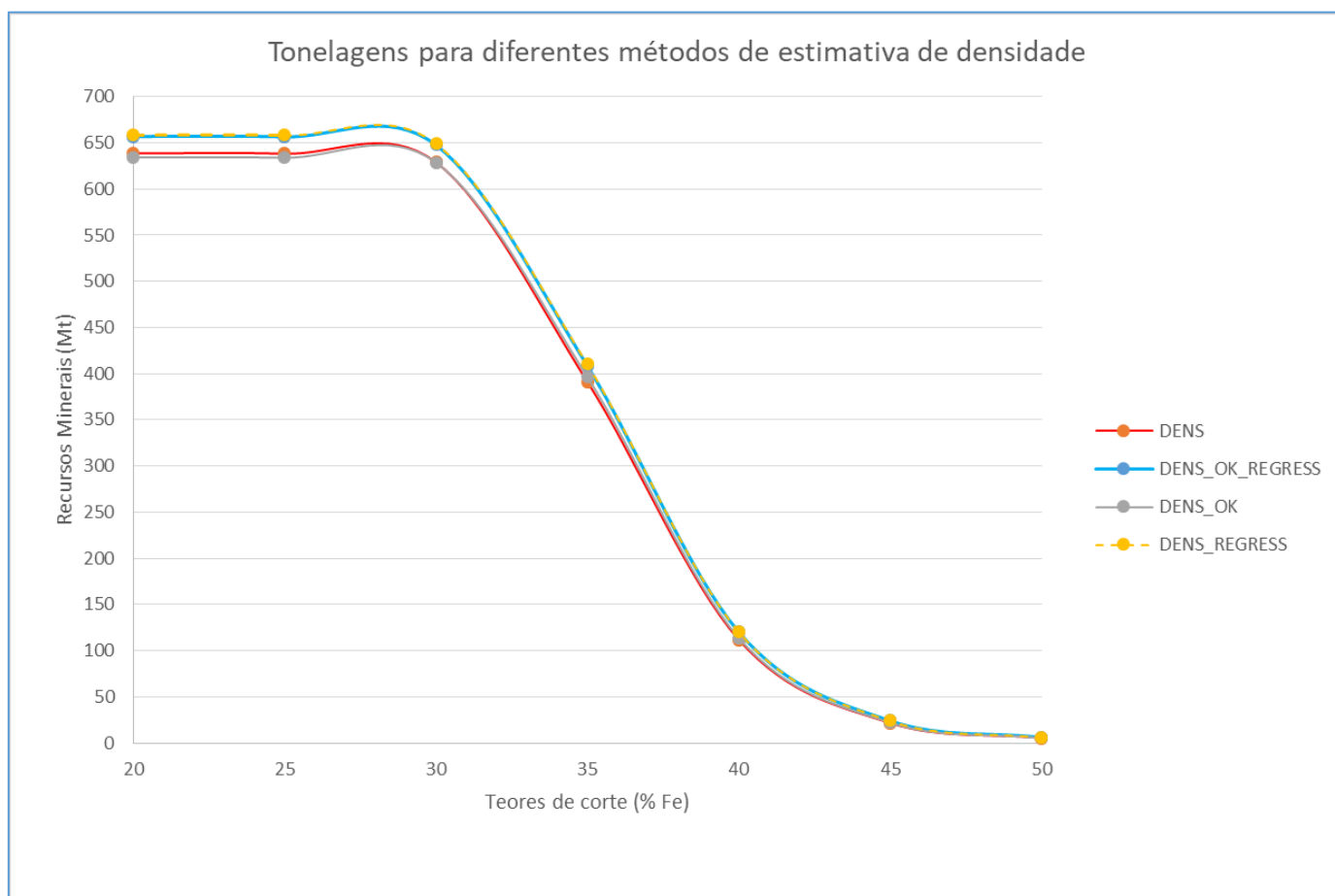
Ao analisar os gráficos de análise de deriva observa-se que os dois métodos analisados são muito próximos e refletem as tendências dos dados de entrada, mas no geral, o método DENS\_OK\_REGRESS é mais aderente a curva dos dados reais do que o outro método.

Portanto, baseada nos dados de validação cruzada e na análise deriva, pode-se concluir que o método DENS\_OK\_REGRESS é a escolha mais adequada a ser utilizada nas etapas de planejamento de lavra. Conforme visto anteriormente, o grau de correlação entre os valores reais e krigados, assim como a distribuição dos erros, apresentou melhores resultados para esse método. A correlação obtida foi de 0.7, a média dos erros obtida foi zero e o desvio padrão 0.154.

A Tabela 4.6 e a Figura 4.21 a seguir mostram a relação tonelagem x teor para as estimativas de recursos minerais realizadas para o depósito de Serra Azul a partir dos quatro métodos de determinação de densidades investigados. Devido à confidencialidade das informações, valores proporcionais aos reais são apresentados. Os resultados mostram que as tonelagens estimadas utilizando a média das amostras de densidade estão sendo subestimadas em aproximadamente 3% se comparadas com o cálculo de tonelagens utilizando a variável densidade estimada pelos métodos DENS\_OK\_REGRESS e DENS\_REGRESS.

**Tabela 4.6:** Tonelagens e teores cubadas no modelo de blocos para os quatro métodos de determinação das densidades.

Teor de Corte	DENS		DENS_OK		DENS_OK_REGRESS		DENS_REGRESS	
	Fe (%)	Massa (Mt)	Fe (%)	Massa (Mt)	Fe (%)	Massa (Mt)	Fe (%)	Massa (Mt)
15	18.53	639	18.53	634	18.53	657	18.53	658
20	23.14	639	23.14	634	23.15	657	23.15	658
25	29.05	638	28.91	634	29.06	657	29.06	658
30	33.32	629	33.34	629	33.33	648	33.33	649
35	37.46	391	37.46	396	37.47	408	37.47	411
40	41.75	112	41.75	114	41.76	120	41.76	121
45	47.01	22	47.01	22	47.02	24	47.03	24
50	52.09	5	52.09	5	52.11	6	52.11	6



**Figura 4.21:** Gráfico Tonelagem x Teor para os quatro métodos de determinação das densidades.

## 4.5 Estimativa de Reservas Minerais

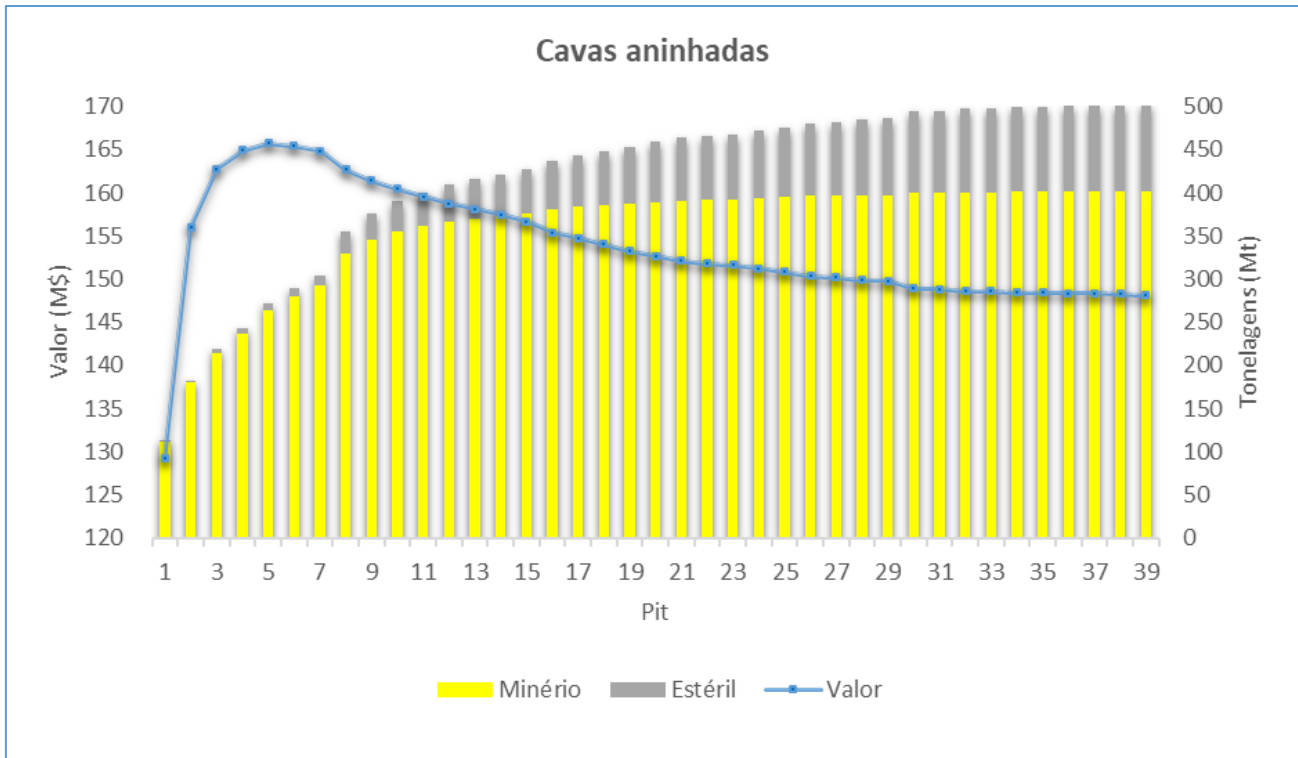
Uma Reserva Mineral é definida (conforme as diretrizes do Instituto Canadense de Mineração - CIM) como parte economicamente lavrável de um Recurso Mineral Medido ou Indicado com comprovação de viabilidade técnica e benefício econômico e, portanto, refletem um maior nível de detalhamento no trabalho de engenharia suportado por parâmetros técnicos e econômicos, bem como todos os outros "fatores modificadores" (por exemplo, legais, ambientais, comerciais, relações comunitárias e governamentais).

O impacto da variabilidade do atributo densidade na avaliação das Reservas Minerais desenvolvido neste trabalho está baseado nas melhores práticas do setor mineral. O desenvolvimento da etapa de planejamento de lavra teve como dados de entrada o modelo de blocos resultante da etapa anterior, superfície topográfica e os dados operacionais da mina de Serra Azul referentes aos parâmetros geotécnicos, custos operacionais, preços de venda, recuperação metalúrgica, perda e diluição na lavra. A otimização de cava e o sequenciamento de lavra foram desenvolvidos e os resultados e discussões dessas etapas são apresentados nas seções a seguir.

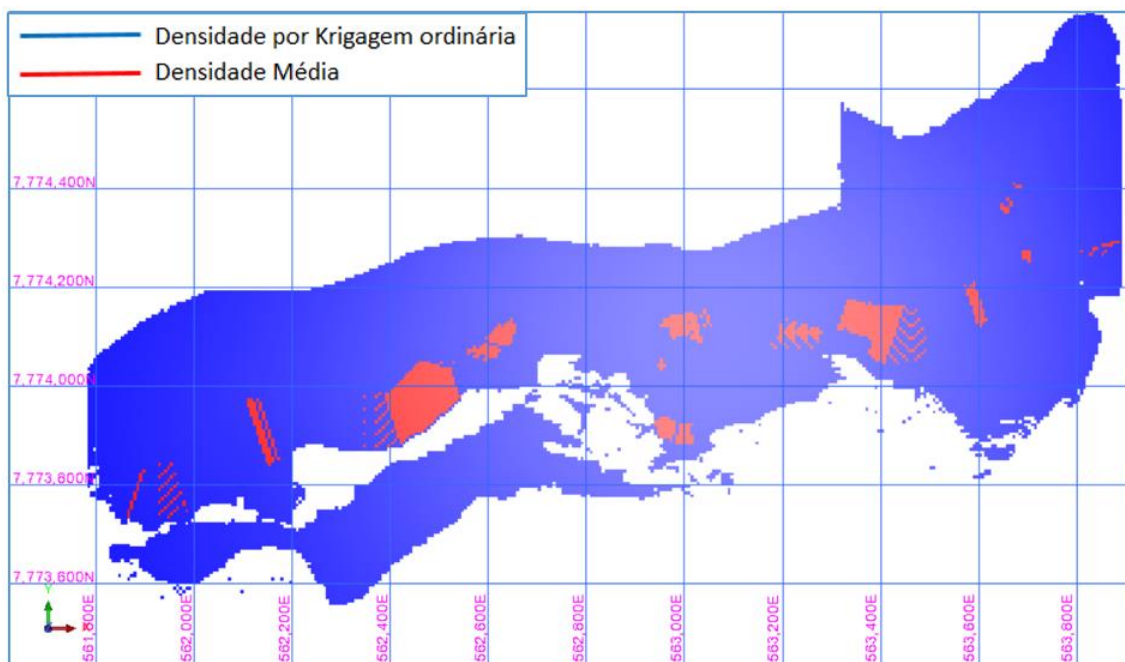
### 4.5.1 Otimização de cava

Com o auxílio do software *Whittle*, os dados e as restrições operacionais do projeto foram utilizados como dados de entrada para o software no processo de otimização e determinação da cava final. Um conjunto de cavas aninhadas foi gerado por meio da aplicação de fatores crescentes de retorno financeiro relacionado ao preço de venda do minério de ferro (*revenue factors*). Dentre essas cavas aninhadas, aquela de retorno financeiro máximo foi selecionada como cava final e utilizada posteriormente nas etapas de operacionalização e sequenciamento de lavra. Esse fator foi variado de 0.5 a 1.5 gerando assim 39 cavas aninhadas, contendo como informações principais tonelagens de minério e estéril, teores de ferro e sílica, além do valor econômico de cada pit. A Figura 4.22 representa o gráfico com as cavas aninhadas. Por motivos de confidencialidade são apresentados dados proporcionais aos reais.

