



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Pós-Graduação em Geociências
Área de Administração e Política de Recursos Minerais

WALMIR CARVALHO PEREIRA

**UTILIZAÇÃO DE VARIÁVEL MINERALÓGICA NA ESTIMATIVA DE
RESERVAS DE MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências na Área de Administração e
Política de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

Este exemplar corresponde
à redação final da tese defendida
por Walmir Carvalho Pereira
e aprovada pela Comissão Julgadora
em 24/02/03.


ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

Fevereiro – 2003

i
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNICAMP
BIBLIOTECA CEN
SEÇÃO CIRCULA

UNIDADE	30
Nº CHAMADA	UNICAMP P414u
V	EX
TOMBO BC/	51936
PROC.	124103
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/05/03
Nº CPD	

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IG - UNICAMP

CM00182337-B

BIB ID 289858

P414u Pereira, Walmir Carvalho
Utilização de variável mineralógica na estimativa de reservas de minério de ferro / Walmir Carvalho Pereira.- Campinas, SP.: [s.n.], 2003.

Orientador: Armando Zaupa Remacre
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Geologia – métodos estatísticos. 2. Pesquisa Mineral. 3. Minério de Ferro. 4. Probabilidade. I. Remacre, Armando Zaupa II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Pós-Graduação em Geociências

Área de Administração e Política de Recursos Minerais

WALMIR CARVALHO PEREIRA

**UTILIZAÇÃO DE VARIÁVEL MINERALÓGICA NA ESTIMATIVA DE
RESERVAS DE MINÉRIO DE FERRO**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

Aprovada em: 25/02/2003

PRESIDENTE: Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

Prof. Dr. Saul Barisnik Suslick

Prof. Dr. Ricardo Sturaro

Campinas, de 2003

Dedicatória

A toda minha família, que sempre me apoiou
nos estudos

Agradecimentos

À SAMARCO MINERAÇÃO S.A., pela oportunidade de realizar este mestrado.

Ao Engenheiro João Pedro da Silva, pelo apoio administrativo e liberação, por parte da SAMARCO, para frequentar o curso de pós-graduação, terminar e defender esta dissertação.

Ao Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre, pela orientação, contribuição e direcionamento proporcionados.

Ao colega Frederico Augusto, pela ajuda na obtenção dos resultados do Capítulo 4 desta dissertação.

Ao Engenheiro Antônio Camilo, pelas dicas no início dos trabalhos.

Ao colega Moacir Cornetti, pelo apoio em informática.

À Geóloga Júnia Rocha, pelo apoio na elaboração de parte do Capítulo 2 desta dissertação.

Ao Técnico Alan Súlivan, pela paciente formatação, edição e revisão do texto.

À Técnica Camila Souza, pela edição de parte das figuras do Capítulo 2.

Aos Engenheiros Norberto Toríbio, Kessel Godinho e ao Geólogo Álvaro Gabriel, pelas sugestões e opiniões.

Aos demais colegas do Departamento de Planejamento de Mina da SAMARCO, pela troca de conhecimento e experiência profissionais durante a elaboração desta dissertação.

E a Deus, por tudo.

Sumário

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Sumário.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Fotos.....	xi
Lista de Siglas e Abreviaturas	xii
Lista de Tabelas.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS.....	2
JUSTIFICATIVA.....	3
METODOLOGIA	3
ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
 CAPÍTULO 1	
1.1. Introdução	5
1.2. Estimativa por Krigagem	5
1.3. Simulação Geoestatística	9
1.3.1. Noções Gerais.....	9
1.3.2. Processo Estocástico : Definição Matemática.....	11
1.3.3. Simulação Sequencial Gaussiana Condicionada (SSGC)	11
1.4. Conceitos de Recursos e de Reservas Recuperáveis	13
1.5. Conceitos de Funções de Recuperação	15
1.5.1. Funções $T(z)$ e $m(z)$ para Variáveis Contínuas.....	16

1.5.1.1. Função Tonelagem de Minério - $T(z)$	16
1.5.1.2. Função Teor Médio - $m(z)$	17
1.5.2. Funções $T(z)$ e $m(z)$ para Variáveis Discretas.....	19
1.6. Conceitos de Efeito de Suporte e de Informação.....	20

CAPÍTULO 2

2.1. Introdução	22
2.2. Dados Gerais da Área em Estudo.....	22
2.3. Aspectos Geológicos da Área em Estudo.....	26

CAPÍTULO 3

3.1. Introdução	31
3.2. Descrição de Procedimentos de Caracterização Mineralógica.....	31
3.3. Banco de Dados e Localização dos Furos de Sonda e de Perfuratriz.....	35
3.4. Análise Estatística da Hematita Especular.....	40
3.5. Estatística Espacial da Hematita Especular.....	45
3.6. Estimativa da Hematita Especular por Krigagem.....	47
3.7. Implementação da Simulação Gaussiana Condicionada da He.....	51
3.7.1. Preparação dos Dados Amostrais.....	51
3.7.2. Estabelecimento das Simulações.....	52
3.7.3. Simulações nos Blocos de Lavra.....	57

CAPÍTULO 4

4.1. Introdução.....	62
4.2. Curvas da Função Teor Médio e Determinação de Teores de Corte.....	62
4.3. Curvas da Função Tonelagem de Minério e Estimativa de Reservas.....	67
4.3.1. Análise Relativa de Custos para Mudança da Malha de Controle de Pré-Lavra da Hematita Especular.....	73

CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
BIBLIOGRAFIA	79
ANEXOS	
Anexo 1.....	80
Anexo 2.....	81
Anexo 3.....	83

Lista de Figuras

Figura 1.5.1.1: Função $T(z)$	17
Figura 1.5.1.2: Função $m(z)$	18
Figura 2.2.1: Localização Geral das Operações da SAMARCO.....	23
Figura 2.2.2: Localização do Complexo Alegria no Quadrilátero Ferrífero.....	23
Figura 2.2.3: Localização dos Depósitos da SAMARCO no Complexo Alegria.....	25
Figura 2.3.1: Seção Vertical Típica do Modelo Litotipológico de Alegria 9.....	29
Figura 2.3.2: Seção Horizontal Típica do Modelo Litotipológico de Alegria 9.....	30
Figura 3.2.1: Esquema 4x1 de Preparação das Lâminas de Seção Polida.....	32
Figura 3.3.1: Mapa Base dos Furos de Sonda.....	37
Figura 3.3.2: Mapa Base dos Furos de Perfuratriz.....	38
Figura 3.3.3: Teores de Hematita Especular no Nível 1.168 do Banco 1.152.....	39
Figura 3.3.4: Teores De Hematita Especular no Nível 1.184 do Banco 1.176.....	40
Figura 3.4.1: Histograma da Hematita Especular - Furos de Sonda e de Perfuratriz.....	42
Figura 3.4.2: Representação Gráfica da Obtenção da Média Representativa de He.....	43
Figura 3.4.3: Histograma da Hematita Especular - Furos de Sonda, Perfuratriz e Global.....	45
Figura 3.5.1: Variogramas para He.....	47
Figura 3.6.1: Histogramas dos Teores Krigados.....	49
Figura 3.6.2: Mapas de Imagens da Krigagem de He no Banco 1.152.....	50
Figura 3.7.1.1: Variogramas da Variável He Transformada.....	52
Figura 3.7.2.1: Verificação do Número de Simulações.....	53
Figura 3.7.2.2: Histogramas de 6 Simulações.....	54
Figura 3.7.2.3: Gráfico Representativo da Estatística Básica das Simulações.....	55
Figura 3.7.2.4: Verificação da Reprodução do Modelo Variográfico nas Simulações.....	56
Figura 3.7.3.1: Gráfico Comparativo do Resumo de Resultados da Simulação e da Krigagem em Blocos de Lavra.....	58
Figura 3.7.3.2: Mapas de Imagens da Simulação 27 e da Krigagem da He no Banco 1.152 - Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.....	60

Figura 3.7.3.3: Mapas de Imagens da Simulação 27 e da Krigagem da He no Banco 1.152 - Blocos de 25 x 25 x 24m.....	6
Figura 4.2.1: Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.....	6
Figura 4.2.2: Detalhe das Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.....	6
Figura 4.2.3: Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m.....	6
Figura 4.2.4: Detalhe das Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m.....	6
Figura 4.2.5: Histogramas dos Teores de Corte das Simulações.....	6
Figura 4.3.1: Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.....	6
Figura 4.3.2: Detalhe das Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.....	6
Figura 4.3.3: Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m.....	6
Figura 4.3.4: Detalhe das Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m.....	6
Figura 4.3.5: Gráfico da Estimativa de Reservas para Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.....	7
Figura 4.3.6: Gráfico da Estimativa de Reservas para Blocos de 25 x 25 x 24m.....	7
Figura 4.3.7: Gráfico dos Resultados da Estimativa de Reservas.....	7

Lista de Fotos

Foto 3.2.1: Fotomicrografia Apresentando Hematita Especular (He)	34
Foto 3.2.2: Fotomicrografia Apresentando Hematita Especular (He) e Goethita (Gt).....	34

Lista de Siglas e Abreviaturas

CCDF	Função Densidade de Probabilidade Acumulada Condicionada
CDF	Função Densidade de Probabilidade Acumulada
EW	Direção Leste-Oeste
FA	Função Aleatória
FR	Funções de Recuperação
Gt	Goethita
He	Hematita Especular
KO	Krigagem Ordinária
NS	Direção Norte-Sul
P	Teor de Fósforo
PDF	Função Densidade de Probabilidade
PPC	Perda por Calcinação
SSG	Simulação Sequencial Gaussiana
SSGC	Simulação Sequencial Gaussiana Condicionada
tc	Teor de Corte
VA	Variável Aleatória
VR	Variável Regionalizada

Lista de Tabelas

Tabela 3.3.1: Resumo do Banco de Dados.....	36
Tabela 3.4.1: Resultados da Estatística Básica da Hematita Especular nos Furos de Sonda e de Perfuratriz.....	41
Tabela 3.4.2: Resultados da Estatística Básica da Hematita Especular	44
Tabela 3.5.1: Parâmetros do Modelo Variográfico.....	46
Tabela 3.6.1: Resumo Estatístico dos Teores Krigados	49
Tabela 3.7.1.1: Parâmetros do Modelo Variográfico da Variável He Transformada	51
Tabela 3.7.2.1: Estatística Comparativa das Simulações (em % de He).....	54
Tabela 3.7.3.1: Resumo Estatístico Comparativo-Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m	57
Tabela 3.7.3.2: Resumo Estatístico Comparativo-Blocos de 25 x 25 x 24m	58
Tabela 4.2.1: Resumo Estatístico dos Teores de Corte Simulados e Teor de Corte da Krigagem para Obtenção de 47% de He.....	65
Tabela 4.3.1: Resultados da Estimativa de Reservas.....	70
Tabela 4.3.1.1: Planilha de Custos.....	73
Tabela 4.3.1.2: Resultados do Balanço Financeiro da Mudança de Malha de Controle de Pré-Lavra da He.....	74



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Pós-Graduação em Geociências
Área de Administração e Política de Recursos Minerais

**UTILIZAÇÃO DE VARIÁVEL MINERALÓGICA NA ESTIMATIVA DE
RESERVAS DE MINÉRIO DE FERRO**

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Walmir Carvalho Pereira

Nesta dissertação é apresentada uma metodologia para estimativa de reservas de minério de ferro, utilizando dados mineralógicos representados pelo mineral hematita especular. No procedimento sugerido, os métodos geoestatísticos de estimativa por krigagem e de simulação condicional são usados para caracterizar a variável mineralógica hematita especular em modelos de blocos. Teores de corte e reservas recuperáveis são determinados pelas funções de recuperação teor médio e tonelagem de minério, assumindo que a especificação requerida das reservas, em termos do teor médio de hematita especular, já esteja estabelecida. Os resultados de teores de corte e de reservas recuperáveis dos modelos de krigagem e de simulação condicional são comparados e demonstram que existem diferenças significativas entre estes modelos. A metodologia foi aplicada em um depósito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero e se justifica pela influência da hematita especular no desempenho dos processos industriais e nas propriedades físicas dos produtos de minério de ferro.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



UNICAMP

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Pós-Graduação em Geociências
Área de Administração e Política de Recursos Minerais**

**THE USE OF MINERALOGICAL VARIABLE FOR ESTIMATING IRON ORE
RESERVES**

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

Walmir Carvalho Pereira

This dissertation presents a methodology to estimate iron ore reserves, by using mineralogical data represented by the mineral specular hematite. In the suggested procedure, the geostatistical methods of kriging and conditional simulation are used to characterize the mineralogical variable specular hematite in block models. Cut-off grades and recoverable reserves are determined by using the recovery functions average grade and ore tonnage, adopting, as an assumption, that the required specification of the reserves is already established, in terms of the average of the specular hematite content. The results of cut-off grades and recoverable reserves from the krigged model and from the conditional simulation model are compared and they show significant differences between these models. The methodology was applied in an iron ore deposit located in the Iron Quadrangle and it is justified due to the influence of the specular hematite in the performance of the industrial processes and in the physical properties of the iron ore products.

INTRODUÇÃO

O contínuo estabelecimento de mercados globalizados tem criado um ambiente extremamente competitivo, onde o foco no cliente é a prioridade e as empresas se vêem obrigadas a reduzir custos, oferecer melhores preços e melhorar a qualidade de seus produtos finais.

O mercado de minério de ferro está inserido nessa realidade, pois além de ser globalizado e muito competitivo, está vinculado ao mercado de aço, tradicionalmente oscilante e bastante dependente da situação econômica mundial.

Para melhorar sua competitividade, a indústria siderúrgica tem que atuar em programas de aumento de produtividade nas etapas de aglomeração e de redução, principalmente através da melhoria da qualidade de insumos, os quais são provenientes da indústria de mineração de ferro. Dessa forma, o fornecimento de minérios precisa obedecer a um conjunto de especificações técnicas cada vez mais rigorosas e o adequado conhecimento das características mineralógicas do minério de ferro é fundamental, já que estas características afetam o desempenho dos processos de aglomeração, tais como a sinterização e a pelotização, e também dos processos de redução.

Nas minerações de ferro, as novas tendências de elaboração de modelos geológicos e tipológicos representativos das formações ferríferas incluem a identificação e quantificação dos minerais como critério predominante de individualização de tipos de minérios, pois a composição mineralógica é a principal condicionante do comportamento dos minérios nas diversas etapas dos processos de mineração e de siderurgia, seja beneficiamento, pelotização, sinterização ou redução.

A mineralogia dos minérios de ferro tem como minerais principais a *hematita*, nas formas especular e porosa, também chamadas de *especularita* e *martita*, respectivamente, a *goethita* e a *magnetita*. Cada um destes minerais-minério afeta as propriedades físicas e metalúrgicas dos produtos de minério de ferro de forma específica.

A hematita especular, ou especularita, é o mineral-minério que contribui para o aumento da densidade e resistência física das pelotas de minério de ferro, características determinantes da produtividade da pelotização, do manuseio subsequente das pelotas no transporte e dos fornos de redução.

O controle dos teores de hematita especular nos minérios é habitualmente feito de maneira qualitativa, através da interseção do modelo tipológico com o modelo de blocos de lavra e também de maneira quantitativa, utilizando-se amostras locais das frentes de lavra e estimativas dos blocos de decisão de lavra, através de informações de perfurações de pesquisa exploratórias tais como furos de perfuratriz e de sonda.

Uma vez que a variável teor de hematita especular é importante na definição dos sequenciamentos de lavra de longo e curto prazos, justifica-se quantificar o impacto, a estimativa de reservas de minério de ferro, resultante da aplicação de teores de corte em hematita especular.

OBJETIVOS

No âmbito geral, esta dissertação visa estimar reservas de minério de ferro, utilizando-se a mineralogia, representada pela variável teor de hematita especular, como parâmetro de qualidade das reservas. De maneira específica, objetiva-se:

1. Descrever as características estatísticas e a variabilidade espacial da variável teor de hematita especular.
2. Implementar modelos de estimativa e de simulação geoestatística para a determinação dos teores de hematita especular em blocos de lavra e comparar os resultados entre teores estimados e simulados.
3. Definir teores de corte de hematita especular, através de curvas do tipo teor médio em função do teor de corte, a partir de um teor médio previamente especificado.
4. Determinar as reservas através de curvas do tipo tonelagem de minério em função do teor de corte.

JUSTIFICATIVA

A utilização da variável hematita especular na definição de teores de corte para obtenção de reservas é justificada pela influência desta variável no desempenho dos processos industriais nas propriedades físicas dos produtos de minério de ferro. Segundo COSTA *et al* (1998), esta influência pode ser verificada através de ganhos de produtividade nas etapas de moagem e flotação dos processos de beneficiamento e nas etapas de filtragem e queima dos processos de pelotização, bem como através do aumento da resistência à compressão da pelota final.

METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, foi obedecida a seguinte metodologia:

1. Revisão bibliográfica, incluindo a revisão de conceitos teóricos sobre estimativa por *krigagem*, simulação geoestatística (destacando o método de *simulação sequencial gaussiana condicionada*), recursos “*in situ*” e reservas recuperáveis, funções de recuperação e efeitos de suporte e de informação.
2. Compilação dos dados amostrais da área alvo do estudo de caso, em especial do banco de dados da variável mineralógica teor de hematita especular.
3. Implementação do modelo de estimativa e de simulação geoestatística da variável mineralógica teor de hematita especular em blocos de lavra, incluindo a comparação entre os resultados obtidos dos dois modelos.
4. Obtenção das curvas representativas das funções de recuperação teor médio em função do teor de corte e tonelagem de minério em função do teor de corte, provenientes do modelo de estimativa e de simulação geoestatística da hematita especular, incluindo a comparação dos resultados obtidos via blocos estimados e blocos simulados, além da definição dos teores de corte.

ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 4 capítulos, nos quais estão descritos aspectos teóricos e práticos que se referem ao uso de dados mineralógicos representados pela variável mineralógica teor de hematita especular para estimativa de reservas recuperáveis de minério ferro.

No Capítulo 1 é feita uma revisão teórica sobre (i) krigagem; (ii) simulação geoestatística destacando o método de simulação sequencial gaussiana; (iii) conceitos de recursos e de reservas; (iv) conceitos de funções de recuperação; e (v) conceitos de efeito de suporte e de informação.

No Capítulo 2 são apresentadas as informações gerais sobre a área escolhida para estudo de caso.

No Capítulo 3 são fornecidas as informações relevantes referentes aos procedimentos de caracterização mineralógica, é feita a compilação dos dados para o estudo de caso e implementação da krigagem e da simulação sequencial gaussiana condicionada para a variável mineralógica teor de hematita especular.

No Capítulo 4 são apresentadas as curvas teor médio em função do teor de corte e curvas tonelagem de minério em função do teor de corte, é feita a definição de teores de corte e determinação de reservas.

Ao final são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO 1

1.1 – Introdução

Neste capítulo é feita uma síntese da bibliografia fundamental, através da revisão bibliográfica de assuntos abordados na dissertação. No Capítulo 1.2 são revisados os conceitos básicos de estimativa por krigagem. A simulação geoestatística é revisada no Capítulo 1.3, no qual os Capítulos 1.3.2 e 1.3.3 são textos modificados do conteúdo encontrado em OLIVEIRA (1997). O Capítulo 1.4 revisa os conceitos de recursos e de reservas recuperáveis; em seguida, aspectos referentes às funções de recuperação são revisados no Capítulo 1.5 e finalmente, os conceitos de efeito de suporte e de informação são revisados no Capítulo 1.6. A sequência de assuntos tratados nos Capítulos 1.4, 1.5 e 1.6 foi baseada em CRUZ JÚNIOR (1998).

1.2 – Estimativa por Krigagem

“A geoestatística foi desenvolvida para suprir a necessidade de medida da exatidão da estimativa e a krigagem representa o método que fornece o melhor estimador linear das estimativas locais. O propósito da krigagem é o de conhecer o melhor estimador do valor real de uma Variável Regionalizada (VR) num dado espaço ou domínio, conhecendo os valores desta VR obtidos através de amostras coletadas em locais estruturalmente ligados àquele espaço. O método de krigagem consiste essencialmente em procurar um estimador, combinação linear de toda a informação disponível, cujos coeficientes (ponderadores a associar aos diversos valores amostrados, quer interiores ou exteriores ao espaço que se quer estimar) obedecem a duas condições, uma de universalidade (não enviesamento) e outra de optimalidade (variância de estimação mínima)” (em NORONHA (2001)).

A krigagem leva em consideração as características geométricas (formas, dimensões e domínio a estimar e a disposição das amostras) e estruturais, definidas através do instrumento base da geoestatística, denominado de *variograma*.

Segundo JOURNEL and HUIJBREGTS (1978), o estimador de krigagem é linear forma:

$$z_{(x_k)}^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

onde $z_{(x_k)}^*$ é a estimativa por krigagem no ponto x e λ_i são os ponderadores aplicados informações experimentais $z(x_i)$. Além disso, este estimador deve satisfazer as seguintes propriedades:

1. $z_{(x_k)}^*$ deve ser um estimador não enviesado, isto é: $E[Z^*(x)] = E[Z(x)]$, onde E tem significado de esperança matemática e $Z^*(x)$ é a estimativa de uma Função Aleatória (FA) $Z(x)$ no ponto x . Desta condição vem: $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$.
2. a variância de estimação (variância de krigagem σ_K^2) deve ser mínima, isto é:

$$\sigma_K^2 = E[(Z(x) - Z^*(x))^2] \text{ mínimo, ou}$$

$$\sigma_K^2 = E\{[Z_V(x) - Z_k^*(x_k)]^2\} = \bar{C}(V, V) + \mu - \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha \bar{C}(v_\alpha, V) \quad (1)$$

onde μ é o parâmetro de Lagrange, \bar{C} tem o significado de covariância, V é o domínio a estimar e v_α é o domínio das informações. Com estas propriedades, a krigagem busca determinar o melhor estimador linear de um parâmetro que descreva um fenômeno natural desconhecido, com base nas informações disponíveis, as quais são em geral representadas por dados experimentais obtidos de amostragens e também com base na variabilidade espacial da mineralização, dada pelo variograma da FA representativa da regionalização do referido parâmetro estudado.

Em geral, sendo $Z(x)$ a FA estudada, estacionária de 2ª ordem, de esperança $E[Z(x)]$ (constante), e sendo conhecido o seu momento de 2ª ordem $C(h)=E\{[Z(x)-m][Z(x+h)-m]\}$, $2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}$, onde $C(h)$ é a covariância centrada e $2\gamma(h)$ o variograma, parâmetros mais importantes a serem observados numa representação gráfica da função semi-variograma $\gamma(h)$ são, resumidamente, de acordo com ISAACS and SRIVASTAVA (1989):

- a *amplitude*, que corresponde ao conceito de “zona de influência” que reflete a distância a partir da qual as amostras se tornam independentes;
- o *patamar*, que reflete a dispersão própria do parâmetro em estudo para distâncias iguais ou superiores à amplitude;
- o *efeito de pepita*, que reflete a presença de microestruturas detectadas pela menor escala de observação e / ou reflete a ocorrência de erros de amostragem e de análises laboratoriais. Quando o efeito pepita é muito alto em relação ao patamar do semi-variograma, os ponderadores atribuídos às amostras tenderão a se igualar. No limite, isto é, em presença de efeito de pepita puro, estes pesos serão rigorosamente idênticos e, sendo assim, as amostras são independentes e a média aritmética da estatística clássica passa a ser o melhor estimador.

As informações experimentais disponíveis se representam por um conjunto discreto de parâmetros ou teores $z(x_i)$ (com $i=1,N$). Estes teores podem ser pontuais $z(x_i)$ ou médios $z_v(x)$ definidos em suportes de dimensão v (volume, superfície ou comprimento), dados pela integral

$$z_v(x_i) = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} z(x) dx.$$

Introduzindo a hipótese de estacionaridade para qualquer suporte, a variável

$$Z(x) \text{ tem por esperança } m : E[z(x_i)] = E[Z_v(x_i)] = m, \forall v.$$

Dessa forma, a krigagem fornece o melhor estimador linear do valor médio de $z(x)$ no domínio V (bloco, painel, totalidade do depósito ou simplesmente num ponto de espaço):

$$z_v(x) = \frac{1}{V} \int_V z(x) dx \quad (1)$$

O estimador de krigagem $Z_K^*(x)$ se expressará como $Z_K^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i)$, em que λ_i são os ponderadores para os dados amostrais. A minimização da variância $E[(Z(x) - Z^*(x))^2]$, com condição de não enviesamento, conduz às $n+1$ equações do denominado *sistema de Matheron*:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\beta} \bar{\gamma}(v_{\alpha}, v_{\beta}) + \mu &= \bar{\gamma}(v_{\alpha}, V), \quad \forall \alpha = 1, \dots, n \\ \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\beta} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1.)$$

$$\sigma_K^2 = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} \bar{\gamma}(v_{\alpha}, V) + \mu - \bar{\gamma}(V, V) \quad (\text{variância de krigagem})$$

No sistema de krigagem em (1.4) está contabilizada a estrutura da variabilidade espacial do parâmetro em análise através da função semi-variograma, bem como as características geométricas dos dados experimentais e do domínio a estimar, quais sejam:

- a geometria interna da informação (no primeiro membro do sistema de krigagem, representada por $\bar{\gamma}(v_{\alpha}, v_{\beta})$);
- a distância e a geometria relativa entre o estimado e as informações (no segundo membro representado por $\bar{\gamma}(v_{\alpha}, V)$).

