

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
(PPGEM)

**O USO DA DENSIDADE NAS ESTIMATIVAS DE TEORES DE COBRE
E OS IMPACTOS OBSERVADOS NA RECONCILIAÇÃO**

Paulo Maurício Dias

Dissertação para obtenção de Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
(PPGEM)

O USO DA DENSIDADE NAS ESTIMATIVAS DE TEORES DE COBRE E OS
IMPACTOS OBSERVADOS NA RECONCILIAÇÃO

Paulo Maurício Dias

Engenheiro de Minas

Dissertação realizada no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção de Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2012

Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio Lúcio Lopes Pinto (DEMIN/UFMG)

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni (DEMIN/UFRGS)

Eng. Dr. Vanessa Cerqueira Koppe

Prof. Dr Telmo Strohaecker

Coordenador do PPGEM

“A journey of a thousand miles begins with a single step”

Confucius

Dedico este trabalho aos meus familiares que contribuíram direta ou indiretamente ao longo de toda minha vida para que essa conquista pudesse ser alcançada e em especial aos meus Pais e minha Esposa Vanessa.

Agradecimentos

Ao Professor João Felipe pelas orientações acadêmicas e sugestões profissionais.

À Vale que forneceu o banco de dados.

Ao Engenheiro de Minas e Geoestatístico Cássio Diedrich que contribuiu muito para o melhor entendimento do depósito, com sugestões e ideias e ensinamentos.

Aos colegas do Laboratório Vanessa, Daniel, Diego e Rochana que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho com discussões e sugestões.

Aos demais colegas do Laboratório.

Ao Professor Rodrigo de Lemos Peroni e ao Engenheiro de Minas Eder Griebeler pela ajuda.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

À minha família pelo incentivo.

À minha esposa Vanessa pela compreensão, paciência, incentivo e revisões.

E a Deus pela vida e pelas pessoas maravilhosas que Ele colocou na minha vida nos momentos mais importantes.

Sumário

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiii
Resumo.....	xv
Abstract.....	xvi
Capítulo 1	
Introdução.....	1
1.1 Estado da arte.....	3
1.2 Meta.....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Metodologia.....	6
1.5 Organização da dissertação.....	7
Capítulo 2	
Densidade.....	9
2.1 Fatores que influenciam a densidade de rochas e amostras.....	11
2.1.1 Composição mineralógica da rocha.....	12
2.1.2 Presença de mais de um tipo de rocha na amostra.....	17
2.1.3 Porosidade e umidade.....	18
2.2 Determinação da densidade de amostras.....	19
2.2.1 Determinação da densidade a partir de testemunho de sondagem.....	20
2.2.2 Determinação da densidade a partir de grandes volumes.....	21
2.2.3 Método da abertura do poço ou cubo para a determinação da densidade.....	21
2.2.4 Determinação da densidade a partir de perfilagem geofísica Gama-Gama.....	22
2.2.5 Determinação da densidade a partir de proporção de minerais em rochas e densidades conhecidas.....	23

2.2.6 Determinação da densidade a partir da correlação entre densidade e metal de interesse.....	23
2.3 Considerações sobre a determinação da densidade.....	25
Capítulo 3	
Incorporação das medidas de densidade na avaliação de recursos e reservas.....	26
3.1 Regularização das amostras.....	26
3.1.1 Regularização de amostras ao longo do furo.....	29
3.1.2 Regularização de amostras ao longo de bancadas.....	30
3.1.3 Regularização por domínios.....	30
3.1.4 Considerações a respeito da regularização de amostras.....	31
3.2 Variáveis acumuladas.....	32
3.3 Conversão teor-tonelagem.....	37
3.3.1 Modelo de densidade por interpolação.....	38
3.4 Efeitos da incorporação da densidade na avaliação de recursos e reservas.....	38
Capítulo 4	
Incorporação da densidade na determinação de recursos minerais em um depósito de cobre.....	40
4.1 Geologia do depósito Sequeirinho.....	40
4.2 Modelo geológico de longo prazo.....	42
4.2.1 Amostras.....	42
4.2.2 Interpretação geológica.....	43
4.3 Estatísticas das amostras (assays).....	43
4.4 Análise exploratória dos dados.....	47
4.4.1 Amostras por domínio.....	47
4.4.2 Regularização das amostras.....	49
4.4.3 Variáveis acumuladas.....	53
4.4.4 Desagrupamento das amostras.....	55

4.4.5 Matriz de correlação.....	56
4.5 Continuidade espacial das variáveis no depósito.....	57
4.6 Modelo de blocos.....	58
4.7 Realização das estimativas por Krigagem ordinária (KO).....	59
4.8 Validação das estimativas.....	61
4.9 Diferenças entre as estimativas CU_CAP e CU_CAP1.....	65
4.10 Diluição do minério.....	67
4.11 Modelo de curto prazo.....	68
Capítulo 5	
Reconciliação dos teores de cobre.....	71
5.1 Aspectos gerais que influenciam no processo de reconciliação.....	71
5.2 Apresentação e discussão dos resultados obtidos na reconciliação dos teores de cobre.....	75
5.2.1 Ano 1.....	75
5.2.2 Ano 2.....	80
5.2.3 Ano 3.....	80
5.2.4 Os três anos juntos.....	82
5.3 Resultados observados em planos de lavra mensais.....	83
Capítulo 6	
Conclusão e recomendações.....	97
6.1 Conclusão.....	97
6.2 Recomendações para trabalhos futuros.....	100
Referências Bibliográficas.....	101

Lista de Figuras

Figura 1.1 Fluxograma apresentando à metodologia aplicada ao estudo de caso.....	7
Figura 2.1 Relação entre densidade-teor e densidade-proporção de minerais na rocha.....	13
Figura 2.2 Variação na densidade (eixo Y) e nos teores (eixo X) ao se variar as proporções de pentlandita e pirrotita na rocha.....	15
Figura 2.3 Variação na densidade (eixo X) e nos teores (eixo Y) ao se variar as proporções de antigorita e magnetita na rocha.....	16
Figura 2.4 Amostra de uma rocha mineralizada com grande concentração de mineral minério em sua porção superior.....	17
Figura 2.5 Amostra de minério composto por dois tipos de rochas diferentes.....	18
Figura 2.6 Variação da densidade em função da porosidade e da presença de água preenchendo os poros.....	19
Figura 3.1 Exemplo da regularização de amostras ao longo de um furo de sondagem.....	27
Figura 3.2 Configuração dos pontos obtidos por simulação LU apresentado no trabalho de Marcotte e Boucher (2001a).....	34
Figura 4.1 Setores do depósito Sequeirinho.....	41
Figura 4.2 Brecha mineralizada. A escala que aparece na foto representa 5 cm de comprimento.....	42
Figura 4.3 Histograma das amostras de cobre e densidade.....	44
Figura 4.4 Histograma da densidade completada com as densidades dos domínios em (a); diagrama de dispersão entre os quantis das duas distribuições de densidade em (b); diagrama de dispersão entre teor e densidade em (c) e entre teor e densidade completada em (d).....	45
Figura 4.5 Histograma da variável teor de cobre e densidade para o domínio de baixo teor.....	47

Figura 4.6 Diagrama de dispersão entre o teor de ferro e a densidade. Em (a) para o domínio de baixo teor de cobre e em (b) para o domínio de alto teor de cobre.....	47
Figura 4.7 Histograma da variável teor de cobre e densidade para o domínio de alto teor.....	48
Figura 4.8 Histograma das compostas CU_CAP e CU_CAP1.....	50
Figura 4.9 Diagrama de dispersão (<i>scatterplot</i>) e diagrama de dispersão entre os quantis (<i>qqplot</i>) das compostas CU_CAP e CU_CAP1 para o domínio de baixo teor em (a) e (b) e para o domínio de alto teor em (c) e (d).....	52
Figura 4.10 Histograma da diferença relativa entre as compostas; em (a) para o domínio de baixo teor e em (b) para o domínio de alto teor.....	52
Figura 4.11 Histograma das variáveis TCD, CD e do comprimento das compostas.....	54
Figura 4.12 Gráficos de análise de deriva ao longo dos eixos cartesianos para os atributos CU_CAP, CU_CAP1 e Densidade para o domínio de baixo teor. A linha cinza representa a média das estimativas e a linha preta a média das amostras.....	62
Figura 4.13 Gráficos de análise de deriva ao longo dos eixos cartesianos para os atributos CU_CAP, CU_CAP1 e Densidade para o domínio de alto teor. A linha cinza representa a média das estimativas e a linha preta a média das amostras.....	63
Figura 4.14 Seção vertical apresentando as amostras, o modelo de minério e os blocos estimados.....	64
Figura 4.15 Seção Horizontal apresentando as amostras, o modelo de minério e os blocos estimados.....	64
Figura 4.16 Diagrama de dispersão e histograma da diferença relativa entre as estimativas de teor de cobre para o método direto e indireto no domínio de baixo teor.....	65
Figura 4.17 Diagrama de dispersão, histograma da diferença relativa e diagrama de dispersão dos quantis entre as estimativas de teor de cobre para o método direto e indireto no domínio de alto teor.....	66

Figura 4.18 Histograma dos teores de cobre diluídos para o método direto, para o método indireto e para a densidade.....	68
Figura 4.19. Representação da coleta de alíquotas ao redor da pilha formada pelo pó de perfuração para desmonte.....	69
Figura 5.1 Gráficos de reconciliação mensal do ano 1.....	76
Figura 5.2 Relação entre suporte (número de blocos) e o fator de correlação.....	78
Figura 5.3 Gráfico de reconciliação trimestral para o ano 1.....	79
Figura 5.4 Gráfico de reconciliação semestral para o ano 1.....	80
Figura 5.5 Reconciliação quadrimestral do ano 3.....	81
Figura 5.6 Reconciliação dos anos 1, 2 e 3 e para os três anos juntos.....	82
Figura 5.7 Polígono selecionado para lavra pelo planejamento do curto prazo no Cenário 1.....	85
Figura 5.8 Polígonos selecionados para lavra pelo planejamento do curto prazo no Cenário 2.....	88
Figura 5.9 Polígonos selecionados para lavra pelo curto prazo no Cenário 3 com os teores dos blocos estimados pelo curto prazo (a), MD (b) e MI (c).....	89
Figura 5.10 Polígonos selecionados para serem lavrados pelo planejamento de curto prazo no cenário 4 com os teores dos blocos estimados pelo curto prazo (a), MD (b) e MI (c).....	92
Figura 5.11 Polígonos selecionados para serem lavrados pelo planejamento de curto prazo no Cenário 5 com os teores dos blocos estimados pelo curto prazo (a), MD (b) e MI (c).....	94

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Diâmetros das amostras coletadas por sondagem com recuperação de testemunho.....	28
Tabela 4.1. Descrição da orientação dos corpos de minério no depósito Sequeirinho.....	41
Tabela 4.2 Código das amostras de acordo com o domínio e com o setor. Teores em % de Cu.....	43
Tabela 4.3. Código do domínio, densidade média do domínio e porcentagem de amostras incorporadas ao banco de dados em relação às amostras faltantes.....	45
Tabela 4.4 Sumário das medidas estatísticas das amostras de teor de cobre (%), densidade (g/cm ³) e densidade completada (g/cm ³).....	46
Tabela 4.5 Sumário das medidas estatísticas das amostras de teor de cobre (%) e densidade (g/cm ³).....	48
Tabela 4.6 Sumário das medidas estatísticas das compostas CU_CAP, CU_CAP e densidade para o domínio de baixo teor e alto teor.....	51
Tabela 4.7 Sumário estatístico das variáveis acumuladas TCD e CD e para o comprimento das compostas para o domínio de baixo teor em (a), (b) e (c) e para o domínio de alto teor (a), (b) e (c).....	55
Tabela 4.8 Sumário estatístico das compostas após o desagrupamento.....	56
Tabela 4.9 Matriz de correlação entre as compostas CU_CAP, CU_CAP1, densidade, TCD e CD.....	57
Tabela 4.10 Parâmetros usados na estratégia de busca para estimativa dos atributos no domínio de baixo teor e alto teor.....	60
Tabela 4.11 Estatísticas dos atributos e das estimativas dos atributos CU_CAP, Densidade, TCD e CD para os domínios de baixo teor e alto teor.....	61
Tabela 5.1 Quantidade total de blocos lavrados no ano 1 e correspondente quantidade de blocos de minério.....	77
Tabela 5.2 Quantidade total de blocos lavrados no ano 3 e correspondente à quantidade de blocos de minério.....	82

Tabela 5.3 Teores médios dos blocos lavrados nos anos 1, 2, 3, e os três anos juntos para o MD, o MI e os teores reais.....	83
Tabela 5.4 Densidades médias aplicadas aos polígonos com base nas densidades médias obtidas para cada intervalo de teor.....	84
Tabela 5.5 Cenário 1. Teores médios para o polígono de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.....	86
Tabela 5.6 Cenário 2. Teores médios para polígonos de desmonte e o fator de reconciliação para o MD e o MI.....	88
Tabela 5.7 Cenário 3. Teores médios para os polígonos de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.....	90
Tabela 5.8 Cenário 4. Teores médios dos polígonos de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.....	93
Tabela 5.9 Cenário 5. Teores médios dos polígonos de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.....	95

Resumo

Vários estudos apontam para a importância do uso da densidade na regularização de amostras, como variável acumulada nas estimativas de teores e na determinação de um modelo de densidade para a conversão volume-massa. Porém, o impacto do uso da densidade nesses casos ainda não foi analisado por meio de reconciliação de teores. A avaliação das consequências desse uso em planos de lavra mensais baseados em estimativas de longo prazo também é raramente encontrada na literatura. Nesse sentido, este estudo visa relatar os impactos de se desconsiderar o uso da densidade nesses casos específicos.

Para tanto, esse estudo considerou a abordagem tradicional e uma abordagem alternativa. A abordagem tradicional desconsidera a densidade como um fator de ponderação na regularização das amostras e na realização das estimativas. Essa prática é denominada método direto (MD). A abordagem proposta regulariza amostras ponderando-as pelos respectivos comprimentos e densidades e ainda estima teor indiretamente a partir da relação entre as estimativas das variáveis acumuladas TCD (Teor x Comprimento x Densidade) e CD (Comprimento x Densidade). Essa metodologia é denominada método indireto (MI).

Ambas as metodologias foram usadas para estimar os teores de cobre no longo prazo e avaliar a qualidade dessas estimativas por meio de reconciliação com estimativas de curto prazo. Essa reconciliação foi feita no intervalo de três anos de produção. Em seguida, o desempenho das duas metodologias foi testado em polígonos de lavra desenhados com base nas estimativas de curto prazo. A intenção é verificar se o destino dos blocos dentro desses polígonos seria os mesmos para as duas metodologias e para as estimativas de curto prazo quando aplicado um teor de corte. Por fim, foram associadas a esses polígonos duas densidades: uma obtida pela densidade média condicionada a intervalos de teores, e outra determinada pela densidade média do polígono obtida pela média das densidades estimadas em cada bloco.

Os resultados mostraram uma melhor reconciliação obtida pela aplicação do método indireto e diferenças relativamente grandes nas massas desses polígonos quando associados a eles essas duas formas de aplicar a densidades.

Abstract

Many studies indicate the importance of using density when compositing assay grades as accumulated variable in grade estimates, and in determining one density model to transform the resources from volume into tonnage. However, the impact of using density in these cases has not yet been analyzed through grade reconciliation. The consequences of the employment of such models in monthly planning, based on the long-term estimates, are scarcely found in the literature. For this reason, this study aims at reporting the impacts of disregarding the use of density in these specific cases.

In order to evaluate that, this study considered a traditional approach and proposed a new one. The traditional approach disregards the density as a weighting factor for assays grades compositing and for grades estimation. This practice is known as direct method (DM). The proposed approach composites assay grades considering length and density as weighting factors and then estimate grades indirectly through the ratio between the estimates of the accumulated variables GLD (Grade x Length x Density) and LD (Length x Density). This method is called indirect method (IM).

Both methodologies were used to estimate the copper grades in long-term block model and evaluate the effect of these estimates through reconciliation with short-term planning estimates. This reconciliation was carried out during a three-year period. After that, the performance of the two methodologies was tested comparing the results to the ones obtained by polygons defined by the short-term estimates. It was checked whether the destinations of the blocks inside the polygons were the same for the two methodologies as well as for the short-term estimates when applying a cut-off grade to them. Finally, two densities were applied to those polygons: one determined by the average density conditioned by grade intervals and the other one determined by the average density of the polygon obtained by the average of the densities estimated in each block.

The results showed a better reconciliation obtained by the indirect method and relatively large differences in tones within those polygons mass when the two densities approaches were applied.

Capítulo 1

Introdução

Em algumas situações a informação sobre a densidade é subutilizada na avaliação de recursos minerais e reservas de minério. Há depósitos onde a densidade varia muito, por exemplo, depósitos sulfetados polimetálicos em que a mesma é caracterizada por valores altos das medidas de dispersão. Nesses casos, a mesma deve ser mais bem utilizada para garantir estimativas de teores e tonelagens mais precisas e acuradas.

A busca pelo uso da densidade de forma mais ampla é motivada por alguns questionamentos que podem surgir durante a realização de estimativas de teor e da conversão teor-tonelagem, ou ainda, pela dificuldade de reconciliar estimativas de teor e tonelagem com os dados medidos após a extração do minério/estéril.

Quanto à realização de estimativa de teor, pode-se questionar se as amostras usadas nas estimativas (compostas) sofrem ou não efeito da densidade no momento da regularização. Por exemplo, considere que cinco amostras de teor de comprimentos variáveis sejam usadas para formar uma composta de comprimento determinado. O procedimento normal irá ponderar cada amostra por seu devido comprimento e a média da composta será a média resultante. Porém, essa média resultante será diferente se cada uma das amostras usadas para gerar a composta tiver densidades diferentes. Nesse sentido, a densidade surge como fator de ponderação para gerar compostas mais condizentes com a variação da densidade que ocorre ao longo do depósito. Nesses casos, em que a densidade varia ao longo dos testemunhos de sondagem, desconsiderar o uso da densidade na regularização das amostras é equivalente a dizer que ao longo de todo o furo o valor da densidade é constante, o que raramente ocorre em depósitos do tipo sulfetado.

Essa observação tem uma implicação direta na estimativa de teores. Caso a densidade varie e gere compostas com teores diferentes, no caso de serem ponderados pela densidade na regularização, os resultados das estimativas de blocos gerados por essas amostras serão diferentes daquelas geradas ao regularizar as amostras considerando apenas o comprimento.

A observação de que compostas com mesmo teor podem apresentar densidades diferentes leva a questionar se no momento da realização das estimativas essa variação da densidade também não deve ser levada em consideração. Porém, como incorporar a densidade durante a realização das estimativas de forma que seja levada em conta essa variabilidade? Uma resposta para essa pergunta pode ser dada ao considerarmos o uso de variáveis acumuladas. Para incorporar a densidade no momento das estimativas basta que se trabalhe com duas variáveis acumuladas: a primeira definida pelo produto teor x densidade x comprimento das compostas, TCD (lembre-se que o processo de regularização pode gerar compostas de tamanhos variados para melhor aproveitamento das informações), e a segunda definida pelo produto densidade x comprimento das compostas. Nesse caso, essas duas variáveis são estimadas separadamente e o teor do bloco é obtido pela relação entre as estimativas das duas variáveis acumuladas. Essa segunda observação também fará gerar blocos com teores diferentes dos estimados diretamente sem levar em consideração a densidade.

Para que a densidade possa ser usada na regularização das amostras como fator ponderador e na realização das estimativas utilizando variáveis acumuladas é necessário que a mesma seja determinada para cada amostra assim como se determina o teor. A amostragem da densidade da mesma forma que é feita para os teores trará um novo ganho, porém agora relacionado com a conversão teor-massa. Se usualmente a quantidade de metal de cada bloco é definida por uma densidade média, seja do depósito ou em setores do mesmo, ou ainda, por uma litologia predominante, o fato de a densidade variar ao longo do depósito pode fazer com que a densidade de um conjunto de poucos blocos difira muito de uma densidade média. É nesse sentido que a amostragem da densidade, da mesma forma como é feita para os teores, permitirá que se estime o valor da densidade para cada bloco gerando estimativas mais precisas e acuradas das quantidades de metal contidas nesses blocos.

Assim sendo, o presente trabalho buscou investigar detalhadamente o atributo densidade e os fatores que influenciam este parâmetro em rochas e de amostras; os métodos de determinação de densidade para amostras competentes e não-competentes geomecanicamente; e a aplicação da densidade nas diversas

etapas da avaliação de recursos e reservas utilizando um estudo de caso para verificar a aplicabilidade da metodologia nessas etapas

No estudo de caso foram considerados os blocos extraídos durante três anos de produção em um setor de uma mina de cobre localizada no norte do Brasil. Esses blocos já lavrados dispunham de informações de curto prazo (amostras de pó de perfuração) que foram usadas para estimar os seus teores, determinando um modelo de referência (modelo de curto prazo). De posse desse modelo, o mesmo foi comparado aos modelos gerados pelas duas metodologias. A primeira metodologia procedeu às estimativas desses blocos diretamente, estimando o atributo teor de cobre a partir das amostras regularizadas considerando apenas o comprimento como fator de regularização. Essa metodologia é referida nesse trabalho como MD (método direto).

A segunda metodologia considerou compostas regularizadas usando, além do comprimento, também a densidade como fator de ponderação. Essas amostras foram usadas para determinar as variáveis acumuladas TCD (teor x comprimento x densidade) e CD (comprimento x densidade), que foram estimadas para os referidos blocos. O teor de cobre de cada bloco foi então determinado indiretamente pela relação entre as variáveis TCD e CD. Essa metodologia é referida no estudo como MI (método indireto).

Por fim, foi comparado o comportamento das duas metodologias em relação a polígonos de lavra determinados pelas estimativas de curto prazo. Foram avaliadas a relação entre as massas geradas nesses polígonos ao se aplicar uma densidade média proposta e a densidade estimada bloco a bloco.

1.1 Estado da arte

A densidade tem um papel importante na conversão de teores em quantidades de metal e de volumes em massas. Uma prática usual para esse tipo de conversão consiste em usar uma densidade média inferida para um dado domínio ou até mesmo para todo o depósito a partir de um pequeno número de amostras se comparado ao número de amostras usadas para estimar teor. Essa prática tem mostrado que em reconciliações de grandes volumes a massa prevista se assemelha à massa obtida. Por outro lado, para reconciliações de pequenos volumes, a massa prevista pode diferir muito da massa obtida.

Uma solução para esse impasse é apresentado por Vallé e Cotê (1992) que sugere a amostragem sistemática da densidade assim como é feito para os teores. Isso possibilitaria que a densidade fosse estimada para cada bloco como feito por Laine (2003), onde um modelo interpolado de densidade foi obtido para um depósito de elementos do grupo da platina, sigla em inglês PGE. Esse mesmo estudo chama a atenção para o fato de que as quantidades de metal contidas em um bloco podem ser afetadas caso seja usada uma densidade média ao invés de um modelo de densidade.

Simultaneamente à questão de reconciliação mássica, há a questão da reconciliação de teores, em que diferentes fatores em diferentes intensidades podem contribuir para uma má reconciliação, como por exemplo, a má qualidade dos dados e das estimativas assim como as incertezas inerentes aos teores tomados como referência. Diante de todos os possíveis fatores que adicionam erro aos dados e às estimativas há um fator relacionado com a forma de se regularizar as amostras. Dadson (1968) e Bevan (1993) mostraram que ao invés de regularizarmos amostras ponderando apenas pelo comprimento das mesmas, a densidade deveria ser incorporada nesse processo ponderando-se as amostras por suas respectivas densidades. Caso contrário, isso poderia levar a superestimativas ou subestimativas dos teores das compostas. Adicionalmente, Sinclair e Blackwell (2006) dizem que regularizar amostras levando em conta apenas a espessura (comprimento) das mesmas, em casos onde a densidade varia significativamente, constitui uma maneira errada de se regularizar amostras.

Outra fonte de erro está relacionada ao uso ou não da densidade como um fator de ponderação quando da realização das estimativas dos blocos. A idéia é considerar a densidade como fator de ponderação (acumulação), uma vez que amostras de mesmo teor podem ter densidades diferentes. Uma forma de se obter isso é usando uma variável acumulada. Krige (1981) sugere que a densidade deveria ser incorporada como um fator de ponderação em todos os processos de estimativas, e Armstrong (1998) diz que seria prudente o uso de variáveis acumuladas (TCD) e (CD) quando houver uma variação da densidade ao longo do depósito.

Sendo assim, o uso da densidade na regularização das amostras, nas estimativas (acumulação) e na construção de um modelo de densidade para

conversão volume-massa é o procedimento mais acurado para um atributo de extrema importância na avaliação de depósitos.

1.2 Meta

Avaliar os efeitos da utilização ou não da densidade nas diversas etapas da avaliação de recursos e reservas minerais por meio de um estudo de caso em uma mina de cobre localizada no estado do Pará, Brasil.

1.3 Objetivo

Averiguar qual método, direto ou indireto, deve ser aplicado na avaliação de recursos e reservas, reconciliando os teores, as massas e as quantidades de metal estimados por essas metodologias contra os teores, as massas e as quantidades de metal determinados pelas informações de curto prazo. Para tanto, pretende-se:

1. Entender quais fatores influenciam a densidade de rochas avaliando se existe alguma relação entre a mesma e as suas propriedades petrográficas, físicas ou químicas.
2. Revisar os métodos de determinação de densidade de amostras.
3. Discutir os potenciais usos da densidade na avaliação de recursos e reservas.
4. Avaliar os efeitos da utilização ou não da densidade na regularização das amostras para obter o teor das compostas;
5. Avaliar os efeitos da utilização ou não da densidade como variável acumulada com o teor para obter os teores dos blocos;
6. Avaliar os efeitos do uso de uma densidade média para cada domínio e o do uso de um modelo interpolado de densidade para a conversão teor-massa;
7. Determinar um parâmetro que indique em que situação deve-se usar cada um dos métodos, direto ou indireto.

1.4 Metodologia

A fim de comparar os efeitos do uso da densidade na avaliação de depósitos, duas metodologias foram propostas para gerar estimativas dos teores de cobre em blocos de dimensão 10x10x16 metros já lavrados durante três anos de operação.

A primeira metodologia procede com as estimativas conforme a prática usual, ou seja, não considera a densidade no processo de regularização das amostras, nem como uma variável acumulada com teor. Portanto, a densidade é utilizada apenas para conversão volume-massa por de um valor médio aplicado para cada domínio. Essa metodologia é referida como método direto (MD).

A segunda metodologia considera o uso da densidade no processo de regularização das amostras e como uma variável acumulada com teor para realização das estimativas e ainda utiliza um modelo interpolado de densidade para conversão volume-massa. Essa metodologia é referida como método indireto (MI).

O fluxograma abaixo (figura 1.1) apresenta as etapas principais a serem seguidas para a determinação dos teores em cada uma das metodologias e os passos seguidos até a comparação dos resultados. Algumas etapas intermediárias foram excluídas do fluxograma, porém podem ser observadas em detalhe no decorrer do trabalho.

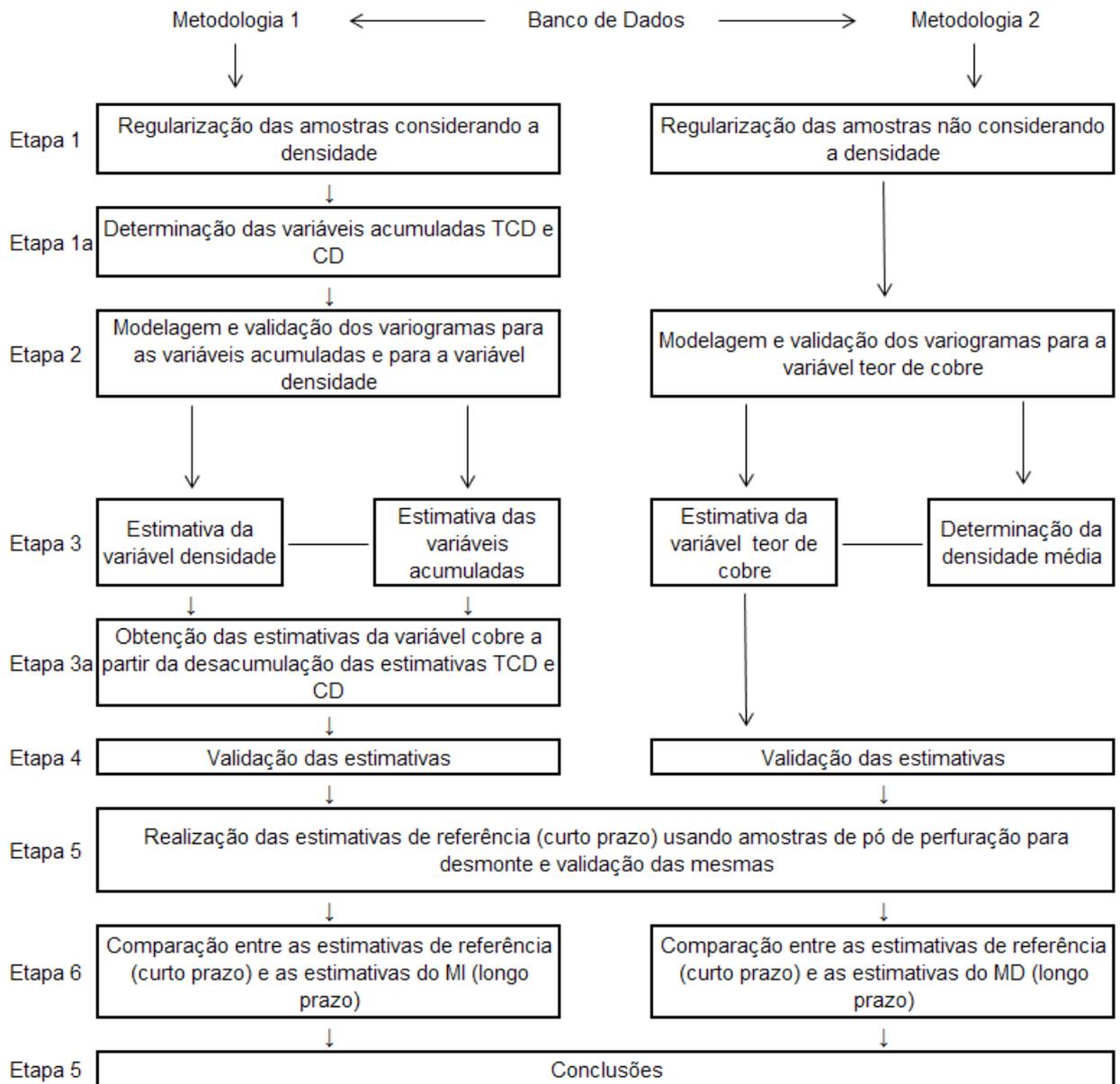


Figura 1.1 Fluxograma apresentando a metodologia aplicada ao estudo de caso.

1.5 Organização da dissertação

Essa dissertação foi organizada em seis capítulos. No segundo capítulo, faz-se uma apresentação da densidade no que se refere às suas definições, à sua relação com a mineralogia, com a porosidade, com a litologia e com o seu valor em rochas e amostras. São apresentados também os principais métodos de obtenção de densidade.

No capítulo 3 discute-se o uso da densidade na avaliação de recursos por sua incorporação à regularização das amostras, no uso de uma variável acumulada com teor e na conversão volume-massa por meio de um modelo de densidade

interpolado. O capítulo se encerra com uma análise dos possíveis efeitos da incorporação da densidade nesses diversos processos.

O capítulo 4 apresenta um estudo de caso em que se aplicam as duas metodologias para determinação dos teores de cobre em um setor da mina considerada. A densidade dos blocos também é estimada por krigagem ordinária. São feitas ainda as estimativas dos teores considerando as amostras de curto prazo para gerar o modelo de referência. As estimativas são devidamente validadas.

O capítulo 5 apresenta os resultados das estimativas do teor de cobre obtidas pela aplicação das metodologias comparadas com aquelas obtidas pelas amostras de curto prazo. Essas comparações são feitas em intervalos ao longo dos três anos de produção e em polígonos de desmonte. É feito o uso de uma densidade média e da densidade estimada em polígonos de desmonte a fim de verificar o impacto da aplicação dessas densidades nas massas previstas.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas no estudo de caso no que se refere ao uso do MD e do MI para realização de estimativa e ao uso da densidade estimada em cada bloco na conversão volume-massa. Por fim, são feitas nesse último capítulo algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo o uso da densidade na avaliação de depósitos minerais.

Capítulo 2

Densidade

Dada à importância da densidade na avaliação de depósitos minerais, tanto para a conversão de volume em massa quanto para a interpolação de teores, segue uma breve revisão de alguns conceitos de densidade. Segue ainda, de forma mais detalhada, uma investigação da relação entre densidade e os minerais constituintes das rochas e de sua relação com a porosidade e a umidade. Buscou-se também discutir quais fatores estão relacionados com a densidade de amostras. Por fim foi feita a apresentação de alguns métodos de obtenção da densidade diretamente a partir de amostras ou, de maneira indireta, sem a necessidade de amostras.

A densidade relativa de uma amostra é expressa em relação à massa do seu volume de água em condições padrão de temperatura e pressão. Por exemplo, um mineral que possui densidade relativa igual a 3 tem três vezes a massa de um mesmo volume de água nessas condições. Sendo assim, a densidade relativa é um número adimensional:

$$\rho_{relativa} = \frac{massa\ da\ amostra_v}{massa\ de\ água_v} \quad (2.1)$$

onde $massa\ da\ amostra_v$ e $massa\ de\ água_v$ foram determinadas para um mesmo volume v .

A densidade específica é a relação entre a *massa* do sólido e o *volume* que contém essa massa. A densidade específica é definida por:

$$\rho_{especifica} = \frac{massa}{volume} \left(\frac{g}{cm^3}, \frac{kg}{dm^3}, \frac{t}{m^3} \right) \quad (2.2)$$

comumente expressa por uma das unidades acima, essa medida de densidade não considera a porosidade das amostras. De acordo com Sinclair e Blackwell (2006), em mineralogia densidade específica é aplicada a materiais sólidos e não porosos.

A 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. O volume total da amostra é a soma de dois volumes

distintos, o *volume de vazios* e o *volume do sólido*. Sendo assim, a densidade aparente considera a porosidade da amostra e é definida por:

$$\rho_{aparente} = \frac{massa}{volume\ dos\ vazios + volume\ do\ sólido} \left(\frac{g}{cm^3}, \frac{kg}{dm^3}, \frac{t}{m^3} \right) \quad (2.3)$$

note que, na prática, esses poros podem estar preenchidos por água. Dessa forma, duas medidas são possíveis: uma com a amostra seca e outra com a amostra úmida. O tipo de medida a ser feito dependerá do tipo de material com o qual se trabalhará. Porém, a norma técnica NBR – 15845:2010, usada para determinação de índices físicos considera o volume de vazios.