Dois cenários foram analisados e ambos indicaram a cava número 5, representada na Figura 4.22, como a de retorno financeiro máximo. Os resultados das otimizações de cava podem ser comparados visualmente na Figura 4.23. O primeiro cenário (Cava matemática em vermelho) estima as reservas minerais a partir da utilização do atributo densidade determinado pela média das amostras, enquanto o segundo cenário (cava matemática em Azul) analisa as reservas minerais a partir do atributo densidade estimado por krigagem ordinária desenvolvida a partir dos resultados do método DENS\_OK\_REGRESS apresentado na seção anterior.



**Figura 4.22:** Cavas aninhadas geradas pelo *Whittle* no processo de otimização.



**Figura 4.23:** Cavas otimizadas para os dois cenários investigados.

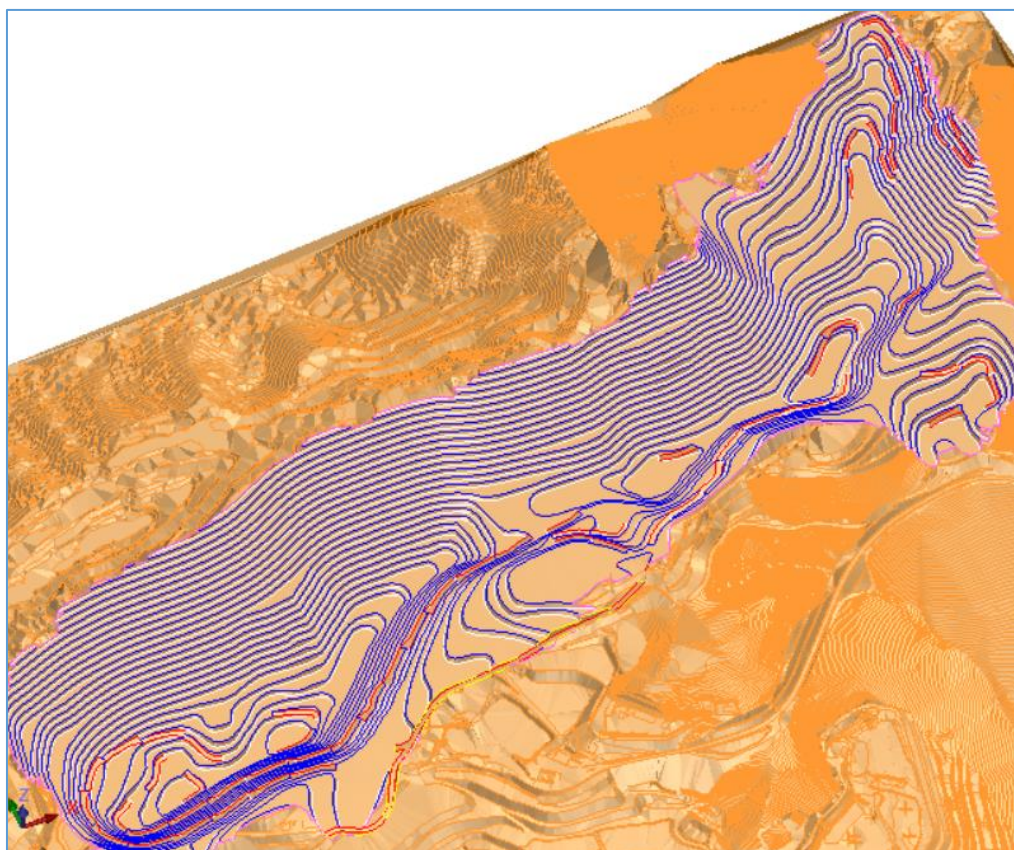
Observa-se uma boa aderência entre os dois cenários, no entanto, a cava otimizada a partir da densidade média é menor em alguns setores do depósito mineral. Essa alteração na geometria representa uma diferença de aproximadamente 5% nas toneladas de itabirito compacto. Com o objetivo de melhor investigar o impacto da variável densidade e as

diferenças existentes entre os dois cenários, essas cavas foram operacionalizadas e divididas em três setores (central, oeste e leste). Os parâmetros operacionais utilizados para realização do desenho de mina estão descritos na Tabela 4.7 e uma vista panorâmica da cava operacionalizada é apresentada na Figura 4.24.

Ao analisar os resultados das cubagens por setorização da cava, observou-se que as maiores diferenças de tonelagens entre os dois métodos são observadas nos primeiros 80 metros da cava final e decrescem à medida que a cava vai atingindo níveis mais profundos do depósito. Essas diferenças são destacadas na Figura 4.25 e analisadas nas seções verticais oeste-leste representadas nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28.

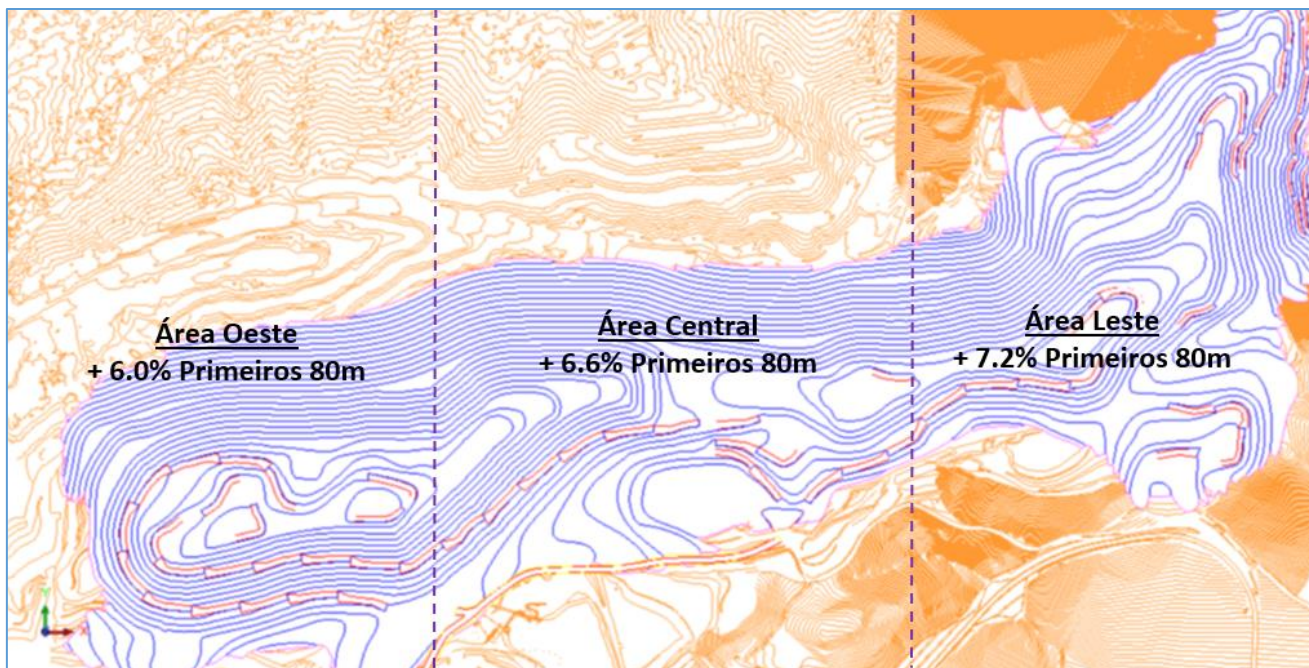
**Tabela 4.7:** Parâmetros operacionais para o desenho de mina.

Restrições para Operacionalização de cava		
Parâmetros	Material	
	Compacto	Semi-compacto / Friável
Altura de bancada (m)	10	10
Largura das bermas (m)	6	8
Largura máxima das rampas (m)	10	10
Gradiente máxima das rampas (%)	12	12
Ângulo de face	80	65
Ângulo global	46	32