A geometria do domínio a estimar (termo $\bar{\gamma}(V, V)$ de σ_K^2) é levada em consideração no cálculo da variância de krigagem. Esta variância de krigagem é a variância do erro da estimativa dado por $(Z(x) - Z^*(x))$ e não representa a variância dos valores obtidos na krigagem. Ela pode ser utilizada como uma referência para a ordem de grandeza da variância dos valores estimados já que, pela condição de não enviesamento, a esperança matemática do erro de estimativa é nula ($E[(Z(x) - Z^*(x))] = 0$).

De acordo com JOURNAL and HUIJBREGTS (1978), o estimador de krigagem subestima a variabilidade dos teores reais, devido ao chamado *efeito de atenuação da krigagem* que pode ser explicado pela teoria dos operadores de projeção.

Os teores Z_{v_i} estimam-se por suas projeções $Z_{Kv_i}^*$ no sub-espço ε_N engendrado por informação. A regra de composição de krigagem de Z_v será:

$$Z_{KV}^* = \frac{1}{N} \sum_i Z_{Kv_i}^* \quad (1)$$

Pelo teorema de Pitágoras:

$$VAR(v/V) = 1/N \sum_i \|Z_{Kv_i}\|^2 + 1/N \sum_i \sigma_{Kv_i}^2 - \|Z_{KV}^*\|^2 - \sigma_{KV}^2 \quad (1)$$

Chamando $\sigma_{Kv}^2 = 1/N \sum_i \sigma_{Kv_i}^2$ de variância média de krigagem e atendendo à Equação 1.5:

$$VAR(v/V) = VAR^*(v/V) + \sigma_{Kv}^2 - \sigma_{KV}^2 \quad (1)$$

A Equação 1.7 é conhecida como relação de atenuação de krigagem com esperança conhecida ou nula. No caso da esperança desconhecida, as relações de atenuação são formalmente idênticas.

Devido ao problema da atenuação em krigagem, a variabilidade dos teores reais é melhor reproduzida através da simulação condicional, assunto a ser tratado no Capítulo 1.3.

1.3 – Simulação Geoestatística

1.3.1 – Noções Gerais

O acesso à realidade *in situ* das características ou parâmetros dos recursos minerais não é possível durante os trabalhos de rotina de planejamento mineiro, pois as informações disponíveis são geralmente limitadas aos teores de poucas amostras, as quais são utilizadas para a realização da estimativa através da krigagem, que é um estimador inadequado para a determinação da dispersão real, conforme afirmado no Capítulo 1.2. De fato, segundo OLIVEIRA (1997), a krigagem se presta ao fornecimento de uma única estimativa local, sem contudo respeitar a estatística espacial de todas as estimativas consideradas conjuntamente, isto é, o semi-variograma de um mapa krigado difere daquele utilizado quando da implementação da referida krigagem.

A alternativa usualmente adotada é simular um dado parâmetro dos recursos minerais com base em um modelo, de forma que a realidade e simulações desta realidade sejam diferentes representações de um mesmo fenômeno mineralizado, caracterizado segundo um dado modelo.

Para JOURNAL and HUIJBREGTS (1978), uma variável regionalizada $z(x)$ interpretada como uma realização de uma FA $Z(x)$. Esta FA é caracterizada por uma função distribuição e um modelo de covariância ou variograma. Simular consiste em obter outras realizações $z_s(x)$ a partir da função aleatória $Z(x)$. Assim, uma simulação é uma realização possível de uma realidade desconhecida. Se os dados das amostras dos depósitos são disponíveis, um modelo de simulação condicionado aos dados tem as mesmas características matemáticas dos mesmos.

Basicamente, o desenvolvimento de um conjunto de simulações é inicialmente determinação das características estatísticas e geoestatísticas das variáveis envolvidas, posteriormente a implementação e o ajuste de um algoritmo matemático que atenda especificações requeridas e finalmente a obtenção de resultados simulados que reproduzam as referidas características estatísticas e geoestatísticas dos dados amostrados.

Na indústria mineral, a simulação geoestatística é uma alternativa para geração de modelos estocásticos de depósitos, modelos estes que devem prover condições para que a dispersão espacial das várias características mineralógicas seja devidamente acessada. De acordo com OLIVEIRA (1997), em uma simulação estocástica, a reprodução das características globais (textura) e estatísticas (histograma e variograma) são priorizadas em relação à acurácia local na obtenção de vários conjuntos alternativos de representações.

Atualmente há uma grande variedade de algoritmos de simulação estocástica disponíveis. Somente será conceituado nesta dissertação o algoritmo de Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), que foi o algoritmo empregado no estudo de caso.

1.3.2 - Processos Estocásticos : Definição Matemática

Uma FA X é um princípio para atribuir a toda realização ξ de um experimento p um número $x(\xi)$. Um processo estocástico é uma família de funções temporais dependendo dos parâmetros ξ e t (tempo). O domínio de ξ é o conjunto de todas as realizações experimentais e o domínio de t é o conjunto R de números reais.

1.3.3 - Simulação Seqüencial Gaussiana (SSG)

Os algoritmos seqüenciais propostos por JOURNEL and ALABERT (1989) são uma aplicação do teorema de Bayes. Os n eventos independentes A_i , $i = 1, \dots, n$ podem ser simulados seqüencialmente usando a expressão:

$$P[A_1, A_2, \dots, A_n] = P[A_n | A_1, A_2, \dots, A_{n-1}] P[A_{n-1} | A_1, A_2, \dots, A_{n-2}] \dots P[A_2 | A_1] P[A_1] \quad (1.8)$$

A técnica requer a inferência de sucessivas $(n-1)$ distribuições de probabilidades condicionais. Isto pode ser obtido de duas formas: a primeira é por adoção do modelo gaussiano, o que corresponde à simulação gaussiana seqüencial, e a segunda é por inferência direta da distribuição através do uso das indicatrizes, correspondendo à simulação indicatriz seqüencial.

No algoritmo de simulação seqüencial gaussiana, cada variável é simulada seqüencialmente de acordo com a sua função densidade de probabilidade acumulada condicionada (CCDF) gaussiana completamente caracterizada através de um sistema de krigagem. Em cada etapa, os dados condicionantes são todos os dados originais mais todos os valores previamente simulados que se encontram dentro da vizinhança da posição a ser simulada.

O algoritmo da simulação sequencial gaussiana consiste das seguintes etapas:

1. Determinar a função densidade de probabilidade acumulada (CDF) univariável F representativa de toda área em estudo e não apenas dos dados experimentais disponíveis. remoção dos agrupamentos (“*declustering*”) é necessária se os dados estão preferencialmente localizados;
2. Fazer a transformação gaussiana da CDF univariável de $F(z)$;
3. Calcular um modelo de semi-variograma dos dados condicionantes transformados;
4. Definir um caminho aleatório, não necessariamente regular, que passa em todos os nós malha;
5. Em cada nó \mathbf{x} , reter um determinado número de dados condicionantes vizinhos incluindo dados originais transformados e os previamente simulados;
6. Usar um tipo de krigagem com o variograma dos dados transformados para obter estimativa e a variância de krigagem. Construir a CCDF gaussiana da FA $Y(\mathbf{x})$ em cada posição \mathbf{x} ;
7. Sortear aleatoriamente um valor de $y(\mathbf{x})$ desta ccdf;
8. Adicionar o valor simulado ao conjunto de dados;
9. Voltar ao passo 5 até todos os nós serem simulados;
10. Transformar os valores simulados gaussianos para a ordem de grandeza da variável original

A transformação gaussiana dos dados originais define uma nova variável Y que é, por construção, univariável com distribuição normal. Contudo, todos os métodos gaussianos requerem que esta nova variável também tenha distribuição multivariável normal. O algoritmo de simulação sequencial gaussiana como foi descrito, requer a solução de sistemas de krigagem cada vez maiores para o cálculo das probabilidades, à medida que o algoritmo progride, pois aumenta o número de dados condicionantes. Para contornar este problema, adota-se vizinhança móvel, em vez de vizinhança única para os cálculos das CCDFs. A vizinhança deve se adequar à amplitude para possibilitar a reprodução dos variogramas. A decomposição da função densidade de probabilidade (PDF) multivariável em produto de CDFs univariáveis é independente do ordenamento das n variáveis aleatórias. Contudo, como a adoção da vizinhança móvel se torna necessária para reduzir o tempo de cálculo das CCDFs, uma sequência que passe nos nós adjacentes deve ser evitada. Por exemplo, tem-se a estratégia de busca em espiral que é u

algoritmo eficiente quando os dados estão ou são reposicionados em uma malha regular. A ideia é simular os nós em uma sequência que sempre privilegie o nó mais distante do anteriormente simulado e que ainda não tenha sido simulado.

Geralmente, o número de nós a ser simulado excede em muito o número de dados condicionantes e, conseqüentemente, os dados originais terão sua influência reduzida à medida que o algoritmo progride. Os programas comerciais fornecem a opção do usuário limitar o número máximo de nós previamente simulados, mesmo que estejam na área da vizinhança, serem usados nos sistemas de krigagem da simulação.

As maiores vantagens da simulação sequencial gaussiana são o fácil condicionamento, fato de que as anisotropias são manuseadas automaticamente, além da possibilidade de aplicar o método para qualquer função covariância. A aparente desvantagem do método é a utilização da distribuição gaussiana intermediária e a necessidade de execução de testes para validar a condição requerida de multinormalidade da variável obtida da transformação gaussiana. Na prática, só é possível verificar o nível bivariado (distribuição bi-gaussiana), isto é, aceita-se como válido testar a binormalidade e, se o teste não for invalidado, admite-se o formalismo multigaussiano.

1.4 – Conceitos de Recursos e de Reservas Recuperáveis

Uma adequada estimativa de reservas minerais a partir dos recursos *in situ* requer que seja conhecida a variabilidade espacial dos parâmetros de natureza geológica (tais como teor, mineralogias e granulometrias) que descrevem um dado depósito mineral.

Usualmente, a partir das informações advindas de campanhas de pesquisa exploratória são geradas representações físicas do depósito mineral, denominadas de modelos geológicos, quais são posteriormente discretizados em blocos. Em seguida, estimam-se os parâmetros de cada bloco, como por exemplo um teor, através de um método de estimativa por krigagem e deseja-se saber qual a quantidade de minério contida em todos os blocos que apresentam teor maior que um dado valor Z .

A seleção de blocos se dá pelo conceito de teor de corte, que corresponde ao valor mínimo de determinado parâmetro do bloco capaz de custear todos os processos de lavra e tratamento do minério do bloco. Isto é, o bloco será selecionado se o seu parâmetro $Z(v_i)$, definido no suporte de bloco v_i , for superior ao teor de corte Z .

Segundo JOURNAL and HUIJBREGTS (1978), “os recursos *in situ* são determinados pelo ambiente geológico do depósito. As reservas recuperáveis (ou lavráveis) dependem não somente dos recursos *in situ* e de suas características peculiares, mas também, e essencialmente, do contexto técnico e econômico da região onde o projeto mineral está inserido”.

Para a estimativa de recursos minerais, geralmente é usada a krigagem ou a simulação estocástica como ferramentas principais da geoestatística ou ainda métodos clássicos como o Inverso do Quadrado da Distância ou do Polígono de Influência. Esta estimativa é obtida através do conhecimento do modelo estrutural regional e local, de mapeamentos de superfície e aerofotogramétricos, de amostragem exploratória, de sondagens e, finalmente, na fase de lavra, de informações provenientes da amostragem dos furos de desmontes de painéis, que servem para o acompanhamento do controle de lavra em operações mineiras do dia a dia de uma mina.

Seja $Z(v_i)$ o valor real de um dado parâmetro, onde v_i representa o suporte de bloco e $Z^*(v_i)$ a estimativa deste parâmetro. Chama-se de **reserva recuperável** a porção do recurso mineral para a qual os parâmetros $Z(v_i)$ de seus blocos v_i foram estimados como $Z^*(v_i)$, com valores acima de um determinado teor de corte Z .

Nesta dissertação, a reserva recuperável depende somente do teor de corte Z adotado (única restrição), pois a escolha de cada bloco é realizada independentemente de sua localização no depósito e de sua vizinhança.

1.5 – Conceitos de Funções de Recuperação

Segundo RIVOIRARD (1994), o cálculo da reserva recuperável depende do estabelecimento de relações entre tonelagem e teor, as quais podem ser determinadas através de diversos tipos de funções, a saber:

- A tonelagem de minério T como função de z : $T(z)$
- A tonelagem de metal Q como função de z : $Q(z)$
- O teor médio m como função de z : $m(z)$
- O benefício convencional B como função de z : $B(z)$
- O custo C como função de z : $C(z)$
- A tonelagem de metal Q como função de T : $Q(T)$

(onde z é o teor de corte do parâmetro em análise).

Tais funções são chamadas de Funções de Recuperação (FR) e seu estabelecimento conhecido como *parametrização* de reservas. Com estas funções é possível avaliar itens relevantes para o planejamento de lavra, como por exemplo, a quantidade de minério do recurso mineral para o qual seus blocos possuem teores com valores maiores que o teor de corte z , bem como o teor médio destes blocos selecionados com teores maiores que z .

As FR podem ser obtidas usando FDPs ajustadas aos histogramas experimentais dos dados (método contínuo) ou trabalhando diretamente sobre os dados estimados (método discreto).

Nesta dissertação, somente as funções $T(z)$ (tonelagem de minério T como função de z) e $m(z)$ (teor médio m como função de z) foram utilizadas no estudo de caso, razão pela qual somente estas serão apresentadas a seguir, além de conceitos referentes à função $Q(z)$ (tonelagem de metal Q), da qual depende a definição da função $m(z)$. Uma descrição mais completa sobre todas as funções de recuperação pode ser encontrada em CRUZ JÚNIOR (1998).

1.5.1 – Funções $T(z)$ e $m(z)$ para Variáveis Contínuas

Segundo REMACRE (1997), uma variável aleatória (VA) Z é contínua se existe uma função densidade de probabilidade de Z [$f(z)$], tal que atenda as seguintes propriedades:

$$\text{a) } f(z) \geq 0, \forall z \in \mathbf{R}; \quad \text{e} \quad \text{b) } \int_{-\infty}^{+\infty} f(z) dz = 1. \quad (1.9)$$

Seja $Z(v)$, definida sobre o volume v , uma VA e $f(z)$ a sua FDP.

1.5.1.1 - Função Tonelagem de Minério - $T(z)$

Seja $f(z)$ a FDP dos teores $Z(v)$, e $F(z)$ sua acumulada crescente, definida por

$$F(z) = P(Z(v) \leq z) = \int_{-\infty}^z f(z) dz \quad (1.10)$$

(P tem o significado de probabilidade) .

A função tonelagem $T(z)$ é, por definição, a probabilidade do teor $Z(v)$ ser maior que um dado teor de corte z , ou seja, o complemento de $F(z)$.

$$T(z) = P(Z(v) > z) = \int_z^{\infty} f(z) dz \quad (1.11)$$

Logo, tem-se $0 \leq T(z) \leq 1$. Podendo-se também escrever :

$$P(Z(v) \leq z) + P(Z(v) > z) = 1 \quad ; \quad F(z) + T(z) = 1 \quad \text{e} \quad T(z) = 1 - F(z) \quad (1.12)$$

Pode-se ver que $T(z)$ é a proporção do número de blocos que possui teor de metal $Z(v_i)$ maior que o teor de corte z . Portanto, $T(z)$ é uma função densidade acumulada não crescente definida no intervalo $[0,1]$. Ou seja, à medida que z cresce, alguns blocos não serão selecionados, fazendo $T(z)$ decrescer. A função tonelagem [$T(z)$] está ilustrada graficamente na Figura 1.5.1.1, extraída de CRUZ JÚNIOR (1998), na qual o eixo horizontal corresponde aos teores de corte z , e o eixo vertical a proporção (no caso já transformada em porcentagem) do recurso mineral formada pelos blocos com teor de metal $Z(v_i)$ maior que o teor de corte z . Essa proporção do recurso é a reserva recuperável, do ponto de vista do teor de corte z como restrição única.

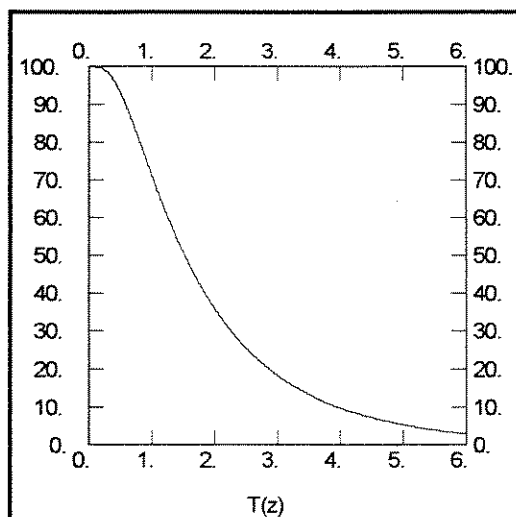


Figura 1.5.1.1 – Função $T(z)$

Se $z = 0$, implicará em $T(0) = 1$, desta forma selecionam-se todos os blocos do recurso mineral fazendo com que esse se transforme totalmente em reserva recuperável. Entretanto, no limite $z = \infty$, implicará em $T(\infty) = 0$, pois não haverá qualquer bloco selecionado.

1.5.1.2 - Função Teor Médio - $m(z)$

A função teor médio $m(z)$ corresponde ao teor médio dos blocos selecionados (com teores $Z(v_i) > z$), os quais vão compor a reserva recuperável. A função $m(z)$ é definida por:

$$m(z) = \frac{Q(z)}{T(z)} \quad (1.1)$$

$Q(z)$ é a função metal contido, definida como a quantidade de metal contido nos blocos selecionados por possuírem teores de metal acima do valor de corte z (critério $Z(v_i) > z$). Esta função metal contido pode se expressar, em proporção, pela integral:

$$Q(z) = \int_z^{\infty} z \cdot f(z) dz \quad (1.2)$$

Neste caso, $Q(z)$ corresponde à proporção de metal da reserva mineral, a qual é contida em $T(z)$.

A função teor médio $m(z)$ é uma função crescente, pois na medida em que o teor de corte z aumenta, os blocos mais pobres serão abandonados. Assim, apenas os blocos mais ricos serão selecionados, fazendo com que o teor médio dos blocos selecionados cresça cada vez que aumenta o corte z . Quando o teor de corte z é igual a zero, a função $m(z)=m(0)$ é igual à média da variável Z do recurso mineral, isto é $m(0) = E(Z) = m$.

A Figura 1.5.1.2, extraída de CRUZ JÚNIOR (1998), mostra o comportamento da função teor médio.

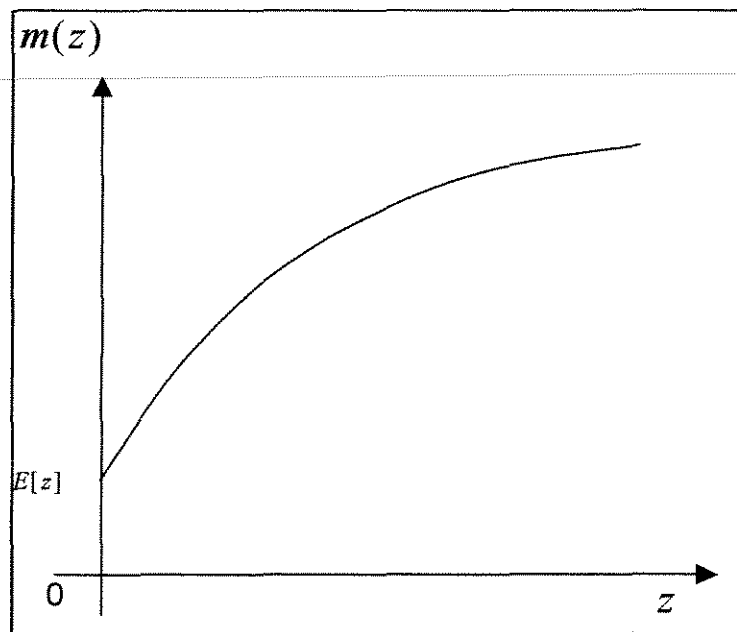


Figura 1.5.1.2 – Função $m(z)$

1.5.2 – Funções $T(z)$ e $m(z)$ para variáveis discretas

Segundo REMACRE (1997), uma VA Z é dita discreta se a mesma toma um número finito ou enumerável de valores. E a função de probabilidade de Z $[p(z) = P(Z = z)]$ possui seguintes propriedades :

$$\text{a) } p(z) \geq 0, \forall z \quad \text{e} \quad \text{b) } \sum_z p(z) = 1 \quad (1.1)$$

Para o cálculo de $T(z)$ e $Q(z)$ pode-se expressar o número de blocos selecionados usando a função indicatriz:

$$I_i(z) = \begin{cases} 1 & \text{se } Z(v_i) \geq z \\ 0 & \text{se } Z(v_i) < z \end{cases} \quad (1.1)$$

Para dados regulares no qual admite-se que $p(z) = \frac{1}{n} \forall z$ tem-se:

$$T(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(z) \quad \text{e} \quad Q(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(v_i) \cdot I_i(z) \quad (1.1)$$

Porém, quando os dados são ponderados, tem-se:

$$T(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(z) \cdot p(z) \quad \text{e} \quad Q(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(v_i) \cdot I_i(z) \cdot p(z) \quad (1.1)$$

em que $T(z)$ e $Q(z)$ são definidos em proporção. Logo, $0 \leq T(z) \leq 1$ e $0 \leq Q(z) \leq 1$.

Pode-se também obter $T(z)$ e $Q(z)$ em tonelagem, por:

$$T(z) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot d_i \cdot I_i(z) \quad \text{e} \quad Q(z) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot d_i \cdot Z(v_i) \cdot I_i(z) \quad (1.1)$$

em que v_i e d_i são o volume e a densidade do bloco i , respectivamente.

A função de recuperação $m(z)$, seja ela em termos de proporção ou em tonelagem, será obtida pela relação entre $T(z)$, $Q(z)$ e z , dada por (1.13), isto é, $m(z) = \frac{Q(z)}{T(z)}$.

1.6 – Conceitos de Efeito de Suporte e de Informação

O termo suporte refere-se ao volume sobre o qual é definido um parâmetro do recurso mineral, como por exemplo um teor. O suporte pode apresentar qualquer tamanho e geometria.

De acordo com MATHERON (1984), os dois princípios da geoestatística são: (i) a média permanece constante e (ii) as curvas de parametrização se degradam quando o suporte aumenta.

Seja uma reserva mineral dividida em painéis V (blocos grandes) e subdividida em blocos menores v (unidade seletiva de lavra). Assim, definem-se os teores de blocos $Z(v_i)$ e $Z(V_i)$ sobre os dois suportes v e V . Tem-se $E[Z(v_i)] = E[Z(V_i)]$ e $var[Z(v_i)] > var[Z(V_i)]$, onde E e var têm o significado de esperança matemática e variância, respectivamente. Logo existem duas populações de teores distintas entre si, que produzem histogramas diferentes. Essa diferença nos histogramas entre os dois suportes, é chamada de **efeito suporte**.

Sendo z o teor de corte, para o estabelecimento das FR, a seleção de blocos se dá pelo teor estimado do bloco $Z^*(v_i) \geq z$ e não sobre seu teor verdadeiro $Z(v_i) \geq z$, por ser desconhecido. Como todo processo de estimativa é passível de erro, é comum encontrar $Z^*(v_i) \neq Z(v_i)$. Essa diferença provoca uma degradação das FR. Este efeito sobre as FR, devido ao desconhecimento do teor verdadeiro $Z(v_i)$, é chamado de **efeito informação**.

Sempre que ocorre $Z^*(v_i) \neq Z(v_i)$, leva-se ao viés $E[Z_v - Z_v^*]$, que é a diferença média entre os valores verdadeiros e os estimados sobre todos os blocos. Não basta que $E[Z_v - Z_v^*] = 0$ pois podem ocorrer casos em que esta esperança é nula, mas a correlação entre $Z(v_i)$ e $Z^*(v_i)$ inexistente ou muito fraca. Existem vários fatores que levam à ocorrência deste viés, tais como amostragem não representativa do depósito, erros cometidos nas análises químicas, mineralógicas e granulométricas das amostras, além de erros cometidos no processo de estimativa.