Essas três definições para densidade são comumente empregadas sem se atentar para as suas diferenças. Para aplicações em conversão de volumes de minério ou estéril usaremos a densidade aparente definida pela equação (2.3) quando se tratar de densidade medida, tanto a partir de amostras, quanto a partir de determinações indiretas. Para simplificar, o termo densidade aparente será mencionado daqui em diante apenas como densidade.

É razoável pensarmos que a densidade de rochas deverá variar de acordo com sua composição mineralógica, sobretudo pela densidade individual de cada mineral constituinte da rocha. A porosidade também deverá exercer um papel importante nesse valor caso o volume de poros seja relativamente grande em relação ao volume total e caso os poros estejam preenchidos por água. Considerando que as amostras das quais se mede o valor da densidade podem contemplar mais de um tipo de rocha, a densidade dessas amostras poderá variar também de acordo com a proporção de cada uma dessas rochas presente em cada amostra.

Quanto aos métodos para determinar medidas de densidade, os mesmos serão aqui classificados segundo o princípio empregado para sua obtenção. Os métodos diretos são caracterizados por obter informações de densidade a partir de medidas realizadas em amostras coletadas para esse fim. Os métodos indiretos determinam a densidade com base em leituras de propriedades físicas ao longo de furos de sondagem ou a partir da sua correlação com outro atributo medido, por exemplo, teor do metal de interesse, ou ainda, por meio do conhecimento dos minerais constituintes da rocha e suas devidas proporções (nesse caso faz-se uso

das densidades específicas de cada mineral encontradas em manuais de mineralogia).

2.1 Fatores que influenciam a densidade de rochas e amostras

A densidade de materiais puros é referida como densidade específica. Para misturas sólidas, as densidades podem ser determinadas com base na proporção de cada uma das unidades constituintes da mistura devidamente ponderadas por suas respectivas densidades específicas. No caso de rochas (que constituem um agregado de minerais), a proporção de cada um dos seus minerais pode ser determinada, da mesma forma que as densidades específicas de cada um dos minerais constituintes podem ser obtidas, por exemplo, em manuais de mineralogia. Sendo assim, a densidade de uma rocha pode ser inferida. Note que, uma vez que haja grandes diferenças entre as densidades dos minerais constituintes da rocha, um dado mineral poderá influenciar, mais ou menos, o valor da densidade da rocha.

O valor medido ou calculado da densidade sofre influência da composição mineralógica, da variação da proporção dos minerais constituintes da rocha, da porosidade (volume de vazios), da umidade e da presença de mais de uma rocha quando se considera a densidade de uma amostra. Tomemos por exemplo um itabirito compacto formado apenas por quartzo, com densidade $2,65 \text{ g/cm}^3$, e a hematita, com densidade $5,1 \text{ g/cm}^3$. A densidade de qualquer amostra dessa mesma rocha será determinada pela proporção de cada um dos minerais constituintes da mesma. Por exemplo, esse mesmo itabirito compacto formado por 70% de hematita e 30% de quartzo terá uma densidade igual a $4,37 \text{ g/cm}^3$. Caso se invertam as proporções, ou seja, o itabirito seja constituído por 30% de hematita e 70% de quartzo, a densidade será $3,39 \text{ g/cm}^3$. Essa variação na densidade em uma amostra é determinada apenas pela variação na proporção dos minerais constituintes da rocha. Caso as proporções dos minerais constituintes das rochas variem pouco, mesmo que a variação entre as densidades desses minerais seja grande, é esperado que a densidade da rocha também varie pouco.

Outro fator importante está relacionado ao fato dessa rocha possuir ou não vazios. Caso ela esteja presente, a rocha pode ter sua densidade reduzida a um valor mínimo se esses poros não forem preenchidos por água e a um valor máximo caso esses poros estejam completamente preenchidos por água.

Por outro lado, caso uma amostra recolhida de um testemunho de sondagem intercepte uma rocha alterada, por exemplo, um itabirito na forma compacta e friável, a densidade da amostra não dependerá apenas das proporções de hematita e quartzo típicas do itabirito compacto apenas, mas também da combinação das proporções dos minerais constituintes, da alteração intempérica da rocha e da porosidade. Esse tipo de variabilidade é geralmente observado.

Uma vez que o processo de determinação de domínios geoestatísticos pode incluir mais de um tipo de rocha em um mesmo domínio, o processo de determinação dos limites da amostra pode não considerar variações nas proporções dos minerais constituintes da rocha e ainda o processo de regularização das amostras pode incluir mais de um tipo de rocha, a densidade de compostas pode variar diferentemente da maneira como varia em relação à rocha e à amostra. Por exemplo, ao regularizarem-se amostras de diferentes rochas em uma mesma composta, a densidade média da composta é resultado da variabilidade na proporção dos minerais constituintes de cada amostra e dos diferentes tipos de rocha em cada uma das amostras usadas para determinar a densidade da composta. Esse modelo que considera a variação na proporção dos minerais constituintes da rocha e a variação do tipo de rocha das amostras na determinação das compostas é útil para se tentar entender quais fatores causam a variabilidade da densidade com teor em amostras, em compostas e em domínios ao longo de todo o depósito mineral.

2.1.1 Composição mineralógica da rocha

Começemos por um exemplo simples considerando um itabirito compacto formado por hematita e quartzo. Nesse tipo de rocha, os minerais constituintes estão dispostos em camadas alternadas de quartzo e hematita com espessura variando de alguns milímetros a alguns centímetros Roberto (2010). A proporção típica de hematita e quartzo presente nessa rocha está em torno de 60% hematita e 40% quartzo. Os teores de Fe e SiO₂ variam entre 38-42% e 39-46%, respectivamente. A densidade nesse tipo de rocha, segundo Santos (2006), pode variar entre 2,91 g/cm³ e 3,76 g/cm³. Alguns contaminantes como Al₂O₃, P, MnO TiO₂, CaO podem estar presentes nesses tipos de rocha, segundo Roberto (2010).

Com base nas informações anteriores, foram determinadas diferentes rochas, hipotéticas, fazendo variar as proporções de hematita e quartzo para se obter rochas

com as densidades no intervalo de 3,88 a 4,86 g/cm³. As presenças de contaminantes e de porosidade são, nesse exemplo, desconsideradas. A figura 2.1 mostra, para essas rochas, a relação entre a densidade e proporções dos minerais constituintes e a relação entre densidade e os teores de sílica e ferro, assumindo porosidade nula. Os teores de sílica e ferro foram determinados com base na proporção de cada mineral e nas suas respectivas massas molares.

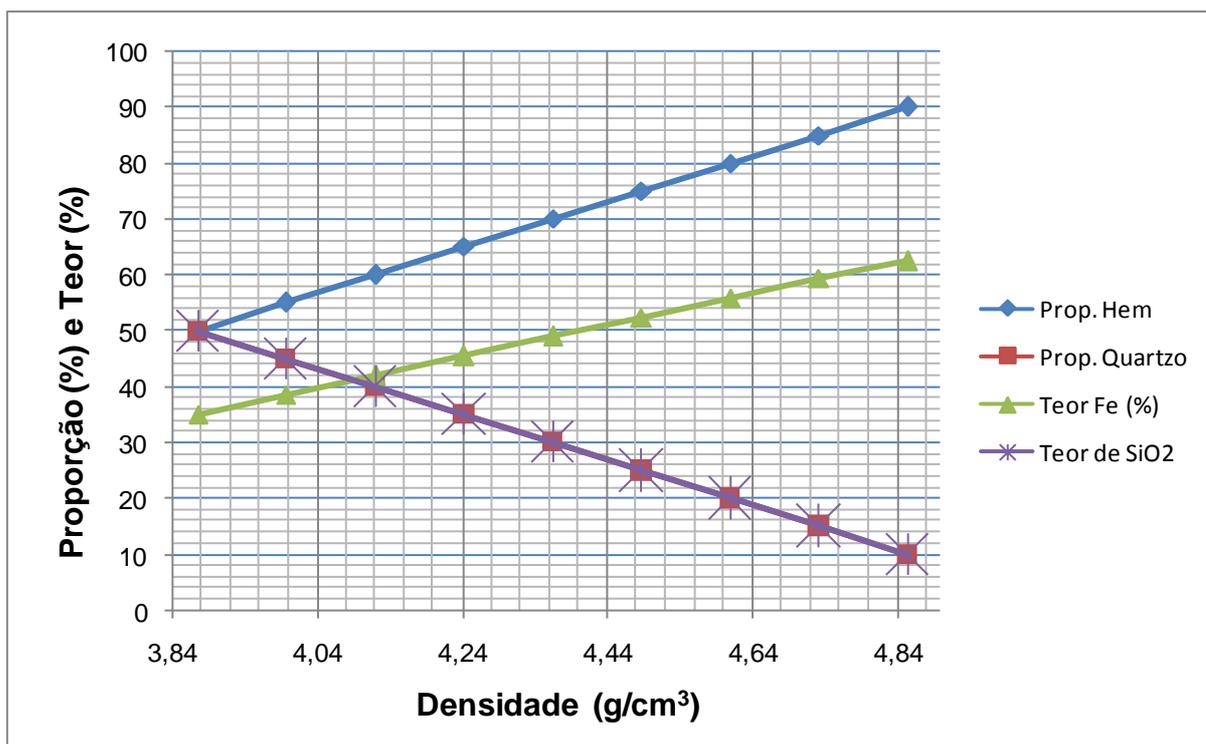


Figura 2.1 Relação entre densidade-teor e densidade-proporção de minerais na rocha.

Percebe-se para esse exemplo teórico que a densidade varia diretamente com a proporção do mineral minério, nesse caso, a hematita e, conseqüentemente, com o teor de ferro. O teor de sílica e a proporção de quartzo têm uma relação inversamente proporcional com a densidade. Isso se deve ao fato da hematita estar sendo gradualmente substituída pela sílica. A relação entre as densidades é de 0,52. Para esse exemplo foram usadas densidades específicas para a hematita igual a 5,1g/cm³ e para o quartzo, 2,65 g/cm³.

Vale lembrar que a distribuição de probabilidades dos teores do metal de interesse nesse tipo de rocha é assimétrica negativa, ou seja, existe uma grande quantidade de teores altos, revelando assim uma grande proporção do mineral minério na rocha. Para metais com distribuição de probabilidades assimétrica positiva dos teores de interesse, como é o caso do ouro, níquel, cobre, dentre

outros, essa dependência da densidade com o mineral minério pode ser menor, uma vez que a proporção do mineral minério é menor na rocha mineralizada.

Consideremos outro exemplo. Dessa vez uma rocha com composição mineralógica um pouco mais complexa do que o itabirito compacto considerado anteriormente. Carvalho *et al* (2002) apresentam um estudo sobre minério sulfetado de alto teor de níquel contendo cobre como metal secundário. Os sulfetos presentes nesse minério são: pentlandita, pirrotita e calcopirita, aparecendo na proporção de 65:30:5, respectivamente. Esse minério é formado basicamente por duas rochas. Uma rocha intersticial constituída tipicamente por 30% de sulfetos, 8% de magnetita e 62% de ganga silicatada, e um minério brechóide constituído de 70% de sulfetos, 10% de magnetita e 20% de ganga silicatada. Nesse último, uma quantidade baixa de cobaltita pode estar presente. A pirrotita ocorre como matriz para a pentlandita e calcopirita. É possível que tanto a cobaltita quanto a pirrotita hospedem níquel na sua estrutura. A pentlandita e a calcopirita são os minerais minérios de níquel e cobre, respectivamente. A ganga silicatada é composta por antigorita, talco e, em menor proporção, tremolita.

Com base nessas informações consideremos uma situação ideal em que uma rocha semelhante seja formada por 62% de antigorita, 8% de magnetita e 30% de sulfetos, sendo eles a pirrotita, a pentlandita e a calcopirita. Esses sulfetos ocorrem na rocha nas seguintes proporções 19,5%, 9% e 2,5%, respectivamente. Considere ainda que essa rocha seja composta apenas por esses minerais e que apenas as proporções de pirrotita-pentlandita e magnetita-antigorita possam variar de forma não simultânea, ou seja, se a proporção entre pirrotita-pentlandita varia, a proporção entre magnetita-antigorita permanece constante. Para efeito de simplificação, assume-se que a rocha não possui porosidade de nenhum tipo e que não há umidade.

Fazendo uso dessas simplificações, fez-se variar, primeiramente, a quantidade de pentlandita entre 1 a 16% por sua substituição por pirrotita. Dessa forma, para que a proporção de pentlandita seja igual a 16%, a proporção de pirrotita deve ser igual a 12,5%, de forma que para qualquer variação na proporção pirrotita-pentlandita a proporção dos dois minerais na rocha permaneça constante e igual a 28,5%. A partir de cálculos estequiométricos determinou-se o teor dos elementos Ni (%), Cu (%), Fe (%), SiO₂ (%) e S (%), bem como a densidade da rocha para cada

proporção. A figura 2.2 mostra a variação desses teores com a densidade à medida que variou a proporção pirrotita-pentlandita.

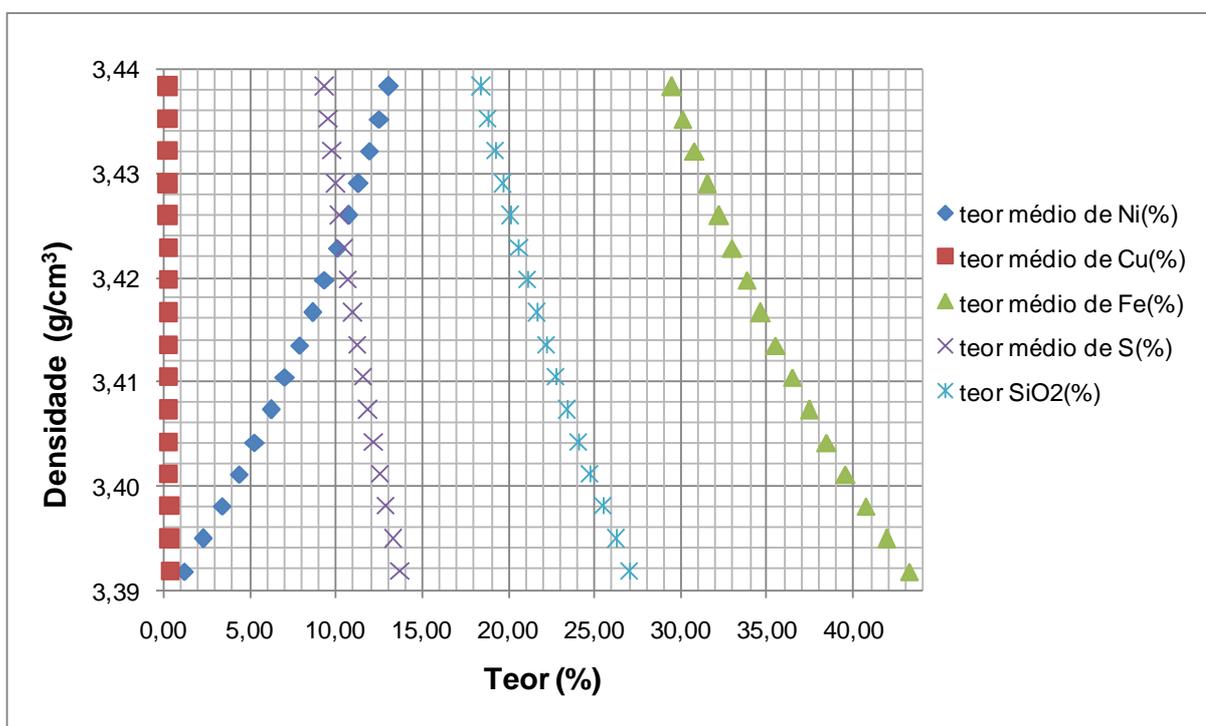


Figura 2.2 Variação na densidade (eixo Y) e nos teores (eixo X) ao se variar as proporções de pentlandita e pirrotita na rocha.

Antes mesmo de qualquer interpretação do gráfico acima, é importante chamar a atenção para o fato de que tipicamente a proporção do mineral minério de níquel constitui 9% da rocha, situação bem diferente do itabirito analisado anteriormente em que a proporção típica de mineral minério (hematita) é de aproximadamente 60%.

O que mais chama a atenção no gráfico da figura 2.2 é que, embora a proporção de pentlandita varie entre 1 e 16% da rocha, a densidade variou em apenas 1,4%, ou seja, de 3,39 a 3,44 g/cm³. Outro fato que chama a atenção é que todos os teores, exceto o teor de cobre, parecem variar não linearmente com a densidade. O resultado mais esperado e óbvio foi confirmado: à medida que se aumenta a proporção de mineral minério aumenta-se o teor do metal de interesse.

Outros resultados interessantes foram obtidos ao se manter constante a proporção de pentlandita 12% e pirrotita 16,5% e fazer variar a proporção entre antigorita-magnetita. Da mesma forma que no caso anterior, a proporção de magnetita variou entre 1 e 16% da rocha através de sua substituição por antigorita.

Dessa forma, quando a proporção de magnetita era 16% a de antigorita era de 54%. Através de cálculos estequiométricos, os teores de Ni (%), Cu (%), Fe (%), SiO₂ (%) e S (%) e a densidade para cada proporção foram recalculados e os resultados apresentados na figura 2.3.

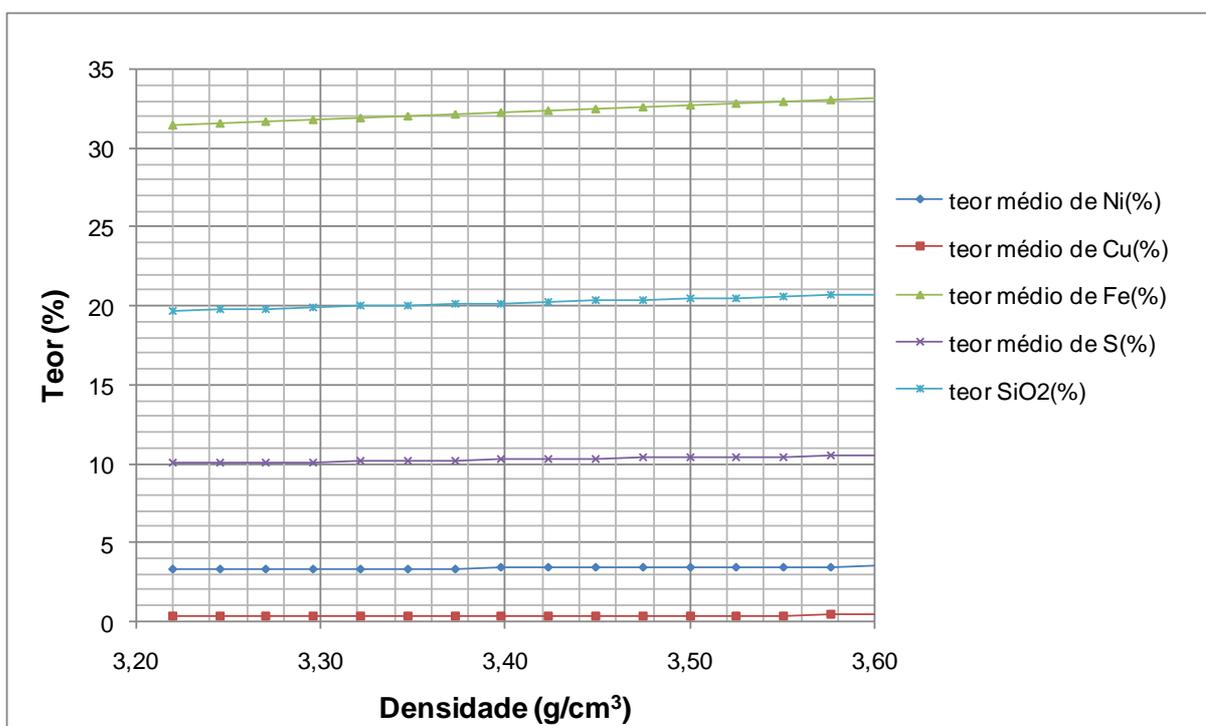


Figura 2.3 Variação na densidade (eixo X) e nos teores (eixo Y) ao se variar as proporções de antigorita e magnetita na rocha.

Nesse caso, observa-se que a variação na densidade foi maior, entre 3,20 a 3,60 g/cm³, 11% em relação à menor densidade. Observa-se também que para a variação magnetita-antigorita os teores, sem exceção, variaram linearmente com a densidade. O teor mais influenciado, como esperado, foi o de ferro.

O comportamento diferente observado na relação entre teores e densidade para a variação pirrotita-pentlandita e magnetita-antigorita deve-se ao fato de que no caso da variação pirrotita-pentlandita, a razão entre as duas densidades é de 0,95, enquanto que para a substituição magnetita-antigorita essa relação é de 0,50, ou seja, no primeiro caso a diferença entre as densidades dos minerais que são substituídos é pequena. Esse contraste entre as duas densidades no caso de uma substituição afetará de forma mais significativa ou não o valor da densidade da rocha. Variar a proporção de magnetita de 1 a 16% resultou em maior variação da densidade, maior do que a variação de pentlandita de 1 a 16%.

Essa observação nos leva a atentar para o fato de que o processo de enriquecimento em teor de metal de interesse poderá contribuir para o aumento significativo da densidade se o mesmo ocorrer por meio de uma substituição por um mineral de baixa densidade na rocha. Essas observações podem explicar a grande variação de teores e a baixa variação nas densidades usualmente encontradas na prática.

Efeito semelhante à variação na proporção dos minerais constituintes da rocha pode ser causado por presença de alterações intempéricas na rocha.

2.1.2. Presença de mais de um tipo de rocha na amostra

Os resultados obtidos no tópico anterior também têm uma implicação muito importante na determinação de densidades de amostras coletadas a partir de testemunhos de sondagem. Isso porque considerando as proporções de minerais anteriormente mencionadas como sendo constantes (62% de antigorita, 8% de magnetita e 30% de sulfetos) não é garantia que a densidade não possa variar ao longo de uma amostra. Essa variação é perfeitamente possível já que pode ser facilmente observada em algumas amostras - regiões mineralizadas -, ou seja, regiões onde há uma maior concentração de minerais minérios. A figura 2.4 apresenta um desenho esquemático da referida amostra.

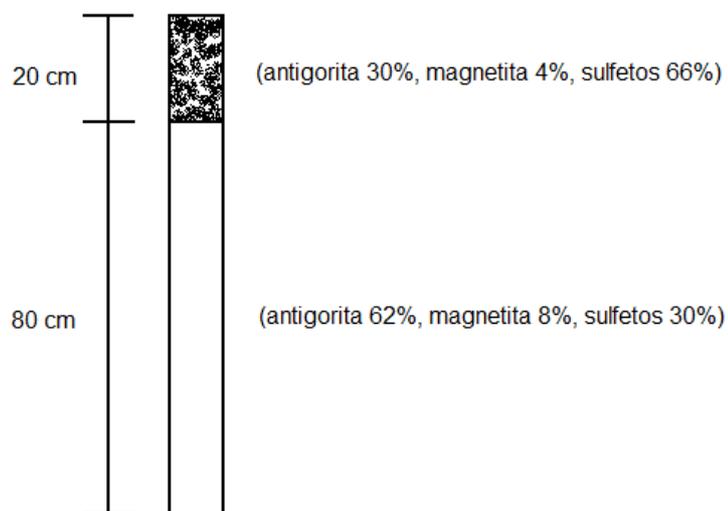


Figura 2.4 Amostra de uma rocha mineralizada com grande concentração de mineral minério em sua porção superior.

Nesse caso, embora o teor do metal de interesse seja determinado usando toda a amostra indistintamente, para a determinação da densidade é necessário que

a mesma seja individualizada em duas amostras, uma de 20 cm e outra de 80 cm, e a densidade determinada para cada intervalo. A densidade média da amostra é então determinada pela média das duas parcelas da amostra devidamente ponderadas por seus comprimentos. Esse procedimento é sugerido uma vez que em situações em que a amostra está fragmentada é comum determinar a densidade de apenas uma dessas parcelas e inferir esse valor como a densidade da amostra como um todo. Esse exemplo mostra que, caso haja a concentração preferencial de minerais minérios em uma dessas parcelas, a densidade da amostra deve ser determinada para cada uma dessas parcelas e a densidade da amostra deve ser inferida pela média dessas parcelas ponderada por seus respectivos comprimentos.

Outro caso possível é quando houver mais de um tipo de minério e a análise de teor considerar toda a amostra de 1m como mostrado na figura 2.5. Nesse caso, o ideal é que a amostra seja dividida em três intervalos e tanto os teores quanto as densidades avaliadas para cada intervalo e a densidade média da amostra sejam determinadas por média ponderada. Nesse caso, evitar-se-ia a perda de informação sobre o comportamento da densidade com o teor. Esse procedimento na definição das amostras poderá gerar informações tais que permitam um melhor entendimento de como se dá a relação densidade-teor no depósito.

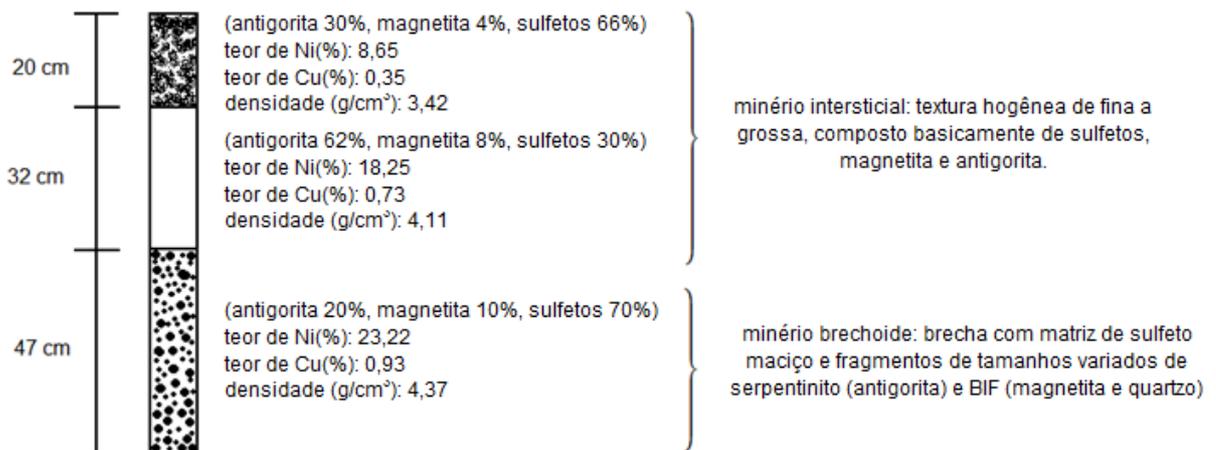


Figura 2.5 Amostra de minério composto por dois tipos de rochas diferentes.

2.1.3 Porosidade e umidade

Tomemos novamente o exemplo anterior em que se considera um itabirito constituído por quartzo e hematita nas seguintes proporções: 30% quartzo e 70% hematita. A densidade da rocha para essas proporções de hematita e quartzo é de

4,37 g/cm³. Outro fator que pode fazer variar a densidade nessa rocha é a quantidade de espaços vazios entre esses minerais, ou seja, a porosidade da amostra. Consideremos para essa mesma rocha três valores para porosidade 2%, 4% e 6%. Aplicando esses valores no cálculo da densidade, as respectivas densidades seriam 4,29 g/cm³, 4,21 g/cm³ e 4,13 g/cm³. Caso esses poros fossem completamente preenchidos com água, três novos valores de densidade seriam obtidos 4,31 g/cm³, 4,23 g/cm³ e 4,15 g/cm³, respectivamente.

A figura 2.6 apresenta um gráfico mostrando a variação da densidade do itabirito com porosidade em relação à densidade sem considerar porosidade. Para tanto, os três valores de porosidade anteriormente mencionados foram aplicados. Esses poros foram também considerados completamente preenchidos por água, ou seja, situação em que a rocha estaria com saturação igual a 100%. Qualquer valor de densidade para uma variação na saturação da rocha entre 0% e 100% estará compreendido entre as curvas 0% e 6%, caso seja essa a proporção de poros na amostra.

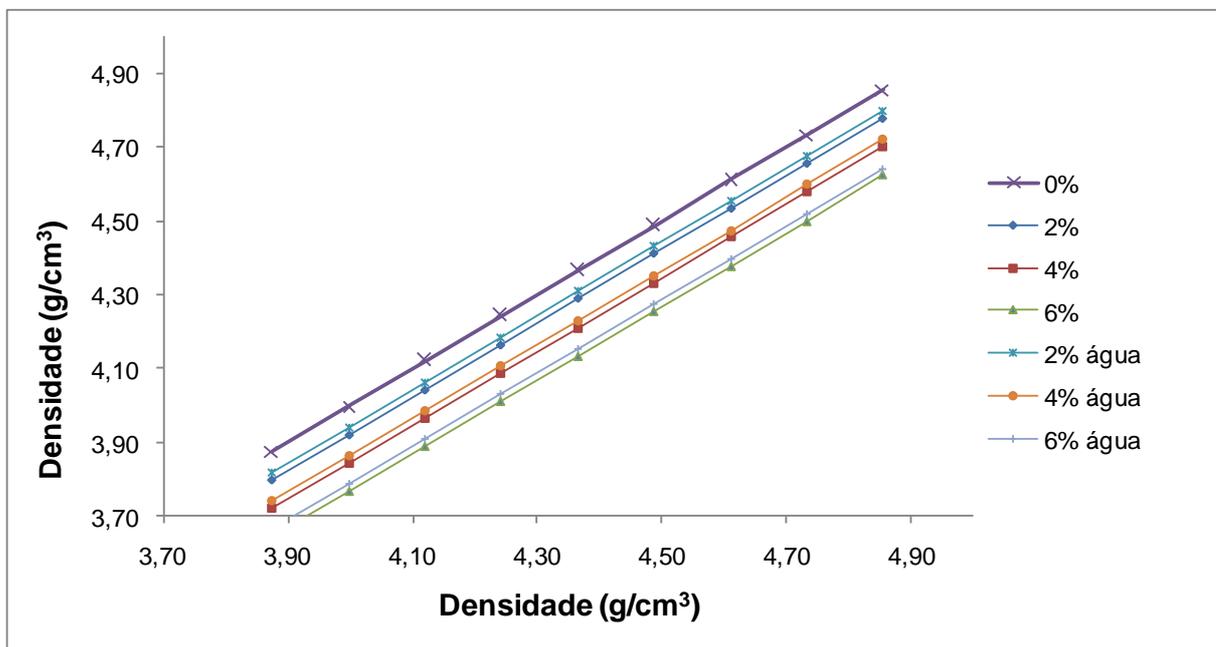


Figura 2.6 Variação da densidade em função da porosidade e da presença de água preenchendo os poros.

2.2 Determinação da densidade de amostras

A seguir serão apresentados seis métodos utilizados para a determinação de densidade de rochas. Os três primeiros métodos fazem uso direto de amostras

coletadas dessas rochas para a determinação de suas densidades. A fim de distingui-lo dos métodos que não fazem uso de amostras para determinação da densidade, esse método é classificado aqui como um método direto de obtenção de densidade. Geralmente a maneira de se obter a amostra depende do comportamento geomecânico da rocha. Rochas competentes geomecanicamente podem ter amostras coletadas a partir de testemunhos de sondagem. Por outro lado, rochas pouco competentes geomecanicamente e que não permitem a obtenção de amostras por testemunhos de sondagem podem ter sua densidade medida, por exemplo, a partir de grandes volumes escavados usando escavadeiras ou mesmo a partir de pequenas escavações com geometrias regulares.

Os três outros métodos pertencem à classe de métodos que já não fazem uso direto de amostras para a determinação da densidade. Esses métodos foram classificados aqui como métodos indiretos para obtenção de densidade. O primeiro seria a perfilagem geofísica gama-gama, com a qual se determina a densidade *in situ*, aproveitando furos de sondagem pré-existentes; o segundo determina densidade de forma algébrica a partir do conhecimento das proporções de cada mineral constituinte da rocha e de suas respectivas densidades específicas; e o terceiro, determina a densidade a partir de uma função que relaciona o teor de algum metal e a densidade analisada direta ou indiretamente para algumas amostras.

2.2.1 Determinação da densidade a partir de testemunho de sondagem

Esse método aplica-se a testemunhos de sondagem extraídos de rochas competentes geomecanicamente, ou seja, de rochas que proporcionam amostras com consistência suficiente para se determinar sua densidade pelo referido método. Primeiramente, a amostra é pesada p_a e em seguida é mergulhada em parafina aquecida. Um tempo é dado para que a parafina se consolide na parede da amostra, criando uma fina camada impermeabilizante. Feito isso, a amostra é imersa em um béquer calibrado contendo um volume conhecido de água v_i . O novo volume é então lido e anotado v_f . A densidade da amostra é determinada pela seguinte relação:

$$d = \frac{p_a}{v_d} \quad (2.4)$$

onde p_a é a massa da amostra e $v_d = v_{final} - v_{inicial}$ o volume de água deslocado, que é igual ao volume da amostra. Esse procedimento representa uma forma rápida e barata de se obter densidade a partir de testemunhos de sondagem. Uma desvantagem do método é que para rochas incompetentes, como alguns itabiritos friáveis, bauxitas e tantos outros casos de minérios inconsolidados, esse método não pode ser aplicado.

2.2.2 Determinação da densidade a partir de grandes volumes

Essa forma de determinar a densidade é sugerida em Hustrulid *et al* (2006) p. 194-195. Para a determinação da densidade é feita a escavação de grandes volumes de materiais, por exemplo, para diferentes áreas da mina, retira-se o volume igual ao de uma concha de uma escavadeira v_c . Esse volume é então pesado p_c e a densidade é determinada pela relação:

$$d = \frac{p_c}{v_c} \quad (2.5)$$

Esse método permite determinar a densidade de várias frentes de lavra e proporciona boas estimativas de densidade localmente. As desvantagens desse método são o tempo consumido para sua determinação e o custo, já que uma balança deverá ser instalada sobre a concha da escavadeira. Outro ponto negativo é que para casos de rochas em que não é possível o desmonte mecânico, o método não pode ser aplicado. Uma tentativa de usar esse método com material desmontado por explosivo é contra indicado uma vez que espaços vazios entre o material fragmentado dentro da concha são de difícil quantificação e sua desconsideração pode levar a subestimativa do valor da densidade.

2.2.3 Método da abertura de poço ou cubo para determinação da densidade

Este método, segundo Almeida (2011), consiste em escavar um poço com paredes de dimensões regulares coletando o material que posteriormente é pesado. As dimensões do poço sugeridas são: 1m x 1m x 1m (1m³) ou 1m x 1m x 0,5m (0,5m³). Em seguida, o poço é revestido com um plástico de forma a impermeabilizar o fundo e as paredes do mesmo e completamente preenchido com água sendo o volume de água conhecido. Dessa forma, a densidade é calculada pela relação entre o peso do material coletado e o volume de água que preenche o poço. Vale ressaltar que existe uma limitação de escavações de dimensões muito grandes pelo

tempo que isso representa e pelo volume de material gerado, da mesma forma ao se reduzir as dimensões desse cubo perde-se a representatividade da amostra, principalmente em termos de quantidade de vazios. Nesse caso, o bom senso deve ponderar a escolha das dimensões do poço.