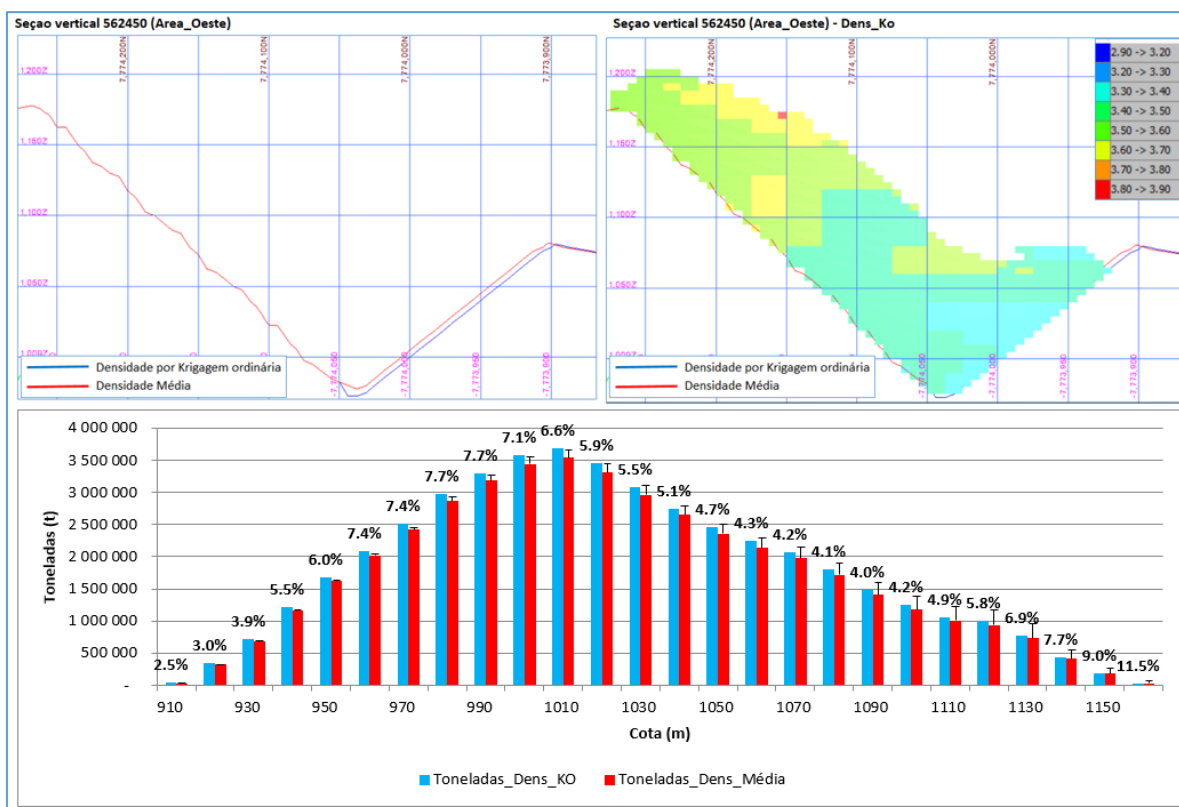


**Figura 4.24:** Cava final operacionalizada

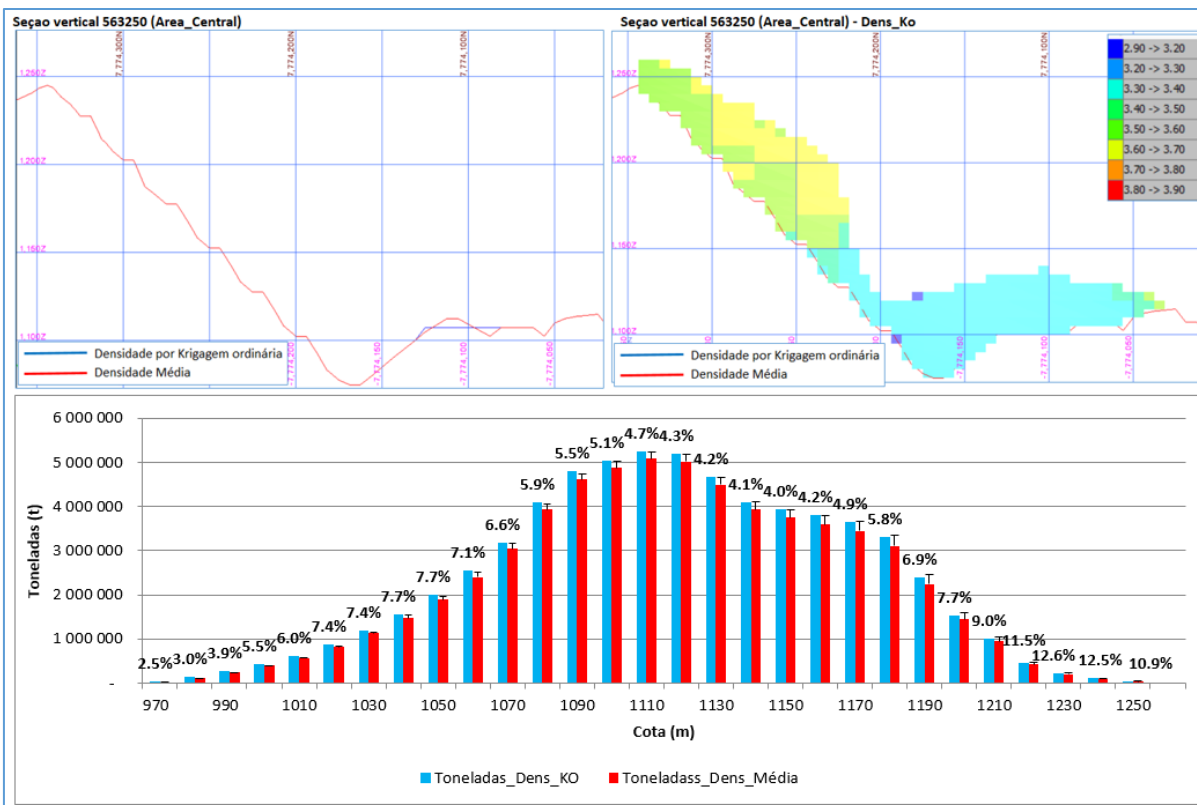




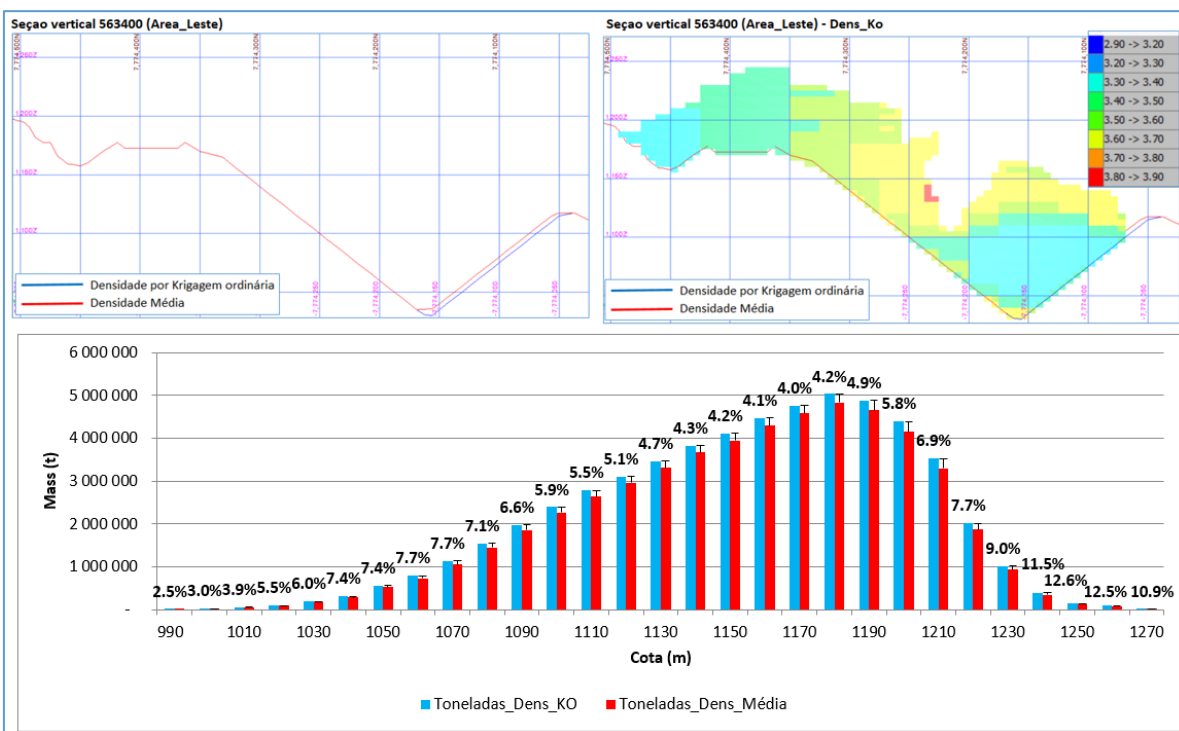
**Figura 4.25:** Diferenças percentuais de tonelagens de Itabirito Compacto entre os dois cenários de estimativa de Reservas Minerais.



**Figura 4.26:** Seção vertical X = 562450 e gráfico de tonelagens estimada por banco – Área Oeste



**Figura 4.27:** Seção vertical X = 563250 e gráfico de toneladas estimada por banco – Área Central



**Figura 4.28:** Seção vertical X = 563400 e gráfico de toneladas estimada por banco – Área Leste

As seções representadas indicam que as principais diferenças se encontram nas áreas próximas as superfícies do depósito mineral da mina de Serra Azul. Os gráficos mostrando as estimativas de tonelagem por cota dentro da cava final indicam discrepâncias de até 12% entre as tonelagens estimadas pela densidade média com a densidade por KO nessas regiões. Uma vez que a maioria das amostras de densidade foram extraídas de setores mais profundos ou intermediários do depósito, em profundidade os valores obtidos por estimativa (KO) são mais parecidos com a média das amostras.

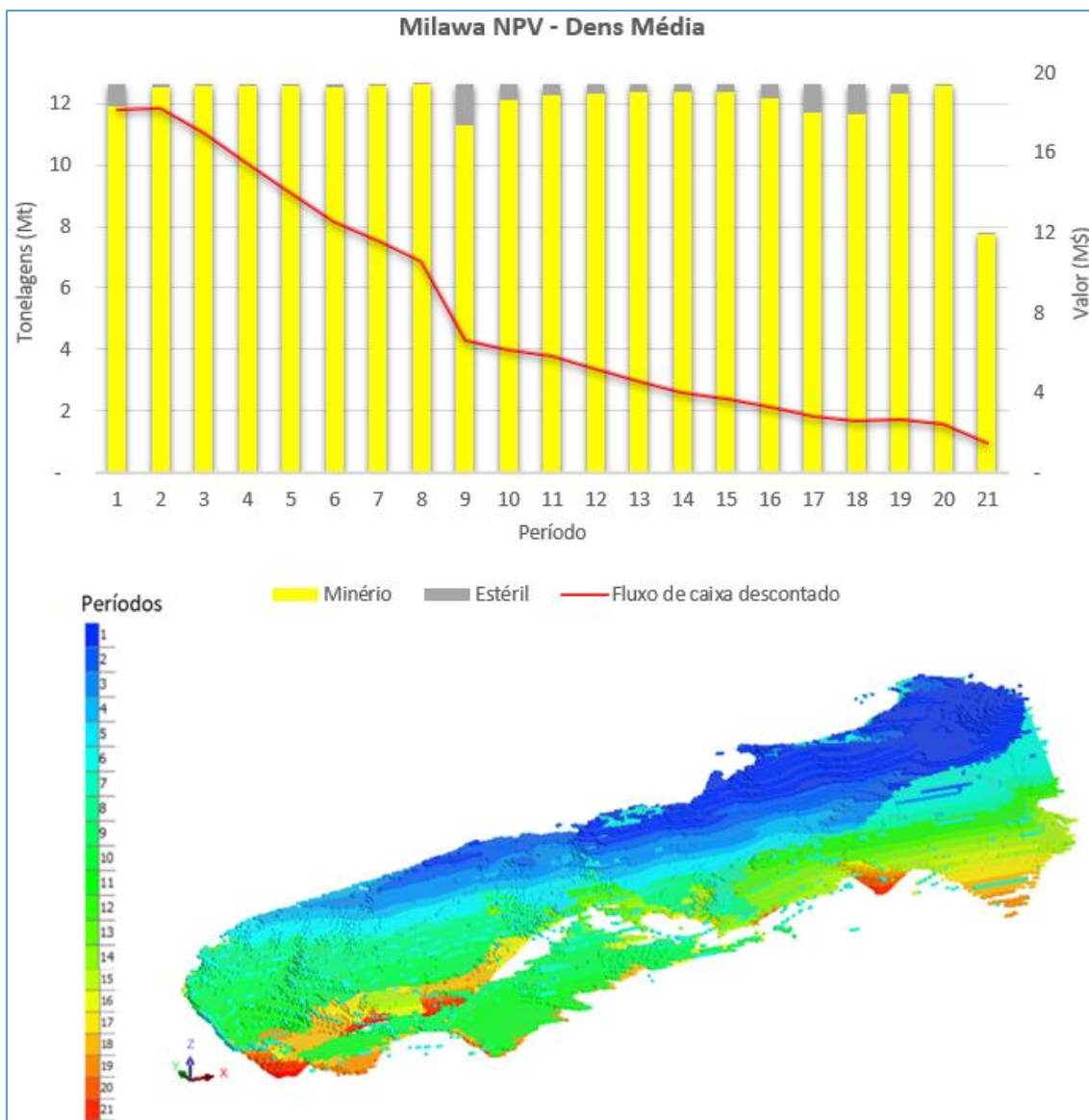
As seções referentes as áreas leste e oeste mostram que essas regiões do pit estão sendo subestimadas pela utilização da média do atributo densidade (blocos verdes e amarelos no topo da seção), enquanto algumas regiões da área central estão sendo superestimadas (predominância de blocos em azul com valores abaixo da densidade média). Ao adotar uma densidade estimada por KO algumas mudanças na definição dos limites ótimos da cava final foram observadas. Como esses limites são determinados com base no valor econômico dos blocos que por sua vez são baseados na quantidade de metal contido, que dependem dos valores de densidade para serem calculados, essas mudanças eram esperadas de ocorrer.