Sejam as variáveis aleatórias Z e Y . De acordo com REMACRE (1997), conceitua-se a *esperança condicional* de Z dado que $Y = y$ (simbolizada por $E[Z | Y = y]$) da seguinte forma:

$$\text{Caso discreto : } E[Z | Y > y] = \sum_z z \cdot p(z | y) \quad (1.20)$$

$$\text{Caso contínuo : } E[Z | Y > y] = \int z \cdot f(z | y) dz \quad (1.21)$$

Aplicando o conceito de esperança condicional na análise do efeito de informação , segundo RIVOIRARD (1987), constata-se a ocorrência do viés condicional $E[Z(v_i) - Z^*(v_i) | Z^*(v_i)]$, quando se toma um valor $Z^*(v_i) = z$. Na verdade, tem-se uma diferença no teor médio $E[Z^*(v_i) | Z^*(v_i) = z]$. Neste caso, os blocos com teor médio acima do teor de corte z têm teor médio dado por $E[Z(v_i) | Z^*(v_i) \geq z]$, que é diferente do teor médio estimado. Assim, o viés condicional $E[Z(v_i) - Z^*(v_i) | Z^*(v_i)]$ é responsável por um viés no teor selecionado dado por $E[Z(v_i) - Z^*(v_i) | Z^*(v_i) \geq z]$, que é a média do viés condicionado para os blocos selecionados.

Em geral, $Z(v_i)$ não é conhecido. Dessa forma, a seleção de blocos é feita através de seus valores estimados $Z^*(v_i)$, o que poderá conduzir à escolha de blocos de teores reais baixos que foram estimados com teores altos e ao abandono de blocos de teores reais altos que foram estimados com teores baixos.

CAPÍTULO 2

2.1 – Introdução

A área alvo considerada na criação do estudo de caso está localizada em um dos depósitos de minério de ferro de propriedade da SAMARCO MINERAÇÃO S.A. Assim, o propósito deste capítulo é fazer uma breve descrição desta empresa, em termos de aspectos relativos à sua localização, aos seus processos produtivos e à geologia geral de suas jazidas.

2.2 – Dados Gerais da Área em Estudo

A SAMARCO MINERAÇÃO S.A é uma associação entre a Companhia Vale do Rio Doce – CVRD e a Broken Hill Properties / Billiton - BHPBILLITON. É uma empresa produtora e exportadora de pelotas de minério de ferro, constituindo-se em um sistema integrado das operações de mineração, beneficiamento, transporte de concentrados através de minerodutos, pelotização e porto. Suas reservas minerais situam-se no chamado Complexo Alegria, que se encontra na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais. A usina de pelotização e o porto estão localizados no Estado do Espírito Santo. A Figura 2.2.1 ilustra a localização geral das operações da SAMARCO e a Figura 2.2.2, extraída de BOTELHO (2000), ilustra a localização do Complexo Alegria no Quadrilátero Ferrífero. Estas figuras são representações esquemáticas, sem escala.

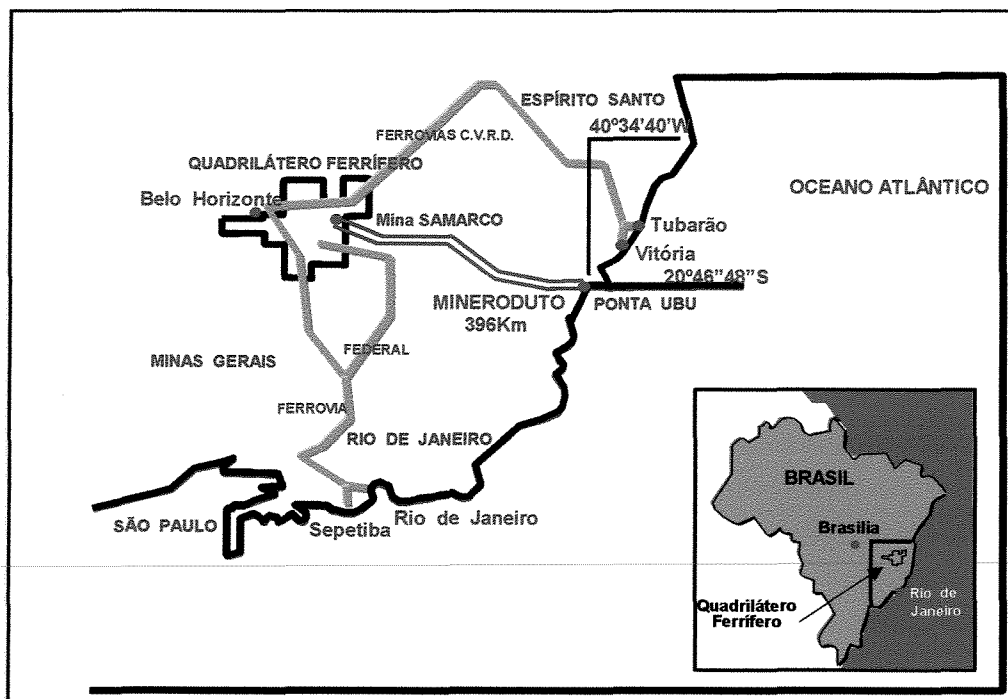


Figura 2.2.1 – Localização Geral das Operações da SAMARCO

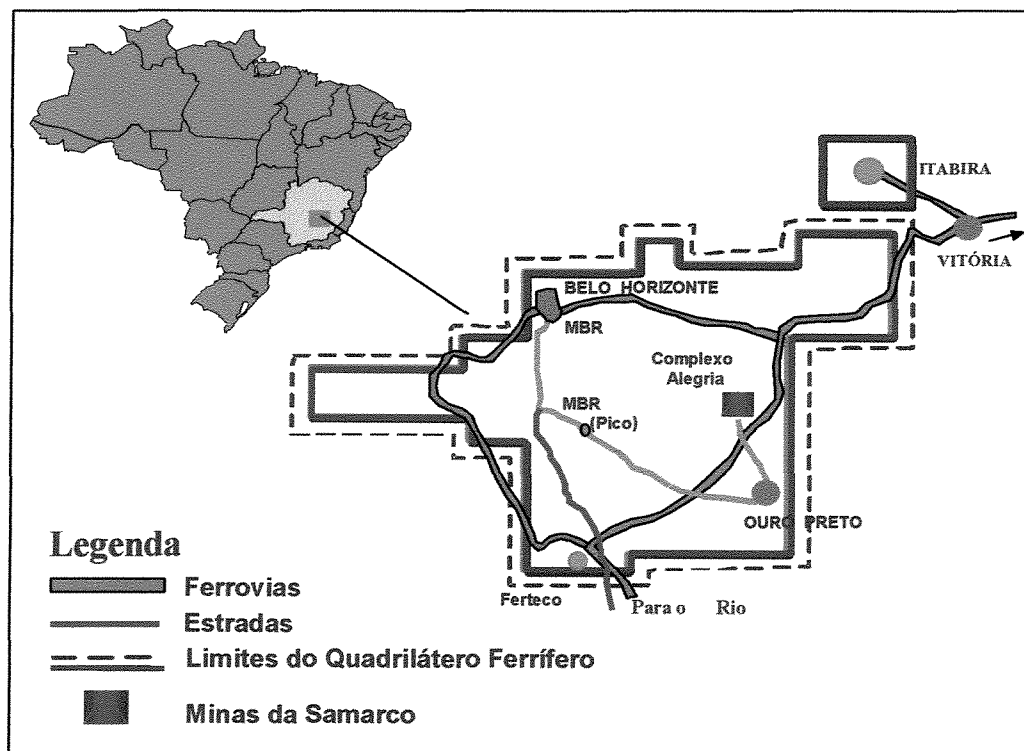


Figura 2.2.2 – Localização do Complexo Alegria no Quadrilátero Ferrífero

As operações de mineração da SAMARCO se iniciaram em 1977, na jazida de Germano situada no município de Mariana, no Estado de Minas Gerais. A mina de Germano foi exaurida em 1992, quando a lavra foi transferida para o Complexo Alegria.

As jazidas de propriedade da SAMARCO no Complexo Alegria estão localizadas nos municípios de Mariana e Ouro Preto, no Estado de Minas Gerais, constituindo recursos geológicos da ordem de 4 bilhões de toneladas de minério de ferro.

O Complexo Alegria da SAMARCO foi dividido em 5 depósitos distintos, denominados Alegria 3/4/5, Alegria 1/2/6, Alegria 9, Alegria 7 e Alegria 8. Os três primeiros encontram-se atualmente em operação, a partir dos quais o minério produzido é transportado por um sistema de correias de longa distância de cerca de 6 km de extensão, até as instalações de beneficiamento, não existindo pilhas de homogeneização intermediárias.

Para o estudo de caso desta dissertação, foi selecionado um conjunto de bancadas do depósito de Alegria 9. A Figura 2.2.3 mostra a localização dos depósitos da SAMARCO no Complexo Alegria, onde está destacada a localização de Alegria 9.

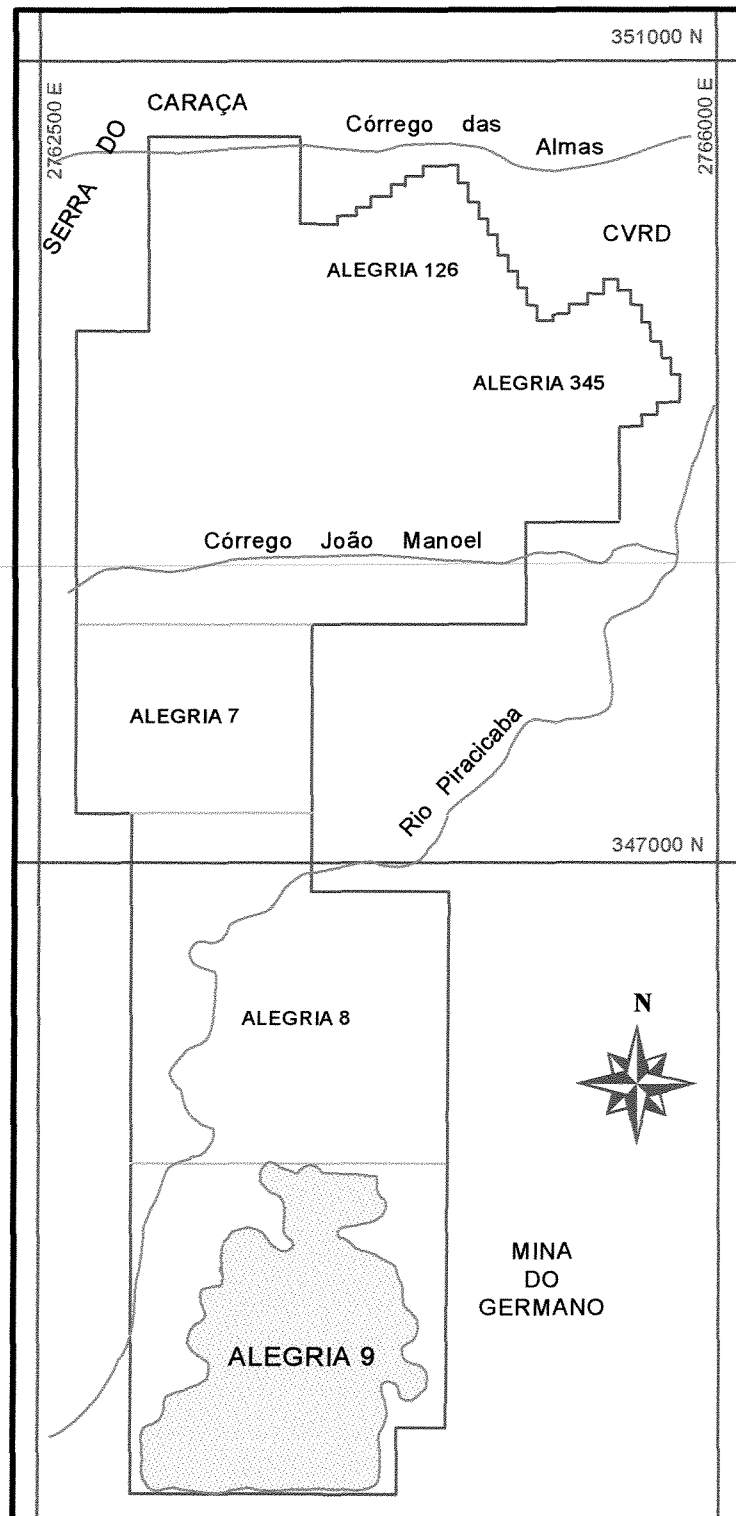


Figura 2.2.3 – Localização dos Depósitos da SAMARCO no Complexo Alegria.

As principais etapas do processo de beneficiamento do minério são britagem, moagem, deslamagem, flotação convencional, remoagem, flotação em coluna e bombeamento concentrados através de um mineroduto de 396 km de extensão, a partir de Mariana em Minas Gerais, até a localidade de Ponta Ubu, município de Anchieta, no Estado do Espírito Santo. As etapas do processo de pelletização podem ser resumidas em recebimento e filtragem da polpa concentrada proveniente do bombeamento por mineroduto, pelletamento e queima das pelotas. A capacidade atual de produção anual é de cerca de 12 milhões de toneladas de pelotas e 2 milhões de toneladas de *pellet feed*. Para atender às especificações de qualidade física das pelotas a um ritmo de produção de 12 milhões de toneladas anuais, o processo de pelletização da SAMARCO está ajustado para receber concentrados provenientes do processo de beneficiamento que apresentem teores médios da ordem de 40% de hematita especular em volume de mineral. Devido à recuperação metálica global do processo de beneficiamento, o atendimento à especificação de hematita especular nos concentrados exige que o processo de lavra produza minérios cujo teor médio de hematita especular seja de 47% em volume de mineral.

2.3 – Aspectos Geológicos da Área Em Estudo

Segundo COSTA *et al* (1998), “as jazidas de minério de ferro que constituem o denominado Complexo Alegria estão localizadas na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, ao norte da Serra do Caraça. Fazem parte da estrutura tectônica denominada Sinclinal de Alegria. Essa estrutura é constituída por rochas do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas. As rochas que integram as jazidas pertencem à Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas. Além dos itabiritos de tipos diversos e, eventualmente, alguma hematita friável, que são objetos de lavra da SAMARCO, ocorrem outros materiais ferruginosos, como hematita compacta, canga, itabiritos anfíbolíticos estéreis, além de rochas não ferruginosas como metabasitos, filitos xistosos e quartzitos. Associados aos itabiritos ocorrem, muito frequentemente, veios e vênulas de caulinita de quartzo e de goethita, além de bolsões e faixas de materiais brechóides. Os fenômenos que deram origem aos jazimentos são de origem tectonometamórficos sobre os sedimentos ferríferos originais, durante o Pré-Cambriano, havendo superposição de processos supergênicos, esses processos são de idade muito recente, já no Cenozóico”.

De acordo com ROCHA (1999), a jazida de Alegria 9 tem rochas que se dividem em três grupos, sendo um grupo inferior (Caraça) com as formações Moeda (quartzito) e Batatal (filito), um grupo médio (Itabira) não dividido, com itabiritos e um grupo superior (Piracicaba), com filitos, sericita xisto, xisto grafitoso, quartzito ferruginoso, filito dolomítico, dolomito. Sua constituição litológica reflete bem a origem por processos tectonometamórficos e a superposição de processos supergênicos. Os litotipos em Alegria 9 são variados e a canga está presente recobrando as partes superficiais. A martita é o mineral mais abundante, seguida da especularita e, em menor quantidade, a goethita. A magnetita está presente em muito baixa concentração sendo praticamente traços. Foram identificados 7 tipos, a saber:

- **Itabirito Martítico (IM)** - Caracteriza-se pela presença de martita como mineral predominante, proveniente da alteração da magnetita. A goethita, a especularita e a magnetita estão presentes em porcentagens inferiores a 15%.
- **Itabirito Martítico-Especularítico (IME)** - É um tipo bem expressivo na jazida. Caracteriza-se pela presença de martita e especularita, sendo a primeira um pouco mais abundante que a segunda. Normalmente, a goethita está presente em porcentagens inferiores a 15% e a magnetita está sob a forma de traços.
- **Itabirito Especularítico-Martítico 1 e 2 (IEM1 e IEM2)** - É o inverso do itabirito martítico-especularítico. Neste caso, caracteriza-se pela presença de especularita e martita, sendo a primeira um pouco mais abundante que a segunda. Normalmente, a goethita está presente em porcentagens inferiores a 15% e a magnetita está sob a forma de traços. A subdivisão em 1 e 2 se deve aos teores médios de sílica obtidos nos testes de flotação, sendo de 1,35 % para o IEM1 e 2,30% para o IEM2.
- **Itabirito Anfíbolítico (IA)** - É reconhecido pela presença de anfíbolios alterados, goethita e menos frequentemente, a quartzo. Além dos pseudomorfos de anfíbólio, estão presentes ainda martita, goethita botrioidal, goethita terrosa, especularita e magnetita. A goethita (pseudomorfa + botrioidal + terrosa) e a martita são os minerais essenciais desta rocha. Ora a goethita é o mineral predominante, ora a martita o é. Quanto à especularita e a magnetita, estas estão presentes em muito pequena proporção. Quando este tipo apresenta teores de fósforo (P) e perda ao fogo (PPC) elevados ($P > 0,080\%$ e $PPC > 6\%$), o mesmo é considerado estéril, sendo identificado como *Itabirito Anfíbolítico Estéril (AE)*.

- **Itabirito Martítico-Goethítico (IMG)** – Este itabirito é pouco expressivo na jazida. Caracteriza-se pela presença de goethita e martita em quantidades bastante semelhantes. Os outros minerais (especularita e magnetita) estão presentes em proporções muito pequenas.
- **Itabirito Goethítico (IG)** - Esta rocha é pouco expressiva na jazida. Seu mineral mais abundante é a goethita (botrioidal e terrosa). Está invariavelmente muito alterado, friável e muito argiloso (goethita). Normalmente é estéril.

Ainda segundo ROCHA (1999), outros materiais que ocorrem na área são as cangas, solos lateríticos, filitos, quartzitos e rochas metabásicas. As cangas aparecem recobrimdo praticamente toda a superfície da área com espessuras variáveis que podem atingir até 12m. Os solos lateríticos, em geral de origem coluvionar, ocorrem com frequência sob a canga recobrimdo a rocha. São avermelhados e amarelados. Filitos ocorrem localmente em lentes restritas dentro dos itabiritos, ou afloram na porção oeste (filito batatal) no contato do grupo Caraça com o grupo Itabira (formação Cauê), ou afloram na porção leste (filitos do grupo Piracicaba) sobrepostos aos itabiritos. Quartzitos afloram na porção oeste da área sotopostos ao filito batatal. Na região central da jazida, ocorre concordantemente sob a forma de sill, uma intrusão metabásica. Esta rocha pode apresentar enriquecimento localizado em turmalina (afrita) e apresenta grau de alteração bastante variável.

A distribuição espacial dos litotipos foi determinada a partir da elaboração de seções verticais e horizontais litotipológicas. As seções verticais estão espaçadas de 100m, ao longo das coordenadas norte (N) 343920 a 345420, perfis orientados de oeste (W) para leste (E), totalizando 16 seções. As seções horizontais foram feitas de 12 em 12m, da elevação (Z) 1.074 a 1.266, num total de 17. Em geral, as camadas apresentam direção norte-sul (NS), com mergulho variando de 0 a 35° para sudeste (SE)

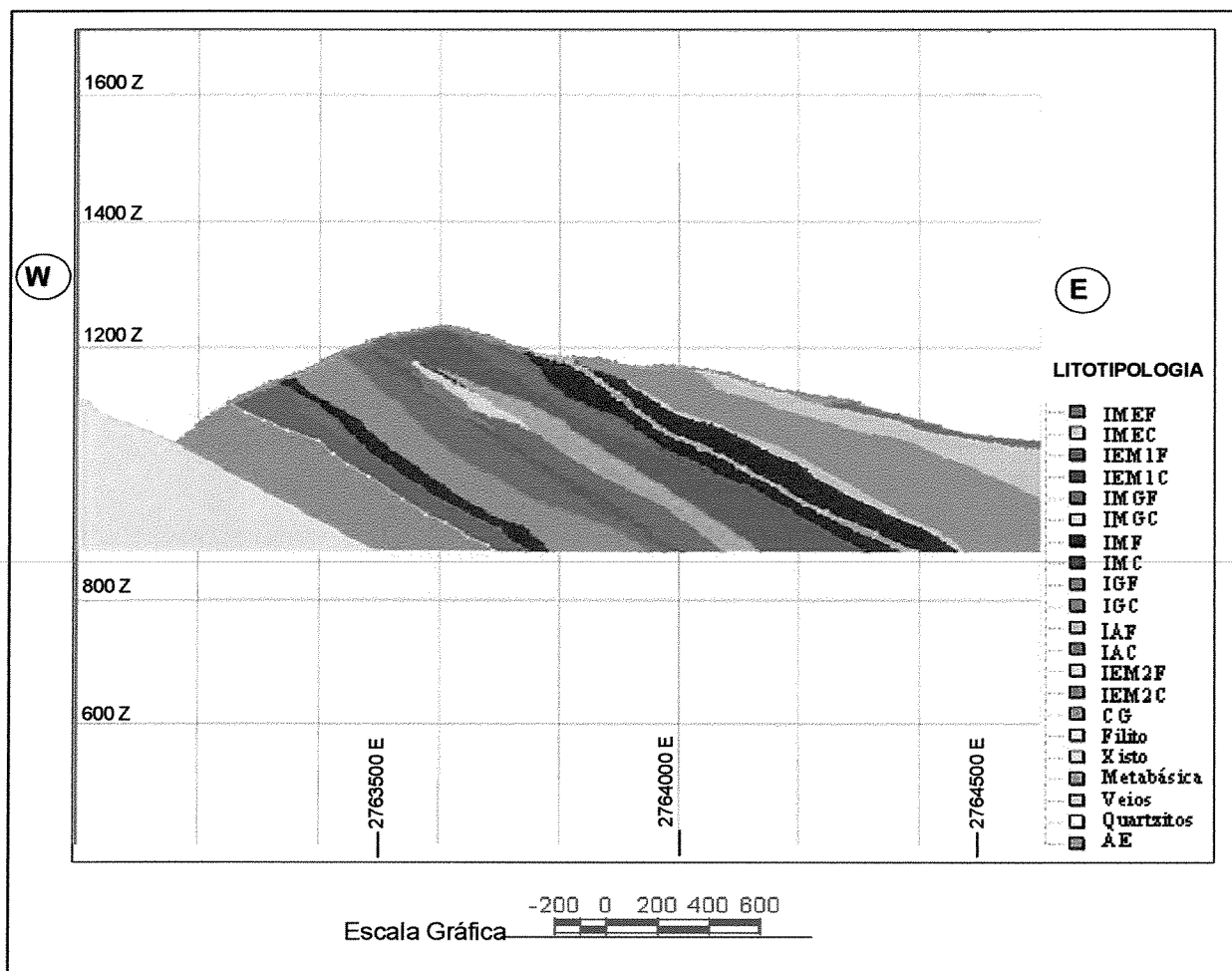


Figura 2.3.1 – Seção Vertical Típica do Modelo Litotipológico de Alegria 9

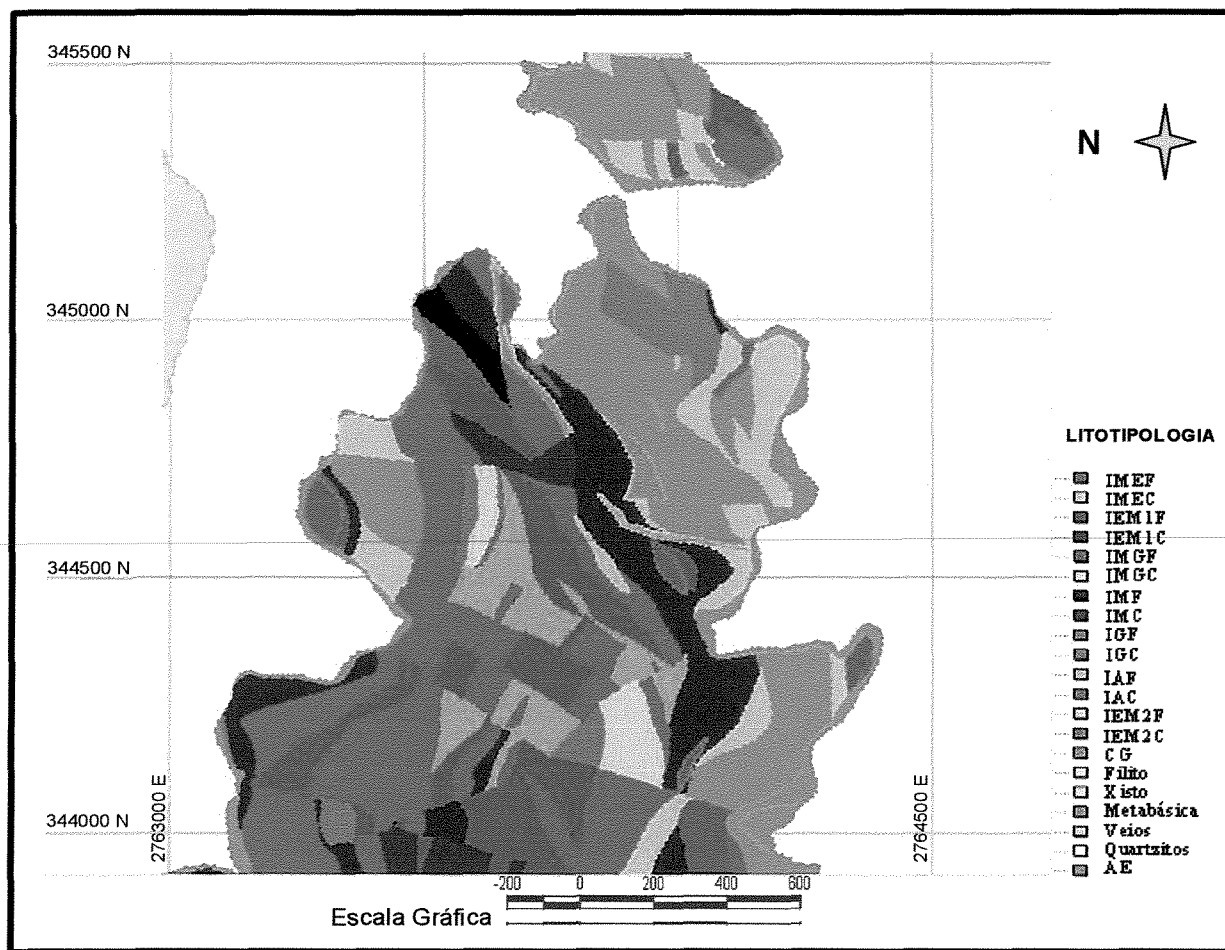


Figura 2.3.2 – Seção Horizontal Típica do Modelo Litotipológico de Alegria 9

Em virtude do enfoque deste trabalho, que é a estimativa de reservas recuperáveis de minério de ferro com a utilização da variável teor de hematita especular como parâmetro de qualidade, os sete tipos de minério descritos anteriormente serão considerados indistintamente como itabiritos, isto é, os modelos para determinação dos teores de hematita especular em blocos de lavra serão implementados considerando-se tais blocos inseridos dentro de um corpo único de minério itabirítico.