Esse método permite que materiais de baixa resistência geomecânica possam ter suas densidades determinadas, como é o caso de itabiritos friáveis, lateritas de níquel e solos. Porém, segundo o mesmo Almeida (2011), a determinação da densidade por esse método pode ser lenta e exigir a utilização de equipamentos de porte médio.

2.2.4 Determinação da densidade a partir de perfilagem geofísica gama-gama

A densidade de rochas pode ser determinada por perfilagem geofísica gama-gama de furos de sondagem previamente existentes criando perfis contínuos de densidade ao longo do furo. Esse método utiliza-se de uma fonte radioativa, geralmente Césio 137, emissora de raios gama. Os raios emitidos interagem com os elétrons da rocha sendo uma proporção desses retro-espalhados ou absorvidos pela rocha. Por meio de receptores, mede-se a intensidade dos raios retro-espalhados. A diferença entre a intensidade dos raios gama emitidos e dos retro-espalhados medidos por receptores é inversamente proporcional à densidade eletrônica dos átomos que compõem a rocha, que por sua vez é proporcional à densidade da rocha. Quanto mais densa a rocha, menor a intensidade captada pelos receptores.

O método utiliza uma sonda composta de uma fonte radioativa e de receptores, além de um dispositivo que capta a radioatividade natural da rocha ou gama-natural. Para obter-se o perfil de densidade, a sonda é introduzida no furo. O perfil de densidade registra continuamente as variações das massas específicas das rochas atravessadas e expressa suas medidas em g/cm^3 . No caso de rochas porosas, a densidade obtida no perfil é resultado da densidade da rocha e do fluido que preenche os espaços vazios.

Segundo Almeida (2011), alguns fatores influem nos resultados dos perfis de densidade obtidos por esse método, tais como a calibração da função resposta, a presença de água no furo, o gama-natural, a presença de fluido de perfuração, a rugosidade na parede do furo, dentre outras.

Embora o método exija certo cuidado no que diz respeito à calibração da função resposta (determinada pela perfilagem de furos com densidades conhecidas) e à compensação da eventual radiação natural presente na rocha sendo investigada, dentre outros, a flexibilidade quanto ao tipo de rocha e a rapidez na obtenção dos dados faz desse método um facilitador para o uso amplo da densidade na avaliação de reservas. Exemplos de aplicações do método em minério de ferro e carvão podem ser encontrados em Oliveira (2005), Webber (2008) e Almeida (2011).

2.2.5 Determinação da densidade a partir de proporção de minerais em rochas e densidades conhecidas

Essa forma de determinação de densidade é citada em vários trabalhos incluindo o de Bevan (1993), Vallé e Côte (1992) e Sinclair e Blackwell (2006). A densidade assim determinada (indiretamente) requer inicialmente o conhecimento da composição mineralógica e da proporção de cada um desses minerais presentes na rocha como um todo. Consideremos, por exemplo, um minério de ouro composto por uma única rocha formada por quartzo 94% e pirita 6% em peso. A densidade específica do quartzo é 2,65 e a densidade específica da pirita é 5,1. Dessa forma, a densidade da rocha com essa composição e proporção de minerais será:

$$d = \frac{2,65 \times 94\% + 5,1 \times 6\%}{94\% + 6\%} = 2,80$$

De maneira geral, essa densidade pode ser determinada pela equação:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2.6)$$

onde d_i e p_i são a densidade específica de cada mineral constituinte da rocha e sua respectiva proporção. Caso a porosidade da rocha deva ser considerada, basta adicionar uma proporção p_i correspondente ao volume de vazios na rocha. Estando esses poros completamente preenchidos por água uma densidade d_i , igual a da água, deve ser incluída no numerador multiplicando a proporção p_i . Embora o método permita a obtenção da densidade de forma simples, assumir que as proporções de cada mineral constituinte da rocha são mantidas constantes ao longo da rocha é algo difícil de acontecer.

2.2.6 Determinação da densidade a partir da correlação entre densidade e metal de interesse

A determinação da densidade pode ser dada de forma indireta com base em uma relação entre densidade da amostra e o teor de um dado elemento presente na rocha, como por exemplo, o teor do metal de interesse. Como discutido anteriormente, essa relação pode ser determinada pela variação da proporção dos minerais constituintes da rocha, pela porosidade, pela umidade e também pela variação do tipo de rocha que compõe a amostra. Em estudos realizados por Potapoff (1968) no depósito de níquel da mina de Craig, localizada em Sudbury, Ontário, Canadá, foi determinada uma equação que relaciona o teor de níquel com o valor da densidade da amostra.

$$d = 0,29736xNi(\%) + 2,83896 \quad (2.7)$$

onde d é a densidade da amostra e $Ni(\%)$ o seu teor de níquel.

Bevan (1993), realizando um estudo no mesmo depósito, constatou que os teores de níquel e densidade apresentavam variações consideráveis e que a equação 2.7 apresentava apenas uma média. Essas variações, ocorrem devido à variação nas proporções dos minerais que compõem a rocha mineralizada, ou seja, variações nas proporções de pentlandita, pirrotita, calcopirita/pirita e de ganga. Sendo assim, o mesmo propôs uma equação que relaciona teor de enxofre e densidade:

$$d = 2,99 + 0,02825xS(\%) + 0,000675xS(\%)^2 \quad (2.8)$$

onde d é a densidade da amostra e $S(\%)$ o seu teor de enxofre. Percebe-se que a relação enxofre e densidade nesse caso não é linear. Essa relação possibilita a determinação da densidade de maneira mais acurada, uma vez que a mesma não considera apenas o teor de níquel provido pela proporção de pentlandita da amostra, mas a quantidade de enxofre presente em todos os minerais sulfetados que compõem a rocha.

Considerando o exemplo citado na seção 2.1, que analisa a relação entre teores e densidade em uma rocha hipotética, à medida que variam-se as proporções de pirrotita-pentlandita, pode-se determinar equações para a densidade em função dos teores de níquel, enxofre e ferro:

$$d = 3,3893 + 0,0021xNi(\%) + 0,0001xNi(\%)^2 \quad (2.9)$$

$$d = 3,656 - 0,0319xS(\%) + 0,0009xS(\%)^2 \quad (2.10)$$

$$d = 3,656 - 0,0101xFe(\%) + 0,00009xFe(\%)^2 \quad (2.11)$$

onde d é a densidade da amostra, $Ni(\%)$ o seu teor de níquel, $S(\%)$ o seu teor de enxofre e $Fe(\%)$ o seu teor de ferro. Note que nenhuma das relações são lineares. Mesmo em se tratando de curvas teóricas, a equação 2.11 pode representar melhor a relação teor e densidade da amostra, uma vez que o elemento ferro está presente em todos os minerais constituintes da rocha.

Segundo Bevan (1993), as desvantagens da determinação da densidade a partir desse tipo de equação é que, embora o teor de metal seja o mesmo para duas amostras distintas, as proporções entre os minerais constituintes da rocha em cada amostra pode variar, o que levaria a densidades diferentes. Para tanto, basta lembrar que o metal de interesse pode estar presente na estrutura de outros minerais.

2.3 Considerações sobre a determinação da densidade

Com base no que foi discutido nos itens 2.1 e 2.2 algumas considerações devem ser feitas ao se determinar a densidade de amostras para um determinado tipo de depósito mineral. Nos itens anteriores, buscou-se mostrar que a densidade das rochas varia em função dos seguintes parâmetros:

- i. Proporção dos minerais na composição mineralógica;
- ii. Porosidade (de todos os tipos)
- iii. Umidade
- iv. Grau de alteração da rocha

Porém, nem todos os métodos de obtenção de densidade levam em consideração esses fatores. É importante relembrar também que a variação da densidade em uma amostra pode se dar pela variação do tipo de rocha presente na amostra.

O método de obtenção de densidade através de testemunho de sondagem permite que esses fatores sejam levados em conta apenas pela correta individualização das parcelas das amostras escolhidas para se determinar a densidade da amostra como um todo. A perfilagem geofísica apresenta-se como um método flexível no sentido de que perfis de densidade podem ser determinados de forma contínua para todo tipo de rocha através de furos de sondagem destrutivos ou não previamente realizados.

No próximo capítulo, serão apresentadas as etapas da avaliação de depósitos em que o uso da densidade pode ser aplicado e uma discussão para tentar prever os possíveis efeitos da incorporação da densidade nessas etapas.

Capítulo 3

Incorporação das medidas de densidade na avaliação de recursos e reservas

A incorporação da densidade na avaliação de depósitos pode ser feita desde a etapa de regularização do suporte das amostras até a etapa de conversão de volume de blocos em quantidade de metal contido ou em massa de estéril. Os possíveis usos da densidade nos diversos momentos da avaliação de depósitos serão apresentados a seguir.

O primeiro uso consiste em aplicar a densidade, quando isotopicamente determinada, como fator de ponderação no momento da regularização das amostras. O segundo uso consiste em acumular a densidade com o teor e comprimento das compostas para obtenção da variável acumulada TCD e em acumular a densidade com o comprimento das amostras para obtenção da variável CD. Após estimar essas variáveis, os teores dos blocos são determinados indiretamente pela relação entre as duas: TCD/CD. O terceiro e último uso consiste em aplicar a densidade como fator de conversão do volume e teor de blocos em massa e quantidades de metal dos mesmos. Esse uso, porém, pode ser feito de duas formas distintas: a primeira, fazendo a conversão aplicando uma densidade média a cada domínio/litologia e a segunda, aplicando nessa conversão um modelo de densidade estimado a partir de um conjunto suficiente de amostras. Densidades estimadas em cada bloco permitem o uso das mesmas como fator de ponderação no cálculo de diluição de blocos localizados na fronteira entre dois domínios.

Considerando alguns possíveis usos da densidade na avaliação de depósitos minerais é feita uma avaliação dos efeitos da sua incorporação em cada uma dessas etapas.

3.1 Regularização das amostras

A regularização de amostras é um processo que consiste em compor amostras analisadas para um dado atributo com diferentes volumes (comprimentos

menores) em compostas do mesmo atributo com volume (massa) constante e comprimentos maiores. A figura 3.1 exemplifica o processo de regularização de amostras.

O teor médio da primeira composta, 1,66 %, apresentado na figura 3.1, foi determinado a partir de três amostras pelo do cálculo da média dessas amostras ponderadas por seus respectivos comprimentos e densidades $(0,70 \times 2,85 \times 0,65 + 1,50 \times 3,12 \times 2,15) / (0,70 \times 2,85 + 1,50 \times 3,12) = 1,66\%$. O mesmo foi feito para as outras duas compostas.

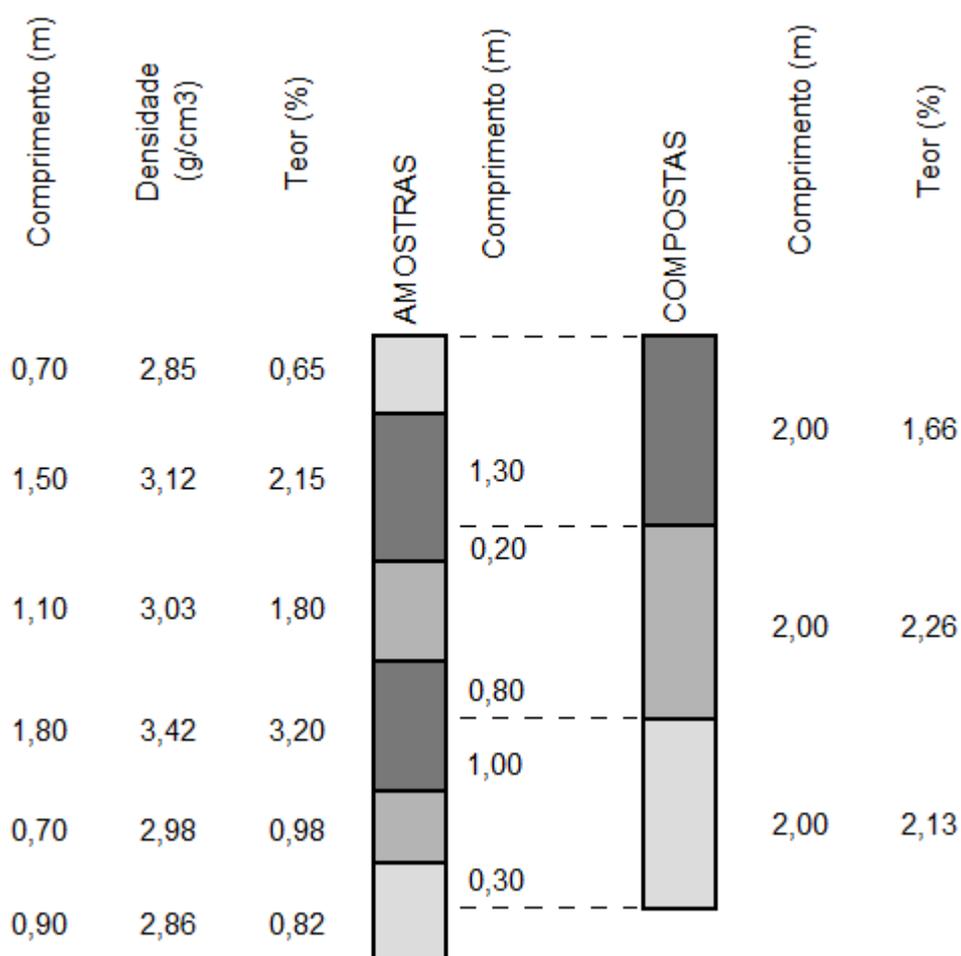


Figura 3.1 Exemplo da regularização de amostras ao longo de um furo de sondagem.

Na maioria dos casos, as amostras são coletadas em testemunhos de sondagem de seção circular com diâmetro que pode variar de acordo com a profundidade do furo segundo a tabela 3.1. Nesse caso, é considerado que a seção horizontal do cilindro (amostra) é constante e seu volume dependente apenas do comprimento. Dessa forma, o suporte passa a ser função apenas do comprimento da amostra. Por isso que, para regularizar amostras, ou seja, colocá-las no mesmo

suporte, basta que tornemos seus comprimentos constantes, ponderando cada comprimento adequadamente.

Tabela 3.1. Diâmetros das amostras coletadas por sondagem com recuperação de testemunho.

Furo	Diâmetro Interdo da Corôa (mm)
AQ	28,6
BQ	36,4
NQ	47,6
HQ	63,5

Em geral, as amostras são coletadas em intervalos de um em um metro de comprimento, podendo variar entre intervalos menores ou maiores, dependendo do tipo de rocha da qual estão sendo coletados os testemunhos de sondagem (amostras). Por exemplo, em locais onde há baixa recuperação, fragmentos de rocha menores que um metro são comumente observados. Porém, avanços em rochas competentes geomecanicamente e sem variação litológica podem ocorrer em intervalos maiores que um metro.

Esse processo de regularização é feito para garantir que as amostras (compostas) estejam no mesmo suporte amostral e, conseqüentemente, não gerem viés de estimativa quando combinadas para cálculo de um valor médio. As amostras pertencentes a um conjunto com suportes diferentes não são aditivas, pois a média dessas amostras não é igual à média aritmética das mesmas. Isso faz com que os variogramas não possam ser estimados a partir de tais amostras, já que o variograma é função do suporte, como colocado por Journel e Huijbregts (1978, p.197-198). Uma maneira de garantir que as compostas estejam no mesmo suporte é ponderando as amostras que determinam a composta por suas respectivas densidades.

Quando a densidade é medida ao longo de um furo de sondagem de maneira contínua por métodos geofísicos, a leitura da densidade ao longo do perfil pode ser discretizada, ou seja, agrupada em intervalos em que a densidade apresenta valores aproximadamente constantes. Nesse caso, dificilmente os intervalos de medida de

densidade serão constantes. Esses intervalos podem ainda ser tomados de tal forma a coincidir com o intervalo de amostra de teores. Nos dois casos, as amostras estarão em suportes diferentes e também necessitarão ser regularizados.

Usualmente, segundo Journel e Huijbregts (1978), Sinclair e Blackwell (2006) e Noble (2011), a regularização de amostras para um mesmo suporte é feita por meio de três diferentes processos. O primeiro é denominado regularização ao longo do furo, o segundo, regularização ao longo de bancadas e o último, regularização ao longo de domínios. Cada um desses métodos será brevemente apresentado a seguir.

3.1.1 Regularização de amostras ao longo do furo

Suponhamos um furo composto de p amostras de onde se analisou o teor de um dado atributo t . Cada uma dessas amostras possui um comprimento z . Os teores do dado atributo em intervalos de mesmo suporte l são dados pela a equação abaixo:

$$g_l = \frac{\sum_{i=1}^n t_i z_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (3.1)$$

onde g_l é o teor de cada intervalo (composta) de comprimento constante l e n é o número de amostras e parcelas representativas de amostras retidas no cálculo do teor médio do atributo para a composta g_l . Esse processo consiste em ponderar o valor do atributo em cada amostra apenas por seu comprimento.

Porém, diversos trabalhos como os de Dadson (1968, p. 3-4), Sinclair e Blackwell (2006 p. 297), Dias *et. al* (2011) e Noble (2011 p. 206), dentre outros, sugerem que nos casos onde exista uma variabilidade da densidade das amostras ao longo do furo, ao invés de regularizarmos as amostras levando em conta apenas o comprimento das mesmas como feito pela equação (3.1), deva-se considerar na mesma equação a densidade de cada amostra como um segundo fator de ponderação. A nova equação ficaria:

$$g_l = \frac{\sum_{i=1}^n t_i z_i d_i}{\sum_{i=1}^n z_i d_i} \quad (3.2)$$

onde d_i é a densidade de cada amostra e fração representativa de amostras usada na determinação do teor g_l . A desconsideração desse fator de ponderação em casos onde a densidade varia significativamente de amostra para amostra pode

subestimar ou superestimar os teores das compostas. Sinclair e Blackwell (2006), nesse caso, classificam a equação (3.1) como uma maneira errada de regularizar as amostras.

3.1.2 Regularização de amostras ao longo de bancadas

O método de regularização por bancadas consiste em combinar as amostras analisadas para um dado atributo para se obter valores médios desse atributo em intervalos iguais (compostas) cujos comprimentos se estendem do topo da bancada até a sua base. Esse processo pode ainda ser aplicado em veios com espessuras quase-constantes. Da mesma forma que o processo de regularização ao longo do furo, a regularização ao longo de bancadas determina o valor médio do atributo a partir dos teores das amostras segundo a equação (3.1). Caso a densidade dessas amostras varie significativamente, a equação (3.2) deve ser aplicada. Esse tipo de regularização permite trabalhar em 2D em um plano que é ortogonal à direção da regularização, ou seja, o plano da bancada. Esse processo de regularização é referido como *grading* por Journel and Huijbregts (1978).

Nesse método de regularização, como a composta assume o mesmo tamanho da altura de uma bancada ou espessura de um veio quase constante, poderá ocorrer uma perda na discretização das amostras ao longo do furo, já que os suportes terão comprimentos maiores. Esse método é usado em situações em que uma camada é extraída completamente sem seletividade dentro da mesma.

3.1.3 Regularização por domínios

O processo de regularização de amostras por domínios consiste em regularizar amostras pertencentes a um mesmo intervalo ao longo do furo e que tenham características parecidas, ou seja, pertencentes a um mesmo domínio. O processo pode ponderar tanto pelo comprimento das amostras quanto pelo comprimento e densidade, dependendo da variabilidade da mesma.

Uma maneira de operacionalizar esse tipo de regularização é dar código para cada amostra pertencente a cada domínio, tipo de rocha ou a qualquer outra propriedade geológica de interesse e, em seguida, regularizar as amostras separadamente para cada um dos códigos. Um aspecto importante a ser observado é o tipo de contato que ocorre na transição de um domínio para o outro no momento

de codificar as amostras. Caso os contatos geológicos ocorram de forma gradativa e não haja grandes variações dos teores é apropriado que a codificação seja feita considerando o domínio predominante na amostra.

3.1.4 Considerações a respeito da regularização de amostras

Alguns aspectos importantes que concernem à regularização de amostras devem ser considerados no momento da regularização. O primeiro deles refere-se ao efeito suavizador da regularização sobre a variância das amostras originais. O efeito da regularização das amostras é o mesmo observado quando da mudança de suporte. Isso implica que, à medida que definimos compostas de tamanhos (comprimentos) cada vez maiores, a variância dos teores das compostas tende a diminuir em relação à variância das amostras e a média tende a permanecer constante. Esse efeito de suavização pode ter um papel importante, segundo Noble (2011 p. 206), no sentido de diminuir as variações causadas pela influência de valores extremos.

Outro aspecto importante é garantir que a média das compostas seja a mais próxima possível da média das amostras. Em geral, a regularização é feita uma vez definido o tamanho da composta. No final, via de regra, compostas com tamanhos abaixo de 25% ou 50% do tamanho escolhido para a composta são descartadas. Nesse caso, o tamanho da composta pode influenciar na média das compostas, pois, quanto maior o tamanho da composta maior será o tamanho das compostas descartadas (compostas de 6m provocariam descarte de compostas de 1.5m – 25% do tamanho definido para as compostas). O aumento do tamanho da composta além de influenciar na variância e poder influenciar na sua média, também provoca um aumento na diferença entre o número de amostras e o número de compostas. Diminuindo, de certa forma, o número de informação.

Nesse sentido, a escolha do tamanho mais apropriado da composta é fundamental. No caso de regularização ao longo de bancadas, está claro que o tamanho (comprimento) da composta é determinado pela altura da bancada. Porém, nos processos de regularização ao longo do furo e por domínios, existem algumas regras para a definição do tamanho da composta. Uma prática comum é determinar esse comprimento um pouco maior que o comprimento médio das amostras. Por

exemplo, se os comprimentos das amostras são, em média, de 2.30m, determinam-se compostas de 3 metros. Outro aspecto considerado é que essas compostas tenham comprimentos múltiplos inteiros do tamanho da bancada, por exemplo, para uma bancada de 12 m, compostas de 3 m seriam uma opção.

É importante lembrar que a aplicação dessas regras para determinar o tamanho da composta deve ser feita avaliando-se o comportamento dessas compostas em relação à sua média, variância e número de compostas geradas. É interessante também, que se tenha uma boa compreensão com relação às compostas descartadas (tamanhos menores de 25% ou 50% do tamanho definido para a composta) como sua quantidade, localização e média. Mais discussões a respeito dos métodos de regularização de amostras podem ser encontradas em Journel e Huijbregts (1978), Rendu (1981), Sinclair e Blackwell (2006), Hustrulid e Kuchta (2006) e Noble (2011).

3.2 Variáveis acumuladas

O uso de variáveis acumuladas com o intuito de incorporar densidade no processo de realização de estimativas é recomendado em vários trabalhos. Krige (1981, p.3) ressalta que em corpos de minério nos quais a densidade varia significativamente e, particularmente, quando a densidade tem correlação com o teor do atributo de interesse, deve-se trabalhar com uma variável acumulada: teor x densidade, TD. O mesmo sugere ainda que a densidade deve ser incorporada em todos os processos ligados às estimativas. Embora Krige (1981) sugira o uso da densidade como variável acumulada, o mesmo não apresenta nenhum resultado dessa aplicação em depósitos reais.

Armstrong (1998, p. 49) sugere o uso de variáveis acumuladas devido a uma questão de aditividade das amostras. Considere um conjunto de amostras de teor que têm suportes iguais, a média desse conjunto de amostras é igual à média aritmética dessas amostras. Nesse caso, a variável teor é aditiva. Caso essas amostras tenham suportes diferentes, a média desse conjunto não é mais a média aritmética das amostras e sim uma média ponderada pelos seus respectivos comprimentos ou volumes, ou por sua densidade, caso ela não seja igual para cada amostra. Nesse caso, para que a variável teor possa ser aditiva, as amostras devem ser ponderadas adequadamente para a realização das estimativas.

Nesse sentido, a autora sugere o uso de variáveis acumuladas em dois tipos de depósitos distintos. O primeiro deles constitui depósitos formados por camadas finas e que são extraídas completamente sem nenhuma seletividade dentro da camada. Podem exemplificar essa situação alguns depósitos de carvão, bauxita, níquel laterítico e ouro em veios. Nesses casos, o estudo é realizado em 2D usando a variável acumulada TE (produto do teor pela espessura) e E (espessura da camada). O segundo tipo de depósitos consiste em depósitos com espessuras maiores e que geralmente são divididos em blocos de dimensões constantes para uma extração mais seletiva. A média dos teores desses blocos é a média aritmética dos mesmos. Porém, os teores desses blocos são estimados por um processo de interpolação de compostas (amostras regularizadas localizadas próximas ao bloco) para determinar o teor médio do bloco. Em geral, o comprimento das compostas raramente é constante assim como suas densidades.

Dessa forma, é inevitável questionar se também nesse segundo tipo de depósito, mencionado por Armstrong (1998), pode-se determinar a média de um bloco por um processo de interpolação, considerando que as amostras usadas nessa interpolação são aditivas. Porém, de fato elas não o são. Como a densidade e o comprimento das compostas variam, a média desse conjunto de compostas não é igual à média aritmética dessas compostas.

Marcotte e Boucher (2001b), realizando um estudo de estimativas em 2D em pontos previamente simulados e no banco de dados Walker Lake, sugerem que o uso de variáveis acumuladas (método indireto de obtenção de teor) é recomendado apenas quando a correlação entre o atributo de interesse e o suporte (espessura) possuem uma correlação negativa e que, ao contrário do comumente praticado quando essa correlação é positiva, o uso da variável acumulada não é recomendado. Nesse caso, o atributo de interesse deve ser estimado diretamente (método direto). Segundo os mesmos, zero é o valor do coeficiente de correlação no qual os dois métodos produzem resultados iguais. Em complemento, os mesmos sugerem que o uso de validação cruzada poderá ajudar na determinação de qual método usar, ou seja, a decisão deve ser baseada no coeficiente de correlação e no erro obtido pela validação cruzada. Sendo assim, dois fatores são determinantes na decisão de usar ou não variáveis acumuladas na estimativa de teores: o coeficiente

de correlação entre teor e espessura e o erro envolvido no processo de validação cruzada.

Porém, as conclusões obtidas por Marcotte e Boucher (2001) partiram de valores simulados para espessura e teor, como mostra a configuração abaixo:

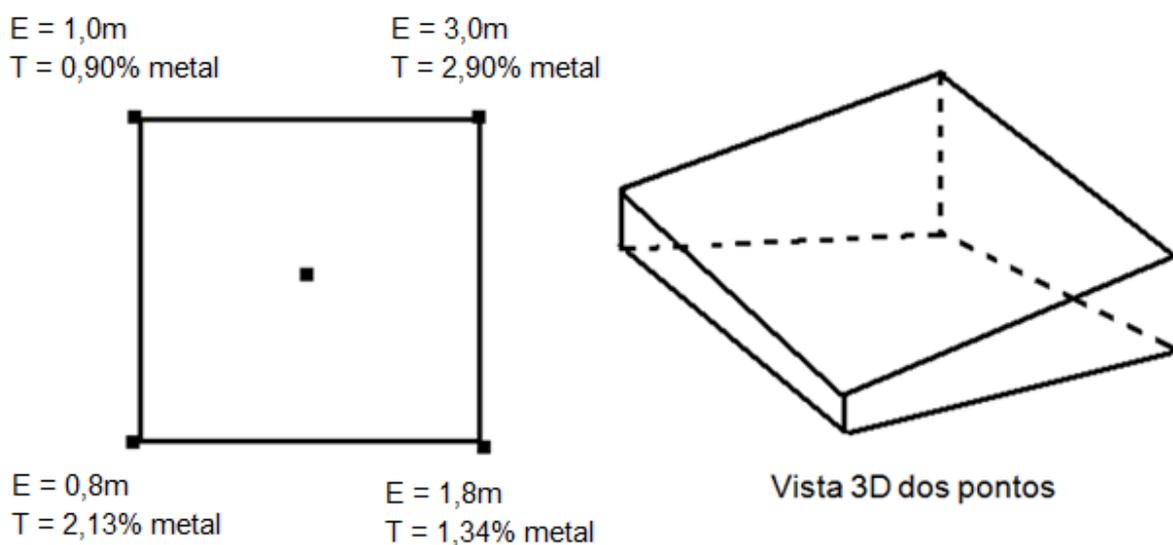


Figura 3.2 Configuração dos pontos obtidos por simulação LU apresentada no trabalho de Marcotte e Boucher (2001a).

Em cada vértice e no centro do quadrado foram gerados valores de espessura e teor com distribuição lognormal por simulação LU. A partir dessas simulações o centro do quadrado foi estimado pelos métodos direto e indireto. Os resultados foram avaliados utilizando-se dois parâmetros: um suposto viés presente no método indireto e o ganho obtido pela diferença da variância de krigagem entre o método direto e o indireto. Os resultados obtidos nas estimativas dos pontos simulados foram testados no banco de dados Walker Lake modificado e os resultados previstos com as simulações de espessura e teor (figura 3.2) puderam ser confirmados. Mesmo com a confirmação desses resultados no banco de dados Walker Lake, em que houve uma aplicação da metodologia para estimativa de pontos, a aplicação direta desses resultados em outras situações deve ser cautelosa. Trata-se de uma aplicação em 2D para pontos simulados e em um banco de dados modificado. Ambos os casos podem diferir muito das características de um depósito real quanto à gênese e quantidade de informação que um avaliador de depósitos dispõe, o que não foi levado em consideração no estudo com base no

banco de dados Walker Lake e nos pontos simulados com o intuito de reproduzir depósitos em veios para uma abordagem 2D.

Dagbert (2001), comentando os trabalhos de Marcotte e Boucher (2001a), ressalta que embora os resultados obtidos por eles não sugerissem o uso do método indireto quando a correlação é positiva, usar o método indireto é, teoricamente, o mais recomendado, uma vez que o processo de acumulação permite que as variáveis estejam no mesmo suporte. Outro aspecto apontado por esse autor é que as conclusões de Marcotte e Boucher não se aplicam para blocos e painéis e sim a pontos. Nesses casos, o autor verificou que a estimativa obtida pelo método direto superestima ou subestima o teor médio desses blocos ou painéis.

Marcotte e Boucher (2001b) em resposta aos comentários de Dagbert (2001) mostraram que o viés causado pelo método direto ao estimar blocos de pequenas dimensões é muito baixo e que para grandes volumes o método indireto não produz viés. Porém, ao definir a geometria de painéis aplicando um teor de corte às estimativas de pontos e estimar o teor do painel pelo método indireto, obteve-se média do painel muito próxima da média real usando o banco de dados Walker Lake modificado. Os mesmos autores sugeriram para esse caso o uso do método direto para determinação da geometria desses painéis e a média de várias co-simulações como uma aproximação do método indireto para se obter o teor médio do painel.

Porém, na maioria dos casos, os painéis de lavra não são definidos apenas pela aplicação de um teor de corte às estimativas *per se*. Os mesmos são definidos a partir de uma meta de extração de minério e estéril, sendo seus destinos restringidos por um teor de corte. Esses destinos podem ser pilha de estéril, britador ou pilha de estocagem. Sendo assim, os resultados obtidos não asseguram resultados parecidos ao se trabalhar com depósitos em 3D e incorporando a densidade. Esses resultados sugerem um estudo envolvendo a densidade e sua aplicação em depósitos reais na tentativa de se observar os efeitos do seu uso como variável acumulada.

Para a consideração da densidade nas estimativas de teores por meio de uso de variáveis acumuladas (para garantir mesmo suporte às compostas), é necessária a definição de duas variáveis. A primeira variável acumulada seria: TCD, que corresponde ao produto entre teor (T) da composta para o atributo de interesse, o comprimento da composta (C) (esse comprimento mesmo após a regularização

pode ser variável) e a densidade da composta (D). A segunda variável acumulada seria CD, que corresponde ao produto do comprimento da composta (C) pela densidade da mesma (D).

Nesse caso, procede-se com as estimativas de cada uma dessas variáveis e o teor é obtido de forma indireta, dividindo a variável TDC pela variável DC, como mostra a equação abaixo:

$$Teor_{ind} = \frac{TCD^*}{CD^*} \quad (3.3)$$

onde $Teor_{ind}$ representa o teor do bloco.

Esse procedimento permite ponderar cada composta por sua respectiva densidade. Como já mencionado anteriormente, ponderar o teor da composta pela densidade é prudente, uma vez que compostas com mesmo teor podem ter densidades diferentes implicando em massas diferentes.

Uma questão importante que deve ser observada é em relação à variância de krigagem quando se trabalha com variáveis acumuladas. Caso as variáveis TCD e CD sejam estimadas por algum algoritmo de krigagem, a variância de krigagem não será determinada pelo processo de desacumulação, ou seja, a variância de krigagem do bloco não pode ser obtida por meio de uma equação semelhante a 3.3. A determinação dessa variância é trabalhosa e é descrita em Journel e Huijbregts (1978, p. 199).

Outro ponto importante, que até mesmo antecede a determinação da variância de krigagem, é que, como se tratam de duas variáveis diferentes, os variogramas das mesmas podem ser diferentes, resultando em pesos diferentes para cada uma das variáveis em um mesmo ponto ou bloco u sendo estimado. Porém, o maior problema reside no fato de que, ao usar raios de busca com alcances iguais aos desses variogramas, para um dado bloco poderíamos ter a variável TCD sendo estimada e a variável CD não sendo estimada e vice-versa. Um procedimento que pode ser adotado nesse caso é o uso de uma estratégia de busca com alcances bem maiores que os dos variogramas para as estimativas das duas variáveis.

Um segundo procedimento usado para evitar que um número diferente de blocos seja estimado para cada uma das variáveis é usar a mesma estratégia de busca para as duas variáveis mantendo iguais principalmente os alcances.

Um terceiro procedimento seria usar o variograma da variável TCD para realizar as estimativas das duas variáveis como proposto por Dagbert (2001). Porém, Marcotte e Boucher (2001b) afirmam que as inconsistências em relação às estimativas realizadas pelo método indireto estão relacionadas com a continuidade espacial da variável acumulada e do suporte. Um quarto procedimento proposto por Armstrong (1998) consiste em cokrigar a variável acumulada e o suporte.

Um último, aqui discutido e utilizado, é estimar a variável TCD com o variograma do cobre e a variável CD com o variograma da densidade com alcances de busca maiores que os dos respectivos variogramas.

3.3 Conversão teor-tonelagem

O principal uso da densidade na avaliação de depósitos é na conversão de teor e volume de blocos em quantidade de metal contida e massa de estéril. Nesse aspecto, a determinação de valores acurados e precisos para densidade é de extrema importância para evitar subestimar ou superestimar a quantidade de metal e de massa a serem removidos.