#### 4.5.2 Sequenciamento de lavra

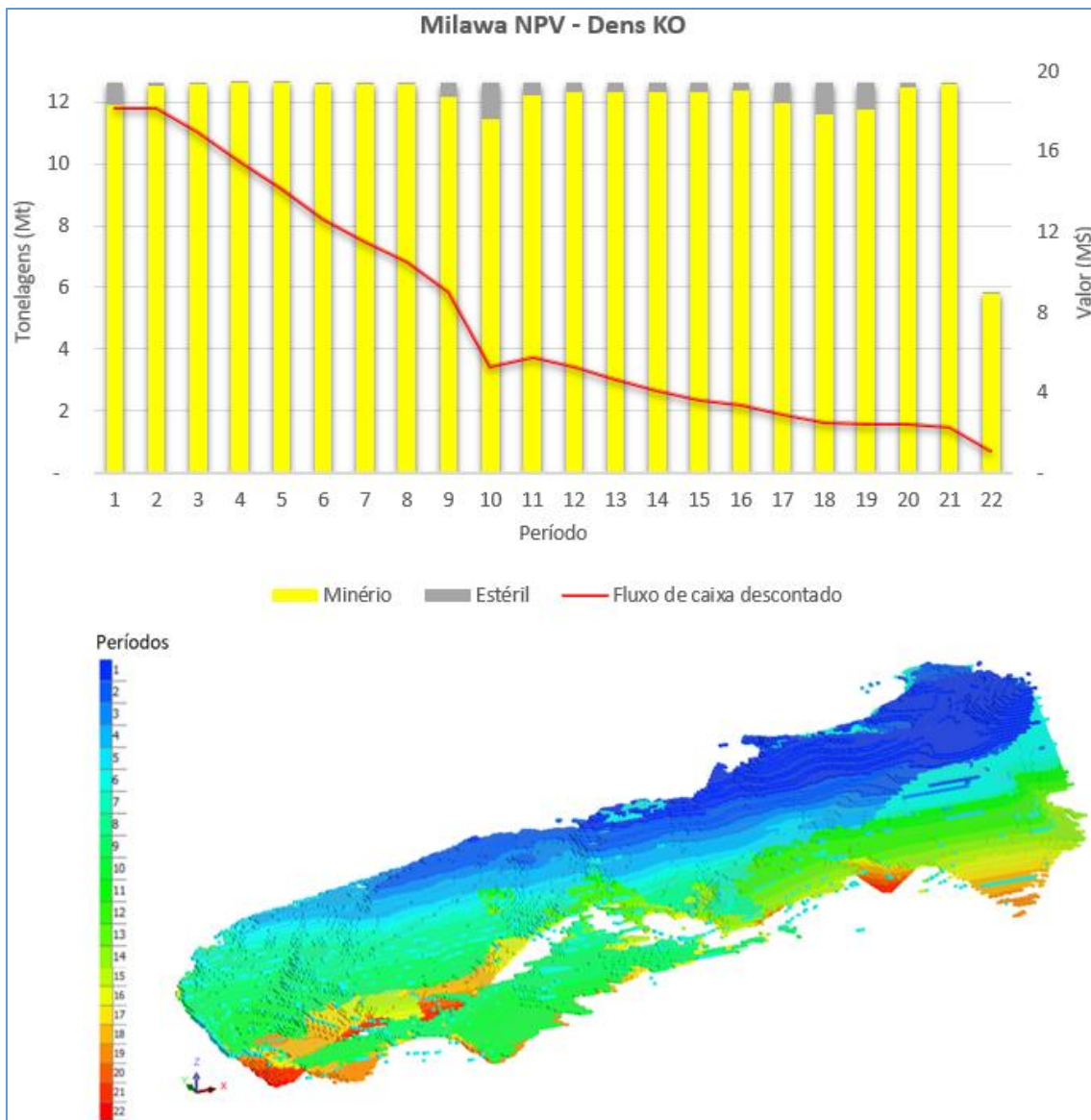
Uma primeira análise do impacto da variabilidade do atributo densidade na etapa de sequenciamento de lavra foi realizada ainda no software *Whittle*. Algumas cavas intermediárias à geometria final de lavra foram selecionados (*pushbacks*). Os limites de produção foram estabelecidos, incluindo metas de movimentação anual de mina, alimentação da instalação de beneficiamento de minério, qualidades químicas e a taxa de desconto por período (10%) a ser aplicada na análise do valor presente líquido do projeto. A ferramenta *Milawa NPV* foi utilizada. O algoritmo *Milawa* busca maximizar o VPL do projeto postergando a remoção de estéril, tanto quanto possível, enquanto a produção de minério é mantida constante (Jamalan, 2017).

Dessa forma, programas de produção foram simulados e os resultados estão representados nos gráficos das Figuras 4.29 e 4.30. Os gráficos mostram as tonelagens lavradas por período para cada um dos cenários analisados. As colunas em amarelo e cinza são a quantidades de minério e estéril extraídos, respectivamente. A linha vermelha mostra o fluxo de caixa descontado para o projeto ao longo do sequenciamento, além disso, os blocos extraídos por período também são apresentados utilizando uma escala de cores. Devido à confidencialidade das informações, valores proporcionais aos reais são apresentados.





**Figura 4.29:** Milawa NPV - Sequência de extração gerada para o cenário Dens Média



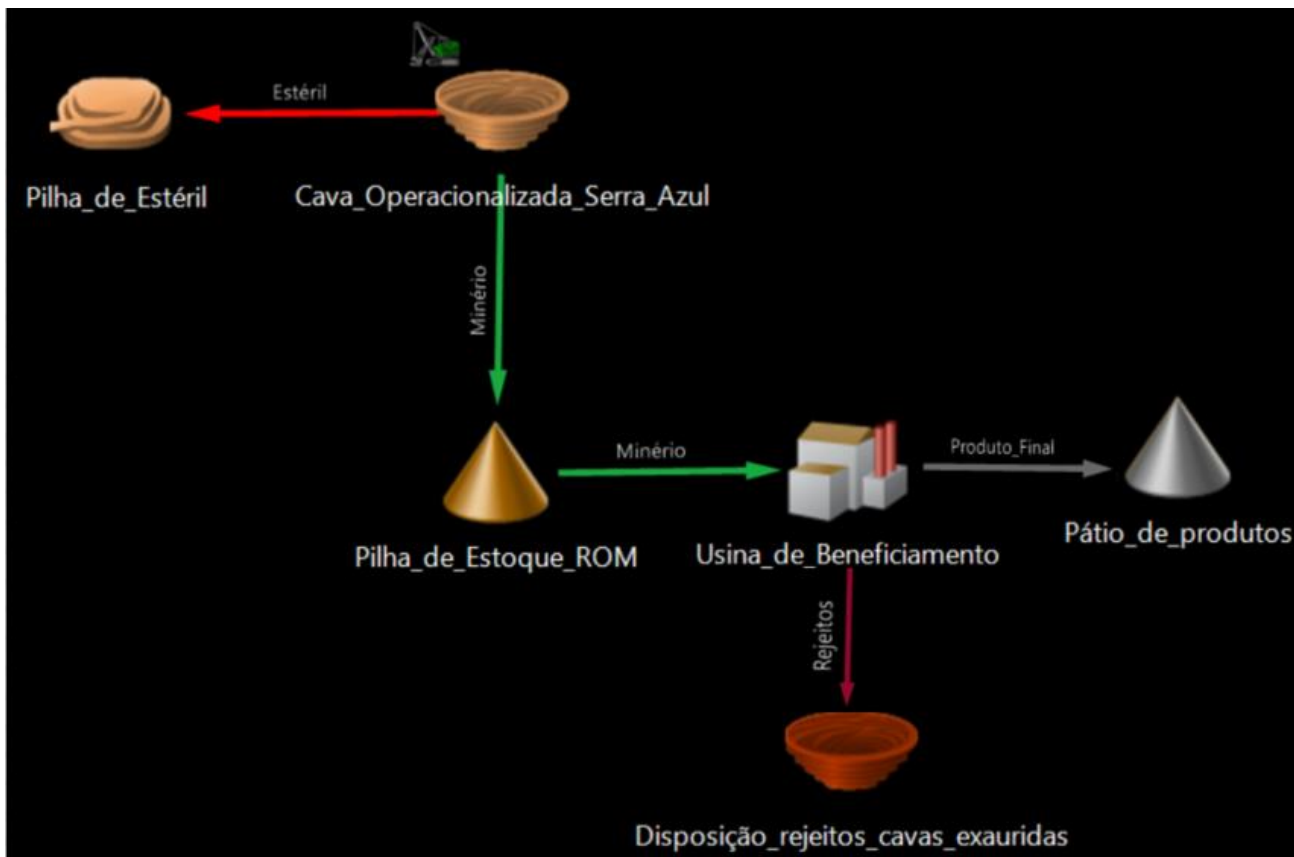
**Figura 4.30:** Milawa NPV - Sequência de extração gerada para o cenário Dens KO

As simulações de produção realizadas com o *Whittle* exibem resultados muito próximos para os dois cenários. Em síntese, a diferença de 5% encontrada na etapa de otimização da cava se refletiu em um ano a mais de vida útil da mina, aumentando o VPL do projeto em 2%, mostrando que a melhor sequência de produção é a que utiliza a densidade estimada bloco a bloco.

Na prática, as simulações executadas no *Whittle* são válidas para fins estratégicos e cálculos de fluxos de caixa. No entanto, a sua implementação não é operacional uma vez que as simulações realizadas pelo software utilizam a cava final matemática e não levam em consideração outras restrições como limitações físicas e disponibilidades de recursos (Flores, 2008).

Dessa maneira, a definição de programas de produção para o cenário econômico escolhido e estabelecimento de uma sequência de lavra operacional, respeitando as restrições geométricas, ambientais e econômicas do projeto foram estabelecidas com o software *Geovia MineSched*.

As principais restrições incorporadas ao *MineSched* para atualização do cenário de produção foram os parâmetros operacionais tais como número de frentes de lavra ativa, posição de início da lavra, direções de lavra, precedências espaciais entre as áreas, taxas de produção (mina e usina), capacidades e disponibilidade física dos equipamentos de lavra. O objetivo de 5,33 milhões de toneladas por ano de produção (base seca) foi a meta principal estabelecida para o sequenciamento de produção e, como consequência, as quantidades de minério e estéril necessário ano a ano para atingir esse objetivo foram estabelecidas pelo software. O fluxograma referente a movimentação dos materiais simulados no *MineSched* é representado na Figura 4.31.



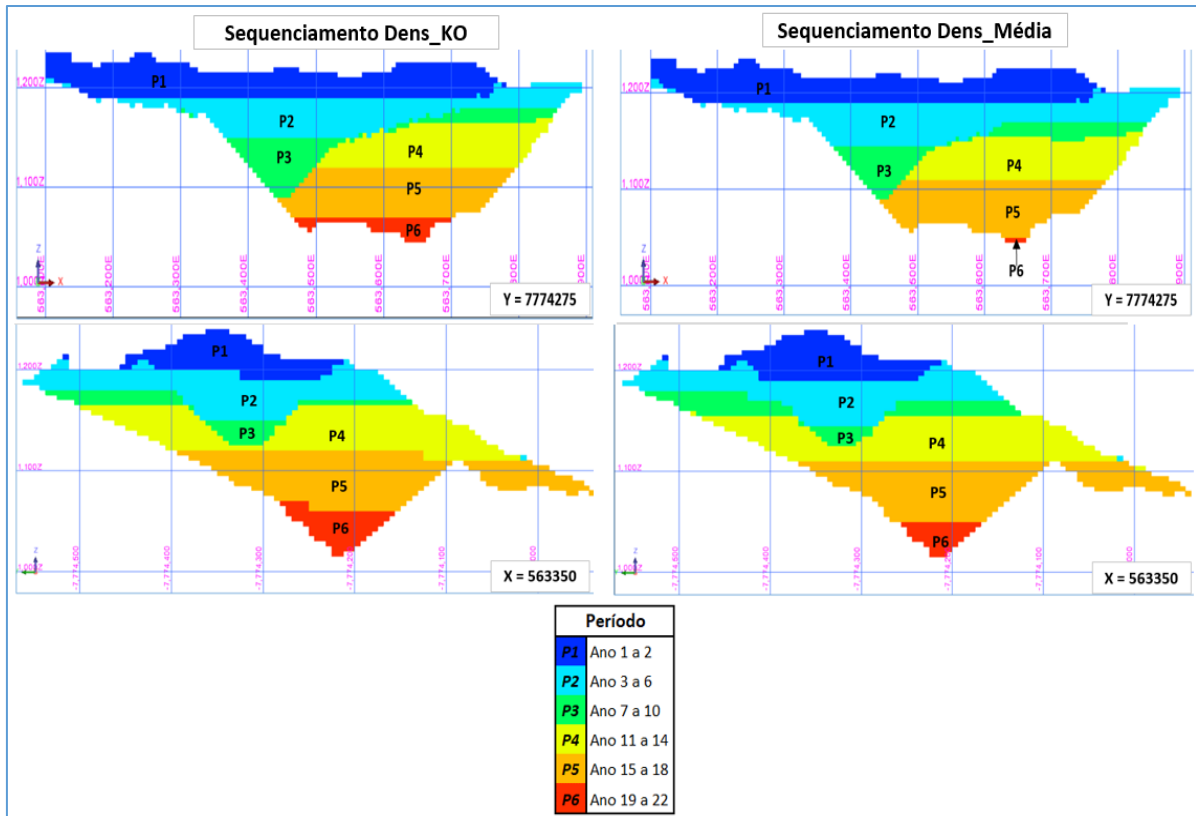
**Figura 4.31:** Fluxograma de movimentação de materiais – Software *Geovia MineSched*

O resumo dos resultados do sequenciamento de lavra operacional simulado com o *MineSched* é apresentado na Tabela 4.8, onde se observa as quantidades de minério, estéril, relação estéril minério (REM), qualidade de minério alimentado e produção da usina. Devido a confidencialidade das informações, os dados apresentados para o sequenciamento de lavra são valores proporcionais aos reais.