CAPÍTULO 3

3.1 – Introdução

Neste capítulo é feita a caracterização dos dados para o estudo de caso. Inicialmente é feita uma breve descrição dos procedimentos de aquisição das informações provenientes da pesquisa geológica e de execução de análises mineralógicas. Em seguida são tratadas questões referentes à organização do banco de dados e à localização dos elementos da pesquisa geológica. Finalmente é feita a análise estatística básica da variável mineralógica teor de hematita especular (He) e a implementação dos modelos para determinação dos teores desta variável em blocos de lavra, por meio de estimativa por krigagem e por meio de simulação geoestatística, através do método de simulação sequencial gaussiana condicionada (SSGC).

3.2 – Descrição de Procedimentos de Caracterização Mineralógica

A obtenção de um modelo mineralógico tem início a partir da coleta de dados espaciais através dos elementos de pesquisa geológica exploratória e de pré-lavra, representados por furos de sonda e de perfuratrizes, além de informações geológicas, geralmente representadas por mapeamento superficial, interpretação de seções verticais e horizontais. A segunda fase do procedimento é a obtenção dos teores dos minerais através de análises mineralógicas.

As análises mineralógicas dos furos são precedidas por rotinas de amostragem e preparação de pastilhas em forma de lâminas de seções polidas. Cada metragem dos furos é dividida igualmente em material para composição de amostras e material reserva. O primeiro furo é amostrado longitudinalmente a cada intervalo do furo em questão. De acordo com a norma interna da SAMARCO, denominada “*Preparação de Pastilhas*” e disponibilizada no anexo 3, existem quatro tipos de pastilhas que podem ser geradas, de acordo com a precisão requerida para a análise: global, 2x1, 3x1 e 4x1, em ordem crescente de precisão requerida, respectivamente. As análises mineralógicas deste estudo foram feitas a partir de pastilhas globais.

O material para confeccionar qualquer um destes tipos de pastilha é proveniente de deslamagem, a fim de se atingir a granulometria de 35#, que é o padrão utilizado. A preparação da pastilha global não requer etapas complementares após a deslamagem, pois o material já se encontra na granulometria padrão. A pastilha 2 x 1 (-325#, +325#) necessita de uma etapa complementar, ou seja, o material recebido é deslamado na peneira de 35# e com seus produtos esta pastilha é confeccionada. A pastilha 3 x 1 (+100#, +200#, 325#) é proveniente de uma análise granulométrica, não necessitando de etapas complementares, pois os materiais retidos nas malhas de 100# , 200# e 325# são individualmente quarteados, sendo que o retido na peneira de 325# é homogeneizado com o seu passante. Na pastilha 4 x 1 (+100#, +200#, +325#, -325#) o procedimento é o mesmo da pastilha 3 x 1, a diferença é a utilização da fração abaixo de 325#. A Figura 3.2.1, extraída de BOTELHO (2001), é um esquema representativo da pastilha 4 x 1.

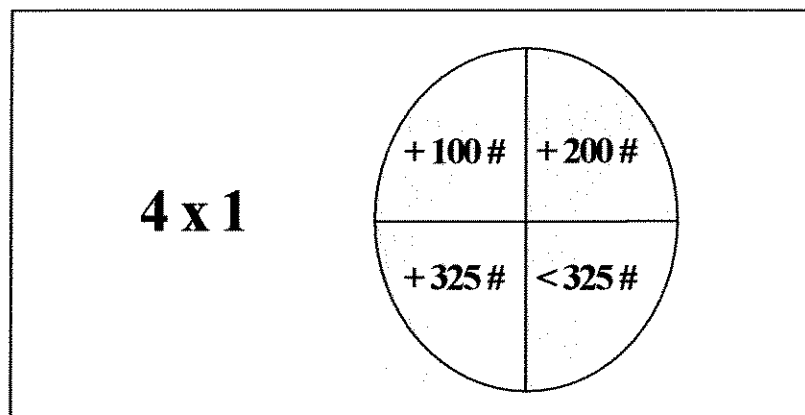


Figura 3.2.1 - Esquema 4x1 de Preparação das Lâminas de Seção Polida

Após a preparação das pastilhas, procede-se à análise mineralógica propriamente dita em microscópio petrográfico de luz refletida, no qual é efetuada a contagem dos grãos para determinação das proporções volumétricas dos minerais presentes. Segundo KANEKO (1999), no processo de utilização da pastilha 4 x 1, a contagem dos grãos tem um erro médio de 3%. No processo de contagem, calcula-se a proporção de cada constituinte mineral do minério (hematita especular, hematita porosa, magnetita e goethita), dos minerais de ganga e outros que aparecem em menor porcentagem. A soma das proporções volumétricas de todas as fases minerais presentes em uma lâmina de seção polida deve ser igual a 100%. Pode-se também, através da multiplicação da proporção volumétrica pela densidade de cada mineral-minério, obter a proporção em peso, cuja soma deve igualmente aproximar-se de 100%.

Neste estudo de caso, os dados de teores de hematita especular são provenientes do recálculo das proporções volumétricas dos quatro minerais-minério, de forma que sua soma seja igual a 100%, eliminando os minerais de ganga e outros.

Como fase final do procedimento de caracterização mineralógica, os dados mineralógicos alimentam um banco de dados geológico que tem ainda coordenadas espaciais e informações litológicas e estruturais de todos os intervalos de formação ferrífera. Em seguida, as amostras do banco de dados são regularizadas, isto é, divididas em *composites* de mesmo comprimento, de maneira que os dados possam ser tratados geoestatisticamente em suportes iguais. Posteriormente, o banco de dados é classificado em tipos mineralógicos, em função dos teores dos minerais-minério presentes.

As Fotos 3.2.1 e 3.2.2 são fotomicrografias geradas no laboratório de mineralogia da SAMARCO, obtidas através de seções polidas em microscópio ótico de luz refletida, com aumento de 200 vezes. Nestas fotos, o fundo escuro é a matriz das seções polidas. Os retângulos de detalhe mostram os minerais-minério hematita especular (He) e goethita (Gt).

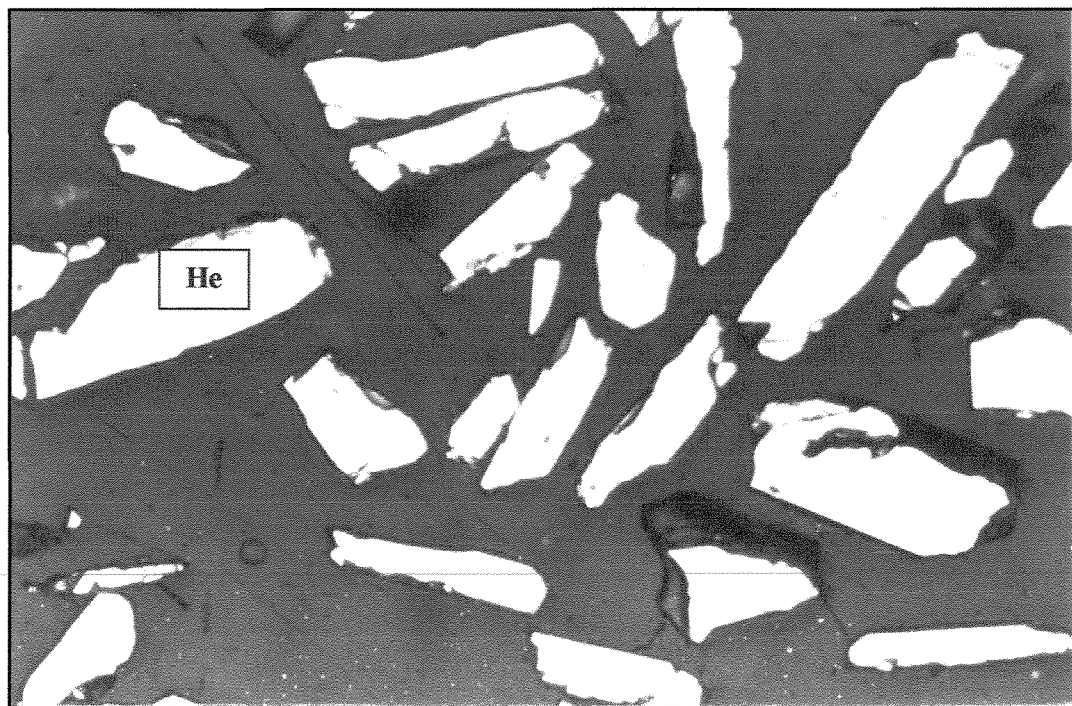


Foto - 3.2.1 - Fotomicrografia Apresentando Hematita Especular (He).

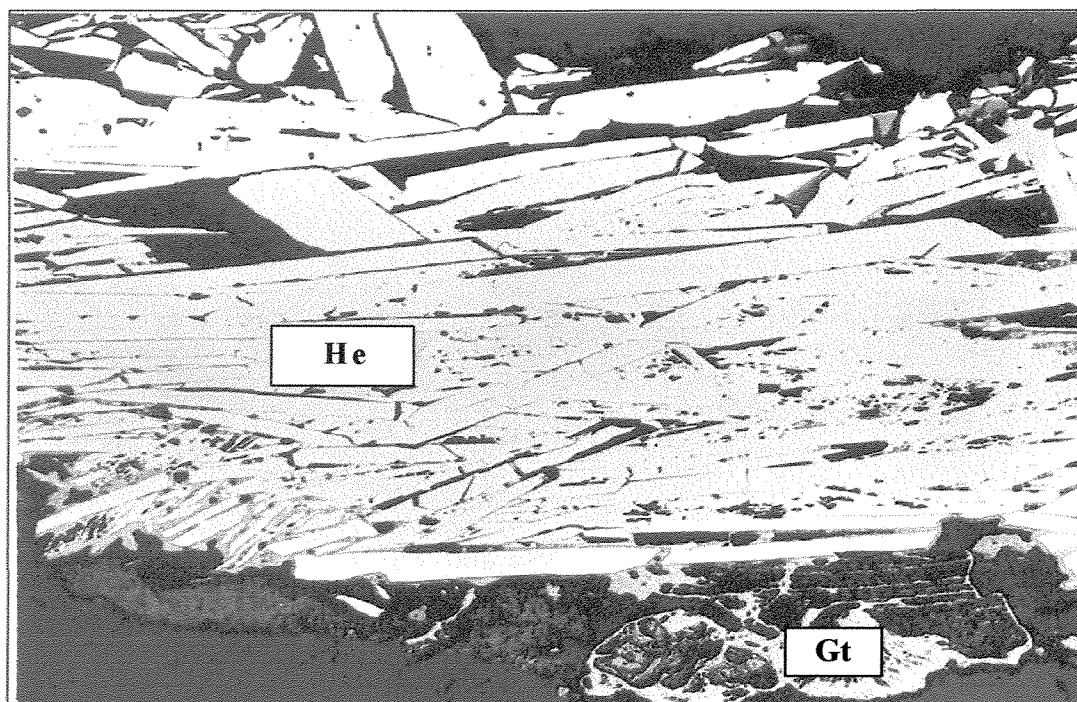


Foto 3.2.2 - Fotomicrografia Apresentando Hematita Especular (He) e Goethita (Gt).

3.3 – Banco de Dados e Localização dos Furos de Sonda e de Perfuratriz

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de análises mineralógicas dos testemunhos de sondagem de furos de sonda rotativos verticais, nas malhas de pesquisa 100 x 100m e 50 x 50m, ao longo das direções norte-sul (NS) e leste-oeste (EW). Também foram utilizadas análises mineralógicas referentes a furos de perfuratriz de pré-lavra de curto prazo verticais de 8m de profundidade, na malha 25 x 25m, também ao longo das direções NS e EW. O diâmetro dos furos é de cerca de 3” e a recuperação é superior a 80%, tanto para sonda como para perfuratriz.

Foram selecionadas, para o estudo de caso em Alegria 9, as áreas em lavra da elevação (Z) 1.152 até 1.248. A lavra atual é conduzida em bancos operacionais de 24 m de altura, que correspondem a três níveis consecutivos de 8m cada. Assim, este estudo envolve quatro bancos operacionais de 24m, totalizando 12 níveis de 8m, da seguinte forma: bancos 1.152 (níveis 1.152, 1.160 e 1.168), 1.176 (níveis 1.176, 1.184 e 1.192), 1.200 (níveis 1.200, 1.208 e 1.216) e 1.224 (níveis 1.224, 1.232 e 1.240). Os testemunhos de sondagem foram regularizados em suportes de 8m, de forma que os centros destes suportes coincidissem com a elevação central dos níveis de 8m.

A metragem e o número total dos elementos de pesquisa utilizados na região selecionada são dados na Tabela 3.3.1, na qual as amostras regularizadas estão totalizadas separadamente para furos de sonda e furos de perfuratriz. Há duas justificativas para esta separação. A primeira se deve à natureza da amostra obtida, já que, embora o comprimento do testemunho de sondagem regularizado e a profundidade dos furos de perfuratriz sejam ambos iguais a 8m, bem como são próximos os diâmetros dos furos nos dois casos, para os furos de sonda a estrutura do material a ser analisado é preservada, ao passo que a perfuratriz destrói esta estrutura, gerando uma amostra pulverizada. A segunda justificativa se deve à localização preferencial dos furos de perfuratriz, que será mostrada através da Figura 3.3.2.

Tabela 3.3.1 – Resumo do Banco de Dados

FUROS	NÚMERO	METROS	NÚMERO DE ANÁLISES MINERALÓGICAS
Sonda	61	3.120	345
Perfuratriz	3.270	26.160	484
Total	3.331	29.280	829

A Figura 3.3.1 e a Figura 3.3.2 mostram as posições, no plano XY, das coordenadas do topo dos furos de sonda e dos furos de perfuratriz, respectivamente. Como citado anteriormente, pode-se observar a localização preferenciada dos furos de perfuratriz na porção sudoeste da área em estudo, onde estão concentradas as operações de lavra atualmente. Além disso, os furos de perfuratriz só estão presentes nos níveis superiores dos bancos operacionais 1.152, 1.176 e 1.200. As Figuras 3.3.1 e 3.3.2 foram geradas pelo programa ISATIS da Geovariances – França.

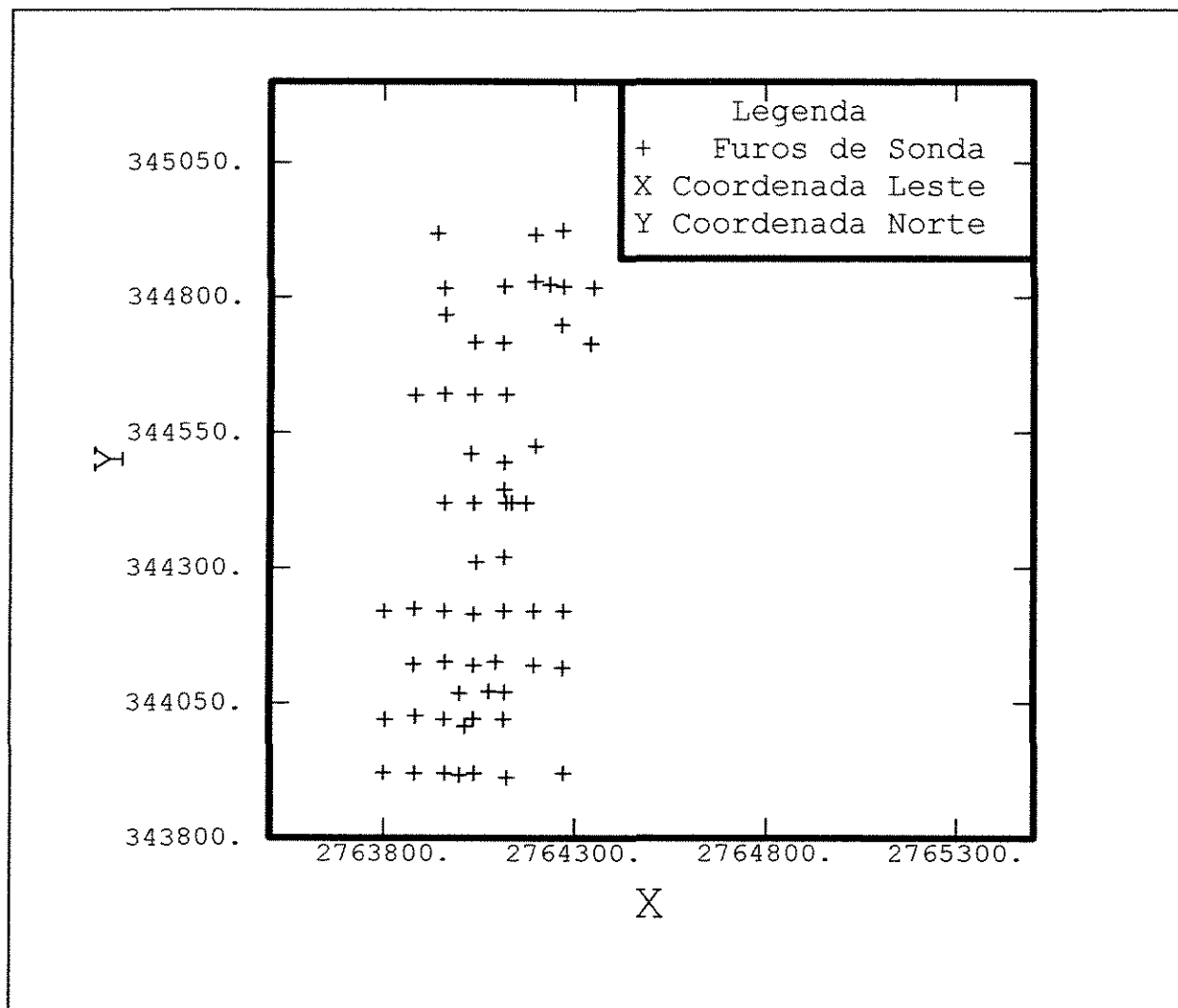


Figura 3.3.1- Mapa Base dos Furos de Sonda

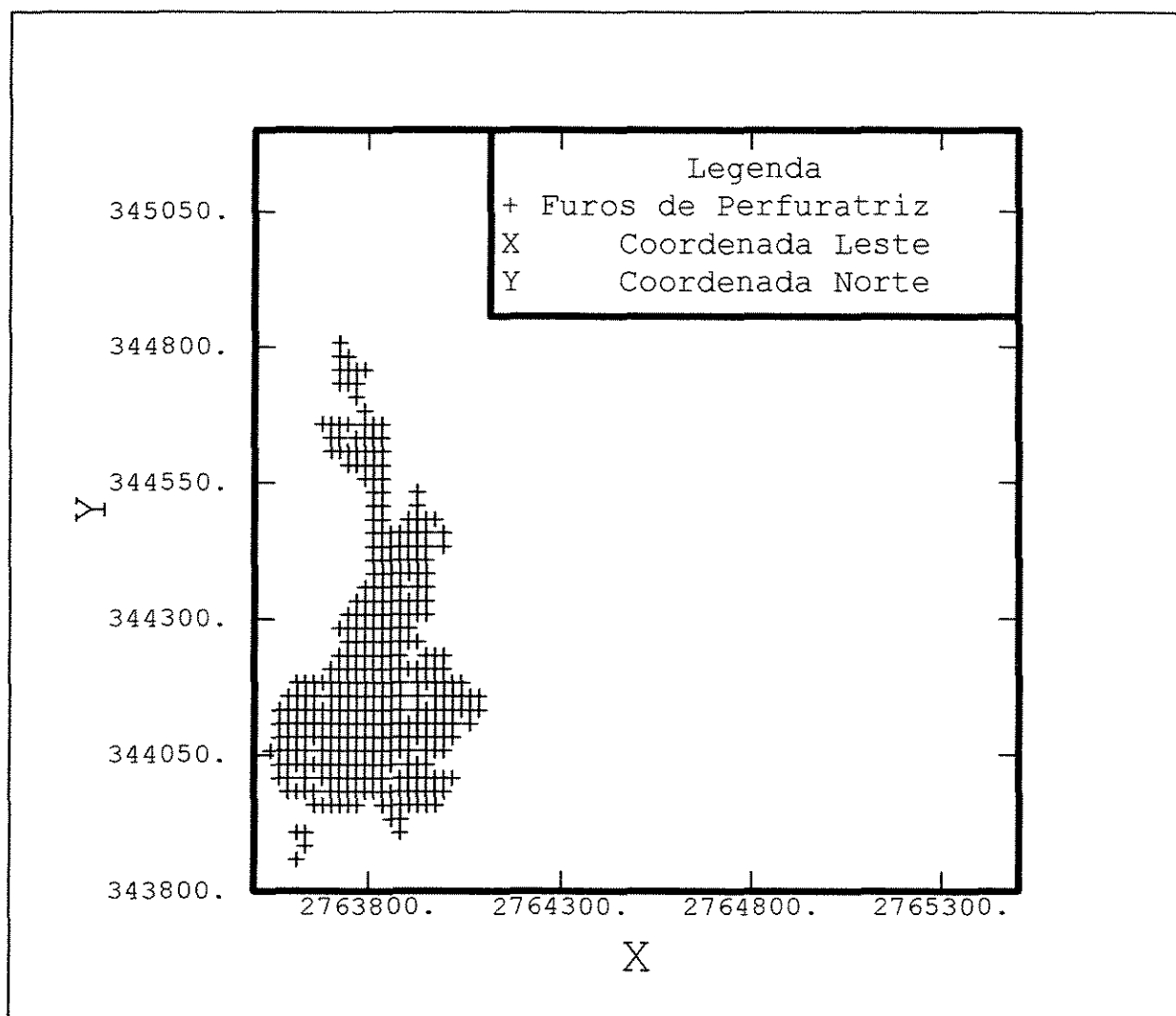


Figura 3.3.2- Mapa Base dos Furos de Perfuratriz

As Figuras 3.3.3 e 3.3.4 a seguir, também geradas no ISATIS, têm por objetivo ilustrar a distribuição espacial típica dos teores de hematita especular nos níveis de 8m dos bancos operacionais de 24m. Nestas figuras, foram selecionados os níveis 1.168 e 1.184, pertencentes aos bancos operacionais 1.152 e 1.176, respectivamente, por representarem bem os dois padrões existentes desta distribuição. O nível 1.168 (e também os níveis 1.192, 1.216 e 1.224) tem amostras provenientes de furos de perfuratriz e de sonda. Já o nível 1.184 só tem informação proveniente dos furos de sonda (padrão observado nos demais níveis, quais sejam: 1.152, 1.168, 1.176, 1.200, 1.208, 1.232 e 1.240).