Usualmente, essa conversão se dá a partir da aplicação da equação abaixo:

$$M = \frac{V}{TF} \quad (3.4)$$

onde M representa a massa total de um dado volume V que pode ser um bloco ou todo o depósito discretizado em blocos. TF é um fator, denominado em inglês *tonnage factor*, definido como:

$$TF = \frac{1}{D} \quad (3.5)$$

onde D é a densidade média a ser aplicada sobre o volume V . Essa densidade, como mencionado anteriormente, pode ser determinada para um domínio, uma litologia ou para todo o depósito.

A grande desvantagem de se aplicar um fator único para conversão de grandes volumes em massa é que, caso esse fator represente corretamente a

densidade média do volume V a ser convertida em massa, localmente essa densidade pode variar. O uso desse fator pode fornecer valores de massa e quantidades de metal ora superestimadas, ora subestimadas localmente. Para casos de painéis e blocos, essas variações de massa podem ser significativas.

Sendo assim, para garantir que essa conversão seja mais precisa, tanto para pequenos como para grandes volumes, é necessário que a densidade seja determinada para cada um desses pequenos volumes, sejam eles blocos ou painéis.

3.3.1 Modelo de densidade por interpolação

Para casos onde a densidade é amostrada como os teores, situação recomendada por Bevan (1992) em depósitos de grandes extensões como os de cobre e níquel sulfetados, é possível determinar a densidade para cada bloco ou painel da mesma forma que se determina os seus teores médios. Para tanto, basta que se interpole o valor médio desses usando krigagem, por exemplo.

Esse tipo de abordagem para o uso da densidade pode ser encontrado em trabalhos como o de Madani *et al.* (1996) em um depósito de barita no Iran e o de Laine (2003), em um depósito de PGE (elementos do grupo da platina) no norte da Finlândia.

Um aspecto importante a ser considerado é o fato de que, caso a densidade não seja amostrada em todos os pontos onde foram amostrados o atributo de interesse, ou seja, se a densidade constitui com o atributo de interesse um banco de dados heterotópico, e caso exista uma correlação entre o atributo e a densidade, é indicado o uso de cokrigagem para estimar a densidade dos blocos, garantindo melhor uso das informações disponíveis.

3.4 Efeitos da incorporação da densidade na avaliação de recursos e reservas

A princípio é esperado que o uso da densidade na avaliação de depósitos produza efeitos em todas as etapas em que a mesma possa ser aplicada. No caso da regularização das amostras, a inclusão da densidade possibilita considerar que a variabilidade das massas de cada amostra seja levada em conta ao se determinar o teor médio das compostas, garantindo a aditividade das mesmas. Já no uso de variáveis acumuladas, a densidade produz um efeito similar no que diz respeito ao

suporte das compostas, uma vez que poderá haver duas compostas com o mesmo teor médio, mas com densidades diferentes. Isso implica em dizer que essas compostas não podem contribuir de maneira igual na estimativa de teores. Nesse caso, é prudente o uso da variável acumulada na tentativa de considerar essa variabilidade.

Ao usar um modelo de densidade interpolado, ao invés de aplicar apenas uma densidade média para cada domínio, principalmente nos casos onde a variação da densidade é grande ao longo do depósito, é esperado que ocorra um ganho nas reconciliações das massas de estéril e quantidades de metal.

O capítulo 4 apresenta a aplicação da densidade na avaliação de um depósito de cobre. Os efeitos da regularização das amostras serão analisados bem como os efeitos do uso da densidade acumulada com teor e espessura na reconciliação de blocos lavrados durante três anos de produção.

Capítulo 4

Incorporação da densidade na determinação de recursos minerais em um depósito de cobre

Depois de analisados os fatores que influenciam a densidade em rochas e em amostras, discutidas as maneiras de determinação da densidade e, ainda, discutidas as possíveis maneiras de se incorporar a densidade na avaliação de recursos e reservas minerais, será feita a aplicação da densidade na avaliação recursos em um depósito de cobre. Para tanto, os teores de cobre serão estimados por dois métodos:

- Método direto: no qual a regularização das amostras é feita considerando apenas o comprimento das amostras como fator de ponderação e as estimativas dos teores dos blocos são feitas diretamente a partir dos teores dessas compostas.
- Método indireto: no qual a regularização das amostras é feita considerando o comprimento e a densidade das amostras como fatores de ponderação e as estimativas dos teores são determinadas indiretamente pela relação entre as estimativas das variáveis TCD e CD.

O objetivo é apresentar de forma detalhada os passos para a incorporação da densidade durante a avaliação de recursos, observar os impactos das duas formas de regularização de amostras e analisar as diferenças entre as estimativas dos teores de cobre obtidas por esses dois métodos.

O modelo de estimativas de curto prazo obtido por amostras de pó de perfuração para desmote também será apresentado no final do capítulo.

4.1 Geologia do depósito Sequeirinho

O depósito Sequeirinho constitui uma mineralização de Cu-Au localizada na Província Mineral de Carajás no estado do Pará, Brasil. Essa Província também hospeda outros importantes depósitos de Cu-Au, Mn, Fe, dentre outros.

O corpo mineralizado que forma o depósito Sequeirinho tem um formato sigmoidal e é dividido espacialmente da seguinte forma (Figura 4.1): extremidade leste do depósito referida como Setor Baiano, porção central do depósito referida

como Setor Sequeirinho, porção oeste do depósito referida como Setor Pista e a porção sudoeste referida como Setor Sequeirinho SW. Esses setores foram definidos levando em consideração o estilo de mineralização ao longo do corpo e a orientação espacial do mesmo. A Tabela 4.1 apresenta a descrição das direções e mergulhos para cada setor.

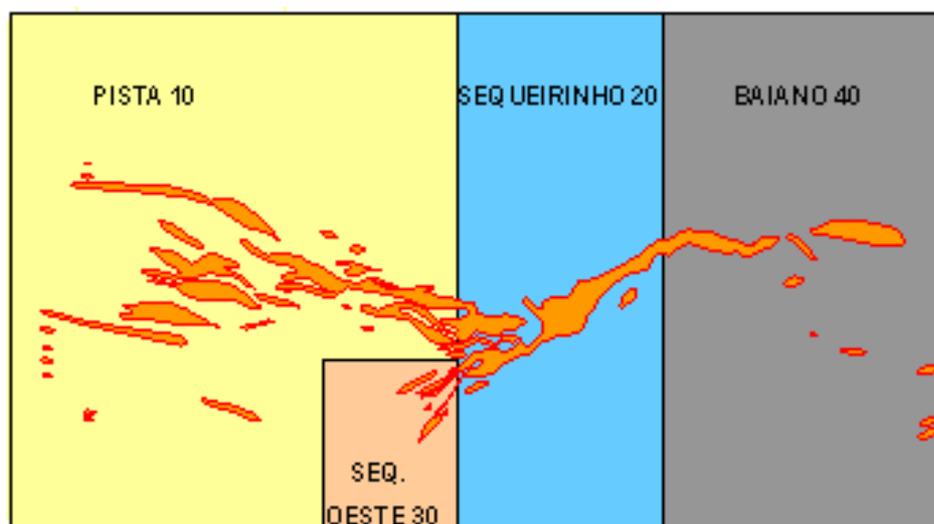


Figura 4.1 Setores do depósito Sequeirinho.

Tabela 4.1. Descrição da orientação dos corpos de minério no depósito Sequeirinho.

Setor	Azimute	Dip
Baiano	85°	70°SN
Sequeirinho	60°	55°SE
Sequeirinho SW	60°	55°SE
Pista	110°	75°SW

A mineralização no corpo geralmente aparece como uma série de corpos subparalelos com espessura agregada variando de 25 a 300 m, sendo estruturalmente controlada nas rochas vulcânicas félsicas, graníticas e gabróica em que se hospeda. Essa última é hidrotermalmente alterada em actinolita-magnetita. A maioria da capa é composta de um granito-tonalítico que apresenta diques e remanescentes de rocha máfica. A lapa é definida por um contato brusco que separa a mineralização de um biotita-xisto alterado. Esse contato pode ser observado por uma quebra na topografia ao norte do Setor Sequeirinho, sendo o contato caracterizado por uma diminuição no conteúdo de calcopirita-actinolita-magnetita e

por um aumento no conteúdo de saprolito-biotita. Um dique de diabásio atravessa o depósito na transição entre os setores Sequeirinho e Baiano.

Zonas sulfetadas mineralizadas de alto teor ocorrem em brechas que são usualmente ricas em Cu-Au nos contatos do corpo na lapa e na capa bem como em zonas de contato internas do corpo. A brecha mineralizada tem uma matriz calcopirítica com clastos de magnetita, anfibólio e outros fragmentos líticos. A figura 4.2 apresenta a brecha mineralizada em testemunhos de sondagens.



Figura 4.2 Brecha mineralizada. A escala que aparece na foto representa 5 cm de comprimento.

Zonas sulfetadas mineralizadas de baixo teor ocorrem de forma disseminada e em vênulas ao longo de todo o depósito.

4.2 Modelo geológico de longo prazo

4.2.1 Amostras

As amostras usadas neste estudo são provenientes de quatro campanhas de sondagem realizadas ao longo da exploração do depósito. As amostras foram coletadas por sondagem diamantada com recuperação de testemunho. Cada furo teve seu desvio medido usando equipamento apropriado. As amostras foram validadas por processos de qualidade (*Quality Assurance / Quality Control*) antes de compor o banco de dados.

Com base em uma análise estatística dessas amostras e no conhecimento da geologia do depósito foram determinados dois domínios mineralizados. O domínio de baixo teor, associado à mineralização que ocorre disseminada e em vênulas e o

domínio de alto teor, associado à mineralização que ocorre na brecha. Dessa forma, foram determinados os intervalos de teores usados para codificação de amostras e para o desenho das seções geológicas verticais e horizontais. A tabela 4.2 apresenta os intervalos de teores associados aos domínios de alto teor e ao de baixo teor.

Tabela 4.2 Código das amostras de acordo com o domínio e com o setor. Teores em % de Cu.

Domínio	Intervalo de Teor	Código da Amostra	Código do Setor	Código Final
	0 <= Estéril < 0,2	0	2	20
Baixo Teor	0,2 <= Baixo Teor <= 0,8	5	2	25
Alto Teor	Alto Teor > 0,8	6	2	26

As amostras foram codificadas de acordo com o setor em que foram coletadas. Um código final associa cada amostra ao setor e ao domínio. Cada amostra também é codificada de acordo com a litologia a qual pertence.

4.2.2 Interpretação geológica

Primeiramente, seções verticais são realizadas respeitando os intervalos de teor apresentados na tabela 4.2 e respeitando as restrições pertinentes à continuidade espacial do corpo e às formas associadas ao tipo do depósito. Essas seções são espaçadas a cada 40 m em regiões mais densas em sondagens e a um intervalo entre 50 a 70 m nas regiões menos densas. Uma vez determinadas as seções verticais, as mesmas servirão de base para determinar as seções horizontais espaçadas a cada 8 metros.

Após determinadas e validadas as seções verticais e horizontais, o sólido de minério é construído por extrusão das seções horizontais. Este sólido constitui o modelo geológico de longo prazo que serve como um controle físico dos teores na determinação de recursos e reservas.

4.3. Estatística das amostras (assays)

Neste estudo foram selecionadas apenas as amostras pertencentes ao Setor Sequeirinho. Ao todo são 18260 amostras em que foi analisado o teor de cobre, sendo que em 14930 amostras foi determinada também a densidade. A figura 4.3 apresenta os histogramas das amostras de Cu (%) e densidade (g/cm³).

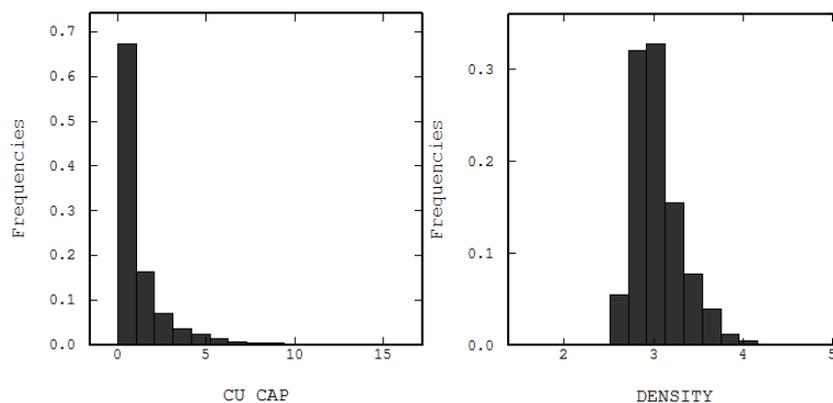


Figura 4.3 Histograma das amostras de cobre e densidade.

Uma vez que a densidade não foi determinada para todas as amostras de cobre e para que possa ser aplicado o método indireto proposto neste estudo, é necessário desconsiderar as amostras de teor de cobre que não possuam informação de densidade. Isso provocará uma redução de 18,2% na quantidade de informação de teor. Porém, na prática de avaliação de depósitos raramente toma-se a decisão de retirar uma quantidade tão significativa de amostras validadas de um banco de dados. Uma alternativa acatada diante desse caso foi atribuir a cada amostra de teor de cobre, 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. A decisão de incorporar a densidade por meio de regressão linear ao invés da densidade média da litologia ou do domínio foi considerada com o objetivo de manter a correlação entre densidade e teor e evitar que a inclusão de valores constantes alterasse a variância da densidade. A tabela 4.4 apresenta o código do domínio, a densidade média do mesmo e a porcentagem (em relação às 3330 amostras faltantes) de amostras incorporadas no banco de dados. Esse artifício possibilitou o uso do banco de dados de forma integral. A figura 4.4a mostra o histograma da densidade após ser completada por regressão linear.

Tabela 4.3. Código do domínio, densidade média do domínio e porcentagem de amostras incorporadas ao banco de dados em relação às amostras faltantes.

Código do Domínio	Densidade Média do Domínio (g/cm ³)	Porcentagem das Amostras Completadas
Brecha (Alto Teor)	3,13	44,6
Disseminado (Baixo Teor)	2,98	55,4

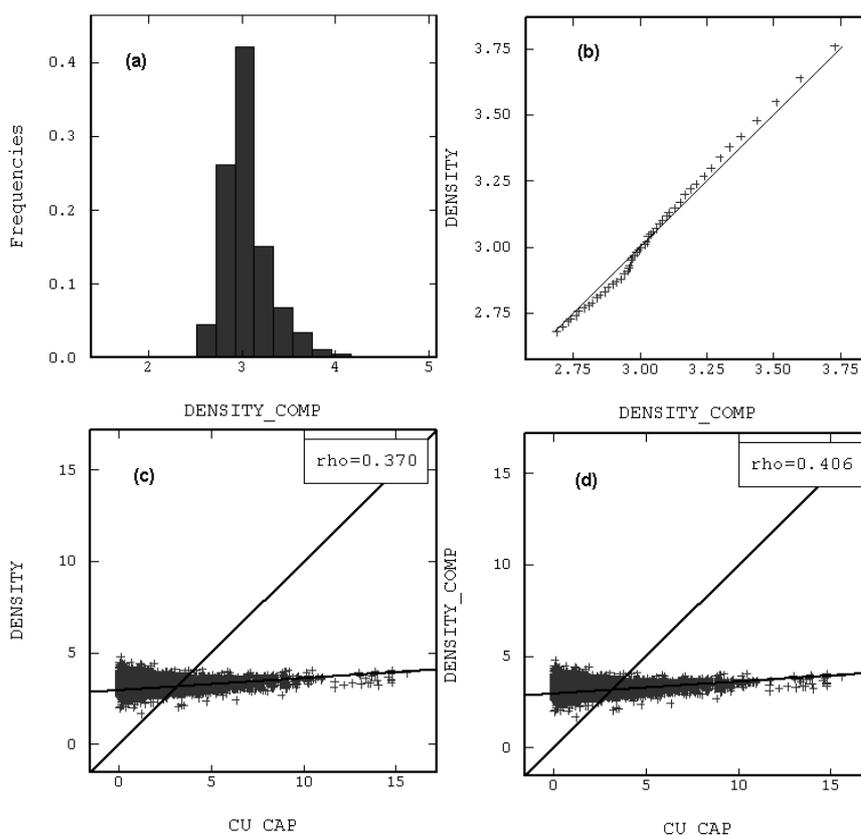


Figura 4.4 Histograma da densidade completada com as densidades dos domínios em (a); diagrama de dispersão entre os quantis das duas distribuições de densidade em (b); diagrama de dispersão entre teor e densidade em (c) e entre teor e densidade completada em (d).

Para averiguar se houve grandes diferenças entre a distribuição original da densidade e a distribuição após completarem-se os campos com a densidade média dos domínios foi determinado um diagrama de dispersão entre os quantis das duas distribuições (figura 4.4b). Note que as duas distribuições apresentaram valores parecidos. O diagrama de dispersão entre teor de cobre e densidade (figura 4.4c) e entre cobre e densidade completada (figura 4.2.3d) apresentaram dispersões parecidas, sendo que o coeficiente de correlação da densidade completada

apresentou pequeno aumento. O histograma das duas distribuições apresentaram formas parecidas, sendo observado um aumento nas frequências relativas próximas de densidade igual a 3 g/cm³, fato esperado. A tabela 4.4 apresenta as medidas estatísticas para a densidade completada.

Tabela 4.4 Sumário das medidas estatísticas das amostras de teor de cobre (%), densidade (g/cm³) e densidade completada (g/cm³).

	Teor de Cu (%)	Densidade Original (g/cm ³)	Densidade Completada (g/cm ³)
Número de Amostras	18360	14930	18260
Mínimo	0,01	1,69	1,69
Primeiro Quartil (Q1)	0,25	2,84	2,88
Média	1,16	3,04	3,04
Mediana	0,57	3,00	3,00
Terceiro Quartil (Q3)	1,40	3,18	3,15
Máximo	15,53	4,78	4,78
Desvio Padrão	1,57	0,27	0,25
Variância	2,45	0,08	0,06
Coef. de Variação	1,35	0,09	0,08
Skewness	3,07	1,07	1,15
Q3-Q1	1,15	0,34	0,27

Com relação às estatísticas da densidade completada pode ser notado que não houve mudanças em relação à média e à mediana. Porém, uma diminuição nas medidas de dispersão pode ser observada. As diferenças mais acentuadas podem ser observadas na variância (25%), no intervalo entre o terceiro e primeiro quartil (21%) e no coeficiente de variação (12,5%).

Com base nesses resultados, foi considerado que a incorporação da densidade não provocou mudanças significativas na sua distribuição original sendo passível de ser usada uma vez que o impacto provocado pela exclusão de 18,2% poderia ser mais significativo aos objetivos deste estudo. Sendo assim, prosseguiu-se com o estudo usando a densidade completada.

4.4. Análise exploratória dos dados

4.4.1 Amostras por domínio

Após a codificação das amostras em relação aos seus respectivos domínios, será analisado o comportamento estatístico desses dois conjuntos de amostras. A figura 4.5 apresenta os histogramas do teor de cobre, da densidade e o diagrama de dispersão entre cobre e densidade para o domínio de baixo teor.

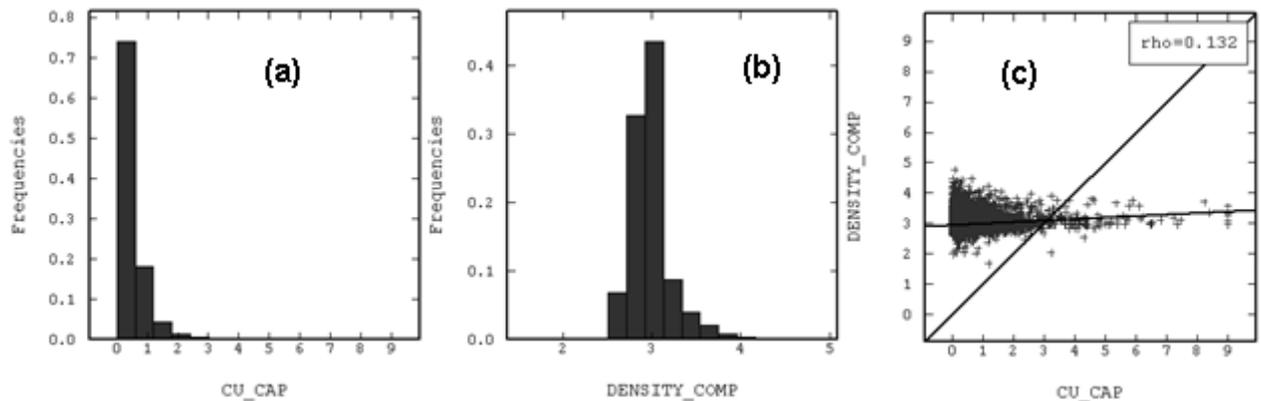


Figura 4.5 Histograma da variável teor de cobre e densidade para o domínio de baixo teor.

Os teores de cobre no domínio de baixo teor (figura 4.5a) apresentam distribuição assimétrica positiva e a densidade apresenta distribuição levemente assimétrica. O diagrama de dispersão entre as duas amostras mostram uma correlação quase nula entre densidade e teor de cobre. Porém, sabe-se que a densidade apresenta uma alta correlação com o conteúdo de magnetita no depósito (figura 4.6). A tabela 4.5 apresenta as estatísticas dessas amostras.

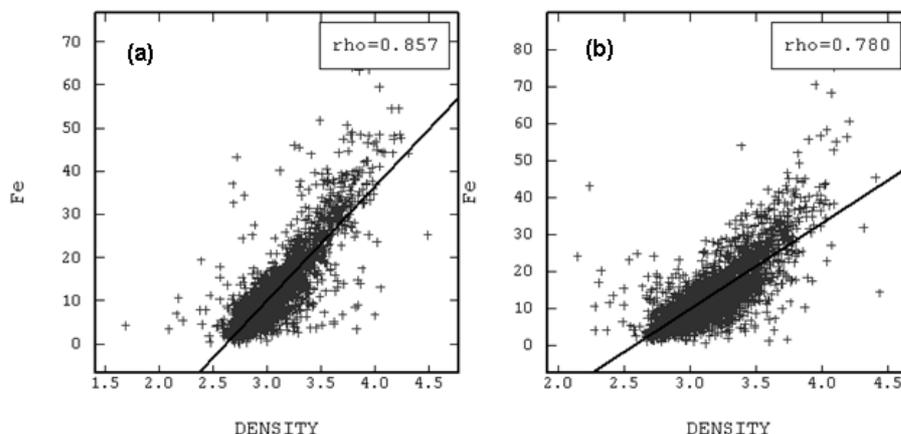


Figura 4.6 Diagrama de dispersão entre o teor de ferro e a densidade. Em (a) para o domínio de baixo teor de cobre e em (b) para o domínio de alto teor de cobre.

Tabela 4.5 Sumário das medidas estatísticas das amostras de teor de cobre (%) e densidade (g/cm³).

	Domínio de Baixo Teor		Domínio de Alto Teor	
	Teor de Cu (%)	Densidade Completada (g/cm ³)	Teor de Cu (%)	Densidade Completada (g/cm ³)
Número de Amostras	10634	10634	7626	7626
Mínimo	0,01	1,69	0,01	2,15
Primeiro Quartil (Q1)	0,17	2,82	0,73	2,98
Média	0,51	2,98	2,07	3,13
Mediana	0,33	2,98	1,47	3,13
Terceiro Quartil (Q3)	0,62	3,05	2,75	3,22
Máximo	9,01	4,78	15,63	4,45
Desvio Padrão	0,64	0,24	1,97	0,24
Variância	0,41	0,06	3,90	0,06
Coef. de Variação	1,26	0,08	0,96	0,08
Skewness	5,15	1,59	2,15	0,87
Q3-Q1	0,45	0,23	2,02	0,24

A figura 4.7 apresenta o histograma do teor de cobre, da densidade e o diagrama de dispersão entre teor de cobre e densidade para o domínio de alto teor. Assim como no domínio de baixo teor, os teores de cobre apresentam distribuição assimétrica positiva. A densidade apresenta distribuição assimétrica pouco acentuada. O diagrama de dispersão entre cobre e densidade mostra uma baixa correlação entre teor de cobre e densidade. Embora se saiba que a densidade correlaciona-se melhor com o conteúdo de magnetita ao longo do depósito, é importante observar que no domínio de alto teor a correlação entre densidade e cobre, ainda que baixa, é maior do que no domínio de baixo teor. Essa relação pode ser maior para metais de interesse ou para outros metais, nesse caso, a correlação é maior para com o ferro.

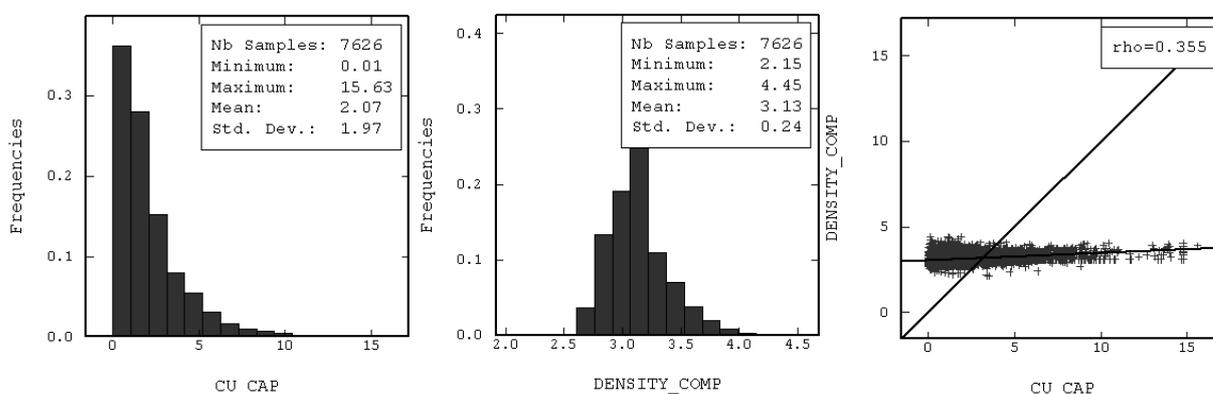


Figura 4.7 Histograma da variável teor de cobre e densidade para o domínio de alto teor.

É importante ressaltar que as amostras de teor de cobre foram tratadas com relação aos valores extremos (*outliers* – teores altos identificados por meio de gráficos de probabilidade). Esses valores, uma vez identificados e sendo confirmadas suas autenticidades, receberam tratamento conforme o contexto das amostras em sua vizinhança. De maneira geral, tanto os *outliers* próximos às amostras de baixo teor quanto os próximos a valores de alto teor foram corrigidos para um valor referente ao quantil 99 da distribuição. Restrições na estratégia de busca quando da realização das estimativas também foram adotadas com relação a esses valores.

4.4.2 Regularização das amostras

A regularização das amostras foi feita individualmente para cada domínio. O comprimento médio das amostras é de 1,05 metros. O tamanho de composta usada é de 2 metros. Compostas de 2 m (e não maiores que 2 m) foram escolhidas considerando a geometria do depósito e a variabilidade dos teores. Compostas de 1m não foram usadas na tentativa de diminuir a variabilidade com o aumento do suporte e, conseqüentemente facilitando a modelagem dos variogramas. Como a potência do mesmo é relativamente baixa e a mineralização ocorre de forma sigmoidal com presença de vênulas, compostas maiores que 2 m poderiam provocar uma baixa discretização ao longo da potência do corpo, além da diminuição de informações devido às compostas menores que $\frac{1}{4}$ (valor adotado) do comprimento da composta que geralmente são descartadas. Ressalta-se que quanto maior a composta menor a quantidade de informação disponível para realizar as estimativas.

O processo de regularização desconsiderou todas as compostas com comprimento menor que 0,5 m, uma vez as mesmas apresentavam média muito diferente da média global (mesmo que essas médias fossem iguais, localmente, em certas regiões do depósito elas podem variar em relação às compostas com comprimento maior que 0,5 m). Conforme os objetivos deste estudo, duas metodologias foram aplicadas à regularização das amostras. A primeira regulariza as amostras ponderando-as apenas pelos seus respectivos comprimentos, ou seja, o teor médio da composta é obtido pela média ponderada entre os teores e seus respectivos comprimentos. As compostas nesse caso foram denominadas CU_CAP. A segunda regulariza as amostras ponderando-as não apenas pelo comprimento, mas também pela densidade. Nesse caso, a média da composta é a média

ponderada entre os teores, seus respectivos comprimentos e densidades. As compostas determinadas dessa forma foram denominadas CU_CAP1. A densidade foi regularizada considerando apenas seus comprimentos como fator de ponderação.

A figura 4.8 mostra o histograma dos teores de cobre e da densidade para as compostas CU_CAP, CU_CAP1 e Densidade dos domínios de baixo teor (a), (b) e (c) e de alto teor (d), (e) e (f).

A forma dos histogramas das compostas CU_CAP e CU_CAP1 não apresenta, visualmente, nenhuma diferença em um mesmo domínio. De maneira geral, os histogramas das compostas honram as formas dos histogramas das amostras. A tabela 4.6 apresenta um sumário das estatísticas das compostas para os domínios de alto teor e baixo teor.

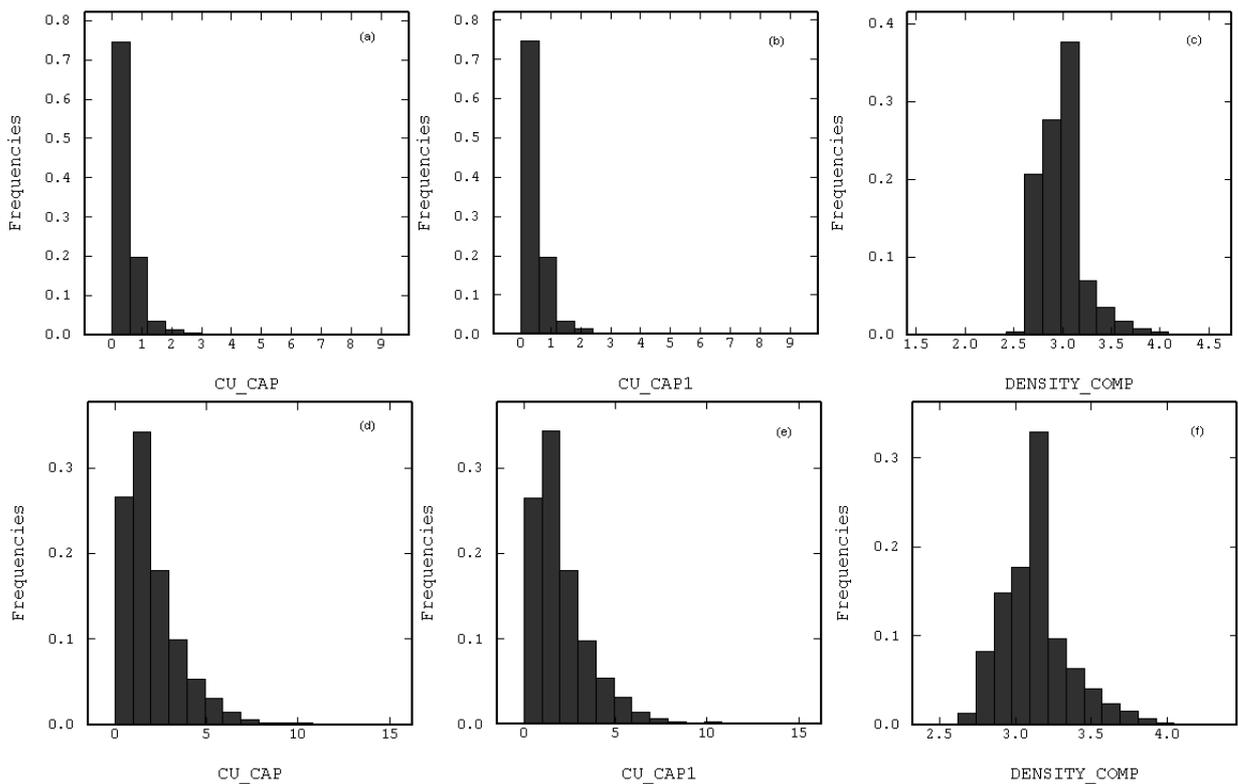


Figura 4.8 Histograma das compostas CU_CAP e CU_CAP1.

Tabela 4.6 Sumário das medidas estatísticas das compostas CU_CAP, CU_CAP1 e densidade para o domínio de baixo teor e alto teor.

	Domínio de Baixo Teor			Domínio de Alto Teor		
	CU_CAP (%)	CU_CAP1 (%)	Densidade Completada (g/cm ³)	CU_CAP (%)	CU_CAP1 (%)	Densidade Completada (g/cm ³)
Número de Amostras	5908	5908	5908	3916	3916	3916
Mínimo	0,01	0,01	1,69	0,02	0,02	2,50
Primeiro Quartil (Q1)	0,21	0,21	2,82	0,96	0,96	2,98
Média	0,49	0,49	2,97	2,03	2,04	3,13
Mediana	0,35	0,35	2,98	1,59	1,60	3,13
Terceiro Quartil (Q3)	0,61	0,61	3,04	2,70	2,71	3,21
Máximo	9,01	9,01	4,45	14,74	14,74	4,28
Desvio Padrão	0,50	0,51	0,22	1,62	1,63	0,22
Variância	0,25	0,26	0,05	2,63	2,67	0,05
Coef. de Variação	1,03	1,03	0,07	0,80	0,80	0,07
Skewness	4,67	4,70	1,51	2,03	2,04	0,92
Q3-Q1	0,40	0,40	0,22	1,74	1,75	0,23

As compostas obtidas pelos dois métodos de regularização não apresentaram aparentemente diferenças globais significativas. As médias, tanto dos teores quanto da densidade, apresentaram valores coerentes com os domínios a que pertencem. Vale observar que as médias das compostas para os dois domínios foram reproduzidas em relação à média das amostras, o que implica que o processo de regularização não provocou viés nos teores médios das compostas.

Para melhor averiguar os efeitos dos dois processos de regularização foram determinados os gráficos de dispersão entre as compostas CU_CAP e CU_CAP1 e entre os quantis de cada distribuição (figura 4.9) para os domínios de baixo teor e alto teor.

A semelhança entre as duas distribuições observada nas estatísticas das compostas (tabela 4.6) pode ser comprovada nos gráficos de dispersão. Porém, uma observação cuidadosa dos gráficos de dispersão entre as duas amostras mostra alguns pontos isolados em que os teores das compostas se diferem. Sendo assim, a diferença foi determinada para cada um dos domínios, tomando como referência as compostas CU_CAP1. A figura 4.10 mostra o histograma da diferença e um sumário estatístico da mesma. Com base nessa figura, a diferença entre as duas compostas fica mais evidente. Para o domínio de baixo teor, a maior diferença ocorreu pela superestimativa de uma composta CU_CAP em 14% e para o domínio de alto teor a mesma foi subestimada em, no máximo, -21%.