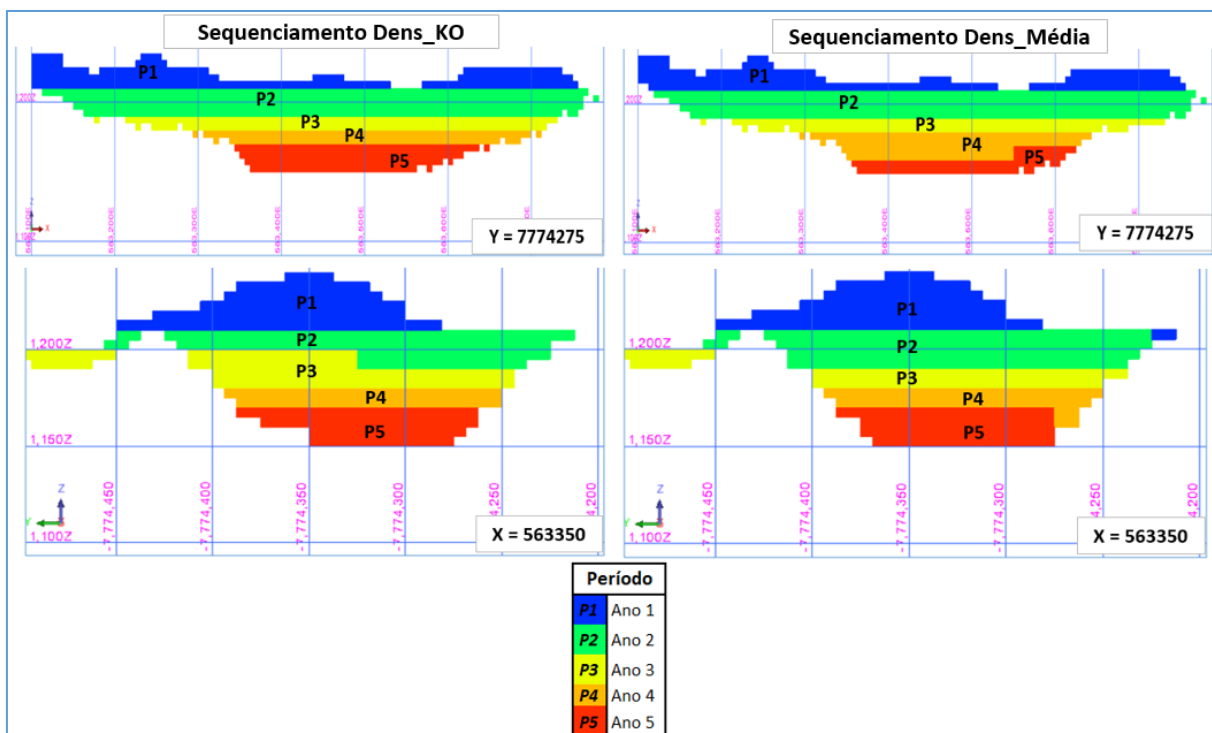
**Tabela 4.8:** Resultados do sequenciamento de lavra operacional pelo software *MineSched*

Período	Cenário - Densidade Média					Cenário - Densidade por KO				
	Minério (kt)	Estéril(kt)	REM	Teor Fe (%)	Produção (kt)	Minério (kt)	Estéril(kt)	REM	Teor Fe (%)	Produção (kt)
1	11 983	639	0.05	43.2%	5 330	11 993	629	0.05	43.2%	5 330
2	11 971	129	0.01	41.3%	5 330	11 995	152	0.01	41.6%	5 330
3	11 965	78	0.01	41.9%	5 330	11 940	65	0.01	41.4%	5 330
4	11 945	178	0.01	42.0%	5 345	11 936	102	0.01	42.0%	5 345
5	11 978	74	0.01	41.5%	5 330	11 952	148	0.01	41.7%	5 330
6	12 539	1 425	0.11	37.9%	5 330	12 495	1 328	0.11	38.2%	5 330
7	12 383	381	0.03	38.5%	5 330	12 153	279	0.02	40.0%	5 330
8	12 007	31	0.00	41.4%	5 345	12 012	25	0.00	41.5%	5 345
9	11 938	114	0.01	41.1%	5 330	11 938	114	0.01	41.1%	5 330
10	11 983	117	0.01	41.6%	5 330	11 936	117	0.01	41.7%	5 330
11	12 447	376	0.03	38.1%	5 330	12 425	342	0.03	38.3%	5 330
12	12 597	297	0.02	37.7%	5 345	12 662	328	0.03	37.4%	5 345
13	12 748	348	0.03	37.3%	5 330	12 674	327	0.03	37.6%	5 330
14	12 792	257	0.02	37.4%	5 330	12 790	401	0.03	37.4%	5 330
15	12 723	207	0.02	37.1%	5 330	12 663	234	0.02	37.4%	5 330
16	12 815	721	0.06	37.0%	5 345	12 837	342	0.03	37.0%	5 345
17	12 681	1 080	0.09	37.4%	5 330	12 610	866	0.07	37.5%	5 330
18	12 513	607	0.05	38.1%	5 330	12 679	796	0.06	37.3%	5 330
19	12 732	80	0.01	37.1%	5 330	12 477	619	0.05	38.3%	5 330
20	12 679	25	0.00	37.1%	5 345	12 807	40	0.00	36.9%	5 345
21	2 492	1	0.00	37.1%	1 066	12 635	25	0.00	37.1%	5 330
22						2 545	1	0.00	36.7%	1 075
<b>Total</b>	<b>249 911</b>	<b>7 164</b>	<b>0.03</b>	<b>39.2%</b>	<b>107 740</b>	<b>262 154</b>	<b>7 280</b>	<b>0.03</b>	<b>39.2%</b>	<b>113 079</b>

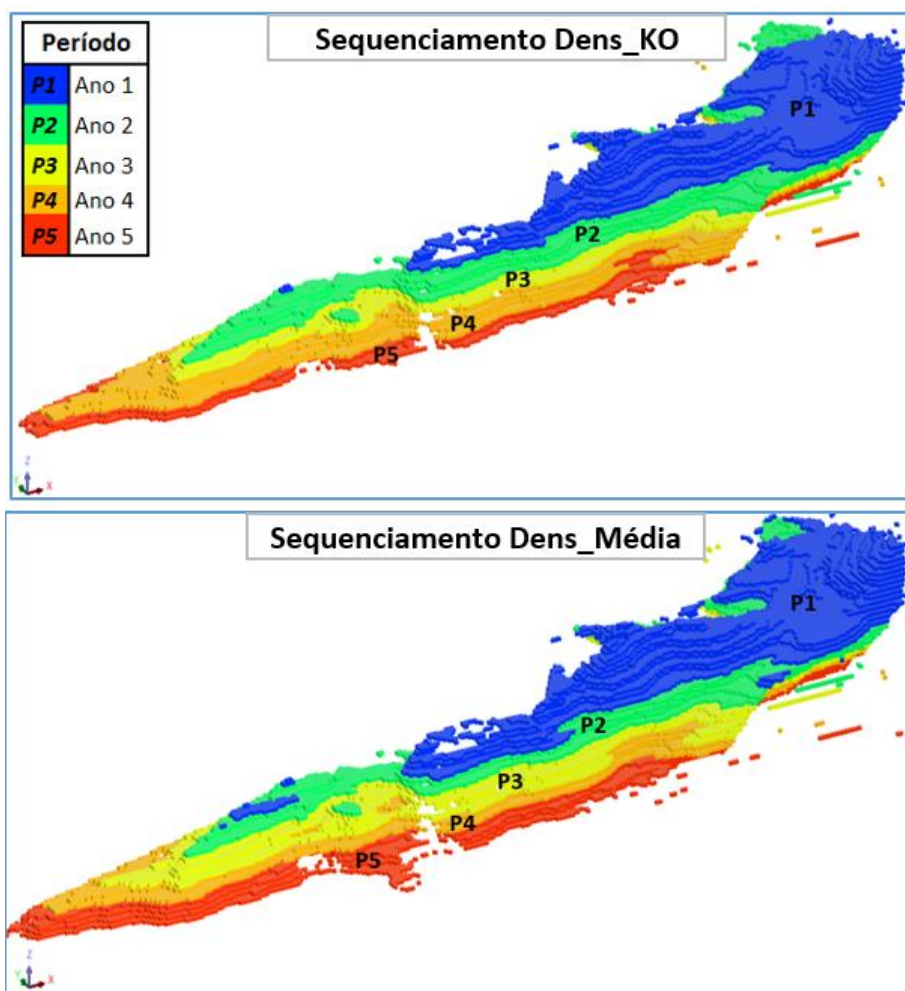
Analisando os dados da Tabela 4.8 observa-se que após simulação do sequenciamento operacional de lavra, a diferença de aproximadamente 5% nas toneladas de minério apontada entre os cenários de otimização de cava permaneceu. Consequentemente a produção apontada para o cenário onde a média do atributo densidade foi utilizado também está sendo subestimada em 5%. Não houve diferenças significativas nos teores de ferro lavrados ano a ano, contudo, ao analisar seções verticais que indicam os blocos extraídos por período observa-se que para atingir a meta de produção de 5.33 Mtpa, o ritmo de lavra por área da mina, simulado pelo *MineSched*, foi diferente. As Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 ilustram alguns exemplos onde esse fato pode ser observado, ademais, a Tabela 4.9 detalha os volumes de minério e estéril a serem movimentados para os primeiros cinco anos de produção, incluindo a diferença percentual de volumes entre os dois cenários.



**Figura 4.32:** Seções verticais, sul-norte ( $Y = 7774275$ ) e oeste-leste ( $X = 563350$ ), representando a programação de produção segundo simulação com a densidade média (seções da direita) e densidade estimada (seções da esquerda).



**Figura 4.33:** Seções verticais, sul-norte ( $Y = 7774275$ ) e oeste-leste ( $X = 563350$ ), representando a programação para os primeiros cinco anos de produção.



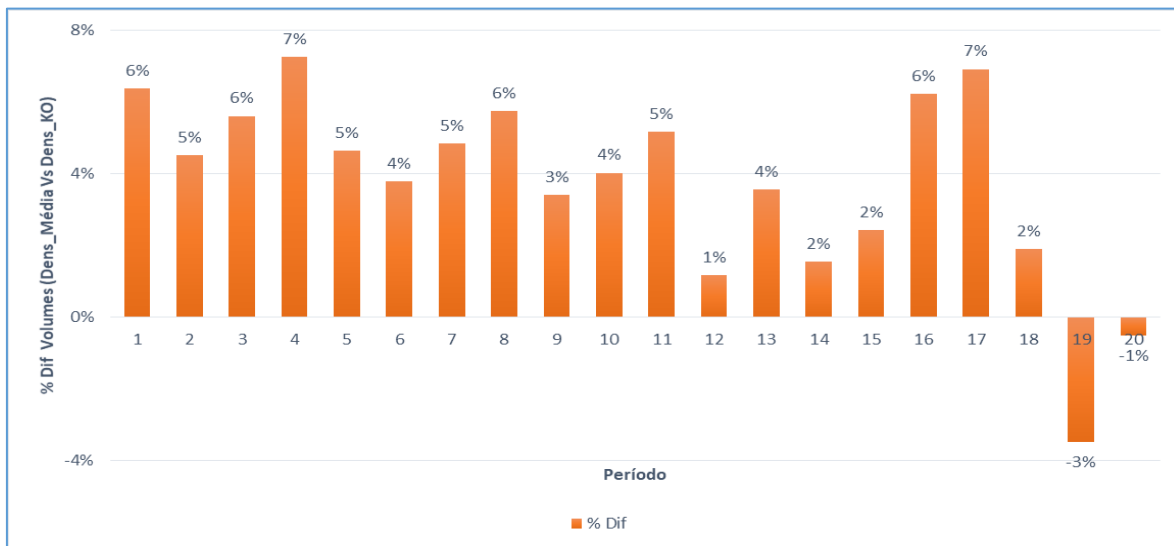
**Figura 4.34:** Vista panorâmica representando o sequenciamento de lavra para os primeiros cinco anos de produção

**Tabela 4.9:** Resultados do sequenciamento mostrando o volume lavrado para os primeiros cinco anos de produção.

Período	Cenário - Densidade Média					Cenário - Densidade por KO					% Dif Volumes Dens_Média Vs Dens_KO
	Minério (kt)	Minério (km <sup>3</sup> )	Estéril (kt)	Estéril (km <sup>3</sup> )	Volume Total (km <sup>3</sup> )	Minério (kt)	Minério (km <sup>3</sup> )	Estéril (kt)	Estéril (km <sup>3</sup> )	Volume Total (km <sup>3</sup> )	
1	11 983	3 721	639	198	3 919	11 993	3 490	629	194	3 684	6%
2	11 971	3 643	129	45	3 689	11 995	3 474	152	55	3 529	5%
3	11 965	3 632	78	27	3 659	11 940	3 442	65	23	3 465	6%
4	11 945	3 674	178	54	3 728	11 936	3 444	102	32	3 476	7%
5	11 978	3 739	74	23	3 761	11 952	3 550	148	45	3 595	5%
<b>Total</b>	<b>59 842</b>	<b>18 409</b>	<b>1 098</b>	<b>349</b>	<b>18 757</b>	<b>59 815</b>	<b>17 400</b>	<b>1 096</b>	<b>349</b>	<b>17 749</b>	<b>6%</b>

Os resultados da sequência de blocos lavrados considerando cada método mostram que para atingir as mesmas toneladas de minério requeridas na programação de produção, o cenário que considera a média do atributo densidade necessita, de forma constante, movimentar um volume maior. A Tabela 4.8 mostra que para os primeiros cinco anos

essa movimentação foi maior em aproximadamente 6%. A variação percentual do volume lavrado ao longo de todo sequenciamento de lavra é representando na Figura 4.35.