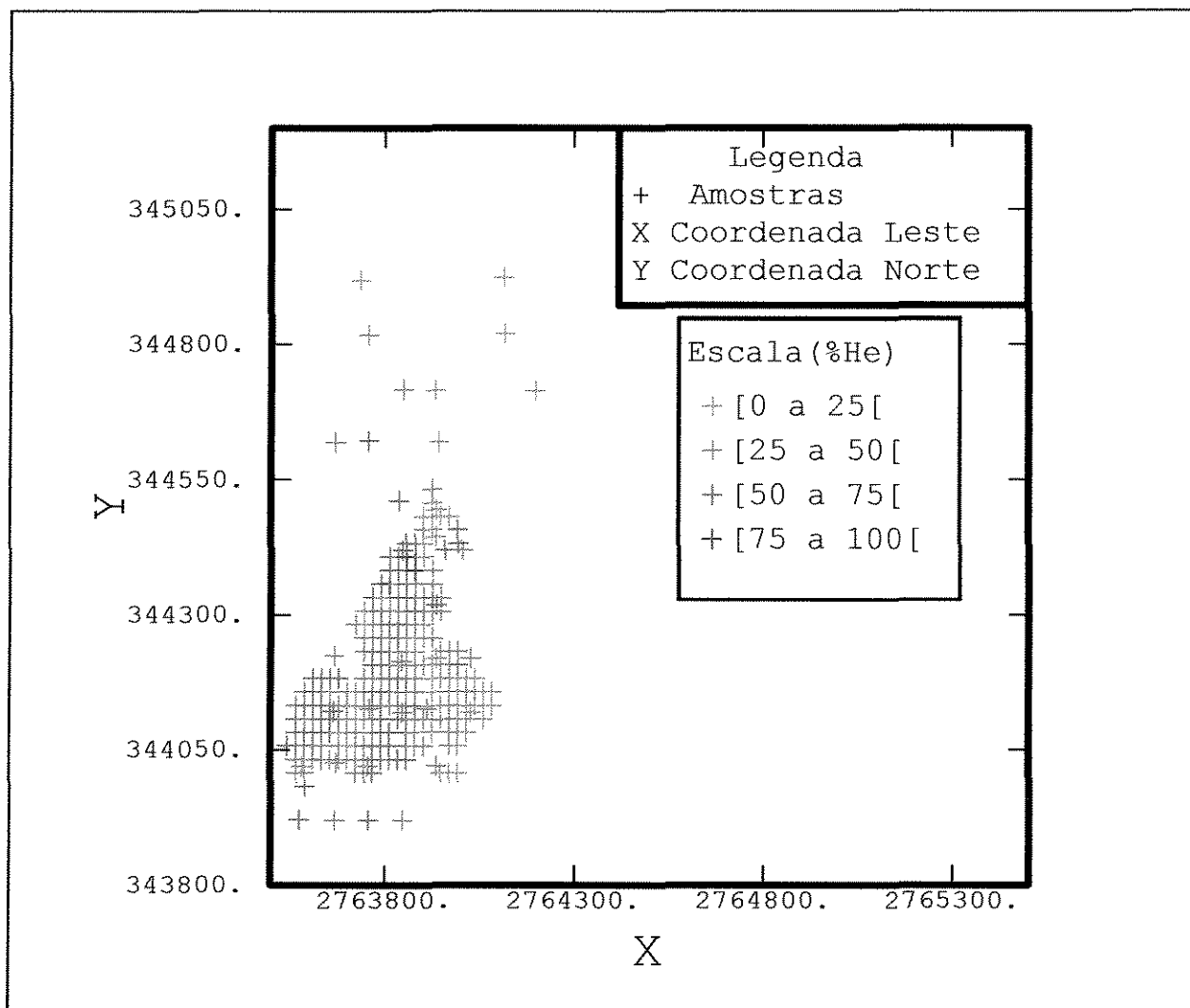


Figura 3.3.3- Teores de Hematita Especular no Nível 1.168 do Banco 1.152

A localização das amostras no nível 1.168 confirma a concentração de furos de perfuratriz de pré-lavra na porção sudoeste de Alegria 9, evidenciada na Figura 3.3.3 pelo menor espaçamento entre as amostras nesta porção. A escala de símbolos de distribuição dos teores mostra, de forma geral no nível 1168, uma tendência de decréscimo do teor de hematita especular com o aumento das coordenadas norte e leste, com exceção de algumas ocorrências isoladas de teores acima de 75%, localizadas próximas da coordenada leste 2763800, entre as coordenadas norte 344300 e 34550.

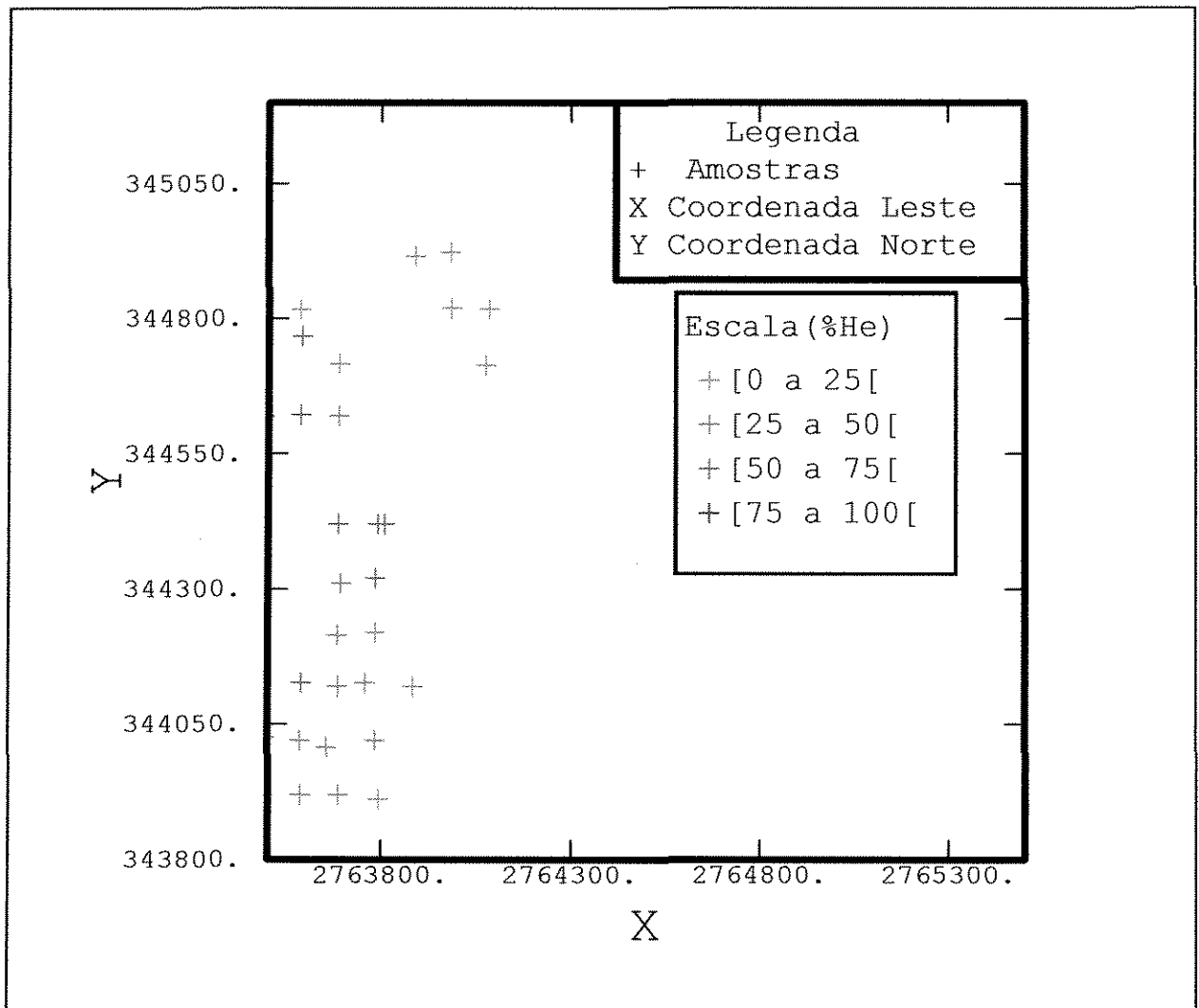


Figura 3.3.4- Teores de Hematita Especular no Nível 1.184 do Banco 1.176

Na Figura 3.3.4, o nível 1.184, conforme citado anteriormente, só possui informações provenientes de furos de sonda. Neste nível, a escala de símbolos de distribuição dos teores também permite observar, em termos gerais, a mesma tendência de decréscimo do teor de hematita especular com o aumento das coordenadas norte e leste.

3.4 – Análise Estatística da Hematita Especular

A análise estatística da hematita especular foi feita em conjunto para os furos de sonda e para os furos de perfuratriz, utilizando-se o programa ISATIS da Geovariances – França.

Uma vez que os furos de perfuratriz estão concentrados na porção sudoeste do depósito na malha 25 x 25 m e os furos de sonda estão mais uniformemente distribuídos nas malhas 50 x 50 e 100 x 100 m, foi necessário levar em consideração o efeito de enviesamento dos parâmetros estatísticos descritivos de toda a área devido ao agrupamento dos furos de perfuratriz, o qual pôde ser evidenciado através das Figuras 3.3.2 e 3.3.3 anteriores.

A Tabela 3.4.1 fornece os resultados da estatística básica da hematita especular separadamente, para furos de sonda e de perfuratriz. A Figura 3.4.1 mostra os histogramas correspondentes, onde as formas de distribuição das porcentagens de He podem ser observadas.

Tabela 3.4.1 – Resultados da Estatística Básica da Hematita Especular nos Furos de Sonda e de Perfuratriz.

Parâmetro	Dados de He nos furos de perfuratriz	Dados de He nos furos de sonda
Mínimo (%)	0	0
Quartil Inferior (%)	15,54	5,38
Média (%)	35,19	27,89
Mediana (%)	37,47	28,55
Quartil Superior (%)	54,42	47,72
Máximo (%)	94,02	77,99
Desvio Padrão (%)	23,18	22,05
Coefficiente de Variação	0,66	0,79
Número de Amostras	484	345

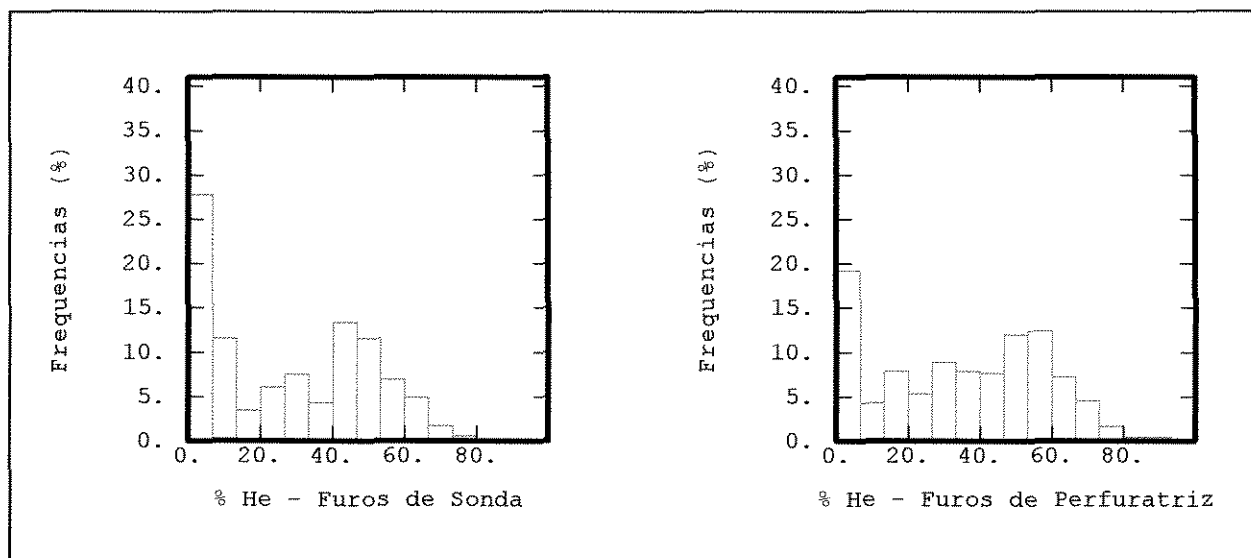


Figura 3.4.1 – Histogramas da Hematita Especular - Furos de Sonda e de Perfuratriz

Verifica-se que a média da hematita especular dos furos de perfuratriz é maior que a dos furos de sonda, devido ao fato de que a campanha de furos de perfuratriz concentrou-se preferencialmente em áreas com maiores teores de He, o que foi exemplificado na Figura 3.3.3 anterior. Dessa forma, a utilização conjunta dos dados de furos de perfuratriz e de sonda para descrever os parâmetros estatísticos da hematita especular, requer a aplicação de técnicas de desagrupamento (“*declustering*”) das informações disponíveis.

Segundo ISAACS and SRIVASTAVA (1989), quando há uma predominância de representação de teores em áreas mais ricas, pode-se aplicar uma técnica de desagrupamento na qual a determinação da média representativa de todo o depósito mineral (e não apenas dos dados disponíveis) é feita pelo estabelecimento de diversos *grids* de teste que permitam a associação de um peso para cada amostra. Para determinar o peso de uma dada amostra, deve-se contar o número de amostras dentro da célula do *grid* que contém a referida amostra. O peso será então o inverso deste número contado. Repetida a contagem para todas as amostras, deve-se normalizar os pesos de forma que a soma de todos os pesos seja igual a 1. A média será obtida pela multiplicação dos valores dos teores das amostras pelos respectivos pesos. Novas médias podem ser obtidas de maneira idêntica, apenas variando as dimensões das células do *grid*. Ao final do

processo, deve-se escolher o *grid* cuja dimensão conduza à menor média entre as várias médias ponderadas geradas. Com base nesta técnica, foi aplicado o seguinte procedimento:

- Estabeleceram-se 18 *grids* de teste, com células de dimensões variando de 25 x 25m a 110 x 110m nas direções NS e EW. A dimensão vertical das células foi mantida em 8m.
- Para cada célula destes *grids*, selecionaram-se as amostras referentes aos intervalos de sonda e/ou perfuratriz que caíssem no interior da célula, a fim de associar um peso para cada amostra.
- Foi determinada como média representativa do teor de hematita especular, denominada de média da hematita especular global, a menor das médias entre as 18 médias ponderadas geradas. Esta média foi de 27.26% de He, e a dimensão das células do *grid* correspondente foi de 100 x 100x 8m, respectivamente, nas direções NS, EW e vertical.

Este procedimento está graficamente resumido na Figura 3.4.2, onde está destacada a média representativa por uma linha tracejada em vermelho, ligando o valor desta média com a dimensão do *grid* correspondente.

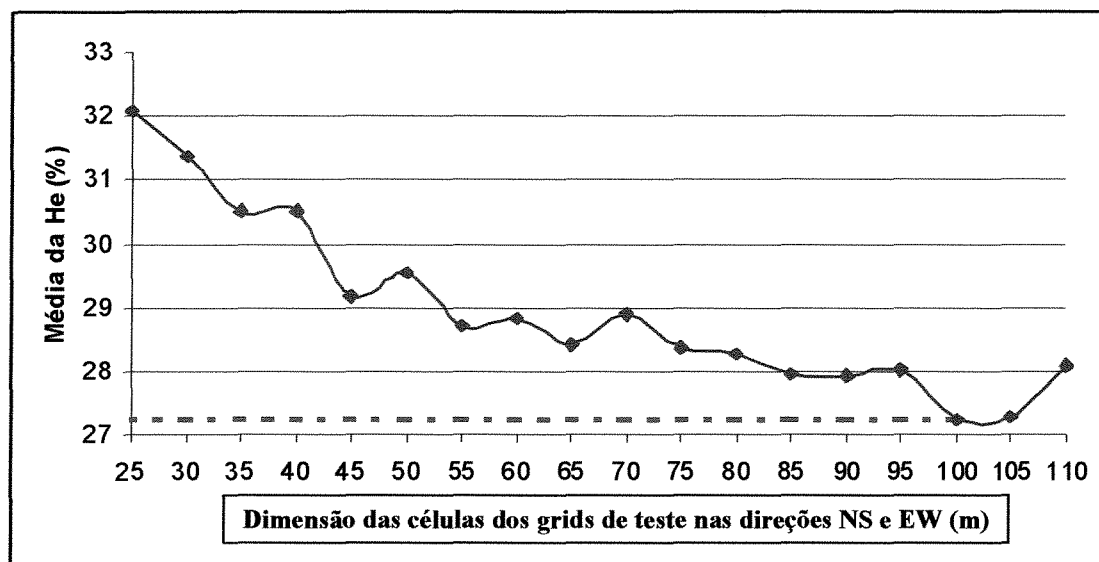


Figura 3.4.2 – Representação Gráfica da Obtenção da Média Representativa de He

Para caracterizar a He global, foi feita uma nova análise estatística, na qual as informações dos furos de perfuratriz e de sonda foram utilizadas conjuntamente, com os respectivos pesos calculados para todas as amostras, segundo o procedimento de desagrupamento. Os resultados desta análise estatística são fornecidos pela Tabela 3.4.2 e o histograma correspondente é mostrado na Figura 3.4.3. A título de comparação, foram também adicionados os conteúdos da Tabela 3.4.1 e da Figura 3.4.1, respectivamente, à Tabela 3.4.2 e à Figura 3.4.3. Os resultados obtidos mostram que a média de He, representativa de toda área em estudo, apresenta valor inferior em relação às médias de He dos furos de sonda e dos furos de perfuratriz. A forma de distribuição das porcentagens de He mostrada pelo histograma da He global da Figura 3.4.3 é semelhante às formas exibidas pelo histograma dos furos de perfuratriz e pelo histograma dos furos de sonda.

Tabela 3.4.2 – Resultados da Estatística Básica da Hematita Especular

Parâmetro	Dados de He nos furos de perfuratriz	Dados de He nos furos de sonda	He Global
			Furos de sonda e perfuratriz
Mínimo (%)	0	0	0
Quartil Inferior (%)	15,54	5,38	7,54
Média (%)	35,19	27,89	27,26
Mediana (%)	37,47	28,55	28,96
Quartil Superior (%)	54,42	47,72	44,37
Máximo (%)	94,02	77,99	94,02
Desvio Padrão (%)	23,18	22,05	22,21
Coeficiente de Variação	0,66	0,79	0,81
Número de Amostras	484	345	829

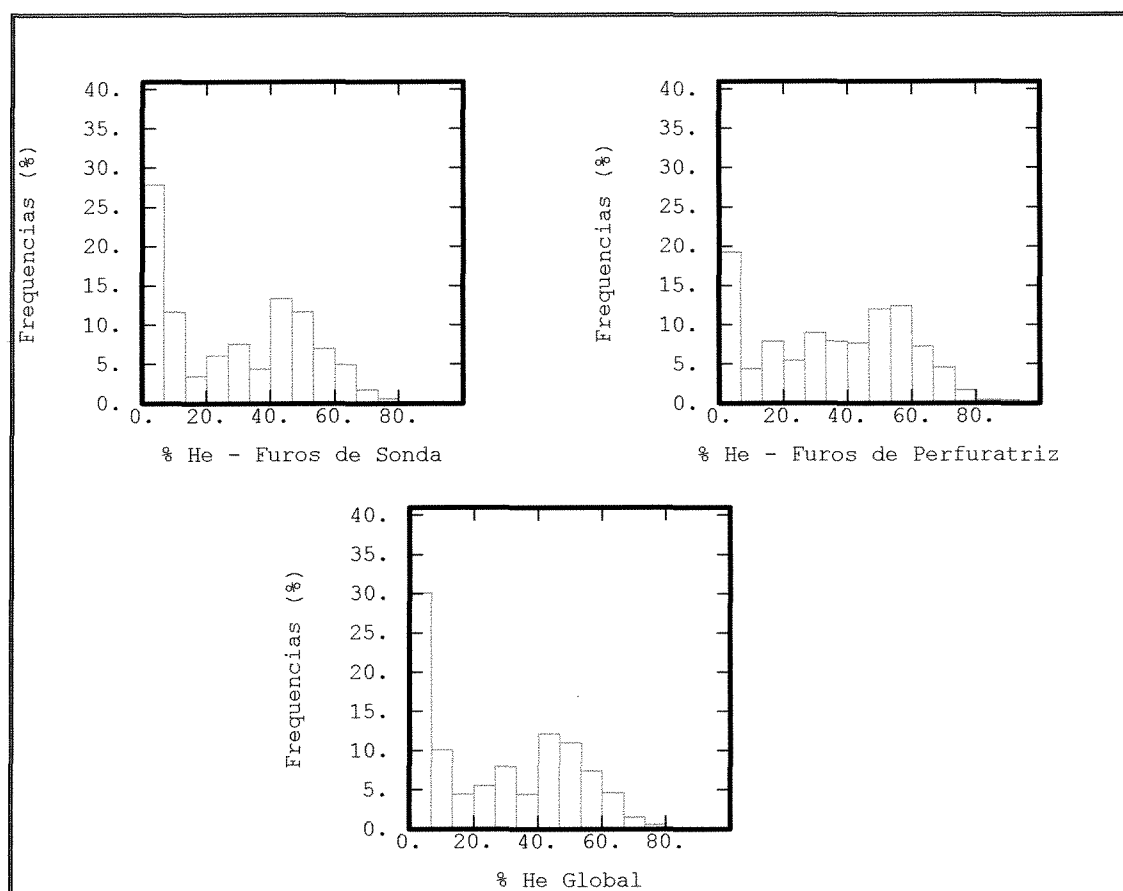


Figura 3.4.3 – Histogramas da Hematita Especular - Furos de Sonda, Furos de Perfuratriz e Global

3.5 – Estatística Espacial da Hematita Especular

Todo o estudo da estatística espacial da hematita especular foi feito com o auxílio das rotinas específicas do ISATIS.

Inicialmente, para determinar as direções principais de variabilidade da He, foram feitos variogramas experimentais direcionais. Após diversos testes, estipulou-se como plano principal de referência, o plano definido pelas direções norte-sul (NS) e leste-oeste (EW), direções ortogonais entre si e respectivamente paralelas às direções dos eixos cartesianos Y e X. Neste plano, a direção NS, coincidente com a direção das camadas, é a direção de maior continuidade da variável He, sendo a direção EW a de maior variabilidade de He. Dessa forma, a terceira direção é a direção vertical, paralela ao eixo cartesiano Z e perpendicular ao plano de referência das direções NS e EW.

O variograma experimental da direção vertical é calculado ao longo dos suportes regularizados dos furos de perfuratriz e de sonda, cujo passo é igual ao tamanho deste suporte (8 m). Já no caso das direções NS e EW, foram testados os passos de 25, 50 e 100m, todos correspondentes às possibilidades de malha de pesquisa existentes. O passo de 25m foi o que mostrou melhor estruturação dos variogramas experimentais.

De posse dos variogramas experimentais nas direções NS, EW e vertical, procedeu-se ao ajuste do modelo variográfico, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3.5.1. Foi adotado o modelo esférico, cuja proximidade da origem é aproximadamente linear e com menor inclinação ao longo da direção NS, confirmando ser esta a direção de maior continuidade.

Tabela 3.5.1 – Parâmetros do Modelo Variográfico
(amplitudes em metros)

<i>ESTRUTURA</i>	<i>PATAMAR (%)</i> ²	AMPLITUDES		
		NS	EW	VERTICAL
Esférica	222	50	50	50
Esférica	290	400	195	120

A Figura 3.5.1. mostra a representação gráfica dos variogramas experimentais e dos modelos variográficos nas três direções principais. Nesta figura, os pontos representam o variograma experimental e as linhas contínuas representam o modelo variográfico, em cada direção.