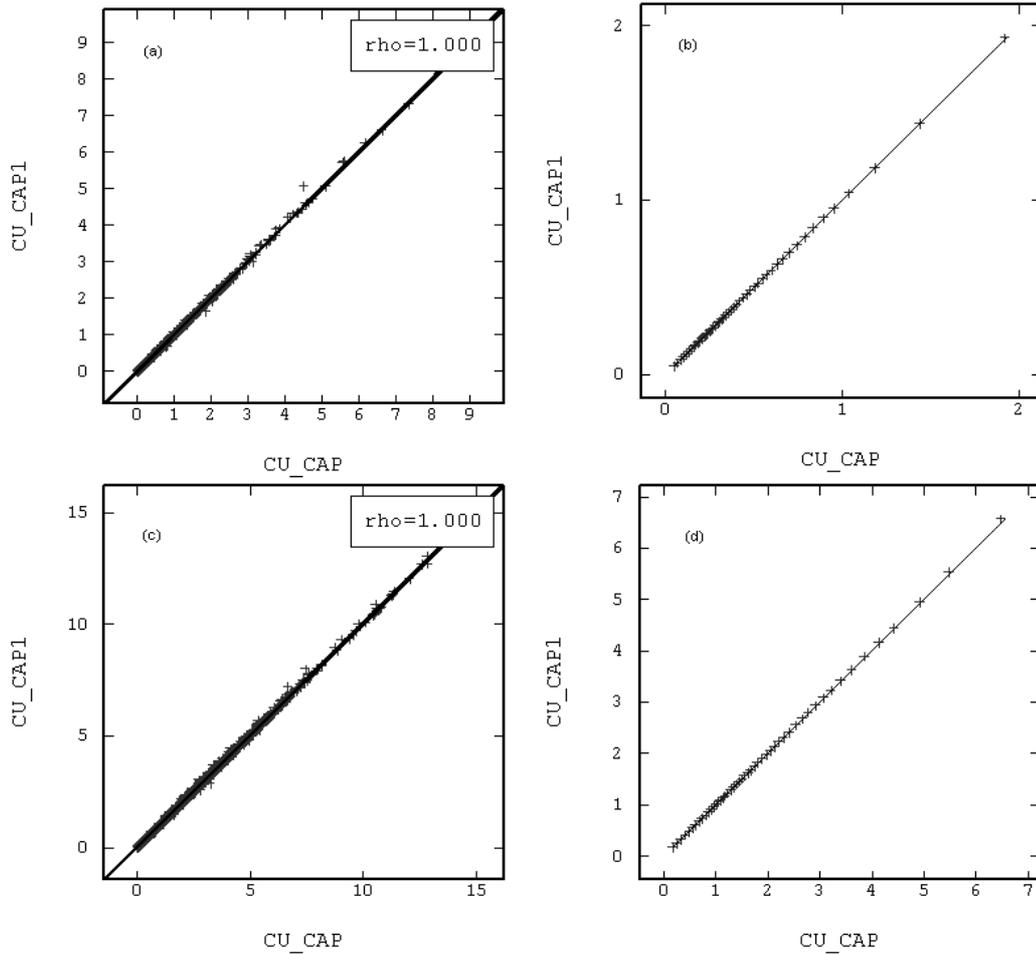


Figura 4.9 Diagrama de dispersão (*scatterplot*) e diagrama de dispersão entre os quantis (*qqplot*) das compostas CU_CAP e CU_CAP1 para o domínio de baixo teor em (a) e (b) e para o domínio de alto teor em (c) e (d).

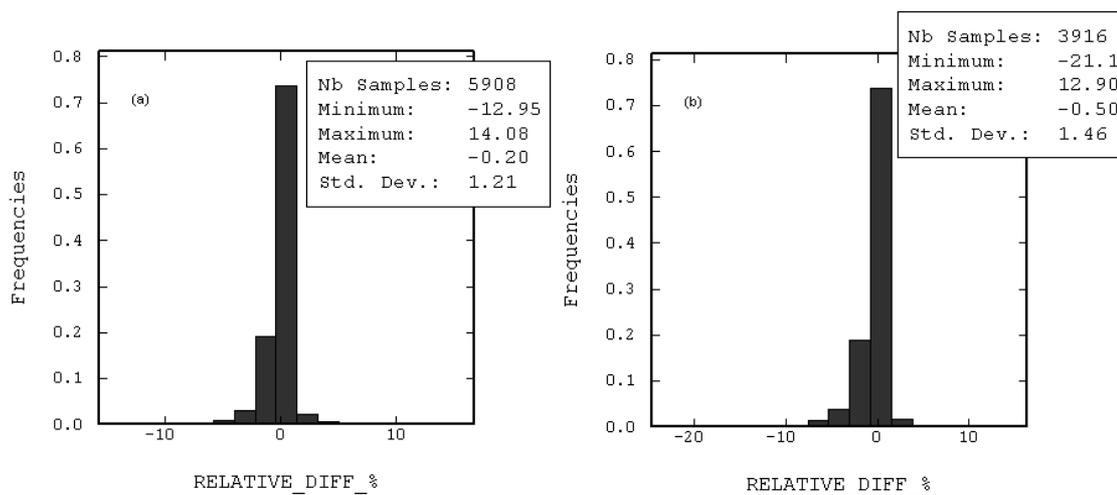


Figura 4.10 Histograma da diferença relativa entre as compostas; em (a) para o domínio de baixo teor e em (b) para o domínio de alto teor.

Essa diferença, ainda que pontual, pode ser potencializada quando da realização das estimativas, caso pesos de krigagem altos fossem atribuídos a essas amostras como relatado por Dias *et. al* (2011). Em ambos os domínios, pode ser notada uma tendência das compostas CU_CAP serem, em média, subestimadas em relação às compostas CU_CAP1. Essa subestimativa é maior para o domínio de alto teor.

4.4.3 Variáveis acumuladas

Como parte da metodologia empregada nesse estudo, foram determinadas duas variáveis acumuladas: TCD, a partir do produto das compostas CU_CAP1, Densidade e COMPRIMENTO; e CD, a partir do produto das compostas de Densidade e COMPRIMENTO. A figura 4.11 mostra os histogramas das variáveis acumuladas TCD, CD e do comprimento das amostras. Pode ser observado que a grande maioria das compostas tem tamanho igual a 2 m e que uma pequena parcela nos dois domínios está abaixo desse valor. Porém, os baixos valores de comprimento provocaram um impacto observado no histograma da variável CD.

A tabela 4.7 apresenta um sumário estatístico das variáveis acumuladas e do comprimento das compostas para os domínios de baixo e alto teor. O fato da variável CD possuir valores mínimos maiores que um, juntamente ao efeito suavizador da krigagem, contribuirá favoravelmente quando da obtenção dos teores dos blocos indiretamente pela relação TCD/CD, evitando teores de fora do máximo e mínimo da distribuição das compostas. Pode ser observado também a presença de valores extremos para a variável TCD nos dois domínios. Esse fato será considerado quando da realização das estimativas dessas variáveis.

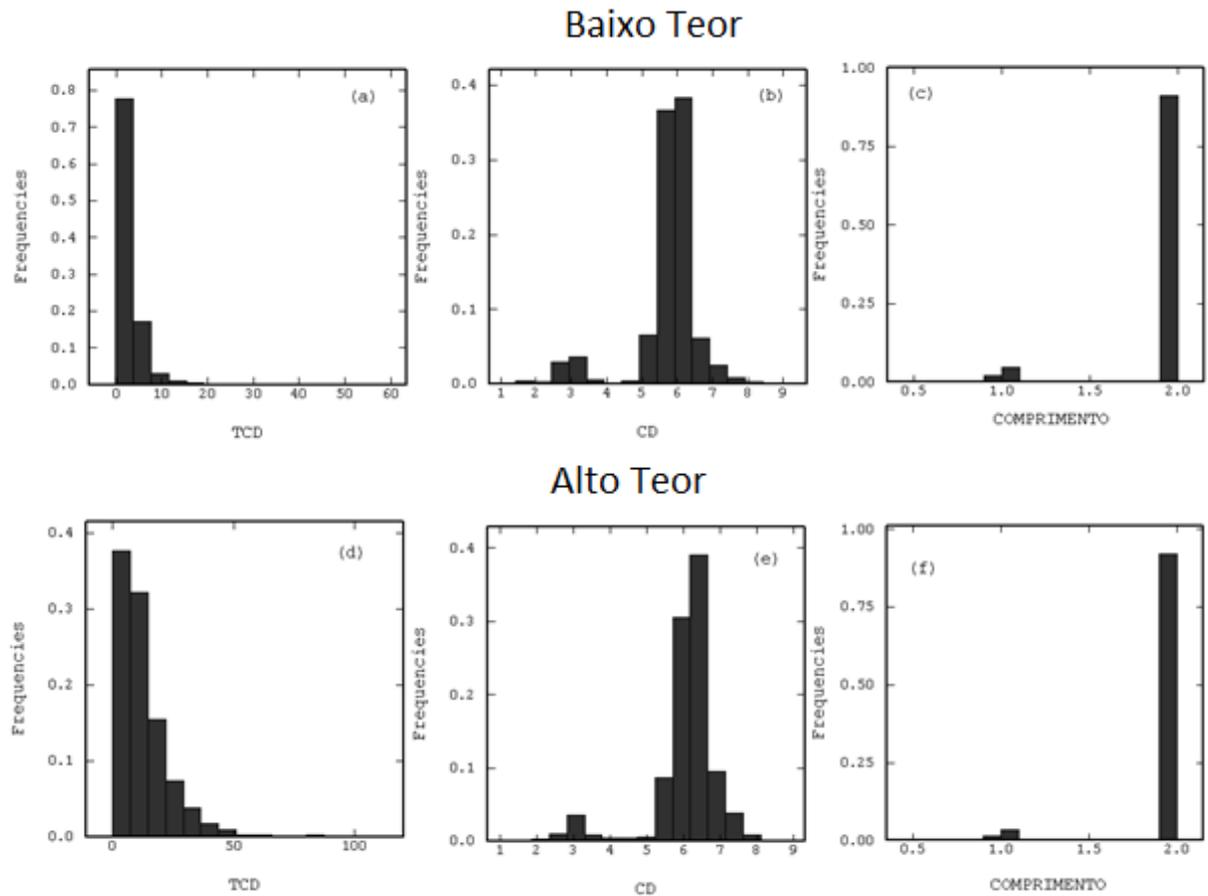


Figura 4.11 Histograma das variáveis TCD, CD e do comprimento das compostas.

O coeficiente de variação de todas as variáveis apresentam valores favoráveis à realização das estimativas, mesmo para a variável TCD no domínio de baixo teor.

Tabela 4.7 Sumário estatístico das variáveis acumuladas TCD e CD e para o comprimento das compostas para o domínio de baixo teor em (a), (b) e (c) e para o domínio de alto teor (d), (e) e (f).

	Domínio de Baixo Teor			Domínio de Alto Teor		
	TCD (m % g/cm ³)	CD (m g/cm ³)	C (m)	TCD (m % g/cm ³)	CD (m g/cm ³)	C (m)
Número de Amostras	5908	5908	5908	3916	3916	3916
Mínimo	0,02	1,44	0,50	0,08	1,40	0,50
Primeiro Quartil (Q1)	1,11	5,53	2,00	5,43	5,85	2,00
Média	2,82	5,69	1,91	12,56	6,03	1,93
Mediana	2,04	5,93	2,00	9,52	6,24	2,00
Terceiro Quartil (Q3)	3,51	6,04	2,00	16,59	6,37	2,00
Máximo	57,55	8,91	2,00	109,39	8,57	2,00
Desvio Padrão	3,07	0,94	0,28	10,82	0,91	0,25
Variância	9,45	0,88	0,08	117,17	0,82	0,06
Coef. de Variação	1,09	0,17	0,15	0,86	0,15	0,13
Skewness	4,94	-1,98	-3,13	2,30	-2,14	-3,48
Q3-Q1	2,40	0,51	0,00	11,16	0,52	0,00

4.4.4 Desagrupamento das amostras

Para verificar os efeitos de amostragem preferencial em cada um dos domínios, foi feito o desagrupamento das amostras pelo método das células móveis, similarmente ao proposto em Deutsch e Journel (1998). Esse método consiste em criar volumes regulares no espaço e determinar as médias e desvios padrões desses volumes. Esse procedimento é feito para vários tamanhos de células e, caso a amostragem tenha sido feita preferencialmente em regiões de baixo teor, a maior média obtida para esse conjunto de células é retida. Caso a amostragem tenha privilegiado regiões de alto teor, como na maioria dos casos em avaliação de depósitos minerais, a menor média é então retida.

Nesse processo a média desagrupada é calculada da seguinte forma:

- Em cada célula é computado um peso inversamente determinado pelo número de células (B) e pelo número de amostras (n) dentro de cada célula.

$$\text{Peso} = \lambda_{\alpha} = 1/B \cdot n$$

- A média do depósito é então calculada atribuindo a cada amostra ($z(u_{\alpha})$) o peso referente ao peso obtido para a célula onde a amostra se encontra.

$$\text{Média} = \sum \lambda_{\alpha} z(u_{\alpha})$$

A tabela 4.8 apresenta o sumário estatístico das compostas após o desagrupamento das mesmas.

Tabela 4.8 Sumário estatístico das compostas após o desagrupamento.

	Domínio de Baixo Teor					Domínio de Alto Teor				
	CU_CAP (%)	CU_CAP1 (%)	DENSIDADE (g/cm ³)	TCD (m % g/cm ³)	CD (m g/cm ³)	CU_CAP (%)	CU_CAP1 (%)	DENSIDADE (g/cm ³)	TCD (m % g/cm ³)	CD (m g/cm ³)
Número de Amostras	5908	5908	5908	5908	5908	3916	3916	3916	3916	3916
Mínimo	0,01	0,01	1,69	0,02	1,44	0,02	0,02	2,50	0,08	1,40
Primeiro Quartil (Q1)	0,22	0,21	2,83	1,14	5,53	0,94	0,96	2,97	5,38	5,80
Média	0,50	0,51	2,98	2,82	5,53	2,03	2,04	3,12	12,18	5,92
Mediana	0,36	0,35	2,98	1,96	5,90	1,57	1,58	3,13	9,31	6,21
Terceiro Quartil (Q3)	0,62	0,61	3,03	3,53	6,02	2,69	2,66	3,19	16,23	6,34
Máximo	9,01	9,01	4,45	57,55	8,91	14,74	14,74	4,28	109,36	8,57
Desvio Padrão	0,51	0,52	0,23	3,10	1,13	1,65	1,67	0,24	10,60	1,03
Variância	0,26	0,27	0,05	9,58	1,29	2,74	2,78	0,06	112,30	1,06
Coef. de Variação	1,02	1,03	0,08	1,10	0,21	0,82	0,82	0,08	0,87	0,17
Skewness	4,43	4,45	1,59	4,77	-1,54	2,02	2,02	1,19	2,29	-1,79
Q3-Q1	0,40	0,40	0,20	2,39	0,49	1,75	1,70	0,22	10,85	0,54

Esse processo de desagrupamento é importante para validar as estimativas quando da comparação das estatísticas das amostras com as das estimativas. O processo de krigagem intrinsecamente desagrupa as amostras.

O tamanho de células para os domínios de baixo teor foram de 40x40x21 m e para o de alto teor 130x130x67 m, retendo a maior e menor média respectivamente.

Pode ser observado (tabela 4.6, 4.7 e 4.8), que houve variações nas médias das compostas após o desagrupamento. Para o baixo teor, as médias das compostas CU_CAP, CU_CAP1 e densidade foram levemente aumentadas enquanto a variável TCD permaneceu constante e a CD apresentou uma diminuição mais acentuada.

Para o domínio de alto teor, as médias das compostas CU_CAP e CU_CAP1 permaneceram constantes, enquanto a média das compostas de densidade, TCD e CD tiveram seus valores diminuídos.

4.4.5 Matriz de correlação

Foi determinada a matriz de correlação entre as variáveis. A tabela 4.9 apresenta a matriz de correlação para as variáveis CU_CAP, CU_CAP1, densidade, TCD e CD tanto para o domínio de baixo teor quanto para o domínio de alto teor.

Tabela 4.9 Matriz de correlação entre as compostas CU_CAP, CU_CAP1, densidade, TCD e CD.

Domínio de Baixo Teor					
	CU_CAP	CU_CAP1	Densidade	TCD	CD
CU_CAP	1,00	1,00	0,14	0,14	0,06
CU_CAP1	1,00	1,00	0,14	0,97	0,06
Densidade	0,14	0,14	1,00	0,20	0,43
TCD	0,97	0,97	0,20	1,00	0,21
CD	0,06	0,06	0,43	0,21	1,00

Domínio de Alto Teor					
	CU_CAP	CU_CAP1	Densidade	TCD	CD
CU_CAP	1,00	1,00	0,36	0,97	0,16
CU_CAP1	1,00	1,00	0,36	0,97	0,16
Densidade	0,36	0,36	1,00	0,42	0,50
TCD	0,97	0,97	0,42	1,00	0,33
CD	0,16	0,16	0,50	0,33	1,00

Os teores e a densidade no domínio de baixo teor apresentaram correlações praticamente nulas, assim como as variáveis acumuladas. No domínio de alto teor, a correlação entre densidade e teor é baixa, mas evidente. O mesmo ocorre para as variáveis acumuladas. Mais uma vez é possível observar o aumento da correlação entre densidade e teor quando o teor da amostra aumenta (domínio de alto teor).

4.5. Continuidade espacial das variáveis no depósito

A continuidade espacial do depósito foi determinada pelo cálculo de correlogramas experimentais ao invés de variogramas devido à variabilidade dos teores no depósito. Os correlogramas experimentais foram calculados para as variáveis CU_CAP, CU_CAP1, densidade e para as variáveis acumuladas TCD e CD. O cálculo dos correlogramas experimentais foi feito usando amostras dos domínios de alto teor e de baixo teor dos setores Sequeirinho e Sequeirinho SW.

As equações dos correlogramas modelados das variáveis CU_CAP e densidade são apresentadas abaixo:

Equação 4.5.1:

$$\rho(h)_{CU_CAP} = 0,10 + 0,60sph \left(\frac{h_{N60^\circ, Dip0^\circ}}{40}, \frac{h_{N150^\circ, Dip35^\circ}}{15}, \frac{h_{N150^\circ, Dip-55^\circ}}{20}, \right) \\ + 0,30sph \left(\frac{h_{N60^\circ, Dip0^\circ}}{70}, \frac{h_{N150^\circ, Dip35^\circ}}{90}, \frac{h_{N150^\circ, Dip-55^\circ}}{200}, \right)$$

Equação 4.5.2:

$$\rho(h)_{Densidade} = 0,10 + 0,45sph \left(\frac{h_{N60^\circ, Dip0^\circ}}{40}, \frac{h_{N150^\circ, Dip35^\circ}}{50}, \frac{h_{N150^\circ, Dip-55^\circ}}{20}, \right) \\ + 0,45sph \left(\frac{h_{N60^\circ, Dip0^\circ}}{150}, \frac{h_{N150^\circ, Dip35^\circ}}{200}, \frac{h_{N150^\circ, Dip-55^\circ}}{400}, \right)$$

Os correlogramas experimentais para a variável CU_CAP1 não apresentaram variações significativas em relação à variável CU_CAP. Quanto às variáveis acumuladas TCD e CD algumas observações devem ser feitas. A princípio, os correlogramas experimentais foram determinados e modelados. As direções principais encontradas são as mesmas das variáveis CU_CAP e densidade. Porém, as direções de menor e maior continuidade se inverteram. Esse efeito foi atribuído a uma possível influência do comprimento das compostas considerado nessas variáveis. Sendo assim, optou-se por usar o modelo de correlograma da variável CU_CAP para estimar a variável TCD e o modelo de correlograma da variável densidade para estimar a variável CD.

O uso de um modelo de correlograma para as variáveis TCD e CD foi descartado. Primeiramente, pelo fato de que as compostas dessas variáveis ocorrem em igual número e nas mesmas posições e uma segunda razão vem do fato da correlação entre TCD e CD no domínio de baixo teor ser praticamente nula.

Sendo assim, os modelos lineares de regionalização apresentados nas equações acima foram usados para estimar as variáveis CU_CAP e TCD e densidade e CD, respectivamente. Os mesmos foram conferidos por processos de validação cruzada e apresentaram média do erro igual a zero e desvio padrão relativamente baixo.

4.6. Modelo de blocos

As estimativas foram feitas em blocos de 10x10x16 metros. As dimensões dos blocos consideram a seletividade necessária a esse tipo de depósito bem como a sua adequação aos equipamentos de lavra. No plano horizontal desse modelo foi considerada a geometria das zonas mineralizadas.

Os blocos foram codificados com base no modelo geológico com a porcentagem do bloco contida em cada domínio. Sendo assim, cada bloco contém informação dos três domínios: domínio de alto teor (associado à brecha mineralizada), domínio de baixo teor (associado ao minério que ocorre de forma disseminada e em vênulas) e estéril, associado às encaixantes. Embora um bloco contenha as três informações, existem casos de blocos completamente inseridos em um único domínio, ou seja, blocos 100% pertencentes ao domínio de alto teor, de baixo teor ou ao de estéril. Os blocos mistos, interceptados por mais de um tipo de domínio (transição de um domínio para outro), tem um papel importante no cálculo da diluição do minério.

A codificação do modelo geológico (domínio) nos blocos é de fundamental importância para o controle da mineralização, evitando que o processo de estimativa determine teores em regiões com baixa densidade de informação. Nesse caso, vale lembrar que os limites dos recursos e reservas são controlados por esse modelo geológico.

4.7. Realização das estimativas por Krigagem Ordinária (KO)

As estimativas foram feitas por krigagem ordinária para todas as variáveis, CU_CAP, densidade, TCD e CD. Esse método foi escolhido, ao invés de co-krigagem ordinária, uma vez que as amostras desses atributos são co-locadas e amostradas em mesma quantidade. Outro fator que contribuiu para o uso de KO é a baixa correlação entre essas variáveis no domínio de baixo teor (tabela 4.9).

Os variogramas usados para estimar os atributos CU_CAP e TCD e os atributos densidade e CD foram os apresentados nas equações 4.5.1 e 4.5.2, respectivamente. O processo de estimativa foi realizado na seguinte sequência:

- Estimativa dos atributos CU_CAP, TCD, densidade e CD nos blocos com porcentagem de baixo teor maior que 1% usando as amostras codificadas como pertencentes ao domínio de baixo teor.
- Estimativa dos atributos CU_CAP, TCD, densidade e CD nos blocos com porcentagem de alto teor maior que 1% usando amostras codificadas como pertencentes ao domínio de alto teor.

Os blocos foram estimados com o elipsóide de busca seguindo a mesma orientação dos respectivos variogramas. O alcance usado na estratégia de busca foi definido de acordo com os critérios de classificação de recursos e reservas cujos raios de busca variam de uma a três vezes do alcance dos variogramas. Os parâmetros das estratégias de busca usados nas estimativas de cada atributo foram: o número mínimo de amostras para estimar um bloco, a divisão do elipsóide de busca em setores angulares, o número ótimo de amostras a serem usadas em cada setor, a distância mínima entre duas amostras selecionadas e a restrição da distância máxima que os valores extremos poderiam estar dos blocos para estimá-los. A distância máxima sem nenhuma amostra e o número máximo de amostras por furo não foram considerados. A tabela 4.10 mostra os parâmetros usados para estimar cada um dos atributos.

Tabela 4.10 Parâmetros usados na estratégia de busca para estimativa dos atributos no domínio de baixo teor e alto teor.

Domínio de Baixo Teor							
	Número Mínimo de Amostras	Números de Setores Angulares	Número Ótimo de Amostras por Setor	Distância Mínima entre duas Amostras Selcionadas	Restrição de Outliers	Teor de Corte	Distância (m)
CU_CAP	2	8	2	4	Não	Não	Não
TCD	2	8	2	6	Não	Não	Não
Densidade	2	8	2	4	Sim	3,75	40
CD	2	8	2	2	Não	Não	Não

Domínio de Alto Teor							
	Número Mínimo de Amostras	Números de Setores Angulares	Número Ótimo de Amostras por Setor	Distância Mínima entre duas Amostras Selcionadas	Restrição de Outliers	Teor de Corte	Distância (m)
CU_CAP	2	8	2	4	Sim	6,46	10
TCD	2	8	2	4	Não	Não	Não
Densidade	2	8	2	4	Sim	3,81	10
CD	2	8	2	Não	Não	Não	Não

As estratégias de busca usadas foram as que melhor reproduziram as estatísticas dos atributos. Para a realização das estimativas os blocos foram

discretizados em 5x5x8 m, o que corresponde nos blocos de 10x10x16 m a 200 pontos.

As estimativas do atributo CU_CAP assim como a densidade fornecem diretamente os teores de cobre e as densidades dos blocos. Já a relação entre as estimativas dos atributos TCD e CD fornecem indiretamente os teores de cobre dos blocos. Essas estimativas serão comparadas com as estimativas usando o atributo CU_CAP1 que considerou a densidade no processo de regularização.

4.8. Validação das estimativas

A qualidade das estimativas foi verificada a partir de três análises. A primeira averiguou se as estatísticas das estimativas reproduzem as estatísticas dos respectivos atributos. A segunda avaliou a qualidade das estimativas por meio de médias móveis (análise de deriva) ao longo dos eixos cartesianos comparando as médias das estimativas com as médias das amostras. A terceira e última análise consta da comparação dos teores dos blocos próximos às amostras dos furos de sondagem e dentro do modelo geológico de teores em seções verticais e horizontais.

A tabela 4.11 apresenta um comparativo entre as estatísticas dos atributos CU_CAP, Densidade, TCD e CD e de suas respectivas estimativas nos domínios de baixo teor e alto teor.

Tabela 4.11 Estatísticas dos atributos e das estimativas dos atributos CU_CAP, Densidade, TCD e CD para os domínios de baixo teor e alto teor.

Domínio de Baixo Teor										
	CU_CAP (%)	Estimativa CU_CAP (%)	CU_CAP1 (%)	Estimativa CU_CAP1 (%)	DENSIDADE (g/cm ³)	Estimativa DENSIDADE (g/cm ³)	TCD (m % g/cm ³)	Estimativa TCD (m % g/cm ³)	CD (m g/cm ³)	Estimativa CD (m g/cm ³)
Número de Amostras/Blocos	5908	76195	5908	76195	5908	76195	5908	76195	5908	76195
Mínimo	0,01	0,14	0,01	0,14	1,69	2,40	0,02	0,73	1,44	2,80
Primeiro Quartil (Q1)	0,22	0,39	0,21	0,38	2,83	2,90	1,14	2,02	5,53	5,03
Média	0,50	0,50	0,51	0,51	2,98	2,98	2,82	2,72	5,53	5,32
Mediana	0,36	0,47	0,35	0,47	2,98	2,97	1,96	2,51	5,90	5,38
Terceiro Quartil (Q3)	0,62	0,58	0,61	0,59	3,03	3,05	3,53	3,14	6,02	5,66
Máximo	9,01	3,60	9,01	3,38	4,45	3,91	57,55	18,21	8,91	7,56
Desvio Padrão	0,51	0,17	0,52	0,20	0,23	0,12	3,10	1,05	1,13	0,50
Variância	0,26	0,03	0,27	0,04	0,05	0,01	9,58	1,09	1,29	0,25
Coef. de Variação	1,02	0,34	1,03	0,39	0,08	0,04	1,10	0,39	0,21	0,09
Skewness	4,43	1,92	4,45	2,21	1,59	0,94	4,77	2,04	-1,54	-0,45
Q3-Q1	0,40	0,19	0,40	0,21	0,20	0,15	2,39	1,12	0,49	0,63

Domínio de Alto Teor										
	CU_CAP (%)	Estimativa CU_CAP1 (%)	CU_CAP1 (%)	Estimativa CU_CAP1 (%)	DENSIDADE (g/cm ³)	Estimativa DENSIDADE (g/cm ³)	TCD (m % g/cm ³)	Estimativa TCD (m % g/cm ³)	CD (m g/cm ³)	Estimativa CD (m g/cm ³)
Número de Amostras/Blocos	3916	34955	3916	34955	3916	34955	3916	34955	3916	34955
Mínimo	0,02	0,59	0,02	0,57	2,50	2,77	0,08	3,31	1,40	3,52
Primeiro Quartil (Q1)	0,94	1,69	0,96	1,68	2,97	3,04	5,38	9,50	5,80	5,44
Média	2,03	2,08	2,04	2,13	3,12	3,12	12,18	12,21	5,92	5,74
Mediana	1,57	2,02	1,58	2,04	3,13	3,11	9,31	11,63	6,21	5,78
Terceiro Quartil (Q3)	2,69	2,41	2,66	2,49	3,19	3,20	16,23	14,30	6,34	6,05
Máximo	14,74	7,03	14,74	6,88	4,28	3,78	109,36	44,10	8,57	7,56
Desvio Padrão	1,65	0,54	1,67	0,62	0,24	0,12	10,60	3,77	1,03	0,48
Variância	2,74	0,29	2,78	0,39	0,06	0,02	112,30	14,25	1,06	0,23
Coef. de Variação	0,82	0,26	0,82	0,29	0,08	0,04	0,87	0,31	0,17	0,08
Skewness	2,02	0,64	2,02	0,92	1,19	0,65	2,29	1,06	-1,79	-0,30
Q3-Q1	1,75	0,72	1,70	0,81	0,22	0,16	10,85	4,80	0,54	0,61

De modo geral, as estimativas reproduziram bem a média das compostas. As maiores diferenças não ultrapassaram 5% em relação à média dos atributos correspondentes.

A figura 4.12 apresenta os gráficos de análise de deriva nos três eixos cartesianos para os atributos CU_CAP, CU_CAP1 e Densidade nos domínios de baixo teor e a figura 4.13 para o domínio de alto teor. A linha cinza representa a média das estimativas e a linha preta a média das amostras.

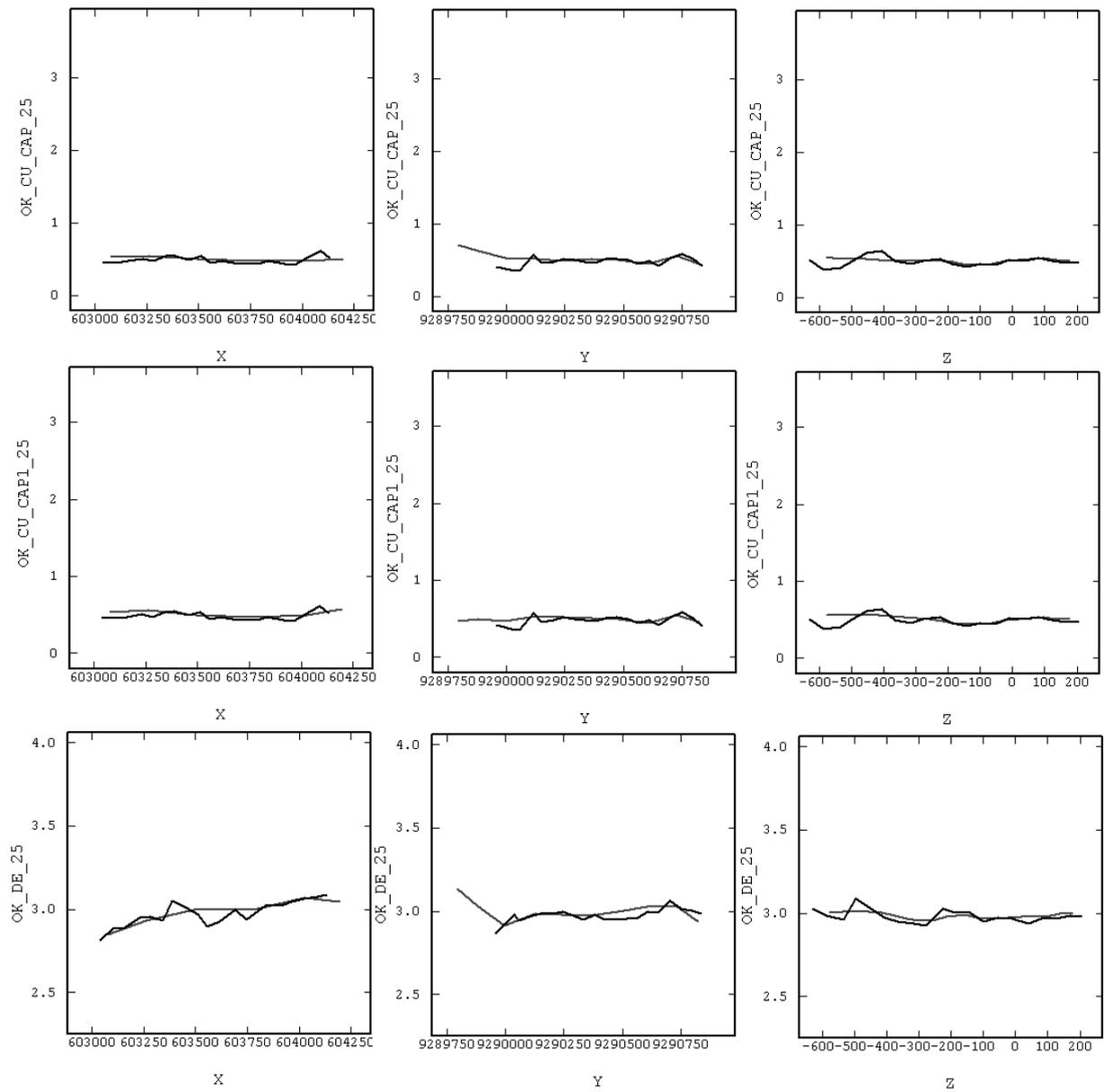


Figura 4.12 Gráficos de análise de deriva ao longo dos eixos cartesianos para os atributos CU_CAP, CU_CAP1 e Densidade para o domínio de baixo teor.