**Figura 4.35:** Variação percentual do volume lavrado entre os cenários analisados

Levando-se em conta o que foi observado, entende-se que essa diferença percentual trará impactos nas análises de reconciliação de mina e no dimensionamento de frota, uma vez que os equipamentos de lavra terão que perfurar, desmontar, carregar e transportar um volume um pouco maior de material para atingir o mesmo nível de produção. Esses impactos serão investigados nas duas próximas seções deste trabalho.

### 4.5.3 Dimensionamento de frota

Com a finalidade de investigar o impacto da variável densidade no dimensionamento de frota, uma análise foi realizada levando em consideração o volume lavrado para os primeiros cinco anos de produção descritos na Tabela 4.9.

Conforme descrito na seção 4.1, o desmonte do material da mina de Serra Azul é realizado por meio de perfuração e desmonte por explosivos, além disso, o sistema de carregamento e transporte é composto por escavadeiras hidráulicas do porte da Liebherr 954, que atuam no carregamento, e caminhões do tipo Scania 8x4 que atuam no transporte. O porte desses equipamentos foi selecionado em conformidade com a escala de produção, geologia do depósito e as dimensões da cava econômica operacionalizada, de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 4.7, proporcionando maior eficiência operacional as atividades de lavra da mina. A título de ilustração, a Figura 4.36 representa o porte dos equipamentos utilizados na mina de Serra Azul.





**Figura 4.36:** Porte dos equipamentos de carregamento e transporte da mina de Serra Azul

As DMTs, Distâncias Médias de Transporte, foram calculadas e definidas de acordo com as geometrias de lavra resultante da etapa de sequenciamento. A DMT estimada para o minério considera a distância referente ao centro de massa das frentes de lavra para o britador, enquanto a DMT estimada para o estéril considera o centro de massa das frentes de lavra para a pilha de estéril.

Para os cinco primeiros períodos do sequenciamento, as diferenças volumétricas observadas entre os dois cenários investigados não afetaram no valor das distâncias medias de transporte. Assim, os valores de DMT para as estimativas de frota foi a mesma e estão resumidas na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10:** Distâncias Médias de Transporte, DMTs, para os primeiros cinco anos de produção.

Período	DMT (km)	
	Minério	Estéril
1		
2	1.40	4.70
3	1.47	4.37
4	1.32	4.01
5	1.26	3.60

Demais premissas utilizadas no dimensionamento da frota são:

- Índice de disponibilidade física (IDF), que representa o percentual do tempo que o equipamento esteve disponível para operar, medindo assim o desempenho da manutenção;
- Índice de utilização (IU), que representa o percentual do tempo que o equipamento esteve operando, em relação ao tempo que a manutenção lhe permitiu operar;



- Rendimento operacional, que representa o percentual de tempo que o equipamento operou em relação ao tempo total disponível, ou seja, é o produto da IDF pela IU;
- Estimativa das produtividades das frotas.

Para estimativa de produtividade dos equipamentos de carga, além das premissas citadas anteriormente, foram considerados o fator de enchimento da caçamba, umidade e empolamento do material. Esses fatores influenciam na quantidade de passes que a escavadeira necessitaria para carregar os caminhões, impactando conseqüentemente no tempo de carregamento.

Para estimativa de produtividade dos equipamentos de transporte o cálculo do tempo de viagem dos caminhões é realizado considerando a sua velocidade média (carregado e vazio), os tempos de carregamento, manobra e basculamento, além do tempo de ciclo da escavadeira.

Já para estimativa da produtividade da perfuratriz os dados históricos da operação de Serra Azul referente a taxa de penetração da operação de perfuração foram utilizados. A taxa de penetração, de acordo com Abbaspour H et al. (2018), depende de fatores como o diâmetro e velocidade de rotação do bit, força pulldown e resistência à compressão uniaxial da rocha.

A Tabela 4.11 mostra as premissas básicas utilizadas para o cálculo das horas de operação utilizadas no dimensionamento da frota enquanto a Tabela 4.12 mostra o resultado dos cálculos de produtividade de carregamento e transporte nos primeiros cinco anos de produção para os dois cenários analisados. Por motivos de confidencialidade são apresentados dados proporcionais aos reais.

**Tabela 4.11:** Premissas para estimativas das horas de operação

Variável	Unidade	Quantidade
Disponibilidade física (IDF)	%	85%
Utilização (IU)	%	77%
Rendimento operacional	%	65%
Dias programados	Dias	365
Horas programadas	Horas	24
Horas calendário	Horas	8,760

**Tabela 4.12:** Resultado das estimativas de produtividade das operações de carregamento e transporte.

		Produtividades				
Período		1	2	3	4	5
Dens_Média	Transporte (t/h)	201.9	201.8	216.2	220.6	229.2
	Carregamento (t/h)	646.7	654.6	656.0	650.7	644.0
Dens_KO	Transporte (t/h)	205.0	203.8	219.1	224.9	231.6
	Carregamento (t/h)	674.6	676.6	679.4	679.1	666.2

Os dados da Tabela 4.12 indicam que as produtividades dos equipamentos de carregamento e transporte estão sendo subestimadas ao serem calculadas utilizando a densidade média. O maior impacto ocorre nas atividades de carregamento, uma vez que o número de passes necessários para carregar os caminhões dependerá da capacidade da concha, em toneladas, que depende da densidade empolada do material. Essa relação é representada por Borges (2013) com a seguinte equação:

$$C_e = FE \times V \times DE \quad (7)$$

Onde,

$C_e$  = Capacidade da concha em toneladas (t)

$FE$  = Fator de enchimento

$V$  = Volume da concha ( $m^3$ )

$DE$  = Densidade empolada do material ( $t/m^3$ )

Dessa maneira, ao estimar a produtividade dos equipamentos de carga utilizando a densidade empolada média do material, necessita-se consistentemente de um número maior de passes para enchimento do caminhão se comparado com o cenário onde a densidade foi estimada por KO. Consequentemente, o tempo de ciclo médio do equipamento de carga será maior, impactando na produtividade em toneladas por hora do carregamento. Uma vez que o tempo de ciclo dos equipamentos de transporte são dependentes do tempo de ciclo de carregamento, a produtividade dos caminhões também é afetada.

Para os equipamentos de perfuração, uma produtividade de 18 metros por hora baseada nos dados históricos da mina de Serra Azul foi utilizada. O principal impacto da variável densidade nessa etapa foi estimado com base no volume adicional de material a ser perfurado e desmontado descritos na Tabela 4.9.

Portanto, de posse dos volumes de produção, premissas operacionais e produtividades dos equipamentos de lavra descritos nessa seção, a estimativa das horas necessárias para atingir a produção e a quantidade de equipamentos requeridos foram calculados para os dois cenários de acordo com as seguintes equações:

$$H_{Req} = \frac{Produção}{Produtividade} \quad (8)$$

$$N_{Equip} = \frac{H_{Req}}{H_T} \quad (9)$$

Onde,

$Produção$  = Toneladas necessária por período em base úmida.

$Produtividade$  = Toneladas por hora estimada para os equipamentos.

$H_{Req}$  = Horas requeridas para atingir a produção necessária por período.

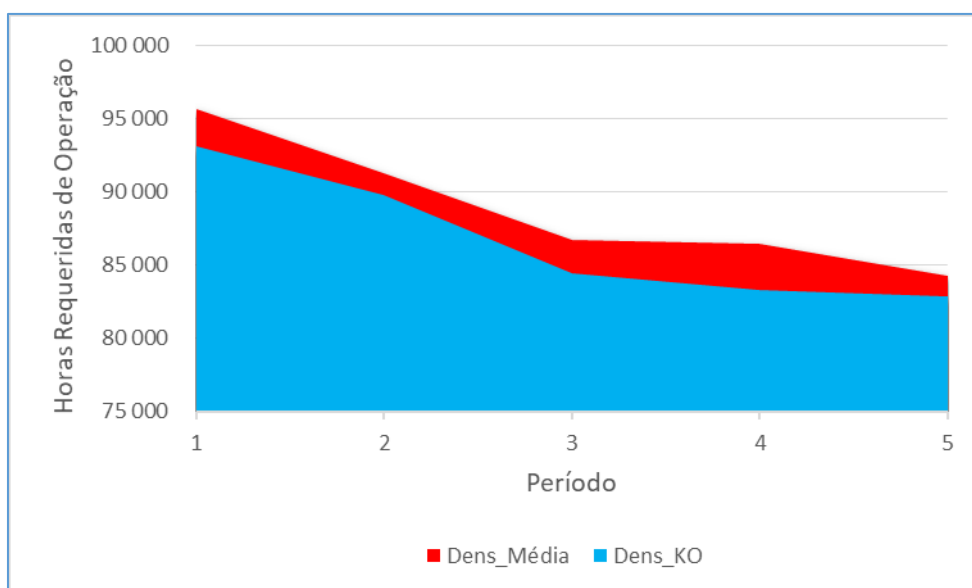
$N_{Equip}$  = Número de equipamentos

$H_T$  = Horas trabalhadas por período ( IDF x IU x Horas calendário)

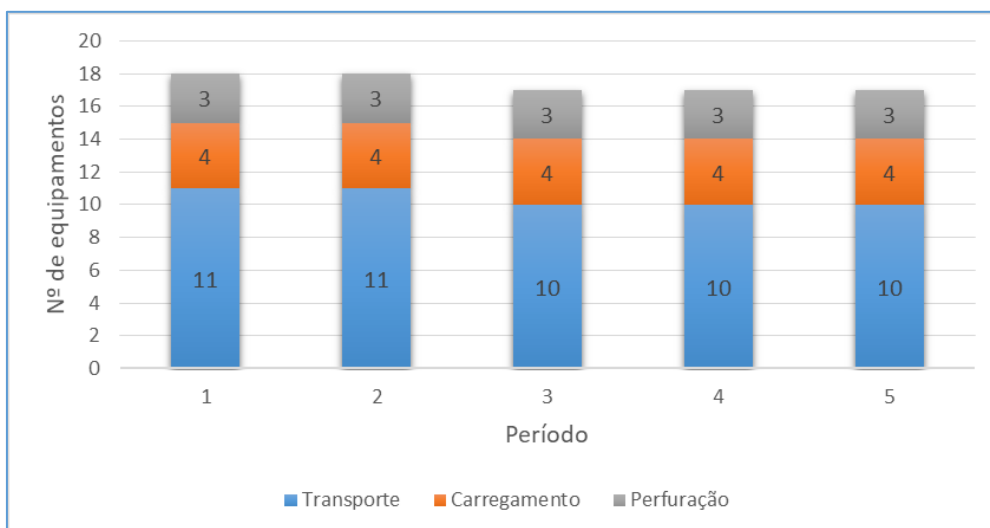
Essas equações foram incorporadas em uma planilha eletrônica do software *Microsoft Excel* onde as estimativas de horas e números de equipamentos foram calculadas. Os resultados estão representados nas figuras e tabelas a seguir. Observa-se que, devido a menor produtividade dos equipamentos de carga e transporte no cenário que considera a densidade média, o número de horas requeridas para atingir a mesma produção é maior, conforme representado na Tabela 4.13 e graficamente na Figura 4.37. No entanto, o número total de equipamentos de lavra não está sendo impactado pela variabilidade do atributo densidade e é igual para os dois cenários. A quantidade total de equipamentos dimensionada é representada na Figura 4.38.