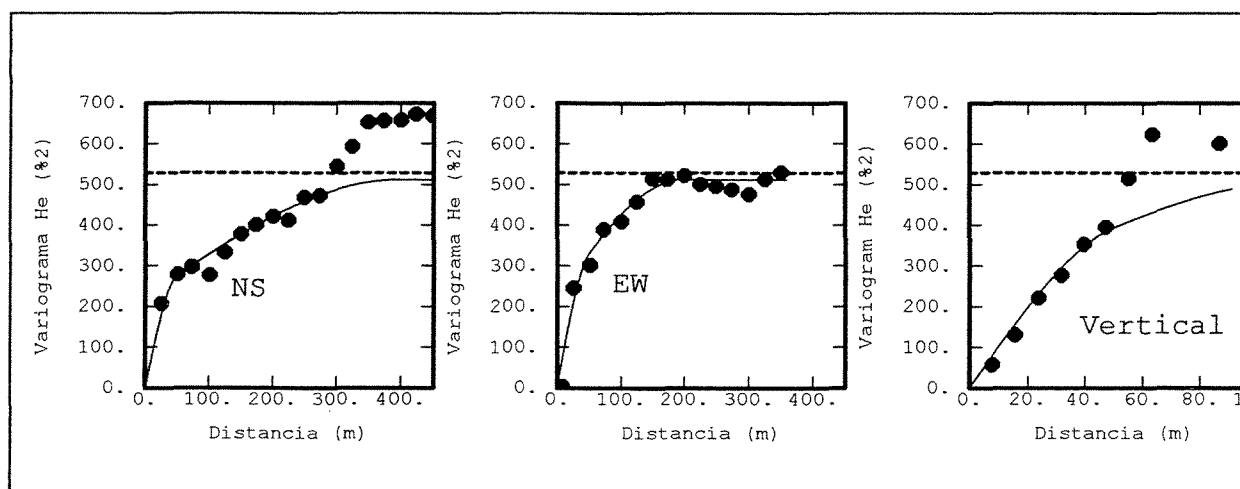


Figura 3.5.1 – Variogramas para He

O modelo ajustado é composto de duas estruturas esféricas: uma isotrópica de curto alcance, detectada através da presença dos furos de perfuratriz; e uma anisotrópica de maior alcance, delineada pela malha de pesquisa exploratória dos furos de sonda. A direção vertical foi ajustada somente pelos primeiros pontos de seu variograma experimental, pois a banca operacional tem uma altura máxima de 24m.

A opção do modelo ajustado com efeito de pepita nulo se deveu à extrapolação do comportamento linear dos pontos iniciais do variograma experimental vertical (que tem o menor passo), e também à ausência de informações adicionais, quando da construção dos variogramas experimentais, que pudessem justificar a inclusão de efeito de pepita.

3.6 – Estimativa da Hematita Especular por krigagem

Foram feitas duas estimativas da variável He por krigagem ordinária (KO), em banc operacionais de lavra, sendo a primeira em blocos de 12,5 x 12,5 x 24 m, e a segunda em bloc de 25 x 25 x 24 m (dimensões dadas ao longo das direções NS, EW e vertical, respectivamente). A escolha destes dois suportes distintos se explica a partir da rotina atual do planejamento de lavra na SAMARCO. Nesta rotina, os painéis de decisão de lavra coincidem com os blocos de 12,5 x 12,5 x 24 m, cujas dimensões nas duas primeiras direções foram originalmente definidas para monitoramento da variável química teor de fósforo, a qual é controlada por furos de perfuratriz de pré-lavra na malha de pesquisa 12,5 x 12,5 m. Já a variável mineralógica teor de hematita especular é controlada por furos de perfuratriz de pré-lavra na malha de pesquisa 25 x 25 m. Assim, objetiva-se comparar os resultados da estimativa nos dois suportes referidos.

A implementação da krigagem da hematita especular também foi feita através do algoritmo de KO disponível no ISATIS. Utilizou-se vizinhança móvel, considerando as dez amostras mais próximas e mínimo de quatro amostras para estimar um bloco. O elipsóide de busca foi implementado com seus eixos principais paralelos às direções NS, EW e vertical, correspondentemente, cujas dimensões foram suficientes para reproduzir as amplitudes do modelo variográfico nas direções NS e EW. A busca na direção vertical foi limitada por um raio de 24m. A discretização dos blocos foi de 4 x 4 x 1 (X Y Z).

A Tabela 3.6.1 e a Figura 3.6.1 trazem, respectivamente, um resumo estatístico dos resultados da krigagem e os histogramas representativos dos teores krigados, para os dois suportes em análise. Nota-se que as médias obtidas foram bem próximas à média global da He, e que a redução da variância no suporte de blocos, em relação à variância inicial das amostras (mostrada na Tabela 3.6.1 pelos valores de desvio padrão), foi maior na krigagem em blocos de 25 x 25 x 24m, porém muito próximo ao da krigagem em blocos 12,5 x 12,5 x 24m. O efeito de atenuação característico da krigagem pode ser percebido pela redução dos valores máximos, e das diferenças entre os quartis superior e inferior (em relação à estatística da He global da Tabela 3.4.2) e também indiretamente através da comparação entre as formas de distribuição

porcentagens mostradas pelos histogramas dos teores krigados e aquelas exibidas pelo histograma da He global da Figura 3.4.1.

Tabela 3.6.1 – Resumo Estatístico dos Teores Krigados

Parâmetro	Krigagem Blocos 12,5x12,5x24m	Krigagem Blocos 25x25x24m
Mínimo (%)	0	0
Quartil Inferior (%)	8,54	7,50
Média (%)	27,71	26,66
Mediana (%)	29,57	27,67
Quartil Superior (%)	42,71	41,35
Máximo (%)	82,07	80,37
Desvio Padrão (%)	19,39	19,26
Coefficiente de Variação	0,70	0,72
Número de Blocos	9.788	2.447

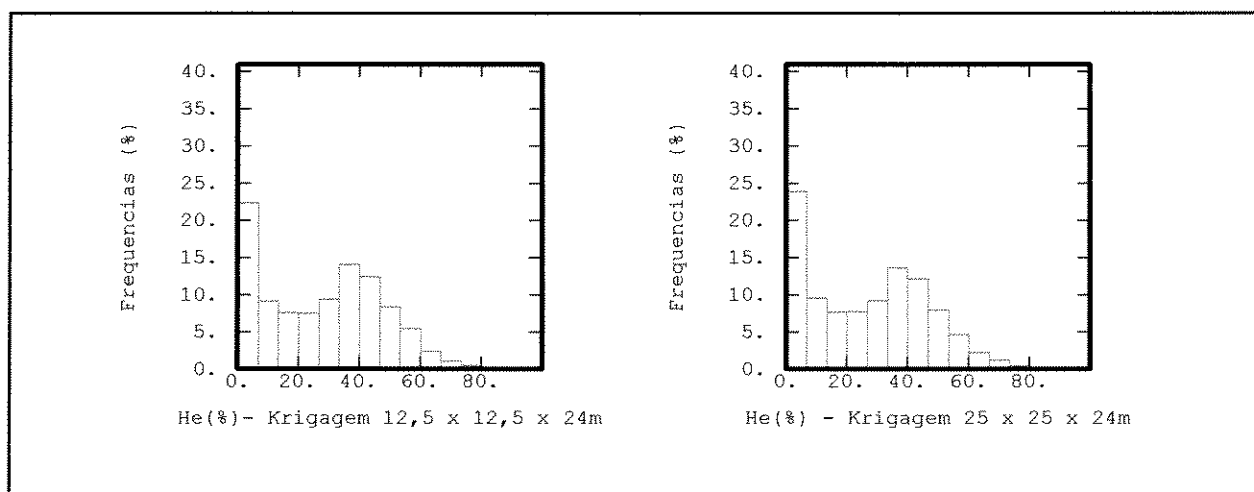


Figura 3.6.1 – Histogramas dos Teores Krigados

A Figura 3.6.2 mostra os mapas da krigagem da He no banco operacional 1.152, para comparação por imagens dos resultados entre os dois suportes considerados. Os mapas foram gerados por uma rotina disponível no ISATIS, denominada representação por imagens do tipo “*raster*”, que, segundo BLEINER *et al* (2000), é uma aplicação para representar uma variável definida em um *grid* regular, na qual intervalos de valores da variável são associadas a cores e a

representação das células do *grid* é suavizada por um fator de refinamento da imagem previamente estabelecido. Nesta figura, as coordenadas X e Y representam as coordenadas leste e norte, respectivamente. De maneira geral, a distribuição dos teores krigados da He no banco 1.152 exibe comportamento semelhante para os dois suportes de blocos, entretanto, a imagem da krigagem em blocos de 12,5 x 12,5 x 24m apresenta detalhes de discontinuidades de teores localizadas (exemplificadas por dois círculos no mapa superior da Figura 3.6.2), que foram atenuadas ou suprimidas nas regiões correspondentes da imagem em blocos de 25 x 25 x 24m.

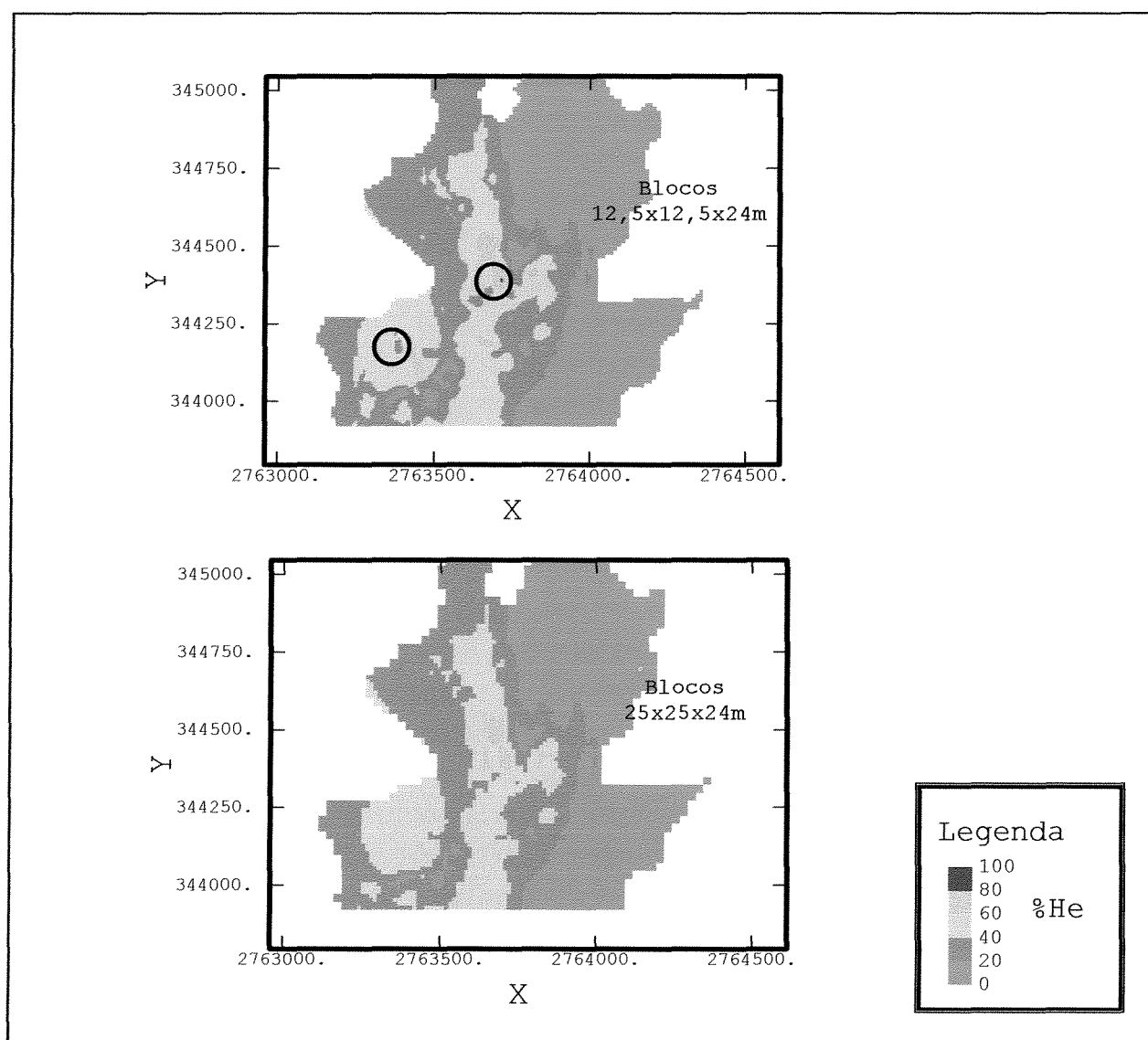


Figura 3.6.2 – Mapas de Imagens da Krigagem da He no Banco 1.152

3.7 – Implementação da Simulação Seqüencial Gaussiana Condicionada da He

3.7.1 – Preparação dos Dados Amostrais

A simulação seqüencial gaussiana da hematita especular foi feita utilizando-se também o software ISATIS da Geovariances – França.

Inicialmente, procedeu-se à transformação dos valores de He das amostras para uma distribuição gaussiana, admitida multivariada após teste de binormalidade, e posteriormente foi gerado um modelo variográfico dos dados normalizados, atendendo às exigências de aplicação do algoritmo da SSG descritas no Capítulo 1.3. A Tabela 3.7.1.1 fornece os parâmetros do modelo variográfico da variável He transformada e a Figura 3.7.1.1 mostra a representação gráfica dos variogramas experimentais e do modelo variográfico nas três direções principais. Nesta Figura, os pontos representam o variograma experimental e as linha contínuas representam o modelo variográfico, em cada direção. Os parâmetros utilizados para construção dos variogramas experimentais da variável He transformada foram os mesmos quando da elaboração da variografia experimental, vista no Capítulo 3.5.

Tabela 3.7.1.1 – Parâmetros do Modelo Variográfico da Variável He Transformada (amplitudes em metros)

<i>ESTRUTURA</i>	<i>PATAMAR (%)</i> ²	AMPLITUDES		
		NS	EW	VERTICAL
Esférica	0.480	50	50	50
Esférica	0.645	400	275	200

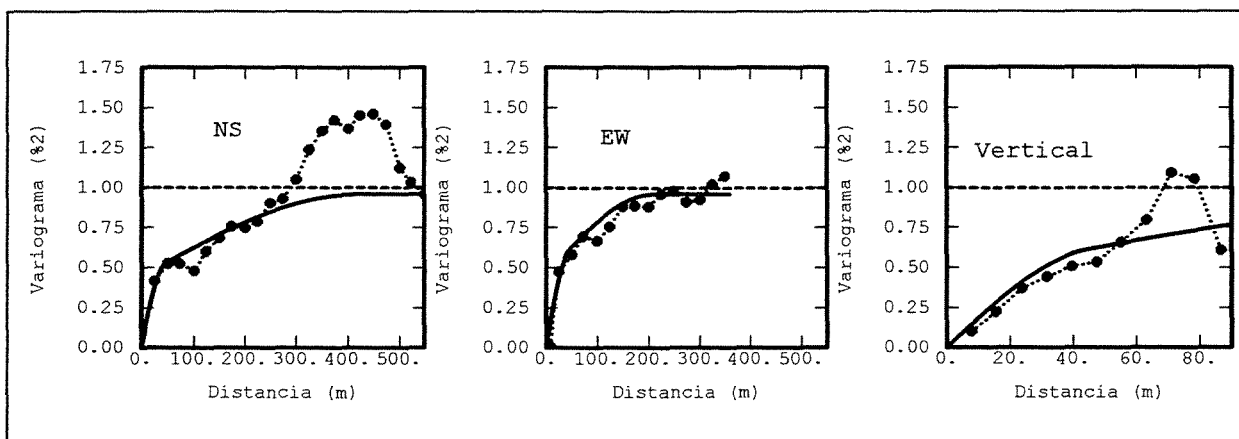


Figura 3.7.1.1 – Variogramas da Variável He Transformada

3.7.2 – Estabelecimento das Simulações

Foram feitas 50 simulações, em um *grid* fino de dimensões 3,125 x 3,125 x 81 (dimensões dadas ao longo das direções NS, EW e vertical, respectivamente), totalizando 469.824 nós simulados. Estas dimensões são sub-múltiplas das dimensões dos blocos de lavra para permitir o posterior estabelecimento dos resultados das simulações em blocos de lavra.

Cada simulação foi feita com vizinhança móvel, considerando as doze amostras mais próximas e admitindo um máximo de seis nós previamente simulados. O elipsóide de busca foi implementado com dimensões que reproduziram as amplitudes do modelo variográfico, sendo limitado na direção vertical por um raio de 24m.

A verificação do número de simulações foi feita observando-se os resultados dos parâmetros estatísticos acumulados do conjunto de realizações, conforme mostrado na Figura 3.7.2.1, onde se pode observar uma razoável estabilização da média e do desvio padrão acumulados para 50 simulações.

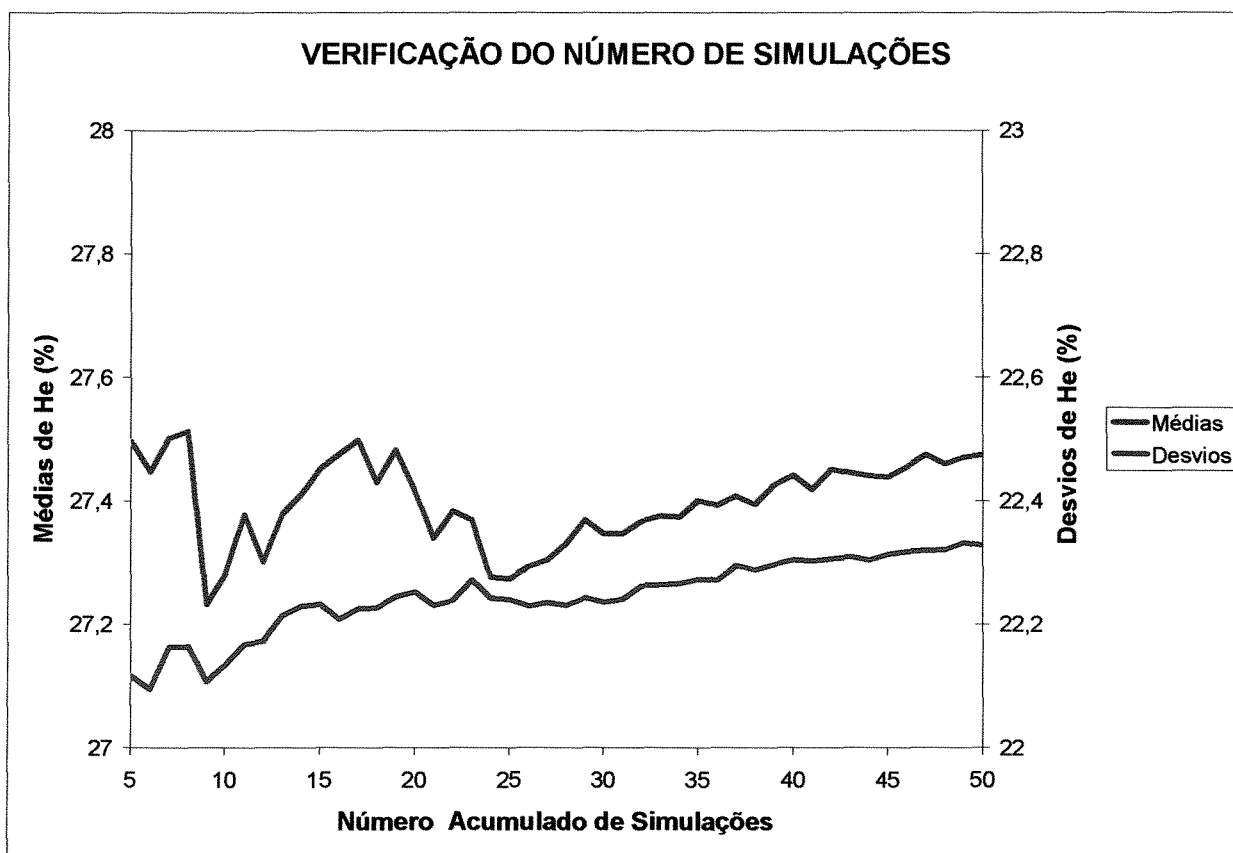


Figura 3.7.2.1 – Verificação do Número de Simulações

A validação dos resultados obtidos, em termos de características estatísticas da simulação de He nos nós do *grid* de 3,125 x 3,125 x 8m, é mostrada na Tabela 3.7.2.1, Figura 3.7.2.2 e Figura 3.7.2.3.

A Tabela 3.7.2.1 fornece a estatística básica de 6 simulações tomadas como exemplo e escolhidas aleatoriamente dentre as 50 simulações (simulação 1 (S_01), 10 (S_10), 27 (S_27), 39 (S_39), 44 (S_44) e 50 (S_50), respectivamente). Nesta tabela é feita a comparação com o resumo da estatística da He global (conforme visto no Capítulo 3.4) e com a média das simulações (valores em % de He). O resumo estatístico das demais simulações pode ser visto no Anexo 1. A Figura 3.7.2.2 fornece os histogramas correspondentes e a Figura 3.7.2.3 resume graficamente a média e o desvio padrão de todas as simulações. Verifica-se que as simulações efetuadas reproduziram satisfatoriamente as características estatísticas e a forma da distribuição das porcentagens da He global.

Tabela 3.7.2.1 – Estatística Comparativa das Simulações (em % de He)

Simulação	Mínimo	Máximo	Média	Desvio
1	0,25	94,03	27,07	21,64
10	0,27	94,03	24,99	21,65
27	0,24	94,03	27,60	22,38
39	0,27	94,03	28,60	22,63
44	0,30	94,03	27,20	22,07
50	0,27	94,03	28,16	22,13
Média das 50 Simulações	0,27	94,03	27,48	22,33
He Global	0	94,02	27,26	22,21