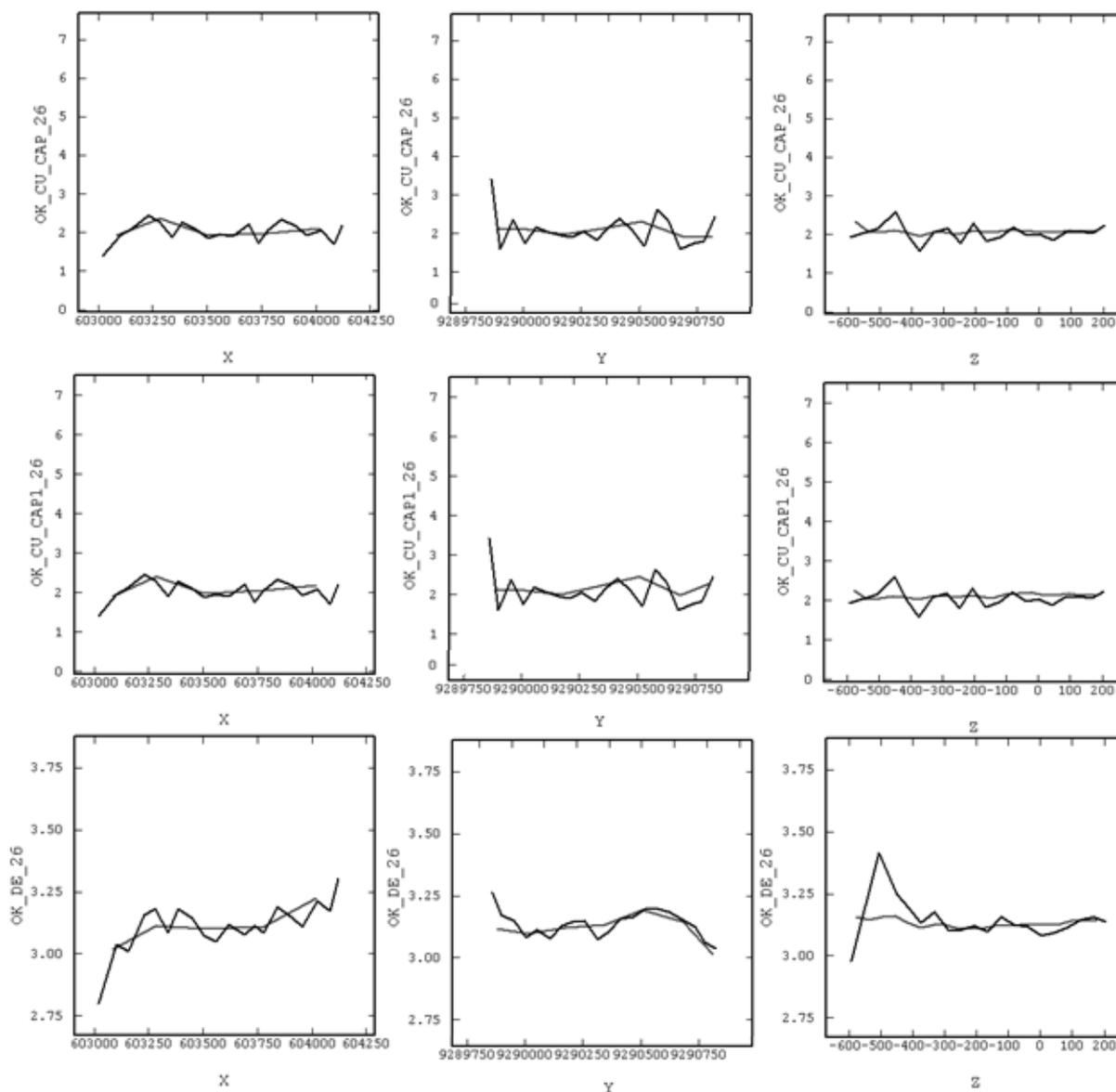


Figura 4.13 Gráficos de análise de deriva ao longo dos eixos cartesianos para os atributos CU_CAP, CU_CAP1 e Densidade para o domínio de alto teor.

Os resultados obtidos pela análise de deriva revela uma boa aderência entre as médias das estimativas ao longo dos três eixos cartesianos e as médias das amostras ao longo dos mesmos eixos para todos os três atributos.

Por fim, a análise visual dos teores dos blocos próximos às amostras e dentro do modelo de minério (modelo geológico) foi realizada para as seções verticais e horizontais para verificar a aderência entre os mesmos (figura 4.14 e figura 4.15). Essas seções são apresentadas aqui sem escala a fim de preservar informações julgadas estratégicas pela empresa fornecedora do banco de dados.

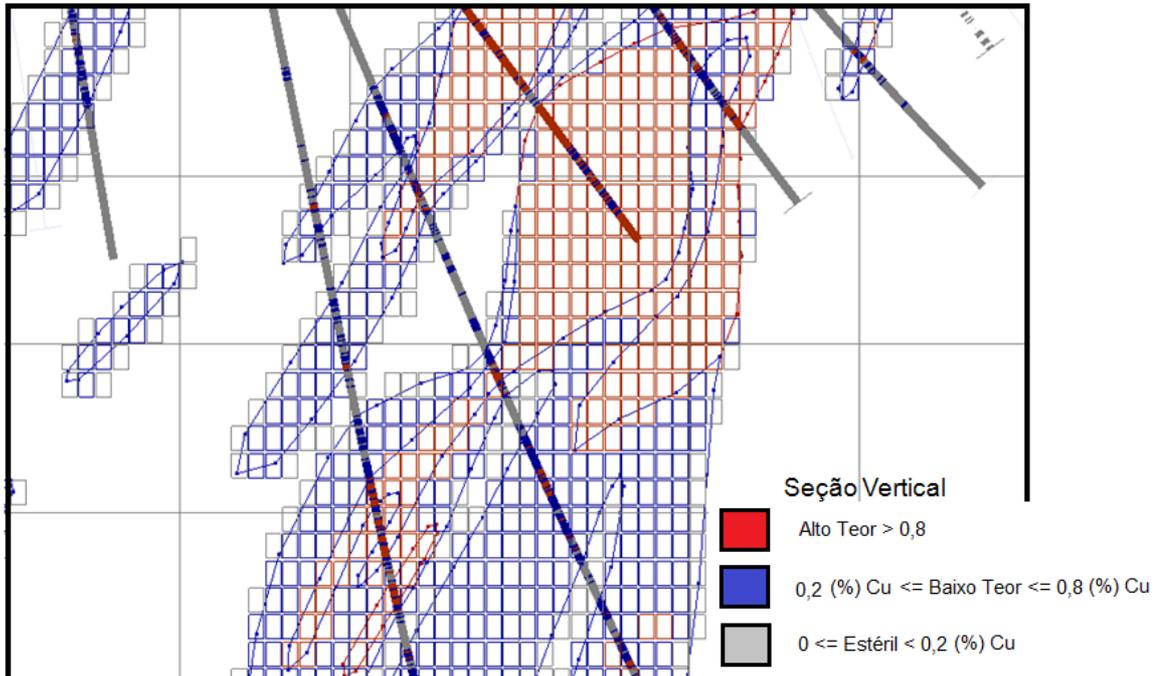


Figura 4.14 Seção vertical apresentando as amostras, o modelo de minério e os blocos estimados.

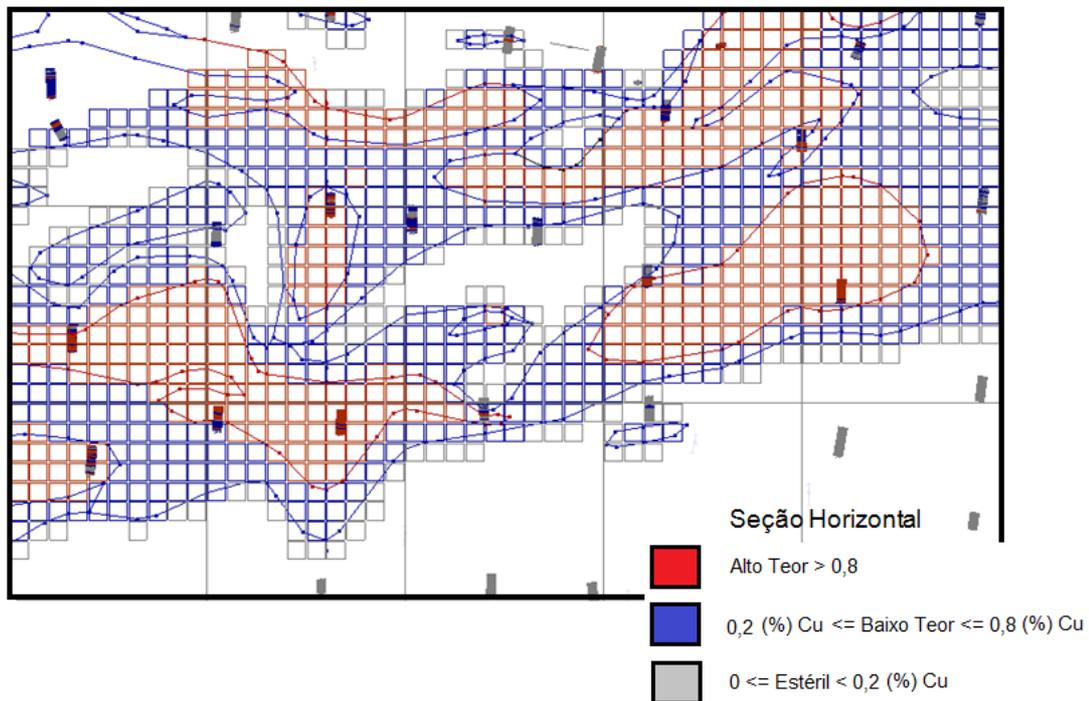


Figura 4.15 Seção Horizontal apresentando as amostras, o modelo de minério e os blocos estimados.

Pôde-se observar uma ótima aderência entre o modelo de minério, as estimativas dos blocos e as amostras para todas as seções verticais e horizontais no setor Sequeirinho.

4.9. Diferenças entre as estimativas CU_CAP e CU_CAP1

Após terem sido validadas as estimativas, foram analisadas as diferenças entre as estimativas geradas pelas duas metodologias: CU_CAP (estimativas geradas pelo método direto) e CU_CAP1 (estimativas geradas pelo método indireto). A figura 4.16 apresenta o diagrama de dispersão dos teores e o histograma da diferença relativa dos dois métodos para o domínio de baixo teor.

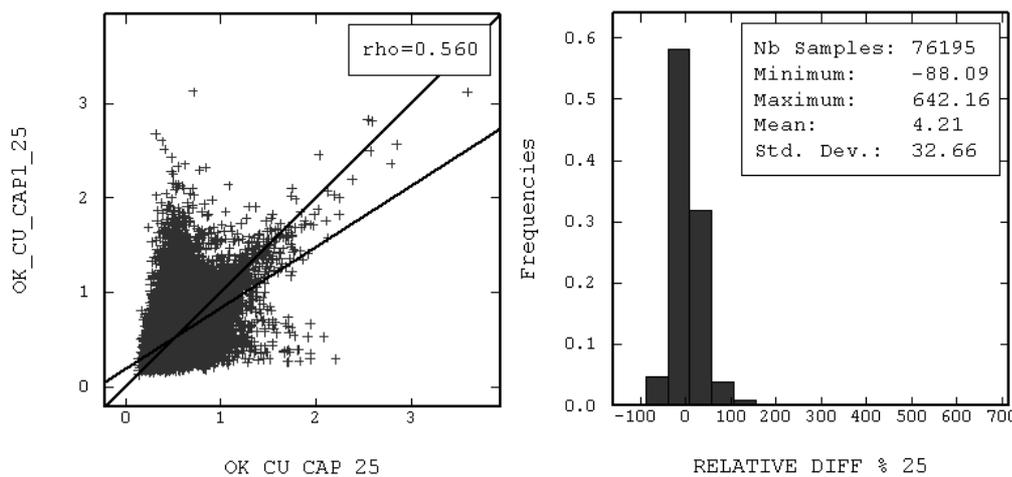


Figura 4.16 Diagrama de dispersão e histograma da diferença relativa entre as estimativas de teor de cobre para o método direto e indireto no domínio de baixo teor.

Observando o diagrama de dispersão dos teores pode ser notado que, bloco a bloco, a diferença entre as duas metodologias pode ser grande. Ao contrário do que acontece com as compostas (figura 4.9a), cuja correlação entre os teores é bem maior.

A inclinação da reta de regressão é menor do que a inclinação da reta de 45°, indicando que o método indireto tende, em média, a subestimar os teores dos blocos em relação ao método direto.

Em ambos os casos, é observada uma considerável variação nos valores das estimativas dos atributos CD e Densidade, o que explicaria a capacidade do método indireto em atribuir teores mais baixos se comparado ao método direto. Essa conclusão é válida considerando que a variabilidade do atributo CD é devido à variabilidade da densidade.

A capacidade do MI (método indireto) em atribuir valores menores aos blocos de baixo teor exerce um papel importante na suavização causada pela krigagem que tende a superestimar os baixos teores e subestimar os altos teores.

Observa-se que no histograma da diferença relativa (valor negativo significa que o método indireto obteve estimativa com valor maior que o método direto) as diferenças mínima e máxima apresentam valores muito diferentes em módulo. A média da diferença apresentou valor positivo, reafirmando a tendência do método direto em superestimar os teores em relação ao método indireto. A mediana (0.50) reafirma essa tendência sem considerar a influência dos valores máximos e mínimos.

Embora as diferenças entre as estimativas tenham uma relação com a variabilidade da densidade, o fato de gerar valores extremos no processo de desacumulação não pode ser descartado caso o atributo CD tenha sido estimado com um valor muito baixo em relação ao atributo TDC. Esse fato pode explicar as poucas grandes diferenças entre as duas estimativas para alguns blocos. O desvio padrão das estimativas do MI é maior do que do MD (tabela 4.11).

As diferenças nas estimativas do domínio de alto teor são apresentadas na figura 4.17.

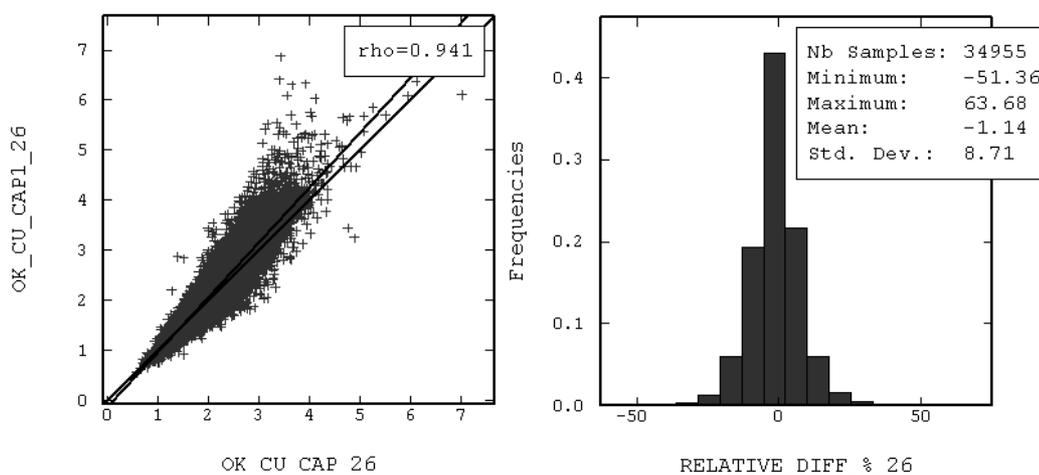


Figura 4.17 Diagrama de dispersão e histograma da diferença relativa das estimativas de teor de cobre para o método direto e indireto no domínio de alto teor.

O diagrama de dispersão dos teores obtidos pelo MD e MI no domínio de alto teor apresentou uma dispersão menor em relação ao domínio de baixo teor e uma boa correlação entre as estimativas. Nesse caso, a correlação entre as duas estimativas melhor reproduziu a correlação entre as amostras (figura 4.9c), sendo que a inclinação da reta de regressão é maior que a inclinação da reta de 45°. Isso

implica dizer que o método indireto tende a superestimar os teores dos blocos em relação ao método direto.

O histograma da diferença relativa apresentou uma maior simetria no domínio de alto teor do que a observada no domínio de baixo teor. Os valores máximo e mínimo da diferença relativa nesse caso foram bem menores e parecidos em módulo. A mediana da diferença é negativa (-1,18) e muito próxima da média, indicando que o método indireto atribuiu, em média, teores maiores aos blocos em relação ao método direto.

Com base nessa informação, é possível considerar que o método direto tende a suavizar mais as estimativas em relação ao método indireto. Esse fato pode ser confirmado na tabela 4.11, em que as estimativas obtidas pelo método indireto (CU_CAP1) apresentam intervalo interquartil e desvio padrão maiores do que as estimativas do método direto (CU_CAP).

A causa dessa maior variabilidade nos teores dos blocos aparenta ter forte correlação com o efeito de considerar a densidade na regularização das amostras e no uso das variáveis acumuladas TCD e CD.

4.10. Diluição do minério

Depois de validadas as estimativas em cada domínio, a diluição do minério é feita para levar em consideração os blocos que estão na fronteira entre dois domínios. As estimativas foram realizadas em todos os blocos interceptados em mais de 1% em volume pelo modelo de baixo teor usando as amostras assim também codificadas. O mesmo foi feito com os blocos interceptados em mais de 1% pelo modelo de alto teor.

Sendo assim, todos os blocos, com exceção dos blocos pertencentes a um único domínio, foram estimados considerando amostras de baixo teor e de alto teor. O teor diluído desse bloco depende da proporção dos domínios que o interceptam e dos teores atribuídos aos blocos utilizando compostas de cada domínio para estimar o mesmo.

O cálculo da diluição da densidade é feito da seguinte forma:

$$\text{Densidade diluída (DE}_{\text{diluída}}) = [(DE_{\text{AT}} \times \% \text{AT}) + (DE_{\text{BT}} \times \% \text{BT})] / (\% \text{AT} + \% \text{BT})$$

E dos teores:

$$\text{Teor diluído (CU}_{\text{diluído}}) = [(CU_{\text{AT}} \times \% \text{AT} \times DE_{\text{AT}}) + (CU_{\text{BT}} \times \% \text{BT} \times DE_{\text{BT}})] / [(DE_{\text{diluída}}) \times 100]$$

Onde:

CU_{AT}: teor de cobre do bloco estimado com compostas do domínio de alto teor;

DE_{AT}: densidade do bloco estimada com compostas do domínio de alto teor;

%AT: porcentagem do bloco interceptado pelo domínio de alto teor;

CU_{BT}: teor de cobre do bloco estimado com compostas do domínio de baixo teor;

DE_{BT}: densidade do bloco estimada com compostas do domínio de baixo teor;

%BT: porcentagem do bloco interceptado pelo domínio de baixo teor;

A figura 4.18 apresenta o histograma dos teores de cobre diluído para as duas metodologias CU_CAP (método direto), CU_CAP1 (método indireto) e da densidade.

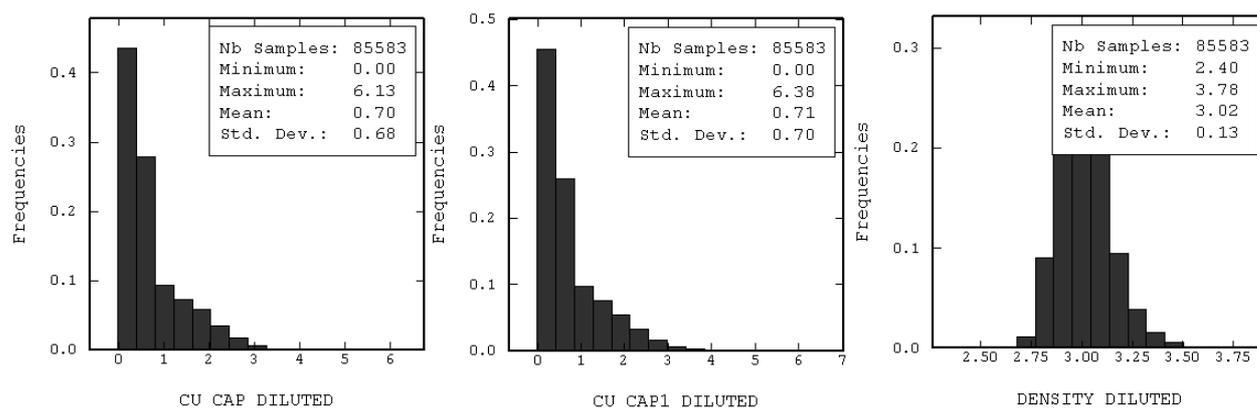


Figura 4.18 Histograma dos teores de cobre diluídos para o método direto, para o método indireto e para a densidade.

Note que o histograma, bem como as estatísticas apresentadas na figura 4.18, representam um modelo único para todo o setor Sequeirinho, sem fazer distinção entre os domínios de alto teor e baixo teor, fato esse já considerado nas estimativas.

4.11. Modelo de curto prazo

O modelo de curto prazo é determinado a partir de estimativas feitas com amostras coletadas do pó obtido na perfuração para desmonte das quais são analisados os teores de cobre. Os furos têm profundidade média de 16,5m (altura do banco 16 m). O procedimento de amostragem se dá da seguinte forma: cada furo é

identificado na área determinada a ser desmontada de acordo com o planejamento de curto prazo. A posição da boca de cada furo é determinada por um GPS de alta precisão.

As amostras são coletadas a partir de uma ferramenta constituída de um cilindro de 1,5 m de comprimento e 5 cm de diâmetro. Várias alíquotas são coletadas ao longo da pilha formada ao redor da boca do furo do topo da pilha para a sua base, como mostra a figura 4.19.



Figura 4.19. Representação da coleta de alíquotas ao redor da pilha formada pelo pó de perfuração para desmonte.

O material coletado (10kg) é colocado em um saco plástico, homogeneizado e em seguida quarteado. Um quarto da amostra segue para análise química, outro um quarto segue para descrição/estocagem e o restante da amostra é descartado. Os resultados das análises químicas são devidamente codificados e carregados no banco de dados. Uma atualização dos modelos geológicos de curto prazo é feita com base nessas amostras. O espaçamento médio entre as amostras é de aproximadamente 7 m.

As estimativas dos teores do modelo de curto prazo são feitas por KO usando o mesmo modelo de correlograma do longo prazo, variando somente a estratégia de

busca dependendo da região lavrada. Esse modelo de curto prazo é utilizado como um modelo de referência em um dos fatores de reconciliação adotados na mina.

Tendo sido geradas e validadas as estimativas dos teores de cobre pelas duas metodologias MD e MI, observada as principais diferenças nos teores gerados pelas mesmas e apresentado o procedimento para obtenção das estimativas de curto prazo (modelo de curto prazo), será realizada no capítulo seguinte uma apresentação do processo de reconciliação. As duas metodologias serão então comparadas com as estimativas de curto prazo no período de produção de três anos para avaliar o desempenho das mesmas no que se refere à precisão com que elas se aproximam do modelo de curto prazo.

Capítulo 5

Reconciliação dos teores de cobre

Após terem sido feitas as estimativas dos teores de cobre envolvendo as duas metodologias (MD e MI) e as estimativas de curto prazo, foi realizada a reconciliação dos teores de cobre em três anos consecutivos de produção.

Para tanto foi feita uma breve discussão a respeito de como pode ser feito um processo de reconciliação e sobre alguns fatores que influenciam nesse processo. Em seguida foram apresentados os resultados da reconciliação com o intuito de verificar qual das metodologias propostas apresentou melhor desempenho em várias massas reconciliadas.

O desempenho das duas metodologias foi testado em polígonos de lavra desenhados com base nas estimativas de curto prazo. Para tal verificou-se se o destino dos blocos dentro desses polígonos são os mesmos para as duas metodologias e para as estimativas de curto prazo quando aplicado a eles um teor de corte. O intuito dessa comparação é verificar se os teores médios dos blocos dentro desses polígonos gerados pelas duas metodologias (MD e MI) se aproximam igualmente das estimativas de curto prazo.

Por fim, duas densidades médias foram aplicadas a cada polígono para transformar o volume do mesmo em massa. A partir dos teores de curto prazo foram determinadas as quantidades de metal para cada uma dessas densidades. A primeira densidade consiste da densidade média previamente determinada com base nos teores dos polígonos, e a segunda consiste da densidade média do polígono obtida pela média das densidades estimadas em cada bloco.

5.1. Aspectos gerais que influenciam no processo de reconciliação

Segundo Parker (2011), a reconciliação constitui um processo chave que permite avaliar a capacidade das operações da mina de produzir massa, teor e quantidade de metal determinados como reservas. Segundo o mesmo, para minas de metais básicos uma boa reconciliação gira em torno de +/- 5% entre o lavrado e o que alimenta a usina. Para metais preciosos esse valor é de +/- 10%. Adicionalmente, o autor mostra que mesmo pequenos erros na estimativa dessas

quantidades podem gerar grandes impactos no fluxo de caixa e no NPV de uma operação, o que conseqüentemente, poderá adiantar ou prolongar o tempo de retorno do investimento planejado. Porém, o mesmo não associa o erro apresentado acima aos períodos de reconciliação.

A reconciliação como um todo é feita considerando três fatores: F1, F2 e F3. O fator F1 reconcilia as estimativas de longo prazo com as estimativas de curto prazo. O mesmo avalia a qualidade das estimativas de longo prazo. O fator F2 reconcilia a massa lavrada com a massa que sai do britador primário. Esse fator avalia os efeitos de diluição e perdas no processo de lavra. O fator F3 reconcilia a massa que sai do britador e alimenta a usina com o que é produzido pela mesma. Esse fator avalia a qualidade das estimativas dos teores que alimenta a usina com o produzido pela mesma.

No período de três anos de reconciliação considerado neste estudo, em média o fator F2 é de 0.98 e o fator F3 é de 0.97. Esses valores asseguram, dadas as devidas diluições que ocorrem no processo de lavra e as oscilações na recuperação da usina, a qualidade das estimativas de curto prazo em representar os teores reais.

A reconciliação entre o modelo de longo prazo e o de curto prazo (F1) é feita, assim como para o F2 e F3, considerando três fatores:

- $F1_{\text{Teor}}$ = média das estimativas dos teores (um dado atributo) de curto prazo para blocos lavrados em um dado período / média das estimativas de teores desses blocos obtidas pelo modelo de longo prazo.
- $F1_{\text{Metal}}$ = média da quantidade de metal estimada pelo curto prazo para blocos lavrados em um dado período / média da quantidade de metal estimada pelo longo prazo no mesmo período.
- $F1_{\text{Massa Total}}$ = massa total a ser lavrada determinada pelo curto prazo em um dado período / massa total a ser lavrada determinada pelo longo prazo no mesmo período.

Com o objetivo de verificar o desempenho das estimativas de longo prazo geradas pelo MD e pelo MI em relação às estimativas de curto prazo foi feita a reconciliação nos blocos lavrados entre os três anos consecutivos: ano 1, ano 2 e ano 3. Porém, antes é importante ressaltar que será feita apenas a reconciliação

determinada pelo $F1_{\text{Teor}}$. Para que fossem considerados os fatores $F1_{\text{Metal}}$ e $F1_{\text{Massa Total}}$ o ideal é que tivéssemos em cada amostra de curto prazo (amostras coletadas do pó de perfuração para desmonte) a densidade determinada. Isso permitiria que a mesma fosse estimada como os teores de curto prazo. A determinação da densidade dessa forma é necessária para se comparar esses fatores de reconciliação para o MD e o MI. A massa do MD é determinada por uma densidade média, já a massa obtida pelo MI é obtida pela densidade estimada em cada bloco com informações de longo prazo. Dessa forma, a massa de curto prazo deveria ser estimada com informações de densidade de curto prazo. Se for considerada a densidade estimada em cada bloco pelas informações de longo prazo na conversão das massas de curto prazo, esses fatores de reconciliação para o MI seriam sempre iguais a um. Embora acreditemos que a densidade estimada no longo prazo é a melhor aproximação da densidade real, a densidade assim determinada em cada bloco é diferente da densidade estimada considerando informações de curto prazo. Para evitar que sejamos tendenciosos em favor do MI esses fatores não serão considerados.

Antes de proceder com a reconciliação do fator $F1$, alguns aspectos relativos a esse tipo de reconciliação e à reconciliação que aqui será realizada serão brevemente discutidos. Geralmente, devido às diferenças nas quantidades e representatividade das informações (em geral distintos protocolos amostrais) usadas para estimar teores no longo e no curto prazos, algumas diferenças certamente ocorrerão entre os modelos gerados no longo prazo e no curto prazo, principalmente se volumes menores de massa forem reconciliados. No longo prazo, o modelo geológico da mineralização (controle físico dos teores) é determinado a partir do conhecimento prévio da geologia do depósito, do comportamento do tipo de mineralização e pelas amostras de melhor qualidade se comparada às de curto prazo, porém em maior espaçamento. Já no curto prazo, o modelo da mineralização é frequentemente atualizado devido às constantes exposições dos contatos entre minério e estéril que são percebidos no momento da lavra. As amostras, embora de pior qualidade do que as de longo prazo, são coletadas em espaçamento muito menores e em quantidades muito maiores. Isso permite inferir com mais precisão a continuidade do corpo de minério e dos teores em uma escala menor devido ao efeito informação.

Sendo assim, é possível perceber uma dificuldade inerente ao modelo de longo prazo em acertar com precisão reconciliações de pequenas massas com o modelo de curto prazo que são estimados com uma quantidade maior de informações mais representativas localmente. Como consequência, quanto menor o volume reconciliado maior tende a ser a diferença entre os dois modelos. Porém, à medida que o volume reconciliado aumenta, a diferença entre os dois modelos diminui e esses tendem a se igualar caso os dois modelos não tragam consigo um viés atribuído no procedimento de realização das estimativas. Portanto, é esperada uma relação entre o suporte usado na estimativa e o erro da reconciliação.

Nesse particular estudo comparativo entre os MD e MI não será possível proceder com as estimativas de curto prazo utilizando o método indireto, pois este requer medidas de densidade associadas a cada um dos furos de perfuração para desmonte. Ou seja, as estimativas de curto prazo são obtidas diretamente a partir das amostras coletadas do pó de perfuração para desmonte.

A não-obtenção da densidade nesses furos tem uma motivação prática e econômica. Prática no sentido do tempo adicional necessário para a obtenção e tratamento dessas informações que poderiam ser obtidas através de perfilagem geofísica. Econômicas no sentido dos custos envolvendo uma equipe devidamente treinada para obtenção e tratamento dos dados, equipamentos e gastos operacionais.

Por outro lado, até o presente momento nenhum estudo considerando os ganhos e custos envolvendo o uso de perfilagem geofísica para obtenção da densidade dos furos de perfuração para desmonte foi desenvolvido com o objetivo de obter densidade dos mesmos para melhorar a reconciliação entre os modelos de longo e curto prazo. A determinação da densidade nesses casos possivelmente não é feita por acreditar-se que uma quantidade considerável de informação é usada para determinar os teores dos blocos no modelo de curto prazo (amostras muito próximas uma das outras e altamente correlacionadas). Sendo assim, esses teores podem ser considerados como muito próximos dos teores reais. Estimar esses teores considerando densidade (variável acumulada), embora teoricamente seja o mais correto por colocar as amostras no mesmo suporte mássico, poderia não apresentar um ganho muito significativo na precisão desses teores.

Se compararmos esse possível ganho ao incorporar a densidade nas estimativas de curto prazo com a diferença inerente entre as estimativas de longo prazo e de curto prazo (estimativas de curto prazo são obtidas por amostras mais correlacionadas entre si do que as estimadas pelo longo prazo), esse ganho relativo poderia ser ainda menor. Porém, apenas um estudo envolvendo a reconciliação dessas estimativas poderia confirmar essa hipótese.

5.2. Apresentação e discussão dos resultados obtidos na reconciliação dos teores de cobre

Feitas algumas considerações sobre a reconciliação, a mesma foi realizada considerando o fator $F1_{Teor}$ como mencionado anteriormente. Os blocos selecionados em cada período para fazer a reconciliação foram determinados de acordo com as atualizações mensais da topografia da cava. O ano 1 será o mais detalhado por terem sido fornecidas atualizações topográficas mensais; no ano 2 serão considerados os doze meses de produção do ano como um todo; e no ano 3 serão considerados os volumes obtidos de atualizações topográficas em intervalos quadrimestrais.

5.2.1 Ano 1

A figura 5.1 mostra os fatores de reconciliação ($F1_{Teor}$) mensais para o ano 1. Ao longo dos meses é possível observar uma oscilação de desempenho dos MD e MI, mas em geral o MD reconciliou melhor em uma frequência maior do que o MI. Situações onde os dois métodos reconciliaram da mesma forma também são observadas. Porém, os resultados apresentados nesse gráfico estão diretamente associados à quantidade de massa reconciliada nesses períodos.

É importante, nesse ponto, mencionar alguns aspectos operacionais que podem influenciar os resultados apresentados na figura 5.1. Em geral, planos de lavra, sejam eles mensais, trimestrais, semestrais ou em qualquer outro período considerado, prezam por uma razão de extração que seja constante nos períodos considerados, respeitando sempre uma relação estéril-minério. Ao observar a tabela 5.1, percebe-se uma grande oscilação na massa lavrada total em cada mês e uma variação ainda maior nos blocos de minério correspondentes a essa massa.

A razão para essa oscilação mensal nos blocos totais lavrados se dá basicamente pelo fato de que a massa que alimenta o britador mensalmente provém

de três fontes diferentes: cava Sequeirinho, cava Sossego e pilha de estocagem. A massa total que alimenta o britador mensalmente é praticamente constante, o que difere é a quantidade desse material proveniente de cada uma dessas fontes. Sendo assim, os blocos apresentados na tabela 5.1 representam a parcela de blocos que contribuíram para a alimentação mensal do britador extraídos apenas da cava Sequeirinho.

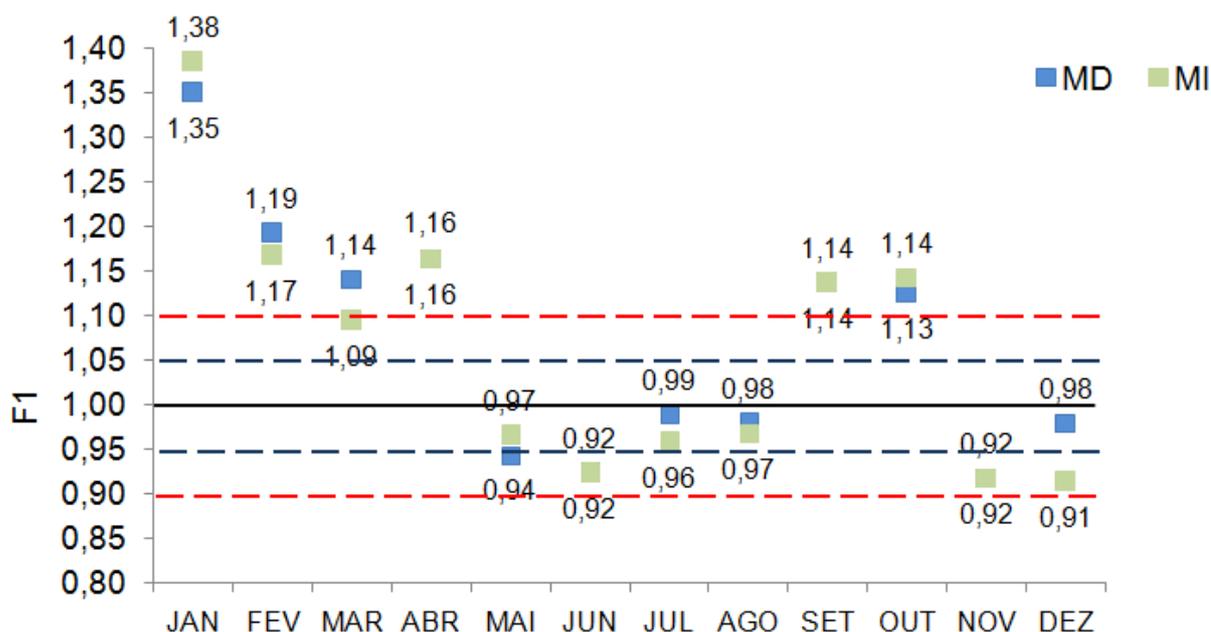


Figura 5.1 Gráficos de reconciliação mensal do ano 1.