**Tabela 4.13:** Horas requeridas para atingir a produção necessária por período

HReq - Horas requeridas para atender a produção						
Período		1	2	3	4	5
Dens_Média	Transporte (t/h)	62 885.0	60 286.0	55 988.5	55 243.1	52 846.1
	Carregamento (t/h)	19 636.1	18 580.4	18 451.3	18 731.3	18 810.2
	Perfuração (m/h)	13 147	12 373	12 274	12 506	12 617
Dens_KO	Transporte (t/h)	61 935.0	59 915.6	55 072.9	53 794.0	52 528.9
	Carregamento (t/h)	18 823.6	18 049.2	17 760.6	17 817.5	18 258.8
	Perfuração (m/h)	12 358	11 838	11 622	11 659	12 058



**Figura 4.37:** Horas requeridas para produção (Perfuração + Carregamento + Transporte)



**Figura 4.38:** Quantidade total de equipamentos dimensionada para os primeiros cinco anos de produção.

No dimensionamento da frota, por se tratar de equipamentos, os resultados encontrados foram arredondados para o primeiro número inteiro acima do valor calculado, por exemplo o resultado de 10,80 encontrado para os caminhões no período 1 do cenário Dens\_KO foi arredondado para 11. Similarmente, o resultado de 10,97 encontrado no mesmo período para o cenário Dens\_Média também foi arredondado para 11. Em razão desse arredondamento que os dois cenários estudados apresentam o mesmo número de equipamentos.

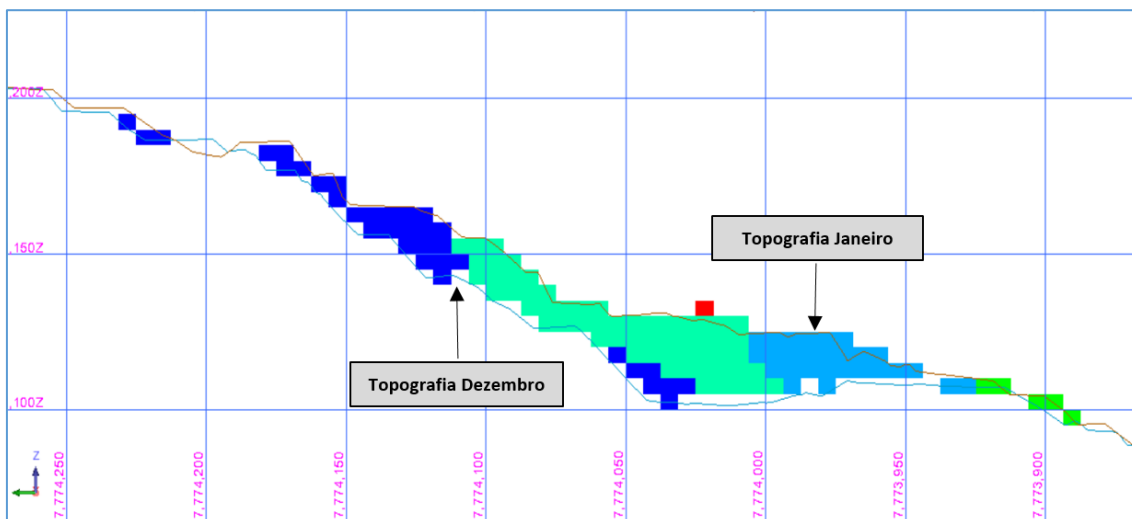
Por fim, com base nas informações desenvolvidas nessa seção, pode-se afirmar que ao utilizarmos a média do atributo densidade nos trabalhos de dimensionamento de frota da mina de Serra Azul estamos superestimando as horas necessárias de operação dos equipamentos de lavra, conforme pôde ser observado na Figura 4.37, gerando consequentemente um aumento dos custos operacionais do projeto. Para os primeiros 5 anos de produção desse estudo de caso esse superdimensionamento foi estimado em aproximadamente 3%, incluindo as horas acumuladas dos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte. Na prática essa capacidade ociosa da frota dimensionada pode estar sendo disfarçada por ineficiências operacionais, tais como esperas na carga e descarga, deslocamentos de frentes de trabalho, acerto de praça, troca de turno, etc. Como consequências a produtividade global da frota diminui e os custos de operação aumentam fugindo dos pontos ótimo calculados no dimensionamento.

#### 4.5.4 Reconciliação

Com o objetivo de aferir os modelos de blocos gerados nos dois cenários quanto a sua precisão e confiabilidade, trabalhos de reconciliação foram realizados comparando os resultados reais da lavra do itabirito compacto dos últimos cinco anos de operação com os resultados previstos para os planos de mina da área central de Serra Azul. O impacto de se considerar a variabilidade do atributo densidade nesse processo teve como dados de

entrada o modelo de blocos resultante em cada um dos cenários estudados e as superfícies topográficas referentes aos períodos analisados.

Para cada ano estudado foram obtidos os volumes dos blocos lavrados através das diferenças entre as topografias de Janeiro a Dezembro. A massa total lavrada nesses volumes foi comparada com a massa real lavrada nessas mesmas regiões para o mesmo intervalo de 12 meses. A seção vertical representada na Figura 4.39 exemplifica o uso das superfícies topográficas para geração dos blocos lavrados que foram utilizados nos cálculos de reconciliação.



**Figura 4.39:** Blocos de lavra gerados para cálculo de reconciliação

De acordo com Parker (2014) o processo de reconciliação envolve a coleta de dados de fontes distintas e independentes (planejamento, mina, usina) que são relacionados segundo três fatores F1, F2 e F3. O fator F1 relaciona as tonelagens, teores e quantidade de metal previstas em modelo de curto-prazo com as estimativas do modelo de longo prazo. O fator F2 relaciona as tonelagens produzidas na mina com as tonelagens que alimentam a planta de britagem enquanto o fator F3, definido como  $F1 \times F2$ , avalia a capacidade da mina de recuperar as tonelagens, teores e quantidade de metal estimados no modelo de longo-prazo.

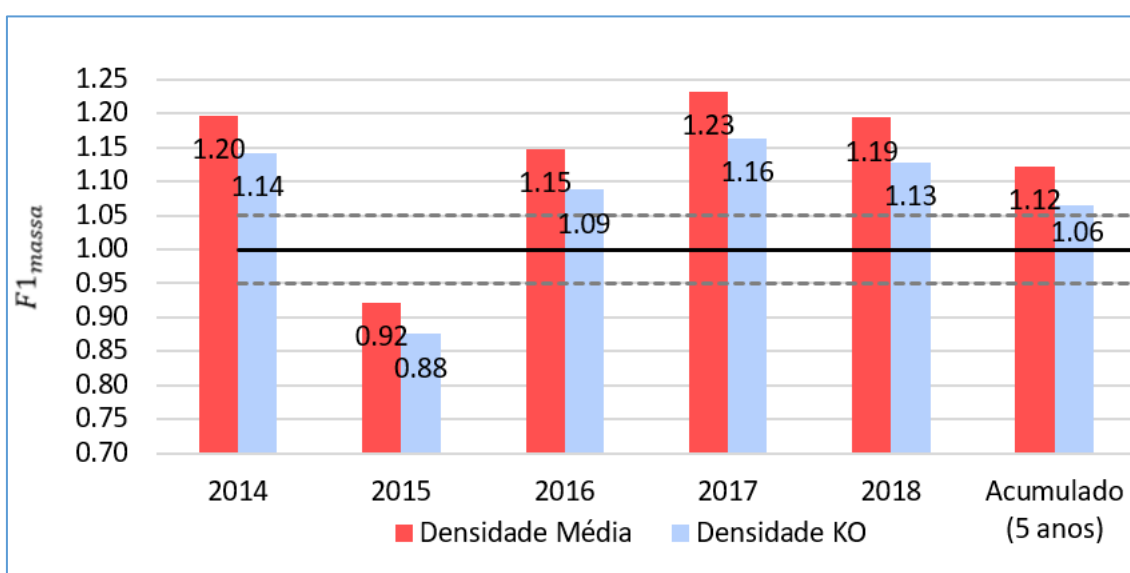
A operação atual da mina de Serra Azul não processa em sua planta de beneficiamento os itabiritos compactos, dessa forma, todo o material IC lavrado é estocado em pilhas visando seu aproveitamento econômico nos projetos de expansão. Por consequência, análises químicas do material IC lavrado nos últimos anos não foram realizadas, assim sendo, apenas a reconciliação mássica referente ao fator F1 foi investigada nesse trabalho.

Diferentemente do processo descrito por Parker, está sendo comparado nesse estudo de caso o modelo de longo-prazo utilizado para estimativas de reservas minerais com os dados reais da lavra do material IC (equação 10).

$$F1_{massa} = \frac{\text{massa efetivamente lavrada na mina}}{\text{massa prevista pelo modelo de blocos longo prazo}} \quad (10)$$

Portanto, além de verificar a confiabilidade do modelo de blocos trabalhado, os fatores calculados servirão como indicadores para correção dos possíveis desvios no estabelecimento de um modelo de curto-prazo que visará o aproveitamento do material IC. O mapeamento do processo permitirá entender as incertezas envolvidas na metodologia aplicada que poderão ser minimizadas por meio de ajustes nos fatores de perda e diluição, ajustes nos processos de amostragem, estabelecimento de sondagem geológica de curto-prazo e até mesmo por meio de correções nas operações de lavra minimizando ineficiências operacionais.

Os resultados obtidos na reconciliação mássica dos itabiritos compactos são representados na Figura 4.40. O eixo y dos gráficos representa os fatores de reconciliação ( $F1_{massa}$ ), enquanto o eixo x apresenta os anos nos quais as informações de produção foram investigadas.



**Figura 4.40:** Reconciliação anual para os itabiritos compactos de Serra Azul.

Como observado na Figura 4.40, os dois cenários estudados apontam alto valor de  $F1$  indicando que os modelos de blocos analisados estão sendo conservadores. No entanto, observa-se uma melhora nos resultados quando o atributo densidade foi estimado por krigagem ordinária. Parker (2014) aponta que para minas de metais básicos um bom nível de reconciliação seria de +/- 5% entre o material lavrado e o que alimenta a britagem. Os resultados acumulados para os últimos 05 anos de Serra Azul apontam + 6% para o modelo de densidade estimada e + 12% para o modelo com a média do atributo densidade, entretanto, conforme mencionado anteriormente, nesse estudo de caso estamos comparando massas previstas em um modelo de longo-prazo com as massas efetivamente lavradas na mina.

Verifica-se também no gráfico da Figura 4.40 que ao analisar os resultados de reconciliação acumulados para o período de cinco anos, um menor erro entre o material lavrado e o previsto no modelo foi observado. Esse fato também foi observado por Dias (2012), onde trabalhos de reconciliação foram realizados relacionando teores de cobre estimados em um modelo de longo-prazo com teores estimados em modelo de curto-prazo. Dias ressalta que em razão de um modelo longo-prazo ser baseado em amostras com grandes espaçamentos (malha de sondagem), mineralizações presentes nos contatos

entre minério e estéril observadas apenas no momento da lavra não conseguem ser mapeadas e incluídas no modelo. Desta forma o modelo de longo-prazo apresenta baixa precisão ao reconciliar pequenas massas e apresentará melhores fatores de reconciliação a medida que o volume analisado aumenta.

Finalmente, pode-se ressaltar que a metodologia de reconciliação aplicada nesse estudo de caso foi satisfatória para entender o impacto de se considerar a variabilidade do atributo densidade nesse processo. O cenário que considera o modelo de densidade estimado bloco a bloco é mais aderente, apresentando em um período de cinco anos um viés de massa lavrada 6% menor do que o modelo que considera a densidade média das amostras.

## **CAPÍTULO 5 : CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

---

O objetivo deste trabalho foi de entender como a variabilidade do atributo densidade pode impactar nas etapas de planejamento de lavra de um empreendimento mineral. No estudo de caso apresentado a litologia itabirito compacto foi investigada por se apresentar como principal material de interesse para os estudos de aproveitamento econômico da mina estudada. As conclusões obtidas nesta pesquisa e às recomendações para trabalhos futuros são apresentadas neste capítulo.