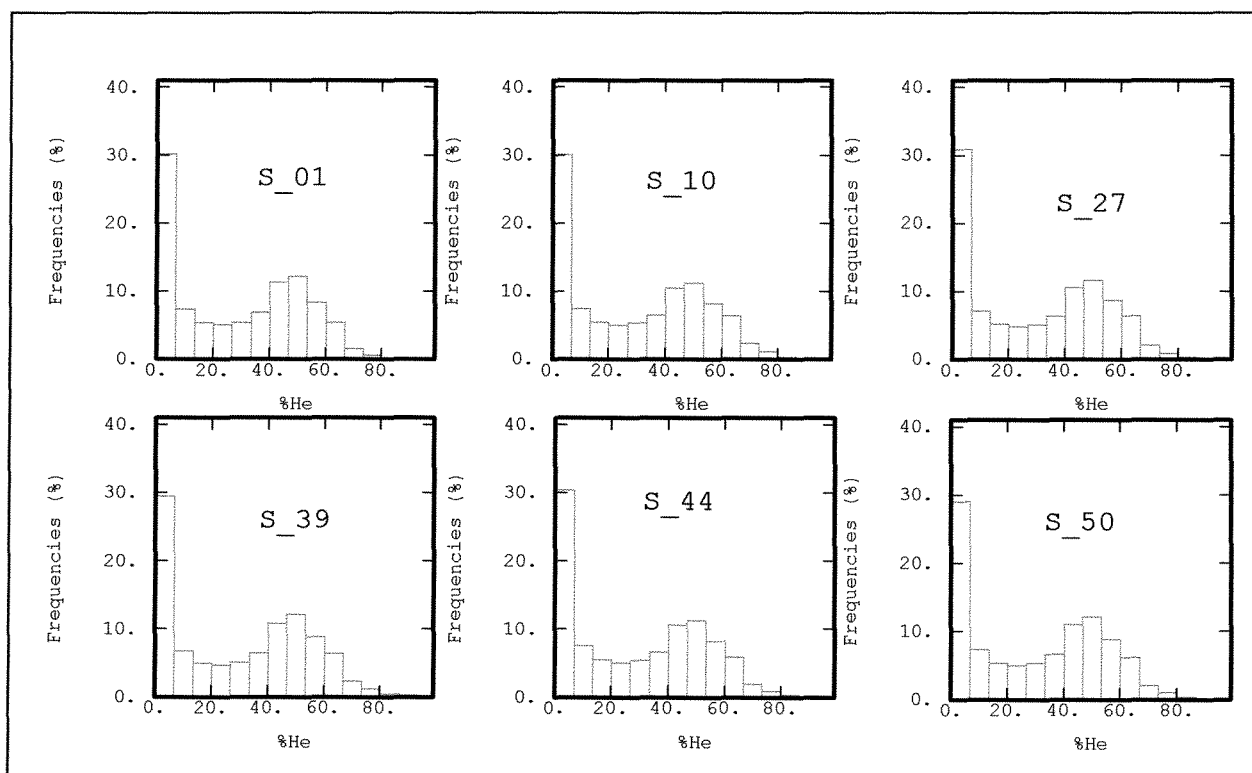


Figura 3.7.2.2 – Histogramas de 6 Simulações

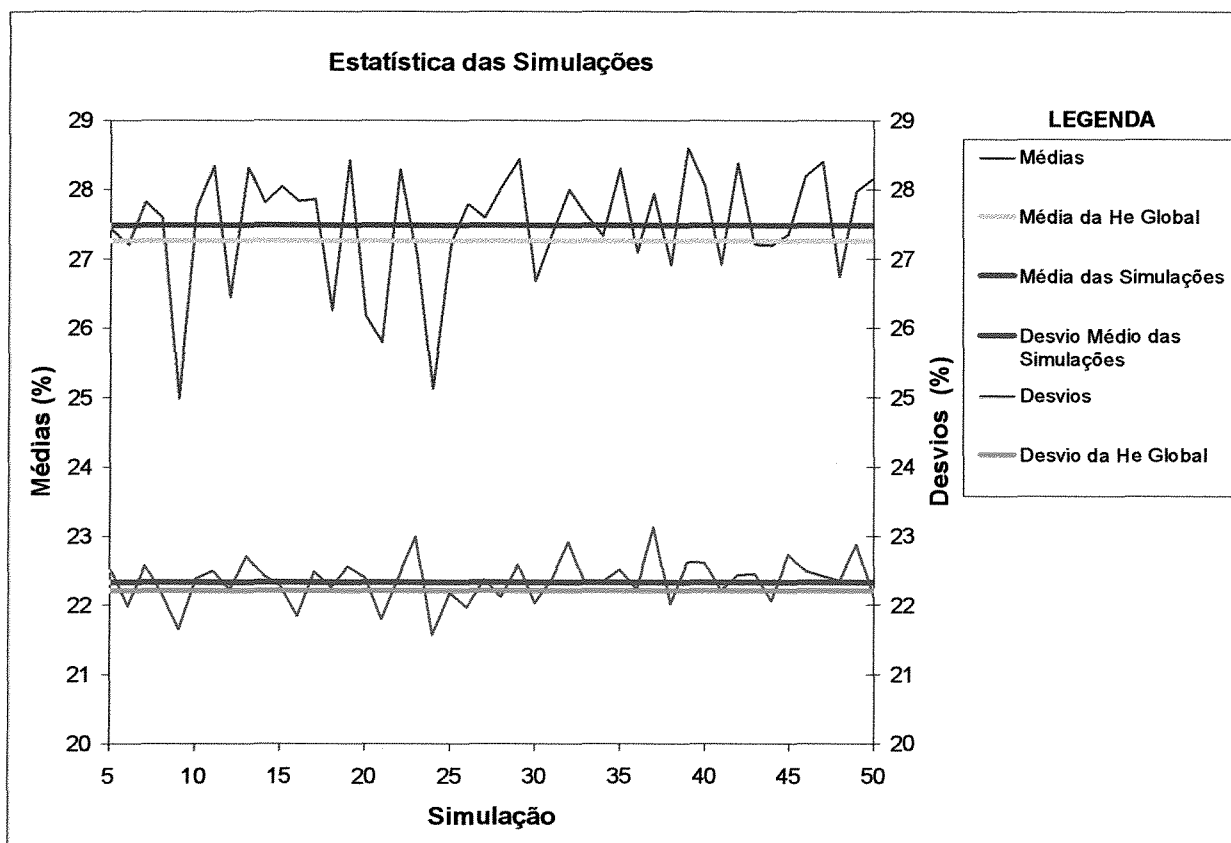


Figura 3.7.2.3 – Gráfico Representativo da Estatística Básica das Simulações

A verificação da reprodutibilidade do modelo variográfico nas simulações está ilustrada na Figura 3.7.2.4, onde os variogramas experimentais de todas as realizações podem ser vistos sobrepostos, juntamente com o modelo variográfico e o variograma experimental construído sobre os dados amostrais, nas já referidas direções norte-sul (NS), leste-oeste (EW) e vertical. Pode-se admitir de forma geral que as simulações efetuadas reproduziram o variograma da He, pois o formato do modelo variográfico proposto foi razoavelmente preservado nos variogramas experimentais das simulações. Na Figura 3.7.2.4, deve-se mencionar o maior desvio dos variogramas experimentais simulados em relação ao modelo variográfico na direção vertical, para distâncias superiores a 30m. Este fato não foi considerado como fator restritivo da validação da reprodutibilidade do modelo variográfico, já que o elipsóide de busca usado nas simulações foi limitado por um raio de 24m na direção vertical, comprimento coincidente com a altura dos bancos operacionais de lavra.

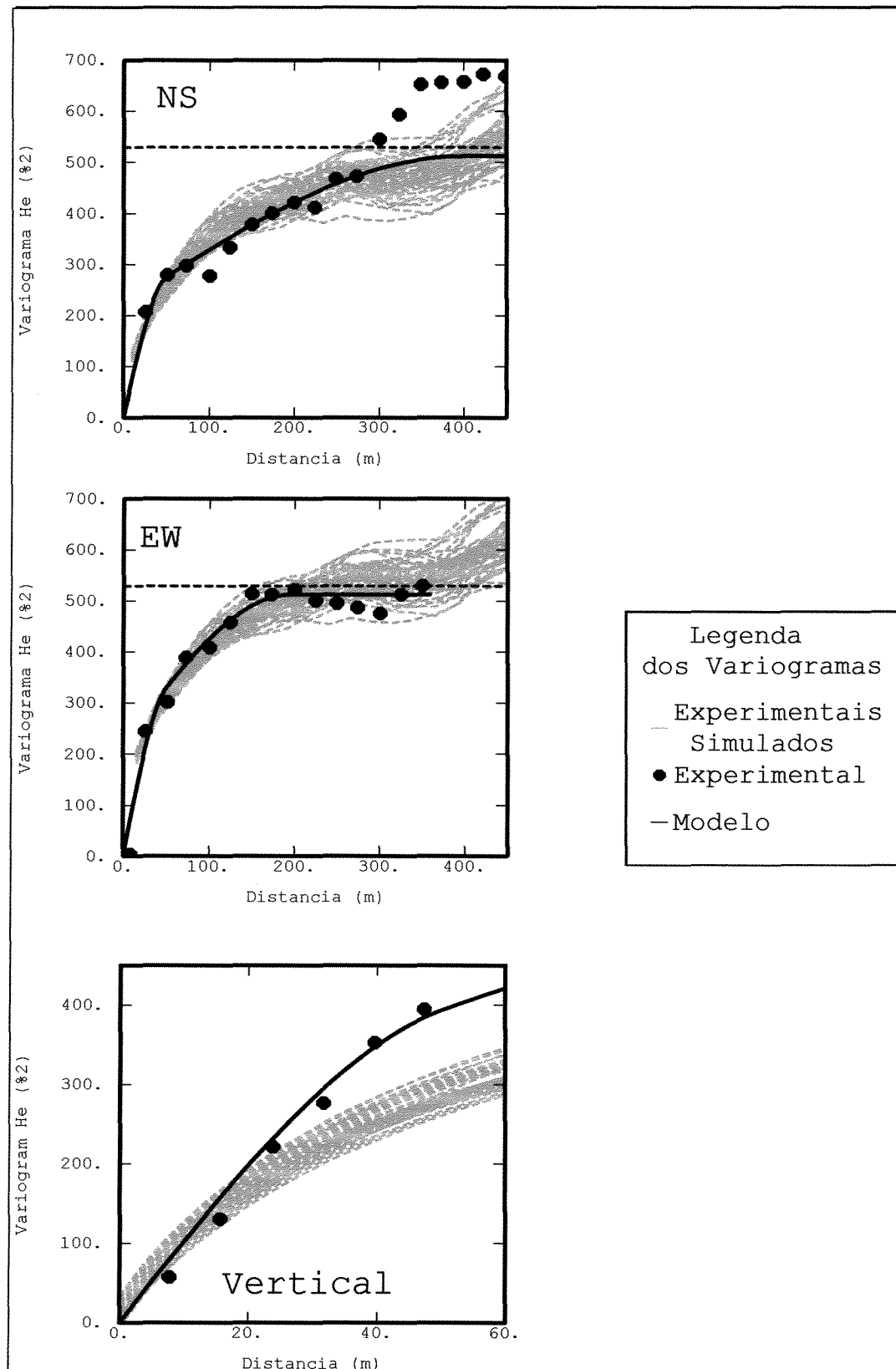


Figura 3.7.2.4 – Verificação da Reprodução do Modelo Variográfico nas Simulações

3.7.3 – Simulações nos Blocos de Lavra

Para implementar os teores simulados de He nos blocos de lavra 12,5 x 12,5 x 24m e 25 x 25 x 24m, a partir dos resultados das simulações nos nós do *grid* de 3,125 x 3,125 x 8m, utiliza-se um procedimento de reblocagem, no qual o valor de He simulado em um dado bloco de lavra equivale à média dos valores simulados dos nós interiores a este bloco, desde que seja verificada a exigência de que o número de nós interiores deve ser igual para todos os blocos, para evitar enviesamento dos valores simulados nos blocos. Os resultados deste procedimento são mostrados nas Tabelas 3.7.3.1 e 3.7.3.2, e também na Figura 3.7.3.1.

A Tabela 3.7.3.1 se refere à reblocagem para blocos de 12,5 x 12,5 x 24m e inicialmente a estatística básica das mesmas 6 simulações anteriormente selecionadas, seguido pelo resumo estatístico da média das 50 simulações em blocos e ao final, a título de comparação, é novamente mostrado o resultado da krigagem nos referidos blocos. Os resultados das demais simulações nos blocos de lavra estão no Anexo 2. A Tabela 3.7.3.2 se refere aos resultados da reblocagem para blocos de 25 x 25 x 24m e sua constituição é análoga à da Tabela 3.7.3.1. Finalmente, a Figura 3.7.3.1 faz uma representação gráfica de todas as médias obtidas, comparando também com os resultados anteriores da krigagem.

Tabela 3.7.3.1 – Resumo Estatístico Comparativo – Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m

Simulação	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1	0,33	90,79	27,48	20,36
10	0,33	88,40	27,85	21,30
27	0,30	91,79	27,82	21,17
39	0,33	92,30	28,84	21,64
44	0,36	90,28	27,64	20,85
50	0,35	93,10	28,48	20,97
Média das 50 Simulações	0,34	89,64	27,80	21,24
Krigagem	0	82,07	27,71	19,39

Tabela 3.7.3.2 – Resumo Estatístico Comparativo – Blocos de 25 x 25 x 24m

Simulação	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1	0,36	85,05	26,66	19,57
10	0,36	84,68	27,07	20,44
27	0,33	84,68	26,91	20,59
39	0,35	86,41	27,84	20,95
44	0,35	82,42	26,74	20,02
50	0,36	92,68	27,90	20,45
Média das 50 Simulações	0,35	84,47	26,95	20,58
Krigagem	0	80,37	26,66	19,26

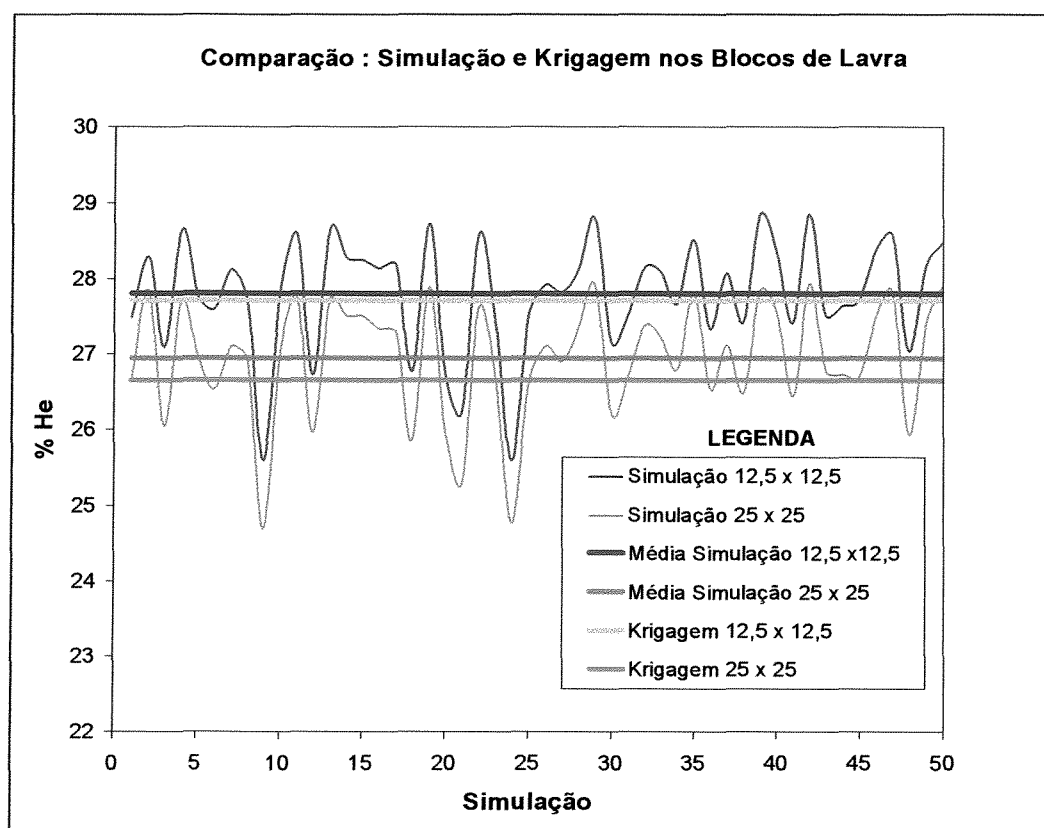


Figura 3.7.3.1 – Gráfico Comparativo do Resumo de Resultados da Simulação e da Krigagem em Blocos de Lavra.

A análise da Figura 3.7.3.1, bem como das Tabelas 3.7.3.1 e 3.7.3.2, permite dizer que a média das 50 simulações ficou próxima da média krigada e da média global (igual a 27,26% de He, conforme visto no Capítulo 3.4), tanto para blocos de 12,5 x 12,5 x 24m quanto para blocos

de 25 x 25 x 24m. A variação das médias individuais de cada simulação em blocos também é satisfatória, do ponto de vista da representatividade da média de He.

Adicionalmente, verifica-se que as medidas de dispersão, que podem ser obtidas das Tabelas 3.7.3.1 e 3.7.3.2, pelas diferenças entre os valores máximos e mínimos e pelos valores dos desvios padrão, são maiores no caso dos resultados obtidos nas simulações do que no caso dos resultados da krigagem, para ambos os suportes de blocos. Estas medidas expressam a variabilidade a nível dos blocos e, devido à característica de atenuação da krigagem (Capítulo 1.2), e também devido ao fato de que as simulações são realizações possíveis da realidade desconhecida (conforme visto Capítulo 1.3), as referidas medidas de dispersão apresentadas pelos resultados obtidos das simulações são manifestações mais próximas da variabilidade real.

Fazendo agora a comparação entre os resultados das simulações nos dois suportes de blocos considerados, verificou-se que os máximos de He obtidos em blocos simulados de 12,5 x 12,5 x 24m foram maiores. Além disso, como esperado, o efeito da redução do desvio padrão, em relação ao desvio padrão a nível de amostras, foi maior para blocos de 25 x 25 x 24m, entretanto esta redução foi mais expressiva do que no caso da mesma comparação entre blocos krigados.

Para enfatizar as diferenças entre os resultados obtidos por krigagem e por simulação também entre os dois suportes de blocos considerados, em termos da distribuição espacial dos teores de He, as Figuras 3.7.3.2 e 3.7.3.3 fornecem as imagens do tipo “*raster*” dos mapas da simulação 27 (S_27) em blocos de 12,5 x 12,5 x 24m e 25 x 25 x 24m, respectivamente, no banco operacional 1.152. Nestas figuras, também é fornecida a imagem referente à krigagem, repetida da Figura 3.6.2 anterior, para facilitar a análise comparativa. As coordenadas X e Y representam as coordenadas leste e norte, respectivamente. Verifica-se que os teores nas imagens da krigagem estão mais atenuados, tendendo para a média de He, ao passo que nas imagens da simulação 27 valores extremos e descontinuidades locais de teores podem ser notados, sendo este efeito mais pronunciado para os blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.

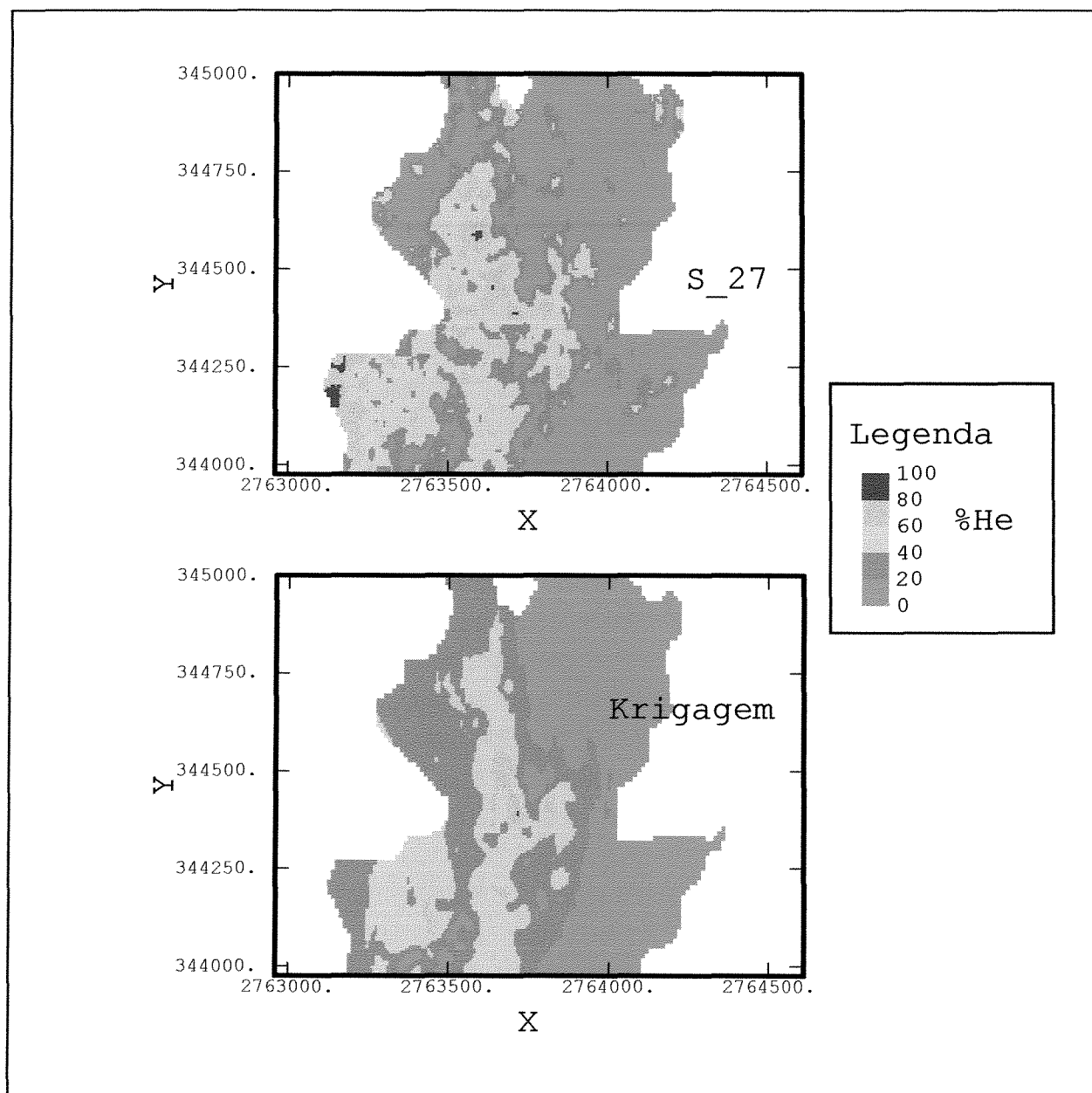


Figura 3.7.3.2 – Mapas de Imagens da Simulação 27 e da Krigagem da He
Banco 1.152 – Blocos 12,5 x 12,5 x 24m

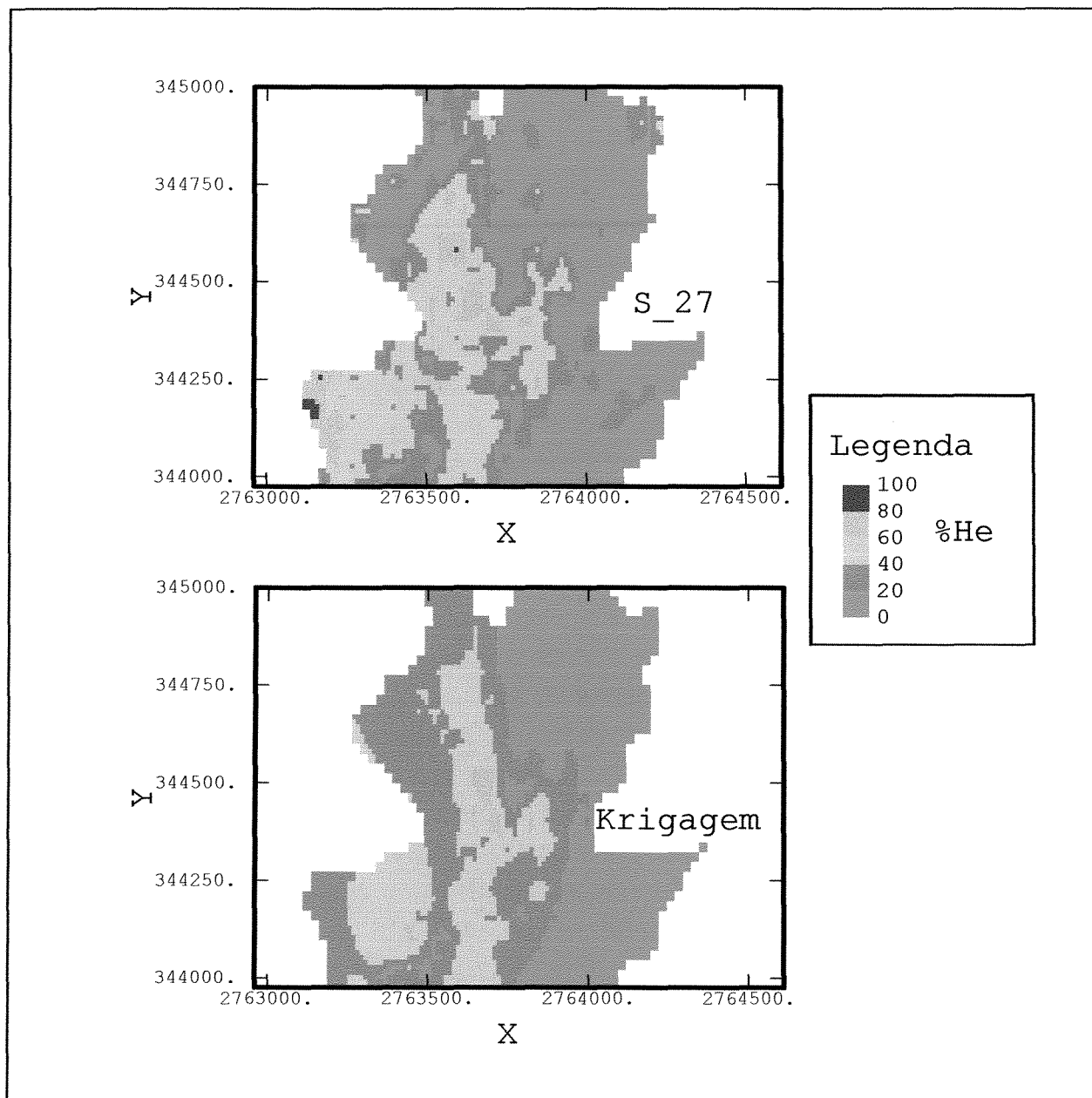


Figura 3.7.3.3 – Mapas de Imagens da Simulação 27 e da Krigagem da He
Banco 1.152 – Blocos 25 x 25 x 24m

CAPÍTULO 4

4.1 – Introdução

Neste capítulo, a partir do modelo estimado por krigagem e do modelo de SSGC da He nos blocos de lavra, são apresentadas as curvas das funções de recuperação teor médio ($m(z)$), e selecionados os teores de corte que possibilitem o atendimento à especificação do teor médio de He do minério. Em seguida, são apresentadas as curvas da função tonelagem de minério ($T(z)$), e determinadas as reservas recuperáveis de minério de ferro. Com base nos resultados obtidos das reservas, é feita ao final uma análise relativa de custos para mudança da malha de controle de pré-lavra da hematita especular

4.2 – Curvas da Função Teor Médio e Determinação de Teores de Corte

De posse dos resultados da krigagem e da simulação, foram feitas as curvas da função $m(z)$, teor médio em função do teor de corte, objetivando-se estipular um conjunto de teores de corte que garanta a especificação da variável mineralógica He. Estas curvas são mostradas nas Figuras 4.2.1 a 4.2.4, onde os valores estão em porcentagens de He e a abreviatura SGS nas legendas tem o mesmo significado de SSGC. Para melhor visualização da dispersão das curvas das simulações, foram geradas as Figuras 4.2.2 e 4.2.4, que são ampliações localizadas das Figuras 4.2.1 e 4.2.3, respectivamente, feitas no intervalo de teores de corte de 30 a 40% de He.