A razão para a variação na quantidade de blocos totais lavrados em cada um desses meses está também relacionada ao fato de se privilegiar, em alguns meses, avanços maiores em áreas de estéril e, principalmente, pelo fato de estarmos trabalhando apenas com o setor Sequeirinho da cava Sequeirinho. Sendo assim, essa oscilação é consequência de estarmos limitados apenas a um setor de uma cava que não é a única fonte que alimenta o britador.

Explicado o porquê da oscilação das massas lavradas totais e de minério para cada mês, é possível entender os motivos das diferenças entre as duas metodologias. A primeira causa é devido às diferentes massas reconciliadas, como já discutido. Sabe-se que massas menores em geral apresentam maiores erros e massas maiores apresentam menores erros (figura 5.2). Note como o fator de reconciliação aproxima-se cada vez mais do valor esperado (1) à medida que o número de blocos reconciliados aumenta. A segunda causa está associada à covariância das amostras usadas para estimar os blocos de curto prazo e à

covariância usada para estimar os blocos de longo prazo. Como as amostras no curto prazo estão em geral mais próximas do bloco a ser estimado, a correlação das amostras entre si e entre o bloco é maior do que para as estimativas de longo prazo, em que as amostras estão, em geral, mais distantes do bloco. Essa diferença na correlação entre essas amostras resulta em uma diferença inerente às estimativas de curto e longo prazo. Sendo assim, essa diferença afetará igualmente as duas metodologias, MD e MI.

Tabela 5.1 Quantidade total de blocos lavrados no ano 1 e correspondente quantidade de blocos de minério.

Ano 1		
	Número de Blocos Lavrados	Número de Blocos de Minério
Janeiro	1032	34
Fevereiro	818	133
Março	1143	149
Abril	1077	106
Maio	928	171
Junho	947	216
Julho	903	243
Agosto	758	190
Setembro	977	201
Outubro	875	232
Novembro	1081	89
Dezembro	1004	207
Trimestre 1	2993	316
Trimestre 2	2952	493
Trimestre 3	2638	634
Trimestre 4	2960	528
Semestre 1	5945	809
Semestre 2	5598	1162
Ano 1	11543	1971

Tendo sido feitas essas observações a respeito do que afeta igualmente a reconciliação das duas metodologias, buscar-se-á então entender melhor as diferenças entre o MD e o MI nas reconciliações mensais. O MI foi melhor nos meses de fevereiro e março; no mês de janeiro o MD foi melhor; e no mês de Abril os dois métodos reconciliaram igualmente. Em geral, esses meses não apresentaram uma boa reconciliação. Porém, em três situações as duas metodologias reconciliaram de maneiras diferentes. Nesses casos, as diferenças

entre os dois métodos estão relacionadas à incorporação da densidade pelo método indireto, que provocou maior erro no mês de janeiro e menor erro nos meses de fevereiro e março, sendo igual ao MD no mês de abril.

Os quatro meses subsequentes, maio, junho, julho e agosto, apresentaram uma melhor reconciliação com as estimativas de curto prazo do que os quatro meses anteriores. Porém, é possível notar que a diferença entre os dois métodos é também menor do que nos quatro meses anteriores. Em geral, os meses de maior massa reconciliada apresentaram os menores erros, exceto pelo mês de julho, que lavrou a maior massa de minério e que apresentou erro parecido com o mês de maio, que lavrou a menor massa de minério desses quatro meses. Note que exceto para o mês de maio os outros três meses apresentaram diferenças entre as duas metodologias sendo o MD melhor em dois desses meses.

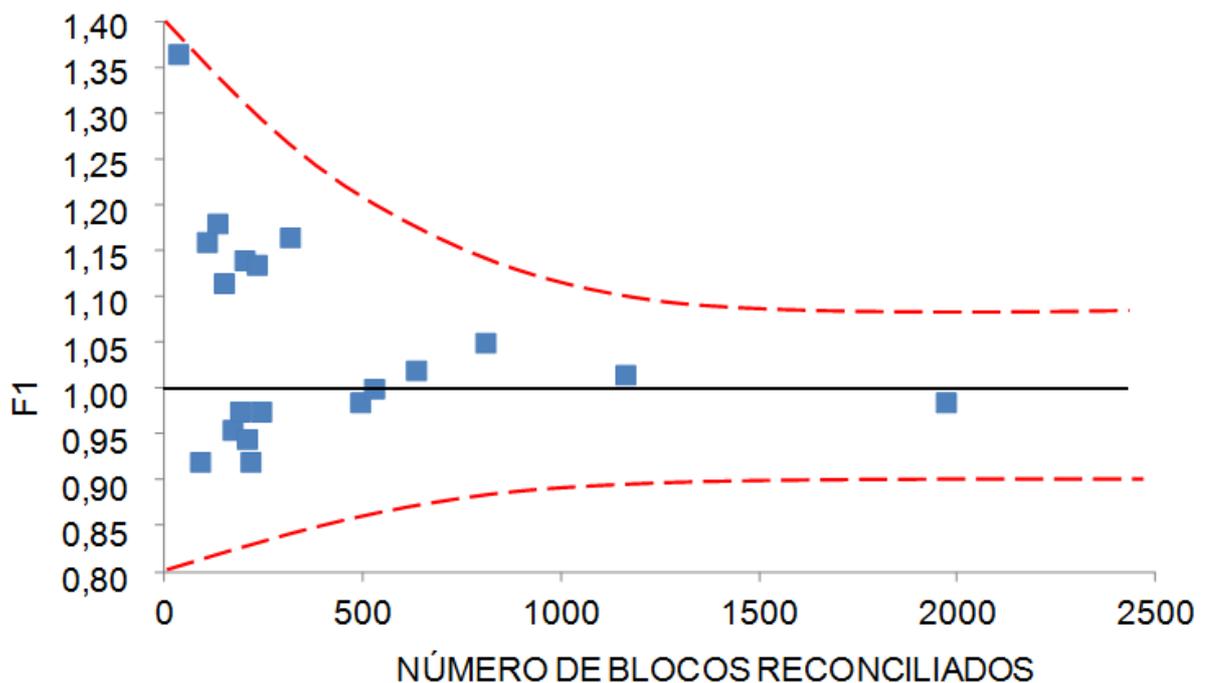


Figura 5.2 Relação entre suporte (número de blocos) e o fator de correlação.

Em geral, para os doze meses reconciliados não foi observado nenhum padrão de comportamento na diferença entre os dois métodos; tais foram os parâmetros analisados: densidade, desvio padrão da densidade, coeficiente de variação da densidade, coeficiente de espalhamento da densidade, variável TCD, variável CD, C e desvio padrão de C.

A figura 5.3 apresenta o gráfico de reconciliação trimestral para o ano 1. Note que nos três primeiros trimestres, o MI foi superior ao MD. No último trimestre do ano, o MI subestimou o teor médio real em 1% enquanto o MD superestimou o teor real nos mesmos 1%.

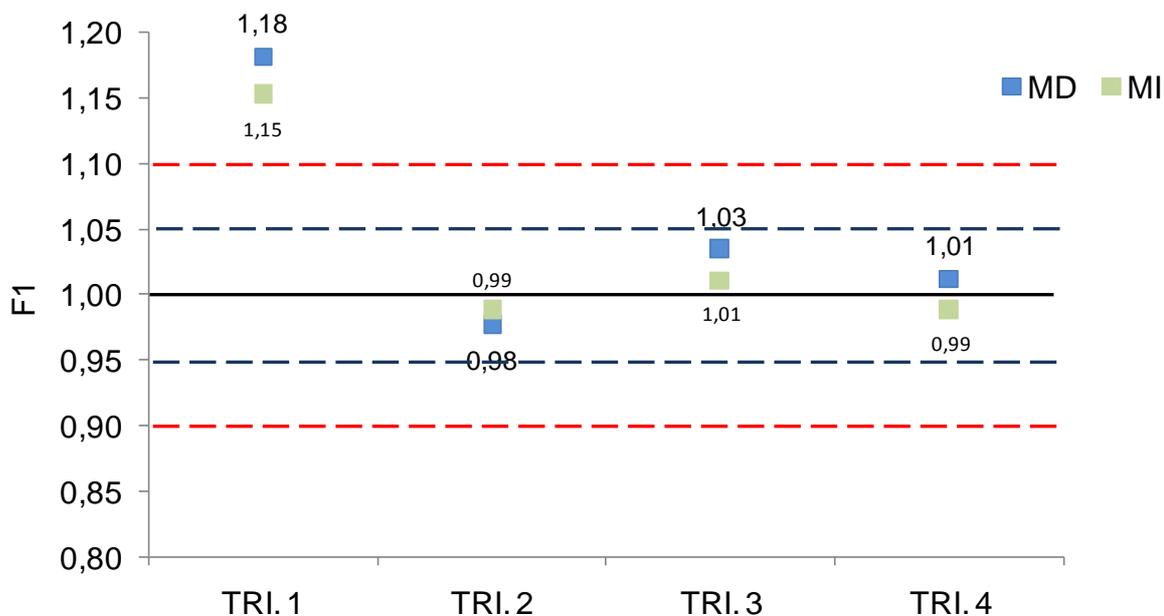


Figura 5.3 Gráfico de reconciliação trimestral para o ano 1.

A figura 5.4 apresenta o gráfico de reconciliação semestral para o ano 1. Tanto o MD quanto o MI superestimaram em 5% o teor médio dos blocos extraídos do setor Sequeirinho no primeiro semestre do ano 1. Já no segundo semestre, o MD superestimou o teor médio em 2%, enquanto o MI superestimou o mesmo em 1%.

Com base na discussão anterior (figura 5.2), a respeito do erro na reconciliação e suporte (massa reconciliada), pode ser percebido juntamente com as figuras 5.3 e 5.4 que o erro das duas metodologias em relação ao teor real de fato diminui com o aumento das massas reconciliadas.

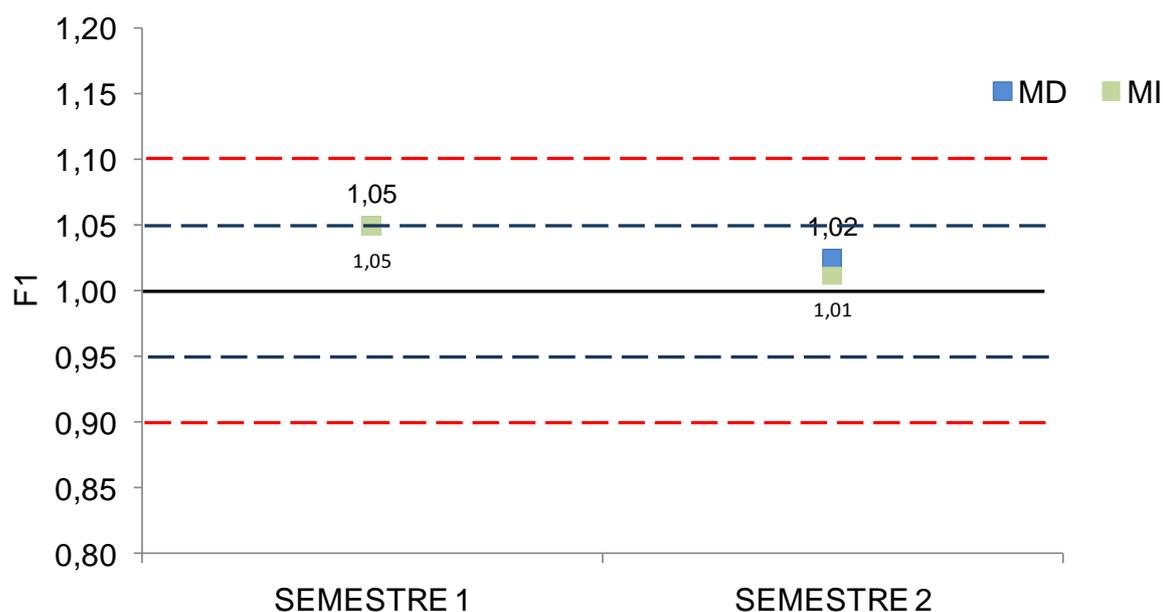


Figura 5.4 Gráfico de reconciliação semestral para o ano 1.

Porém nesse caso é importante notar que com o aumento das massas reconciliadas o MI apresentou, na maioria das vezes, o melhor fator de reconciliação comparado com o MD. Isso mostra um ganho real nas reconciliações com o aumento da massa reconciliada e com a aplicação do método indireto.

5.2.2 Ano 2

No ano 2 foram reconciliados 2447 blocos provenientes do setor Sequeirinho. A massa considerada nesse ano é a maior reconciliada até então. O fator de reconciliação para o MD (0,99) foi pior do que para o MI (1,00). Esse fato vem corroborar com os resultados obtidos no ano 1. Ao reconciliarmos uma massa maior, houve uma melhor reconciliação das duas metodologias com um destaque para o MI.

5.2.3 Ano 3

A figura 5.5 apresenta o gráfico de reconciliação quadrimestral para o ano 3. No ano três, houve um maior equilíbrio nos desempenhos dos métodos direto e indireto. Para o primeiro quadrimestre o MD superestimou os teores reais dos blocos extraídos do Setor Sequeirinho em 1%, ao passo que o MI subestimou os mesmos em 4%. Já no quadrimestre seguinte, o MD superestimou os teores reais em 5%,

enquanto o MI superestimou os mesmos em 2%. No último quadrimestre, os dois métodos apresentaram resultados iguais quanto à reconciliação. Ambos superestimaram os teores em 9%.

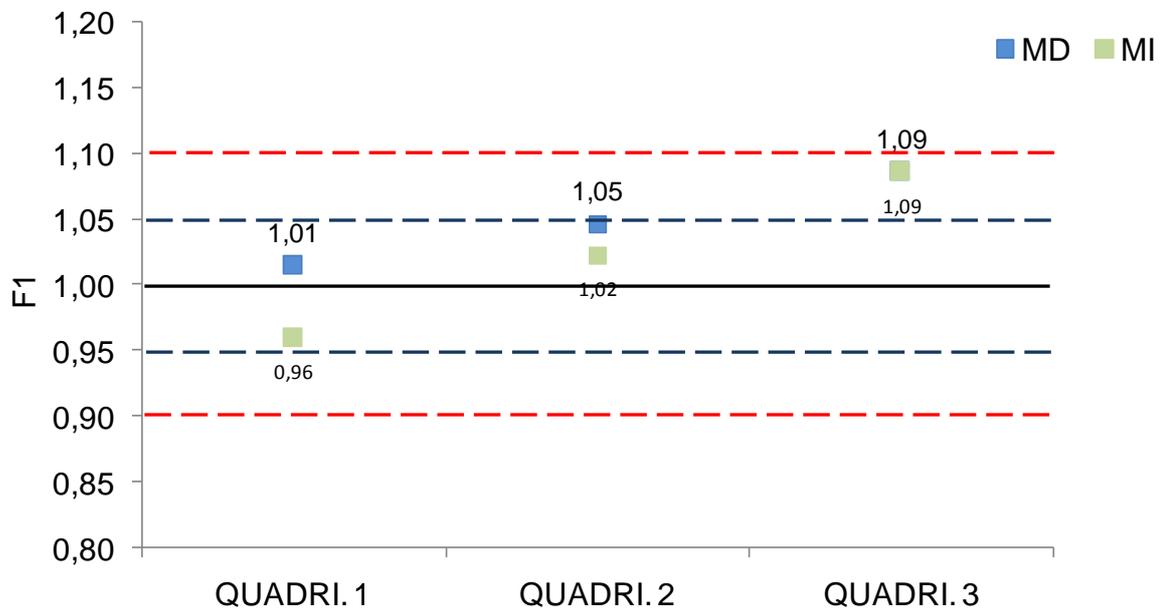


Figura 5.5 Reconciliação quadrimestral do ano 3.

É importante considerar a quantidade de blocos extraídos nesses quadrimestres (tabela 5.2). Eles representam a massa reconciliada em cada um desses períodos. O primeiro quadrimestre foi o que reconciliou a menor massa. Porém, o maior erro na reconciliação foi obtido no último quadrimestre. Dessa forma não somente o volume reconciliado influencia na reconciliação, mas também influencia o fato de estimarmos os teores de blocos no curto prazo com amostras muito mais próximas do mesmo do que no longo prazo (a correlação entre as amostras mais próximas é maior). Esse fato afeta igualmente as duas metodologias.

Tabela 5.2 Quantidade total de blocos lavrados no ano 3 e correspondente à quantidade de blocos de minério.

Ano 3		
	Número de Blocos Lavrados	Número de Blocos de Minério
Quadrimestre 1	4073	419
Quadrimestre 2	4942	884
Quadrimestre 3	4765	879
Ano 3	13780	2182

5.2.4 Os três anos juntos

Por fim foi feita a reconciliação para os três anos, o que engloba uma massa reconciliada consideravelmente maior. A figura 5.6 apresenta o gráfico com a reconciliação para cada ano e a reconciliação envolvendo os três anos.

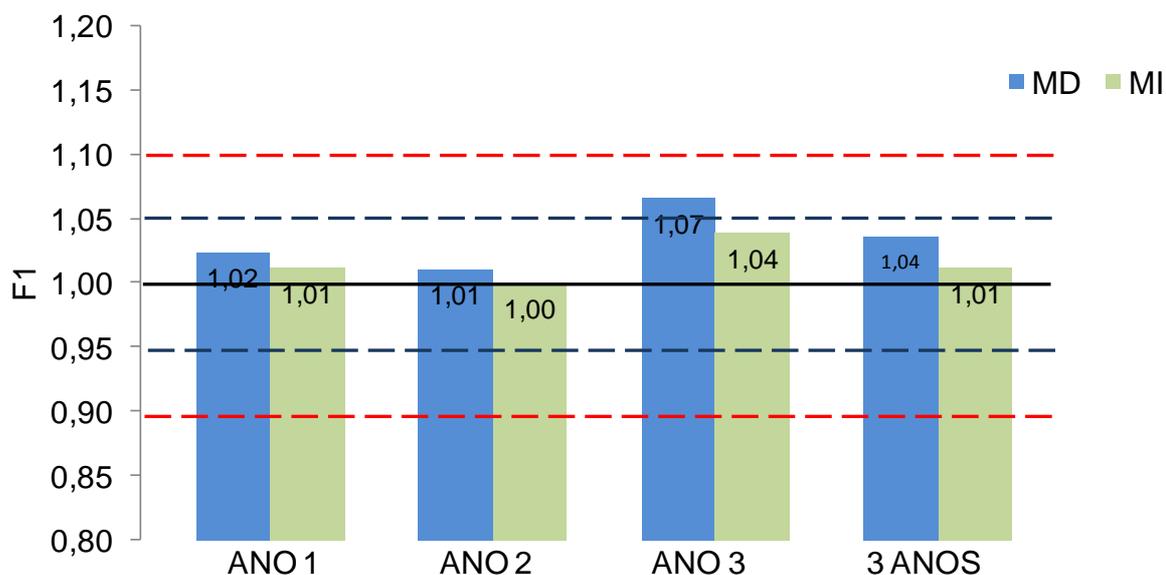


Figura 5.6 Reconciliação dos anos 1, 2 e 3 e para os três anos juntos.

Em geral a massa lavrada do setor Sequeirinho apresentou uma boa reconciliação para as duas metodologias nos três anos observados. No ano três, a reconciliação foi um pouco pior. A explicação para essa má reconciliação é devido ao fato de que no ano 3 foi lavrada uma região do setor Sequeirinho onde existe um

bolsão de alto teor que não foi possível mapear com as informações disponíveis no longo prazo.

O MI em todas as situações reconciliou melhor em relação ao MD. No ano 1, o MD subestimou os teores reais em 2% contra 1% subestimado pelo MI. No ano 2, o MD subestimou os teores reais em 1% enquanto o MI obteve valor igual aos teores reais. Já no ano 3, o MD subestimou os teores reais em 7% contra 4% do MI. Considerando a massa lavrada do setor Sequeirinho nos três anos consecutivos o MD subestimou os teores reais em 4% enquanto o MI subestimou esses teores em 1%.

A tabela 5.3 apresenta os teores médios dos blocos lavrados para cada metodologia e o teor real obtido pelas estimativas de curto prazo.

Tabela 5.3 Teores médios dos blocos lavrados nos anos 1, 2, 3, e os três anos juntos para o MD, o MI e os teores reais.

Ano	MI	MD	Teor Curto Prazo
Ano 1	0,85	0,84	0,86
Ano 2	0,91	0,9	0,91
Ano 3	0,78	0,76	0,81
Três Anos	0,85	0,83	0,86

As diferenças nos teores reconciliados (que teve valor máximo no ano 3 para o MD e que subestimou a média real em 6%) podem representar valores extremamente altos de massas de minério e metal *in situ*.

Consideremos uma produção hipotética e anual de dez milhões de toneladas de minério, os teores obtidos pelo MD, pelo MI e o teor real para os três anos consecutivos. A quantidade de metal *in situ* subestimada pelo MD é de aproximadamente 9.000 toneladas, enquanto que para o MI essa subestimativa é de 3.000 toneladas, quantidades apreciáveis.

5.3 Resultados observados em planos de lavra mensais

Para verificar se existe uma melhor aproximação de alguma das metodologias com as estimativas de curto prazo, foram propostos polígonos de desmontes em determinados meses dos três anos aqui considerados baseados nas estimativas de

curto prazo. Em seguida, esses polígonos foram aplicados ao modelo de estimativas de longo prazo obtidos pelo MD e pelo MI. Foram então conferidos os destinos do material dentro desses polígonos para cada uma das metodologias e pelas estimativas de curto prazo aplicando-se a elas um teor de corte. O objetivo é constatar se as duas metodologias geram configurações espaciais dos teores diferentes a ponto de variar o destino de materiais selecionados para serem lavrados.

Além disso, foram aplicadas duas densidades a esses polígonos para determinação de suas massas. A relação entre essas duas densidades foi determinada para averiguar a diferença nas massas e na quantidade de metal desses polígonos ao se aplicar o teor médio das estimativas de curto prazo.

A primeira densidade usada (DMD - densidade média do domínio) foi determinada de acordo com a densidade média das amostras em cada faixa de teor segundo a tabela 5.4.

Tabela 5.4 Densidades médias aplicadas aos polígonos com base nas densidades médias obtidas para cada intervalo de teor.

Intervalo de Teor %Cu	Densidade Média g/cm ³
0.001 <= %Cu < 0.20	2,85
0.20 <= %Cu < 0.30	2,95
0.30 <= %Cu < 0.45	2,98
0.45 <= %Cu < 1.00	3,01
1.00 <= %Cu < 2.00	3,09
%Cu >= 2.00	3,23

Essas densidades foram consideradas para melhor discretizar os valores de densidade usados. A escolha desses valores médios de densidade pode ser feita considerando outros fatores, sendo este apenas mais um de tantos outros adotados.

A segunda densidade aplicada ao polígono (DME - densidade média estimada) é constituída da densidade média dos blocos dentro do polígono estimada por KO. Dessa forma foram analisados cinco cenários diferentes.

O primeiro cenário apresenta apenas um único polígono de desmonte (PD) selecionado para ser lavrado. Trata-se de um polígono que mistura blocos de altos e

baixos teores, além de blocos de estéril. Este polígono é dividido em três polígonos operacionais (PO) a fim de minimizar a diluição durante o carregamento do material, uma vez que o teor médio desses polígonos operacionais geralmente difere do teor médio do polígono selecionado para desmonte. Esse procedimento é aplicado para tornar o processo de carregamento mais seletivo. A configuração desse polígono é apresentada na Figura 5.7. Tanto o PD como os POs foram desenhados com base nas estimativas de curto prazo. Esses polígonos foram então aplicados às estimativas de longo prazo geradas por ambos MD e MI.

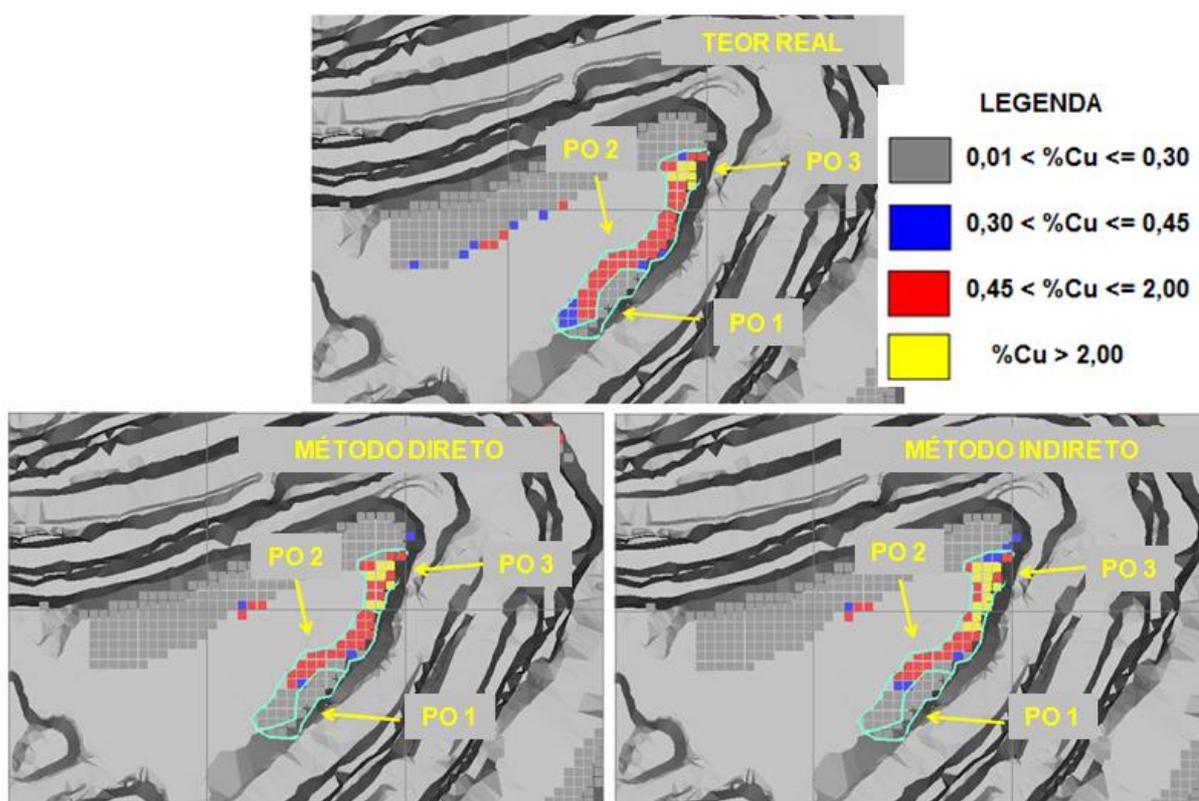


Figura 5.7 Polígono selecionado para lavra pelo planejamento do curto prazo no Cenário 1.

Em geral todos os blocos selecionados pelo curto prazo também foram estimados pelo longo prazo, exceto por alguns blocos na parte sudoeste do PO 2. Esses blocos não estimados ocorrem em regiões não contempladas pelo modelo geológico (controle físico da mineralização) como uma região mineralizada. Trata-se de algo que pode ocorrer em certas regiões do depósito, uma vez que os dados usados para criar o modelo geológico de longo prazo são coletados esparsamente se comparados aos de curto prazo. Isso torna difícil a inferência da geometria da mineralização em algumas regiões.

No PO3 nota-se uma diferença dos teores dos blocos entre o MD e MI e dos dois em relação aos de curto prazo (teor real). As razões para essas diferenças dependem da representatividade das informações usadas nas estimativas de longo prazo (efeito informação), uma vez que se trata de um depósito de alta variabilidade de teores, o que dificulta a obtenção de estimativas acuradas de longo prazo em escala de bloco. Porém, a diferença entre o MD e o MI está relacionada à influência da densidade na composição das amostras e no uso das variáveis acumuladas, ou seja, está relacionada à incorporação da densidade no processo de estimativa.

Tabela 5.5 Cenário 1. Teores médios para o polígono de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.

Polígono de Desmonte						
	Teores Estimados (%Cu)				F1 _{TEOR}	DME/DMD
	PO1	PO2	PO3	PD1		
Método Direto	0,22	1,19	1,68	0,82	1,09	
Método Indireto	0,22	1,25	2,11	0,95	0,94	
Curto Prazo	0,27	0,70	1,80	0,89		
DME	2,89	2,89	3,08	2,94		
DMD	2,85	3,01	3,09	3,00		0,98
Destino do Material						
	PO1	PO2	PO3	PD1		
Método Direto	Estéril	Britador	Britador	Britador		
Método Indireto	Estéril	Britador	Britador	Britador		
Curto Prazo	Estéril	Britador	Britador	Britador		

A Tabela 5.5 apresenta o teor médio de cobre para cada polígono de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais, além do fator de reconciliação F1_{TEOR}. A segunda parte da tabela mostra os destinos do material desmontado baseado no teor de corte. Polígonos com teor médio abaixo de 0.3% são mandados para uma pilha de estéril, entre 0.3% e 0.45% para uma pilha de estocagem e acima de 0.45 para o britador. Nota-se que, tanto para os polígonos operacionais quanto para o polígono de desmonte como um todo, os destinos dos materiais de cada polígono determinados pelo longo prazo (MD e MI) é igual ao destino dado pelas estimativas de curto prazo.

Em termos do teor médio do polígono de desmonte, as estimativas geradas pelo MI se aproximam mais do teor estimado pelo curto prazo gerando uma superestimativa de 6% contra uma subestimativa de 9% gerada pelo MD.

A relação entre a densidade média aplicada a partir de intervalos de teores e a densidade estimada é de 0.98, mostrando que tanto a massa total quanto a quantidade de metal do polígono difere em 2% somente devido a diferença entre as duas densidades aplicadas. Essa diferença pode refletir em subestimativas ou superestimativas dos valores previstos de quantidades de metal contidas nos polígonos e de massa a ser transportada. Essa diferença reforça a necessidade de se determinar densidades de forma mais precisa, se possível a níveis de longo e curto prazo, para que o erro entre massas previstas e realizadas seja minimizado.

O segundo cenário (figura 5.8) considera dois polígonos de desmonte (PD). O PD3 e o PD4 constituem polígonos de alto teor. Os mesmos foram completamente estimados pelas duas metodologias. A distribuição espacial dos teores dos blocos (textura) nesses PDs foram similares entre as duas metodologias, mas ambos diferem da distribuição espacial dos teores de curto prazo, principalmente nos blocos com teor acima de 2.00% Cu.

A tabela 5.6 mostra o teor médio para cada PD e seus destinos. Tanto o PD3 quanto o PD4 foram apontados para o mesmo destino por ambas as metodologias e pelas estimativas de curto prazo. Não houve diferença entre os teores médios obtidos para as duas metodologias no PD3 e os mesmos se aproximaram muito bem da média das estimativas de curto prazo. No PD4, ambos os métodos também apresentam médias parecidas entre si e subestimam o teor das estimativas de curto prazo em aproximadamente 5%.

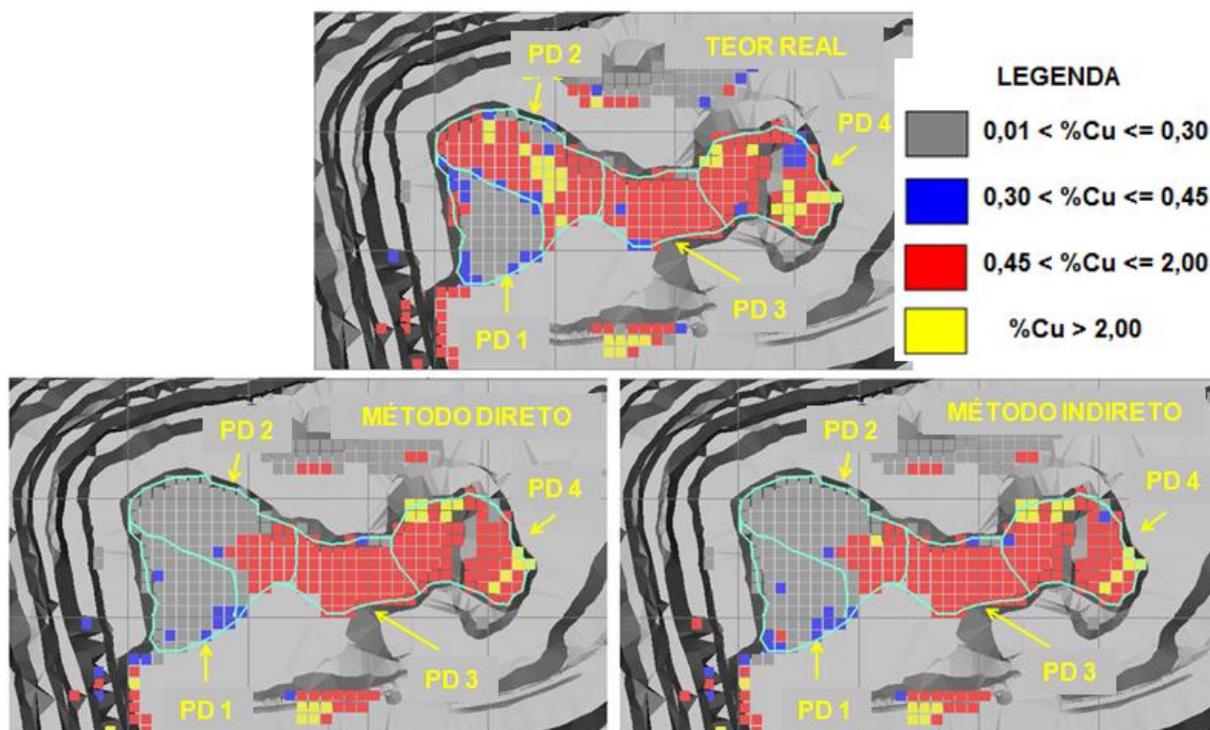


Figura 5.8 Polígonos selecionados para lavra pelo planejamento do curto prazo no Cenário 2.

Tabela 5.6 Cenário 2. Teores médios para polígonos de desmonte e o fator de reconciliação para o MD e o MI.