### **5.1 Conclusões**

- O modelo de densidade desenvolvido para os itabiritos compactos de Serra Azul permitiu um melhor entendimento do comportamento desse atributo ao longo do depósito mineral, levando a uma melhor confiabilidade das estimativas de recursos e reservas e a uma pequena mudança no limite ótimo da cava final. A boa correlação existente entre densidade e teor de ferro para a litologia IC permitiu que uma regressão linear fosse aplicada para atribuir valores de densidades a todas as amostras em que a análise química foi realizada, mas a densidade não foi amostrada. Dessa forma, uma maior quantidade de dados foi disponibilizada para a avaliação geoestatística, melhorando a qualidade das estimativas.
- Ao comparar os cenários estudados observa-se que os resultados dos trabalhos desenvolvidos utilizando a média do atributo densidade são consistentemente menores do que os resultados dos trabalhos onde o atributo densidade foi estimado por krigagem ordinária. Uma diferença de 3 % na avaliação dos recursos minerais foi estimada, enquanto o impacto na avaliação das reservas minerais chegou a 5%. Esses valores ampliaram em um ano na vida útil da mina aumentando o VPL do projeto em 2%.

- Influência nos trabalhos de dimensionamento de frota também foram observados. Os resultados mostraram que ao utilizarmos a média do atributo densidade estamos superestimando as horas necessárias de operação dos equipamentos de lavra, gerando conseqüentemente um aumento dos custos operacionais do projeto. Para os primeiros 5 anos de produção esse superdimensionamento foi estimado em aproximadamente 3%, incluindo as horas acumuladas dos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte.
- Através dos trabalhos de reconciliação, a precisão e a confiabilidade dos modelos de blocos foram investigadas, reconciliando as massas previstas nos modelos com as massas efetivamente lavradas nos últimos cinco anos. Os resultados mostraram uma melhor aderência para o cenário que considera o modelo de densidade estimado bloco a bloco. A diferença das massas reconciliadas entre os dois modelos foi de aproximadamente 6%.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- De modo geral entende-se que a variabilidade do atributo densidade na mina de Serra Azul para a litologia IC foi efetivamente entendida e apresenta um baixo impacto nas atividades de planejamento de lavra longo-prazo, no entanto, em menor escala foi possível identificar regiões da mina onde a variabilidade desse atributo é mais significativa. Áreas próximas a superfície do depósito chegaram a apresentar uma diferença de até 12% entre as tonelagens estimadas. Essas áreas de maior incerteza foram mapeadas e os efeitos dessa maior diferença devem ser analisados em trabalhos futuros. Para esses setores, é previsto que haja uma maior influência nos trabalhos de planejamento de lavra curto-prazo e da operação de mina.
- Destaque foi dado nesta pesquisa para a densidade da litologia IC que constitui a maior proporção do depósito mineral em estudo. No entanto, é aconselhável que mais medidas de densidade sejam obtidas para os outros materiais presentes na mina, de forma a aumentar a confiabilidade nos valores de densidade usados para os diferentes domínios e permitir que a mesma metodologia utilizada para estimar a densidade dos Itabiritos compactos seja aplicada para as demais litologias.
- Recomenda-se também aplicação da metodologia desenvolvida neste estudo de caso em outros empreendimentos minerários, com diferentes tipos de minério. Baseado nos resultados apresentados nesta pesquisa, espera-se que em depósitos minerais que apresentam litologias com maior variabilidade do atributo densidade o impacto na avaliação dos recursos e reservas minerais seja ainda mais relevante.



- Com o objetivo de melhor representar a variabilidade real dos dados de densidade e obter um maior controle dos riscos e incertezas associados, sugere-se realizar um estudo de caso utilizando a simulação geoestatística. Dessa maneira, cada bloco do modelo poderá ser representado por um intervalo de dados de acordo com uma distribuição de probabilidades ao invés de associar um único valor médio para o bloco, como determinado por exemplo pela krigagem ordinária.
- Ao analisar o impacto da densidade nos trabalhos de reconciliação, é importante que a qualidade e confiabilidade associada as práticas de medição dos dados reais também seja investigada. Recomenda-se que os erros associados as etapas de amostragem, medição topográfica, ensaios de laboratório e apontamentos de produção também sejam avaliados e a variabilidade dessas medições seja incorporada nos cálculos de reconciliação.

## REFERÊNCIAS

ABBASPOUR H. et al. **Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling.** Int J Min Sci Technol. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.009>

ABZALOV, M. Z. **Measuring and modelling of dry bulk rock density for mineral resource estimation.** Appl. Earth Sci., 122, pp.16–29. 2013.

ARROYO, C. E. **Caracterização geometalúrgica e modelagem geoestatística da Mina de Brucutu – Quadrilátero Ferrífero (MG).** 180 p. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2014.

ARSENEAU, G. J. **Estimating bulk density for mineral resource reporting.** SRK Consulting (Canada) Inc ,Vancouver, Canada, p. 1-8, jan. 2014.

BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração.** 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2013

BOZORGEBRAHIMI, E.; HALL, R. A.; BLACKWELL, G. H. **Sizing equipment for open pit mining – a review of critical parameters.** Institute of Materials, Minerals and Mining in association with AusIMM. Canada. Pg. 114-115. 2003.

BLACKWELL, G. **Relative kriging errors – a basis for mineral resource classification,** Explor. Min. Geol., 7, (1–2), 99–105. 1998

BURT, C., CACCETTA, L. **Equipment selection for surface mining: a review.** Interfaces volume 44, pp.143–162. 2014, <https://doi.org/10.1287/inte.2013.0732>

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. 2014.

CIM DEFINITION STANDARDS – For Mineral Resources and Mineral Reserves. Disponível em <https://www.cim.org>

CHANGANANE, A. P. **Estudo dos parâmetros envolvidos na determinação da função benefício na mineração.** Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral. 2017.

CRAWFORD, K. M., **Determination of bulk density of rock core using standard industry methods,** Master's report, Michigan Technological University. 2013.

CURI, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra,** São Paulo, Oficina de Textos. 2014.

DAGDELEN, K. **Open Pit Optimization – Strategies for Improving Economics of Mining Projects Through Mine Planning**, 17<sup>o</sup> International Mining Congress and Exhibition of Turkey, pp 117 – 121. 2001.

DELGADO, C. M. L. **Modelos de optimización para la planificación minera a cielo abierto**. 70p f. Departamento de Ingeniería de Mina, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 2009

DIAS, P. M. **O uso da densidade nas estimativas de teores de cobre e os impactos observados na reconciliação**. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre. 2012.

DIMITRAKOPOULOS, R. **Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments**. Journal of Mining Science, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 138–150. 2011.

DOMINY, S.; NOPPE, M.; ANNELS, A. **Errors and Uncertainty in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation: The Importance of Getting it Right**. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 2004.

ECCLES, A. **Take time for pit design**. Published in SME Annual meeting, Denver, CO. 2013.

EL HAJJ, T. M.; CHIEREGATI, A. C.; DELBONI, H., & PIGNATARI, L. E. C. **Illusory reconciliation: the importance of sample representativeness**. REM: Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, MG, v. 66, n. 3, p. 383-389. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672013000300017>

FARMER, I. W. **Stochastic Mining Supply Chain Optimization: A Study of Integrated Capacity Decisions and Pushback Design Under Uncertainty**. 97 P. Master's Thesis, Department of Mining and Materials Engineering McGill University, Montréal, Quebec, Canada. 2016.

FEAM. **Disposição de rejeitos em cavas exauridas utilizando o método de empilhamento drenado**. Banco de Boas Práticas Ambientais, Belo Horizonte. 2016.

FLORES, A. B. **Planejamento de lavra estratégico e tático de Morro da Mina - Conselheiro Lafaiete/MG**. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2008.

GOODFELLOW, R. **Unified Modelling and Simultaneous Optimization of Open Pit Mining Complexes with Supply Uncertainty**, Doctor's Thesis, Department of Mining and Materials Engineering McGill University, Montréal, Quebec, Canada McGill University. 2014.

JAMALAN, S; RASHIDINEJAD, F. **Compare Methods of Fix Lead, Milawa NPV and Milawa Balance Algorithm in Optimizing the Production of Open Pit Mines**. Open Journal of Geology, 2017.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**, New York, Academic Press. 1978.

JUNIOR, W. T. S. **Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a metodologia de auxílio multicritério à decisão. Estudo de caso: Mineração Bauxita.** 2012. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2012.

HOPPER, T. **Continuous Dry Bulk Density Evaluation Using Borehole Magnetic Resonance and Density Measurements.** AEGC 2018: Sydney, Australia. 2018.

LAINE, E. **Kriging estimation of block densities in Ahmavaara PGE-deposit.** Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries, South African Institute of Mining and Metallurgy. 2003.

LERCHS, H., GROSSMANN, L. F. **Optimum design of open-pit mines.** Transactions, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Montreal, Canada, v. LXVIII, p.17-24, 1965.

LIPTON, I. T. **Measurement of bulk density for resource estimation.** In: A. C. Edwards, ed. Mineral resources and ore reserves estimation – Monograph 23, The AusIMM guide to good practice. Melbourne: The Australian Institute of Mining and Metallurgy, pp.57–66. 2001.

LIPTON, I.T.; HORTON, J.A. **Measurement of bulk density for resource estimation – methods, guidelines and quality control:** in Mineral resource and ore reserve estimation, AusIMM Monograph 30, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2014.

LISBOA, M. C. **Impacto da incorporação da variável densidade na estimativa de reservas minerais de ferro: Mina de Brucutu.** 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2018.

MADANI, H.; MOHAMMADI, A. M. **Geostatistical reserve estimation in Dorreh Barite mine.** In: International symposium on application of computers and operations research in the minerals industries, 24 ed., Pensilvânia: University Park, 1996. p. 93-99. 1996.

MAKHUVHA, M.; ARELLANO, M., HARNEY, M. W. **Determination of bulk density, methods and impacts, with a case study from Los Bronces Mine, Chile.** 2014.

MATHERON, G. **Principles of Geostatistics.** Economic Geology, p. 1246-1266. 1963.

MOHALLEM, S. D. **Análise de sistema de Coodisposição dos rejeitos de minério de ferro gerados na Mina de Serra Azul.** 105p. Dissertação (Mestrado em geotecnia aplicada à mineração) – NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto 2018.

MORLEY, C. **Guide to creating a mine site reconciliation code of practice**: In Mineral resource and ore reserve estimation, AusIMM Monograph 30, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2014.

OSALOON, M., GHOLAMNEJAD, J., KARIMI, B. **Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms**. International Journal of Mining, Reclamation and Environmental. v.22 n.1, p.3-35. 2008.

PARKER, H. M. **Reconciliation principles for the mining industry**. In: Mineral resource and ore reserve estimation, AusIMM Monograph 30, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2014.

PITTARD, F.F. **A strategy to minimize ore grade reconciliation problems between the mine and the mill**. In: Mineral resource and ore reserve estimation, AusIMM Monograph 30, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2014.

QUIGLEY, M. **The Stochastic Optimization of Long and Short-term Mine Production Schedules Incorporating Uncertainty in Geology and Equipment Performance**. 98 P. Master's Thesis, Department of Mining and Materials Engineering McGill University, Montréal, Quebec, Canada. 2016.

RACIA, I. M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração**. 2016. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre. 2016.

RICHARD, A. **Ore grade Reconciliation Techniques – A Review**. In: Journal of Geosciences and Geomatics, Vol. 3, No. 5, 116-121. 2015.

SALINAS, I.; EMERY, X. **Estimacion de recursos en un yacimiento de fierro**. Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Avenida Tupper 2069, Santiago, Chile. 2012.

SEC, **Annual Report on FORM-20F ArcelorMittal**. Securities and Exchange Commission, SEC, 2018.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Bulk density**. In: Applied Mineral Inventory Estimation. ed. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK: Cambridge, cap. 15, p. 294-300. 2002.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Estimates and Reality**. In: Applied Mineral Inventory Estimation . ed. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK: Cambridge, cap. 17, p. 316-324. 2002.

SOUZA, F. R. **Sequenciamento direto de blocos: Impactos, limitações e benefícios para aderência ao planejamento de lavra**. 95 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte. 2016.

SUCKAU, V. **Technical Report – Serra Azul Mine** ArcelorMittal. 2018.

TORRES, V. F. N. et al. **Classical and stochastic mine planning techniques, state of the art and trends**. REM, Int. Eng. J.[online]. 2018, vol.71, n.2, pp.289-297. ISSN 2448-167X. <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672016710165>. 2018.

VASCONCELOS, J.A.; BRANDÃO, P.R.; LEMOS L. N. **Estudo de caracterização e concentração de Itabirito Compacto do complexo Serra Azul, MG** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, 2012.

WHITTLE. **Global asset optimisation, Orebody Modelling and Strategic Mine Planning**. 2004.