	Polígonos de Desmonte					
	Teores Estimados (%Cu)		F1 _{TEOR}		DME/DMD	
	PD3	PD4	PD3	PD4	PD3	PD4
Método Direto	0,84	1,23	0,99	1,05		
Método Indireto	0,84	1,23	0,99	1,05		
Curto Prazo	0,83	1,29				
DME	3,16	2,94			1,03	0,95
DMD	3,01	3,09				
	Destino do Material					
	PD3	PD3				
Método Direto	Britador	Britador				
Método Indireto	Britador	Britador				
Curto Prazo	Britador	Britador				

A diferença entre as massas aplicando as duas densidades DME e DM no PD3 foi de 3%, enquanto no PD4 foi de 5%. Isso mostra que a escolha da densidade correta para conversão mássica do polígono tem tanta importância quanto a

determinação dos teores, uma vez que a mesma influencia diretamente na quantidade de massa de metal contida e na massa a ser transportada.

O terceiro cenário (figura 5.9) apresenta dois polígonos de desmonte. O primeiro é dividido em dois polígonos operacionais e o segundo é dividido em três, a fim de minimizar a diluição durante o processo de carregamento na lavra.

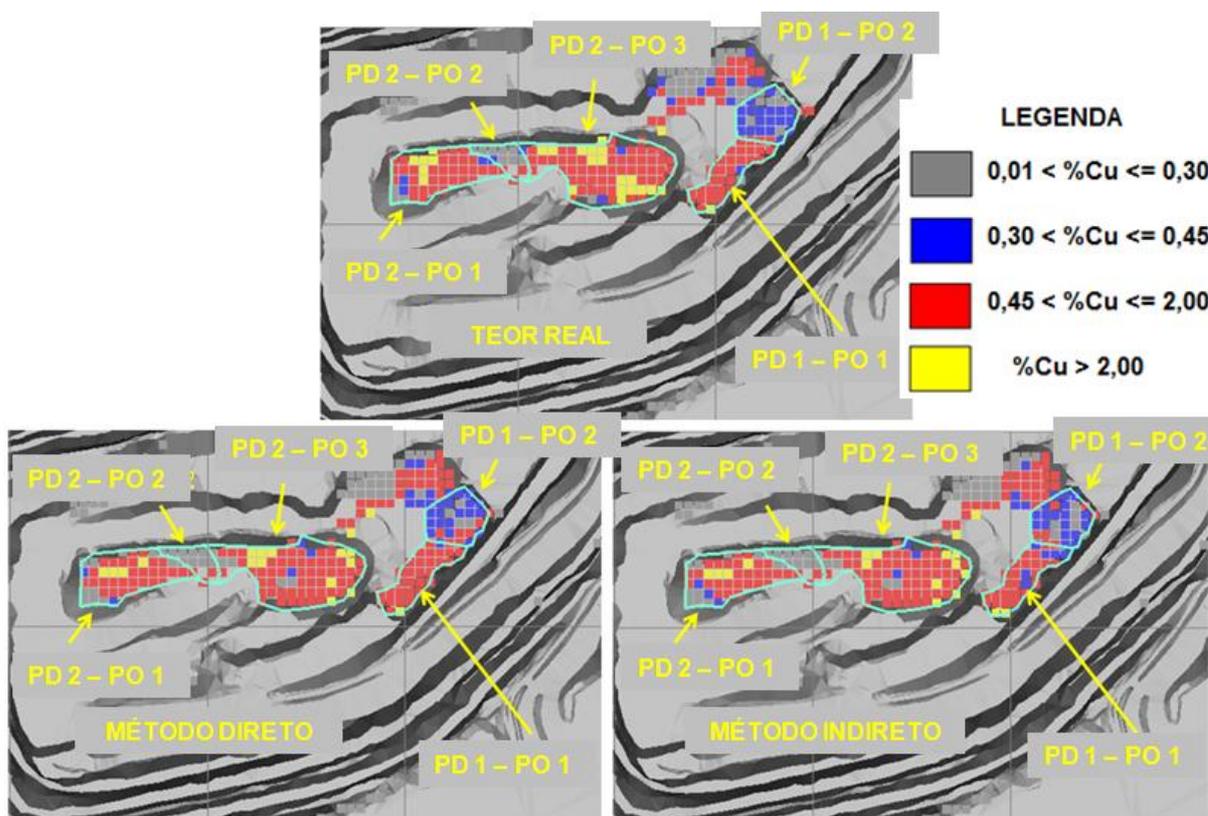


Figura 5.9 Polígonos selecionados para lavra pelo curto prazo no Cenário 3 com os teores dos blocos estimados pelo curto prazo (a), MD (b) e MI (c).

O PD1 é composto por blocos de altos e baixos teores. A distribuição espacial dos teores no PO1 é diferente entre as duas metodologias. Essa diferença está relacionada à consideração da densidade pelo MI. A diferença entre as estimativas obtidas pelo MD e MI no longo prazo e a estimativa de curto prazo está relacionada a fatores intrínsecos aos dois modelos de estimativas pelo fato do curto prazo estimar os blocos com amostras mais próximas e mais correlacionadas do que o longo prazo. No PO2, a distribuição espacial dos teores entre MD e MI também são diferentes entre si, assim como são diferentes se comparados com os de curto prazo. A tabela 5.7 mostra que o destino desses polígonos operacionais e do polígono de desmonte como um todo coincide com o destino dado pelo modelo de

curto prazo. Ambos os métodos subestimaram os teores de curto prazo do PD1 em 12%.

Tabela 5.7 Cenário 3. Teores médios para os polígonos de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.

Polígono de Desmonte 1						
	Teores Estimados (%Cu)			F1 _{TEOR}	DME/DMD	
	PO1	PO2	PD1			
Método Direto	0,70	0,37	0,58	1,12		
Método Indireto	0,70	0,37	0,58	1,12		
Curto Prazo	0,85	0,36	0,65			
DME	2,92	2,97	2,94			
DMD	3,01	2,98	3,00		0,98	
Destino do Material						
	PO1	PO2	PD1			
Método Direto	Britador	Estoque	Britador			
Método Indireto	Britador	Estoque	Britador			
Curto Prazo	Britador	Estoque	Britador			

Polígono de Desmonte 2							
	Teores Estimados (%Cu)				F1 _{TEOR}	DME/DMD	
	PO1	PO2	PO3	PD2			
Método Direto	0,94	0,68	1,68	1,11	1,09		
Método Indireto	0,92	0,71	2,11	1,12	1,08		
Curto Prazo	1,24	0,67	1,80	1,21			
DME	3,14	2,94	3,12	3,00			
DMD	3,09	3,01	3,09	3,06		0,98	
Destino do Material							
	PO1	PO2	PO3	PD2			
Método Direto	Britador	Britador	Britador	Britador			
Método Indireto	Britador	Britador	Britador	Britador			
Curto Prazo	Britador	Britador	Britador	Britador			

O PD2 é constituído de blocos de alto teor com a presença de um número pequeno de blocos de estéril separados no PO3 para minimizar a diluição desses blocos de alto teor durante o carregamento. Exceto pelo PO2, tanto o PO1 quanto o PO3 apresentaram uma distribuição espacial dos teores diferentes entre o MD e o MI e dos dois com relação ao curto prazo. A diferença entre as duas metodologias está diretamente relacionada ao efeito da incorporação da densidade. A tabela 5.7 mostra os teores médios desses polígonos, seus destinos e o fator de reconciliação F1_{TEOR} dos polígonos de desmonte. Note que não há diferença entre os destinos

apontados pelos MD e MI e os executados pelo curto prazo, tanto para os polígonos operacionais quanto para os de desmonte. Os teores do PD2 são subestimados em aproximadamente 8% pelo MI e em 9% pelo MD. A diferença entre as massas ao se aplicar a DMD e a DME é de 2% para os dois polígonos de desmonte.

Para o quarto cenário (figura 5.10), foram selecionados três polígonos de desmonte para serem lavrados. Esses polígonos incluem uma grande quantidade de estéril dentro deles. O PD1 é dividido em dois polígonos operacionais, um completamente de estéril (PO2) e outro com minério de baixo teor (PO1). Tanto na porção extremo-sudeste, como na porção oeste do PO1, o MD e o MI não estimaram os teores porque o controle físico dos teores (modelo geológico) não considerou essas porções. Esse fato determina a diferença das duas metodologias (MD e MI) em comparação com as estimativas do curto prazo. Na verdade, uma pequena diferença na textura desses polígonos pode ser percebida nos blocos remanescentes. Ao observar a tabela 5.8, constata-se que as duas metodologias enviaram o PO1 para a pilha de estoque assim como os modelos com as estimativas de curto prazo. Nesse caso, o MD se aproxima melhor das estimativas de curto prazo comparado ao MI. O PO2 foi enviado para o estéril pelas duas metodologias e também pelas estimativas de curto prazo.

O PD3 é uma combinação de estéril e minério de alto teor e por essa razão é dividido em dois polígonos operacionais. O PO1 mostra uma distribuição espacial dos teores (textura) diferente entre o MD e o MI e também em relação ao curto prazo (teor real). Nota-se que há uma quantidade grande de blocos acima de 2.00% de cobre gerados pelas duas metodologias e que não aparece nas estimativas de curto prazo. Essa diferença depende da representatividade das amostras usadas para estimar os teores no longo prazo e no curto prazo. Já a diferença entre as duas metodologias está relacionada à incorporação da densidade nas estimativas pelo MI. A tabela 5.8 mostra que, mesmo assim, o destino previsto tanto para os POs quanto para o PD determinado pelo curto prazo são iguais aos determinados pelo longo prazo. O fator de reconciliação mostra uma melhor reconciliação do MI, o qual superestima o teor real em 4% contra 6% superestimado pelo MD.

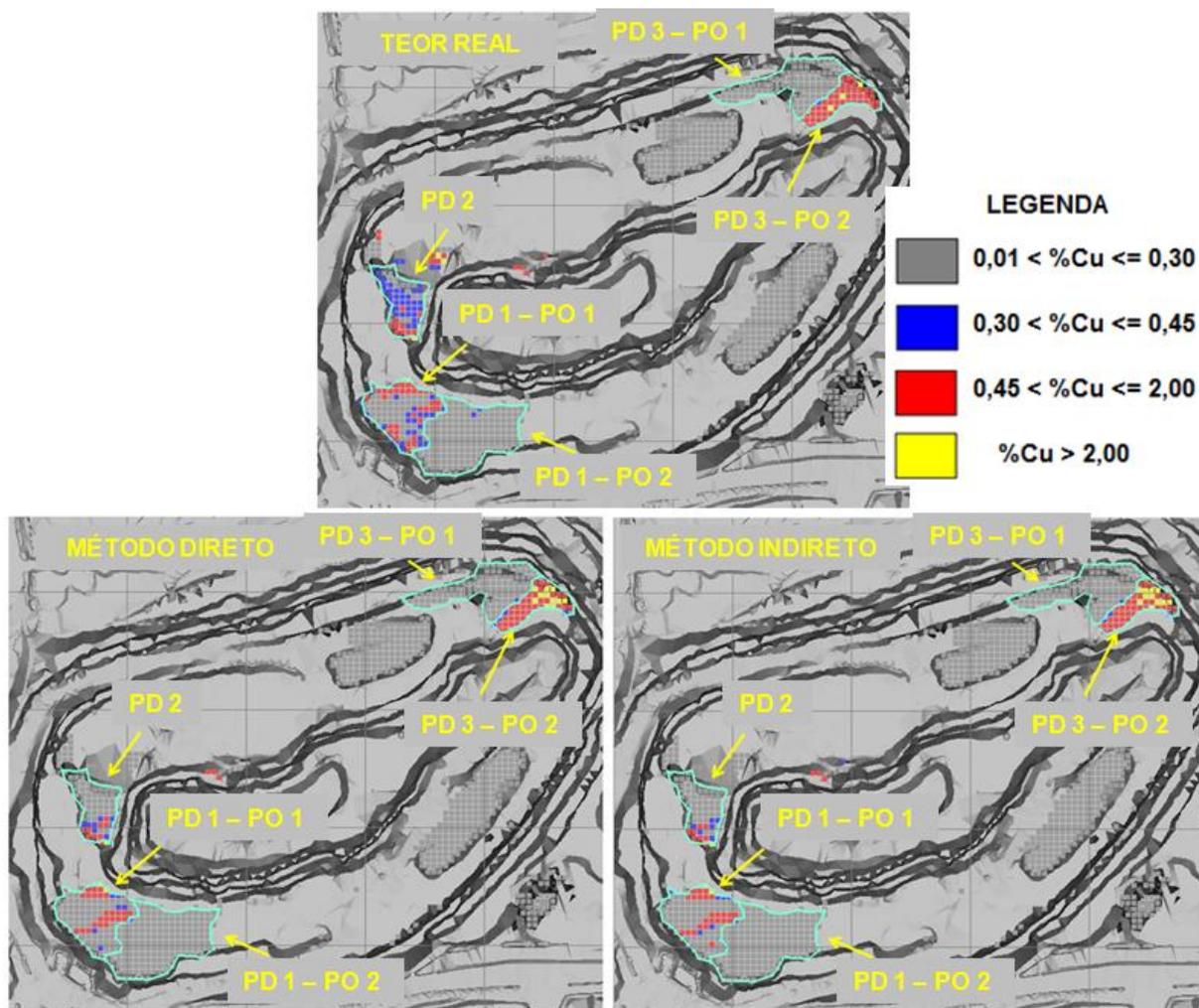


Figura 5.10 Polígonos selecionados para serem lavrados pelo planejamento de curto prazo no cenário 4 com os teores dos blocos estimados pelo curto prazo (a), MD (b) e MI (c).

Também nesses casos, a aplicação das duas densidades DMD e DME refletiu em 2% de diferença nas massas dos dois polígonos. Isso reforça a importância de se determinar a densidade local com a maior precisão possível.

Tabela 5.8 Cenário 4. Teores médios dos polígonos de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.

Polígono de Desmonte 1					
	Teores Estimados (%Cu)			F1 _{TEOR}	DME/DMD
	PO1	PO2	PD1		
Método Direto	0,37	0,02	0,17	1,41	
Método Indireto	0,33	0,02	0,16	1,50	
Curto Prazo	0,45	0,08	0,24		
DME	2,93	2,81	2,86		0,98
DMD	2,98	2,85	2,91		
Destino do Material					
	PO1	PO2	PD1		
Método Direto	Estoque	Estéril	Estéril		
Método Indireto	Estoque	Estéril	Estéril		
Curto Prazo	Estoque	Estéril	Estéril		

Polígono de Desmonte 3					
	Teores Estimados (%Cu)			F1 _{TEOR}	DME/DMD
	PO1	PO2	PD3		
Método Direto	0,01	1,40	0,50	0,94	
Método Indireto	0,01	1,37	0,49	0,96	
Curto Prazo	0,03	1,36	0,47		
DME	2,80	3,05	2,88		0,98
DMD	2,85	3,09	2,93		
Destino do Material					
	PO1	PO2	PD3		
Método Direto	Estéril	Britador	Britador		
Método Indireto	Estéril	Britador	Britador		
Curto Prazo	Estéril	Britador	Britador		

O quinto e último cenário (figura 5.11) considerou três polígonos de desmonte para serem lavrados. O PD2 é uma mistura de blocos de alto teor e de estéril e foi dividido em três polígonos operacionais. Percebe-se no PO2 uma diferença na configuração dos teores dos blocos entre o MD e o MI e entre o executado pelo curto prazo. A tabela 5.9 mostra que não foram atribuídos destinos diferentes para os blocos selecionados dentro dos polígonos pelas duas metodologias em comparação com o realizado de fato. Nesse caso, o teor médio dos blocos obtidos pelo MD no PO2 se aproxima melhor do teor médio de curto prazo.

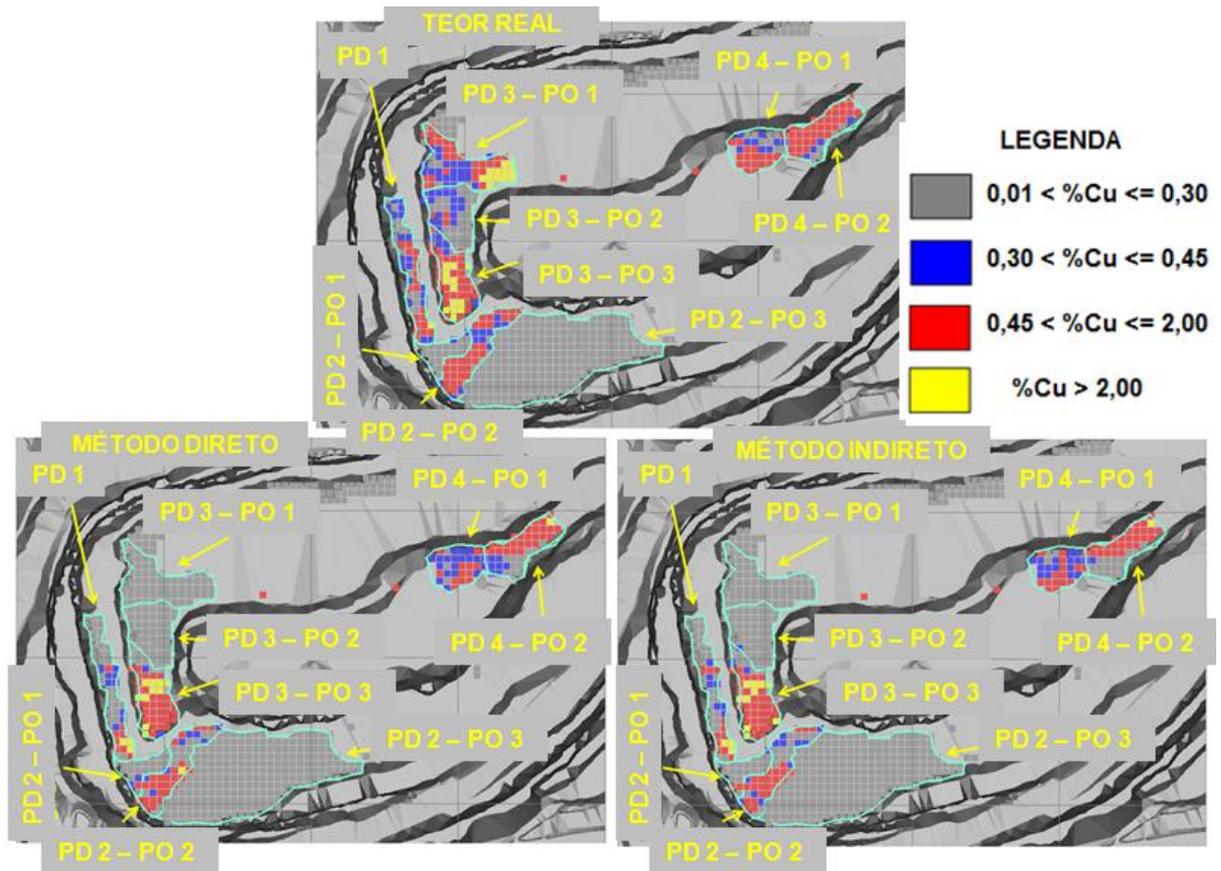


Figura 5.11 Polígonos selecionados para serem lavrados pelo planejamento de curto prazo no Cenário 5 com os teores dos blocos estimados pelo curto prazo (a), MD (b) e MI (c).

O PD3 foi dividido em três polígonos operacionais. Porém apenas o PO3 pertence ao setor Sequeirinho. Ambas as metodologias atribuíram o mesmo destino aos blocos do polígono que as estimativas de curto prazo.

Tabela 5.9 Cenário 5. Teores médios dos polígonos de desmonte e seus respectivos polígonos operacionais e o fator de reconciliação para o MD e o MI.

Polígono de Desmonte 2						
	Teores Estimados (%Cu)				F1 _{TEOR}	DME/DMD
	PO1	PO2	PO3	PD2		
Método Direto	0,14	0,6	0,01	0,11	1,55	
Método Indireto	0,14	0,52	0,01	0,10	1,70	
Curto Prazo	0,19	0,76	0,04	0,17		
DME	2,92	2,93	2,79	2,82		
DMD	2,85	3,01	2,85	2,88		0,98
Destino do Material						
	PO1	PO2	PO3	PD2		
Método Direto	Estéril	Britador	Estéril	Estéril		
Método Indireto	Estéril	Britador	Estéril	Estéril		
Curto Prazo	Estéril	Britador	Estéril	Estéril		

Polígono de Desmonte 3						
	Teores Estimados (%Cu)				F1 _{TEOR}	DME/DMD
	PO1	PO2	PO3	PD3		
Método Direto	0,00	0,05	1,32	0,41	2,24	
Método Indireto	0,00	0,05	1,31	0,41	2,24	
Curto Prazo	1,07	0,32	1,44	0,92		
DME	2,85	2,74	3,01	2,86		
DMD	3,09	2,98	3,09	3,06		0,93
Destino do Material						
	PO1	PO2	PO3	PD3		
Método Direto	Estéril	Estéril	Britador	Estoque		
Método Indireto	Estéril	Estéril	Britador	Estoque		
Curto Prazo	Britador	Estoque	Britador	Britador		

Polígono de Desmonte 4						
	Teores Estimados (%Cu)			F1 _{TEOR}	DME/DMD	
	PO1	PO2	PD4			
Método Direto	0,47	0,75	0,58	0,97		
Método Indireto	0,48	0,71	0,56	1,00		
Curto Prazo	0,47	0,68	0,56			
DME	2,82	3,08	2,97			
DMD	3,01	3,01	3,01		0,99	
Destino do Material						
	PO1	PO2	PD4			
Método Direto	Britador	Britador	Britador			
Método Indireto	Britador	Britador	Britador			
Curto Prazo	Britador	Britador	Britador			

O PD4 é uma mistura de blocos de altos teores, de baixos teores e de estéril e foi dividido em dois polígonos operacionais. A textura dos teores dos blocos no PO1 difere entre as duas metodologias e entre os teores de curto prazo. Ambos MD e MI mostram menos blocos de alto teor do que aqueles encontrados nos blocos estimados pelo curto prazo. No PO2 o MD estima uma quantidade maior de blocos de baixo teor e o MI estima uma quantidade maior de blocos de estéril se comparado às estimativas de curto prazo. As previsões para o destino de todo polígono de desmonte e para os operacionais correspondem aos destinos reais dos blocos lavrados. O teor médio do polígono de desmonte pelo MI corresponde ao teor médio das estimativas de curto prazo, enquanto que o modelo MD superestima aquele em 3%. A diferença nas massas para o PD2, PD3 e PD4 foram de 2, 7 e 1%, respectivamente, quando aplicada às duas densidades DME (densidade média estimada) e DMD (densidade média do domínio).

Feita a comparação utilizando cinco cenários entre os polígonos baseados nas estimativas de curto prazo e aplicados os mesmos polígonos no modelo de blocos de longo prazo, pôde-se perceber que o fato de incorporar a densidade nas estimativas de longo prazo não foi suficiente para alterar o destino dos blocos estimados pelo longo prazo dentro do polígono comparado com o destino dado pelas estimativas de curto prazo. Isso ocorre tanto para os polígonos de desmonte quanto para os polígonos operacionais.

Ao analisar cada polígono, embora existam erros grandes para pequenas massas reconciliadas, o fato das metodologias acertarem os destinos dado pelo curto prazo mostra, de certa forma, a qualidade das mesmas. É possível perceber também que o MI aproximou melhor das estimativas de curto prazo com uma maior frequência que o MD.

Por fim, foi observado que ao se aplicar uma densidade média na conversão dos volumes em massas dos polígonos uma atenção deve ser dada para se determinar o método que melhor se aproxime da densidade real do mesmo. Caso contrário, pode haver uma diferença grande entre a massa total e de metal contido esperado e a efetivamente realizada nesses polígonos. Sendo assim, nessa situação recomenda-se o uso do MI e da estimativa da densidade dos blocos.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações

São apresentadas neste capítulo as conclusões a respeito do uso da densidade na avaliação de recursos e reservas. Sugestões para trabalhos futuros com o intuito de melhor averiguar a eficiência desses usos também são apresentadas.

6.1. Conclusão

O presente estudo avaliou a aplicação da densidade na avaliação de recursos e reservas minerais de três formas. A primeira delas consistiu do uso da densidade no momento da regularização das amostras como um fator de ponderação para gerar os teores médios das compostas. A segunda forma consistiu em usar a densidade como um fator de ponderação no momento da realização das estimativas utilizando-se de duas variáveis acumuladas, TCD e CD. A terceira consistiu da aplicação de um modelo de densidade estimada em cada bloco assim como os teores de cobre para a conversão volume-massa e massa-quantidade de metal. Essas duas primeiras formas de se aplicar a densidade na avaliação de recursos e reservas foram combinadas no que se chamou MI (método indireto). Esse método foi comparado com o MD (método direto), que realizou as estimativas dos teores de cobre usando compostas regularizadas considerando apenas o comprimento das mesmas como fator de ponderação no momento da regularização e estimando os teores dos blocos diretamente a partir dessas compostas.

Para tanto, buscou-se primeiramente entender como a densidade varia nas rochas e em amostras. Os resultados dessa análise mostraram que a densidade varia de acordo com a composição da rocha e que nem sempre essa variação está relacionada ao mineral minério em questão. Essa variação se dá em função dos minerais constituintes das mesmas que ocorrem em maior proporção e depende de como a variação na proporção desse mineral pode ocorrer. Foi observado que a densidade pode variar nas amostras caso intervalos onde ocorrem grandes concentrações de minerais mais densos não sejam individualizados no momento de determinação da densidade de forma direta a partir de testemunhos de sondagem.

Em seguida, no banco de dados utilizado neste estudo, foi verificada uma diferença entre as compostas regularizadas considerando a densidade e o comprimento como fator de ponderação e entre as compostas geradas a partir da regularização dessas, considerando apenas o comprimento como fator de ponderação. Os resultados mostraram que os dois métodos de regularização não produziram viés em relação às médias globais das amostras e que o método que não considera a densidade como fator de ponderação subestimou os teores em relação ao que considera a densidade em 0.20% para o domínio de baixo teor e em 0.50% para o domínio de alto teor. Porém, essas diferenças chegaram a até 14% no domínio de baixo teor e em 21% no domínio de alto teor para algumas compostas individualmente. Essa diferença local pode ser potencializada no momento da realização das estimativas caso a krigagem atribua pesos grandes a essas amostras com diferença relativa alta no valor resultante de um bloco estimado.

Após avaliar as diferenças observadas sobre os teores de cobre pelos dois métodos de regularização de amostras foram feitas as estimativas dos teores de cobre pelo MD e pelo MI. As diferenças nas estimativas dos teores de cobre do domínio de baixo teor mostraram que o MI tende a subestimar os teores de cobre em relação aos teores obtidos pelo MD. A mediana de diferença relativa entre os dois métodos mostra que em média, nesse domínio, o MI subestimou os teores de cobre em 0.5%.

Com relação ao domínio de alto teor, as diferenças nas estimativas dos teores de cobre mostraram que o MI tende a superestimar os teores dos blocos em relação ao MD. A mediana da diferença relativa mostra que, em média, o MI superestimou os teores em 1,18%. Esses resultados confirmam o observado na tabela 4.81, em que nos dois domínios o desvio padrão e o coeficiente de correlação dos teores estimados pelo MI são maiores dos que os gerados pelo MD. Esse resultado sinaliza para a capacidade do MI em gerar estimativas de teores com maior variabilidade, diminuindo o efeito suavizador provocado pelo processo de krigagem. Porém o efeito dessa variabilidade pode estar associado à variabilidade da densidade ou ao processo de desacumulação.

Observadas as diferenças entre as estimativas geradas pelas duas metodologias foi feita a reconciliação dos teores considerando-se períodos mensais, trimestrais, quadrimestrais, semestrais e anuais ao longo dos três anos de produção.

Pode-se perceber uma relação entre o erro gerado das estimativas de longo prazo e as de curto prazo e os períodos de reconciliação. Para períodos menores o erro de ambas as metodologias foram maiores e para períodos maiores esses erros foram menores, resultado intuitivamente esperado quando se reconciliam estimativas de longo prazo com estimativas de curto prazo.

Para períodos curtos de reconciliação houve uma oscilação no desempenho das duas metodologias. Porém, à medida que se aumentava o período de reconciliação, o MI reconciliava melhor que o MD. Ao considerar os três anos de produção juntos o MD subestimou os teores de cobre do setor Sequeirinho em 4%, enquanto o MI subestimou o mesmo em apenas 1%. Esse resultado mostrou que o MI foi o mais indicado para estimar os teores de cobre no depósito, dada a variabilidade da densidade no mesmo.

Ao comparar as estimativas dos teores de cobre geradas pelas duas metodologias com as estimativas de curto prazo em polígonos selecionados para desmonte baseados nessas mesmas estimativas, observou-se que de acordo com o teor de corte aplicado, os destinos dos blocos pertencentes a esses polígonos foram os mesmos quando esses polígonos eram aplicados às estimativas de longo prazo geradas pelas duas metodologias. Esse resultado mostra a qualidade das estimativas geradas pelas duas metodologias. Porém, mesmo nesses casos foi observado um melhor desempenho do MI.

Tomando como referência as estimativas de teores de cobre do curto prazo, duas densidades foram aplicadas a esses polígonos para determinar suas massas e respectivas quantidades de metal contidas. A primeira densidade é constituída de densidades médias observadas em faixas de teores predeterminadas. A segunda densidade é constituída da densidade média do polígono obtida pelas estimativas das densidades dos blocos desses polígonos. Os resultados mostraram que na maioria dos casos essas massas dos polígonos variaram em aproximadamente 2% em relação a quando aplicado a eles essas duas densidades. Esse fato mostra a importância de se determinar localmente com a maior precisão possível não somente os teores, mas também as densidades, uma vez que as mesmas podem ter grande influência na quantidade de metal desses polígonos de desmonte prevista e realizada.

De maneira geral, o MI apresentou melhores resultados nas reconciliações com as estimativas de curto prazo. Para três anos de reconciliação essa diferença foi apenas de 1% contra 4% do método direto. Essa diferença está associada à incorporação da densidade na regularização das amostras e no uso das variáveis acumuladas TCD e CD pelo MI. No que se refere ao uso da densidade na conversão volume-massa e massa-quantidade de metal, a diferença entre uma densidade média e a densidade estimada apresentou, na maioria dos casos, diferença de 2%. Esse fato realça a necessidade de determinar a densidade com maior precisão localmente. Dessa forma, acredita-se que o MI juntamente com a densidade estimada constituiu o tratamento mais adequado a ser dado ao atributo densidade na avaliação de depósitos em que há uma variabilidade da densidade.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com base na metodologia proposta neste estudo e nos resultados obtidos seguem como sugestões para trabalhos futuros algumas questões que não foram respondidas apenas pelos resultados gerados no presente estudo.

- i. Aplicar o MI em outros depósitos de cobre e de outros metais como níquel, zinco-chumbo, manganês, dentre outros, comparando os resultados através de reconciliação;
- ii. Reconciliar o MI com estimativas de curto prazo também estimadas pelo MI.
- iii. Aplicar ponderação pela densidade em para minérios onde são amostradas frações granulométricas e materias recuperados dentro de processos de lavagem ou peneiramento.

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, T. de, *A perfilagem geofísica gama-gama em depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero: uma ferramenta para medições de densidade de rochas*. 2011. Mestrado em Engenharia - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ARMSTRONG, M. *Basic Linear Geostatistics*. Berlim: Springer, 1998. p. 49.
- BEVAN, P. A. *The weighting of assays and the importance of both grade and specific gravity*. CIM Bulletin, vol. 86, N. 967, 1993. p. 88-90.
- CARVALHO, E. A. et al. *Níquel - Mineração Serra da Fortaleza*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2002.
- DADSON, A. S. Ore estimates and specific gravity. In: *Ore reserve estimation and grade control*, CIM special v. 9, Montreal, 1968. p. 3-4.
- DAGBERT, M. Comments on the paper "The estimation of mineralized veins: A comparative study of direct and indirect approaches" by D. Marcotte and A. Boucher. In: MARCOTTE, D.; BOUCHER, A. *Exploration and Mining Geology*, vol.3, 2001. p. 243-244.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. *Geostatistical software library and user's guide*. 2. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 1998.
- DIAS, P. M. et al. The Effects of Considering Spatial Bulk Density Variability in Mineral Resources and Reserves. In: *Proceedings International Symposium on Application of Computers and Operations Research in Mineral Industry*, New South Wales: Universidade de Wollongong, 35 ed., 2011. p 81-88.
- HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M. *Open pit mine planning & design*, 2. ed. Londres: Taylor & Francis, 2006. p 194-195.
- JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, CH. J. *Mining geostatistics*. Londres: Academic Press, 1978. p 172-173, 197-199.
- KRIGE, D. *Lognormal-de Wijsian Geostatistics for Ore Evaluation*. Johannesburg: South Africa Institute of Mining and Metallurgy, Monograph Series, 1981.
- LAINÉ, E. *Kriging estimation of block densities in Ahmavaara PGE-deposit*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERALS INDUSTRIES, 31., 2003, Cape Town: South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003. p. 367-371.
- 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. 1996, Pensilvânia: University Park, 1996. p. 93-99.

MARCOTTE, D.; BOUCHER, A. The estimation of mineralized veins: A comparative study of direct and indirect approaches. In: _____. *Exploration and Mining Geology*, vol.3, 2001a. p. 235-242.

MARCOTTE, D.; BOUCHER, A. Author's reply to 'Comments on the Estimation of Mineralized Veins: A Comparative Study of Direct and Indirect Approaches' by M. Dagbert. In: _____. *Exploration and Mining Geology*, vol.3, 2001b. p. 245-247.

NOBLE, A. C. Mineral resource estimation. In: HARTMAN, H. L. (ed.) *Mining Engineering Handbook*, 2. ed., Littleton: SME, 2011. p. 206.

OLIVEIRA, L. J. de, *Avaliação do uso da perfilagem geofísica para obtenção de informações secundárias para utilização em co-estimativas de variáveis geológico-mineiras*. 2005. Mestrado em Engenharia - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PARKER, H. M. Reconciliation principles for the mining industry. In: *Proceedings International Symposium on Application of Computers and Operations Research in Mineral Industry*, New South Wales: Universidade de Wollongong, 35 ed. 2011. p 47-67.

POTAPOFF, P. Ore reserve estimation and grade control methods for nickel-copper-iron sulphide deposits at Sudbury, Ontario. In: *Ore reserve estimation and grade control*, CIM Special, vol. 3, 1968. p 130-138.

RENDU, J. M. *An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation*. Johannesburg: Institute of Mining and Metallurgy, 1981.

ROBERTO, J. B. *Influência dos diversos tipos litológicos nas operações de concentração da instalação de beneficiamento de Brucutu*. 2010. Monografia (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, P. A. *Estudo de densidade de rocha e comparação de técnicas de medição na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Itabira: Instituto Superior de Educação de Itabira, 2006.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

VALLÉ, M.; COTÊ, D. *The Guide to the Evaluation of Gold Deposits: Integrating Deposits Evaluation and Reserve Inventory Practices*. CIM Bulletin, 1992. 85(957):50-61.

WEBBER, T. *Estimativa de qualidade de carvão usando krigagem dos indicadores aplicados a dados obtidos por perfilagem geofísica*. 2008. Mestrado em Engenharia - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.