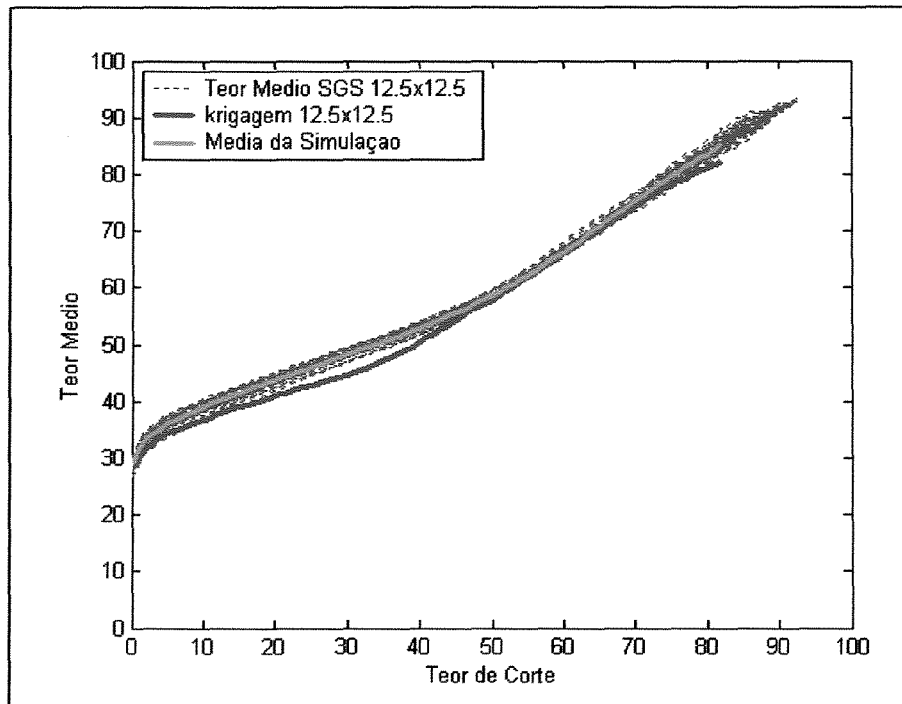


Figura 4.2.1 – Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m

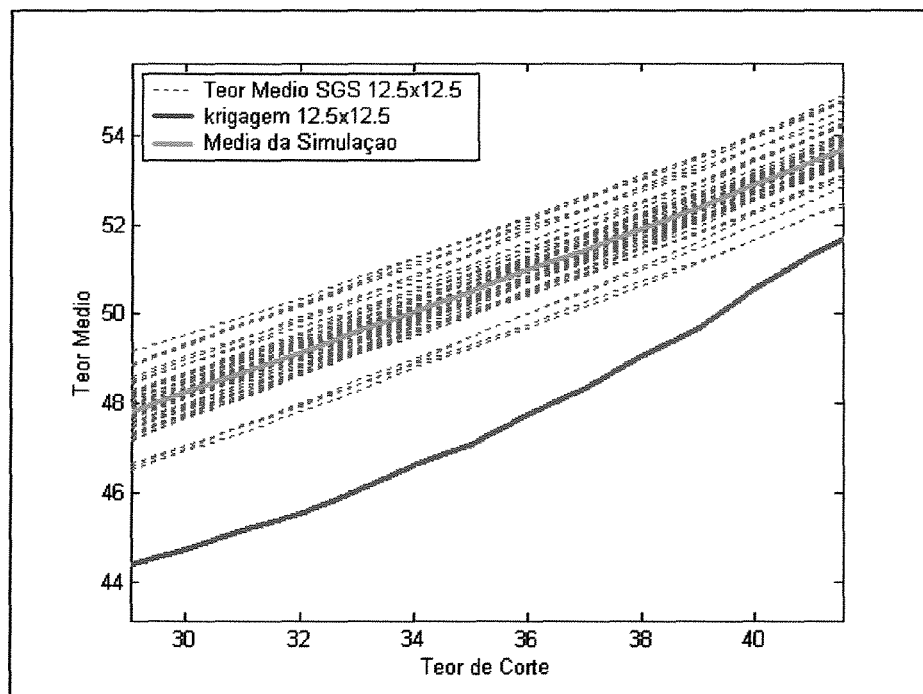


Figura 4.2.2 – Detalhe das Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m

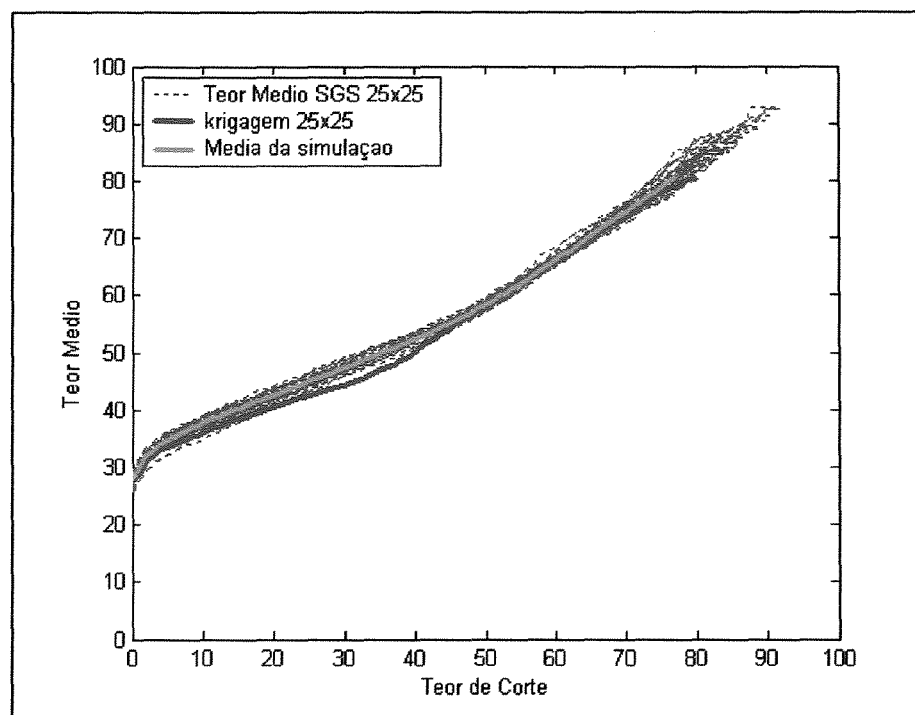


Figura 4.2.3 – Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m

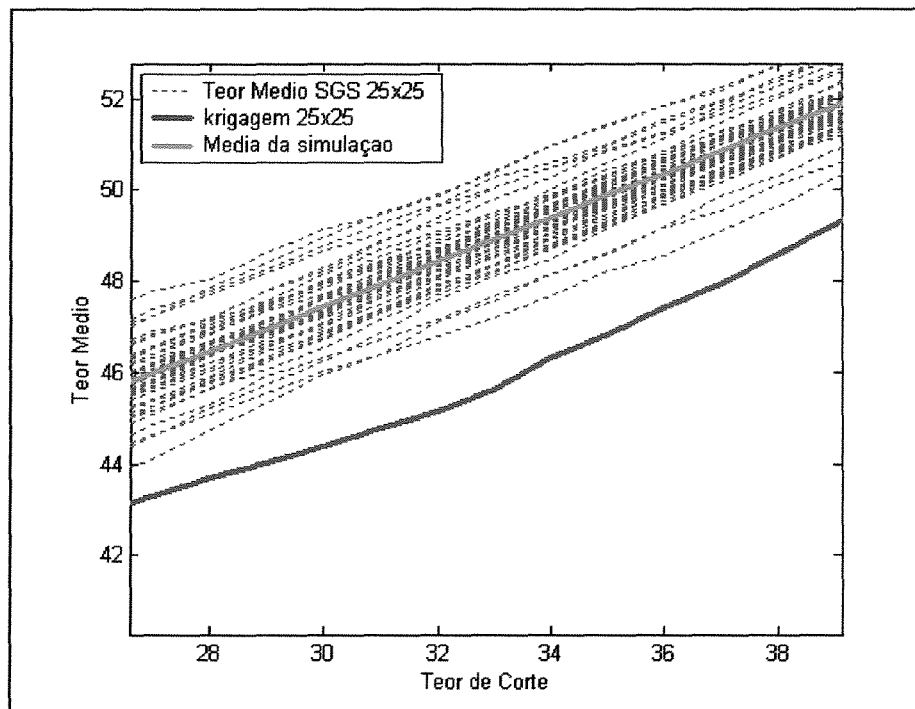


Figura 4.2.4 – Detalhe das Curvas da Função $m(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m

Conforme citado no Capítulo 2.2, o processo de lavra da SAMARCO tem que produzir minérios com teores médios de 47% de hematita especular para atender a exigência de 40% de hematita especular nos concentrados finais. Assim, a partir das curvas da função $m(z)$, fixando-se o teor médio de 47% de He, obtêm-se 50 valores equiprováveis de teores de corte provenientes das simulações e um valor de teor de corte estimado por krigagem, para cada um dos suportes em análise.

A Tabela 4.2.1 fornece o resumo estatístico dos 50 teores de corte das simulações, além do valor do teor de corte estimado por krigagem, para obtenção de 47% de média de He. Nesta tabela, a sigla *tc* significa teor de corte e os valores estão em porcentagens de He. A Figura 4.2.5 mostra os histogramas das distribuições de teores de corte obtidos das simulações, para os dois suportes de blocos considerados. Nesta figura, os histogramas aparecem superpostos, para melhor percepção visual das diferenças entre os intervalos de teores de corte selecionados nos dois suportes.

Tabela 4.2.1 – Resumo Estatístico dos Teores de Corte Simulados e Teor de Corte da Krigagem para Obtenção de 47% de He.

Parâmetro	Blocos 12,5 x 12,5 x 24m	Blocos 25 x 25 x 24m
Mínimo (Mín_tc)	24,16	25,38
Quartil Inferior (Q1_tc)	26,29	28,27
Média (Média_tc)	27,15	29,07
Mediana (Q2_tc)	27,24	29,06
Quartil Superior (Q3_tc)	27,69	29,86
Máximo (Máx_tc)	30,15	32,50
Desvio Padrão	1,33	1,39
Coeficiente de Variação	0,05	0,05
Teor de Corte da Krigagem	33,89	34,41

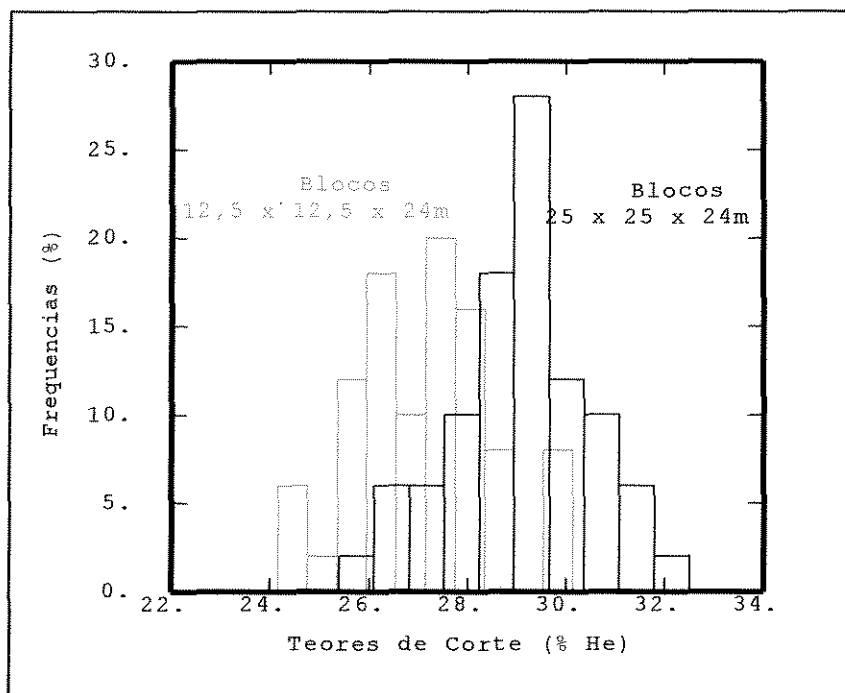


Figura 4.2.5 – Histogramas dos Teores de Corte das Simulações

As diferenças entre os teores de corte obtidos entre blocos de 12,5 x 12,5 x 24m e de 25 x 25 x 24m, que podem ser obtidas da Tabela 4.2.1 e melhor retratadas pela Figura 4.2.5, são o resultado da influência combinada dos efeitos de suporte e de informação. Nesta figura, pode-se detectar a ocorrência de uma área de interseção entre os dois histogramas, que é a representação de um conjunto de valores de teores de corte equiprováveis comuns aos suportes de blocos em análise, variando de 25,38 a 30,15% de He. É importante notar que neste conjunto de valores estão contidas as médias dos teores de corte das simulações para ambos os suportes. Fora deste conjunto de teores de corte comuns, existem dois intervalos de valores, igualmente equiprováveis. No primeiro deles, de 24,16 a 25,38% de He, estão os menores valores de teores de corte simulados, cuja aplicação possível para obtenção do teor médio de 47% de He se restringe a blocos de 12,5 x 12,5 x 24m. No segundo intervalo, de 30,15 e 32,50% de He, estão os maiores valores de teores de corte simulados, cuja aplicação garante a especificação média de He para os dois suportes, sendo que esta média é igual a 47% de He no caso dos blocos de 25 x 25 x 24m e maior que 47% de He no caso dos blocos de 12,5 x 12,5 x 24m.

Os teores de corte da krigagem apresentaram valores bastante próximos, da ordem de 34% de He, entre os blocos de 12,5 x 12,5 x 24m e de 25 x 25 x 24m, mostrando não haver diferenças

significativas entre os dois suportes, em termos de teores de corte krigados, na obtenção do teor médio requerido. Além disso, os valores dos teores de corte krigados ficaram acima do intervalo de teores de corte simulados, para ambos os suportes de blocos. Isto pode ser justificado pela característica de atenuação da krigagem, responsável pelo maior desvio da curva do teor médio krigado em relação às curvas dos teores médios simulados, para valores próximos ao teor médio pré-estabelecido de 47% de He.

4.3 – Curvas da Função Tonelagem de Minério e Estimativa de Reservas

As curvas da função de recuperação $T(z)$, tonelagem de minério em função do teor de corte, definida no Capítulo 1.5, são mostradas nas Figuras 4.3.1 a 4.3.4. Em todas as curvas, o valor de $T(z)$ tem o significado de reserva recuperável de minério de ferro, em termos de porcentagem da tonelagem total do recurso mineral disponível na região em estudo (a tonelagem total é igual à soma das tonelagens individuais dos 9.788 blocos de 12,5 x 12,5 x 24m ou dos 2.447 blocos de 25 x 25 x 24m). Conforme afirmado anteriormente no Capítulo 1.4, a reserva recuperável depende somente do teor de corte Z adotado (única restrição), pois a escolha de cada bloco é realizada independentemente de sua localização no depósito e de sua vizinhança. Analogamente ao que foi feito no Capítulo 4.2, para melhor visualização da dispersão das curvas das simulações, foram geradas as Figuras 4.3.2 e 4.3.4, que são ampliações localizadas das Figuras 4.3.1 e 4.3.3, respectivamente, feitas no intervalo de teores de corte de 28 a 38% de He.

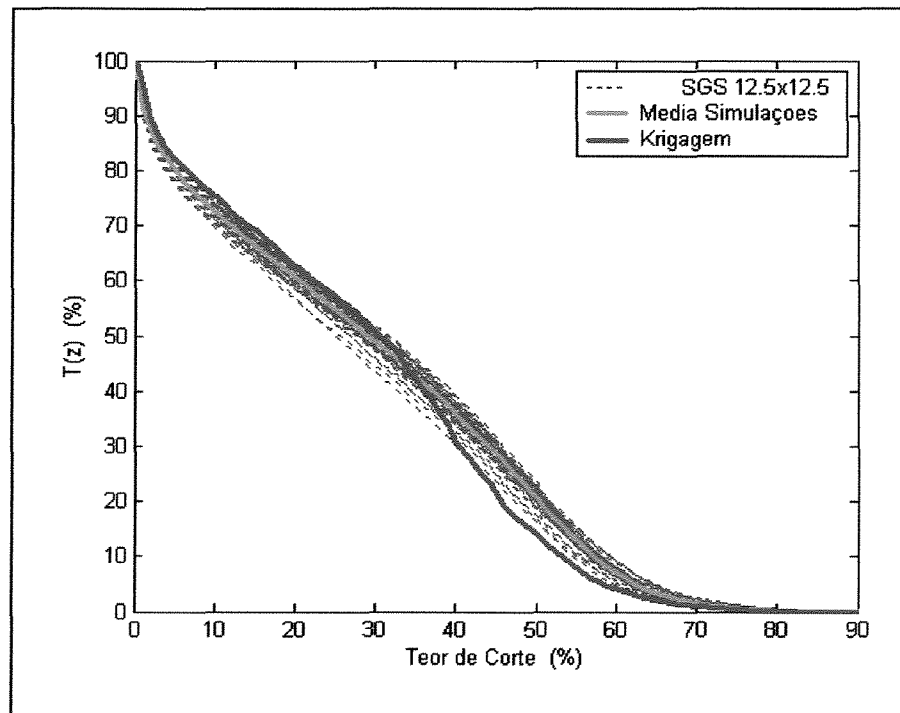


Figura 4.3.1 – Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m

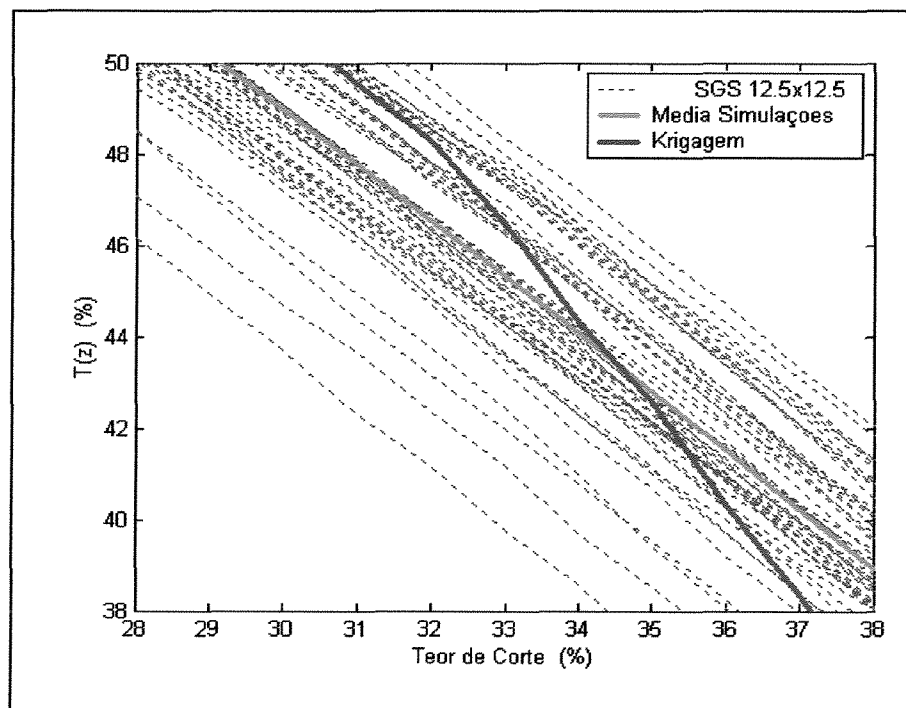


Figura 4.3.2 – Detalhe das Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m

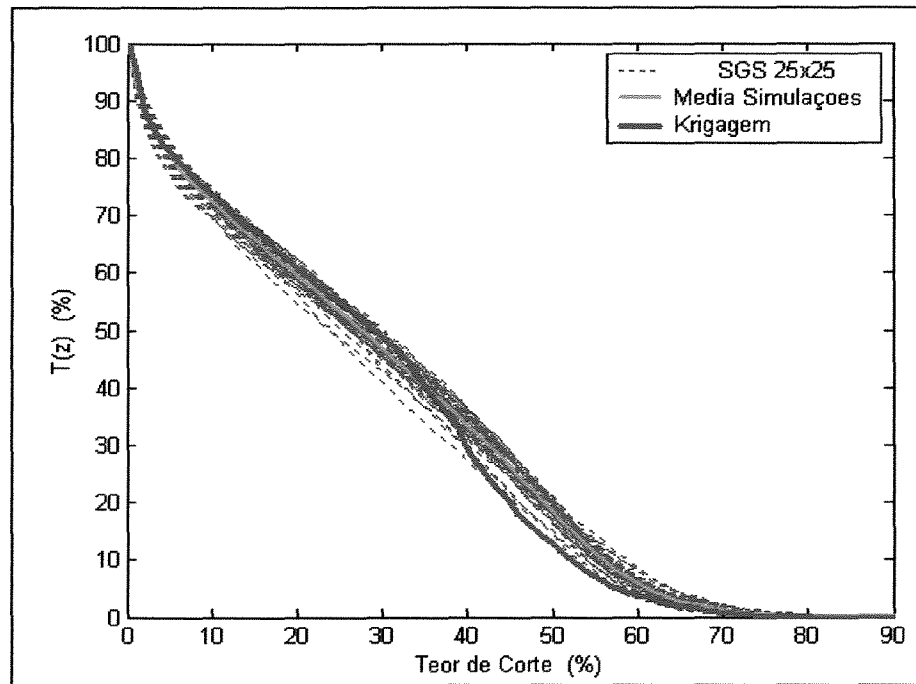


Figura 4.3.3 – Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m

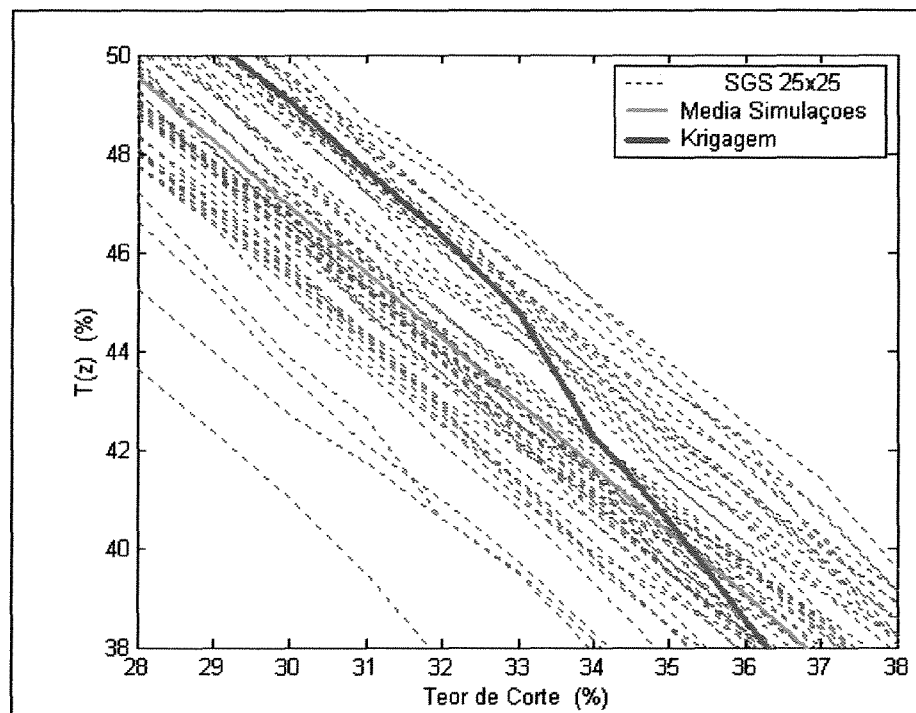


Figura 4.3.4 – Detalhe das Curvas da Função $T(z)$: Blocos de 25 x 25 x 24m

A partir das curvas da função $T(z)$, ao se fixar cada um dos teores de corte das simulações listados na Tabela 4.2.1, obtêm-se 50 valores equiprováveis de reservas com teor médio de 47 de He, para cada suporte de bloco considerado. A análise da variação das 50 reservas resultantes por teor de corte selecionado foi feita considerando-se os seus valores mínimos, médios e máximos. Os resultados deste procedimento são dados na Tabela 4.3.1, em porcentagens do recurso mineral total. Nesta tabela também são mostrados os 2 valores de reservas obtidas por krigagem, resultantes da aplicação dos teores de corte krigados da Tabela 4.2.1, sendo 1 valor para cada suporte. A representação gráfica dos resultados da estimativa de reservas é mostrada através das Figuras 4.3.4 a 4.3.6, sendo a Figura 4.3.4 para blocos de 12,5 x 12,5 x 24m, a Figura 4.3.5 para blocos 25 x 25 x 24m e a Figura 4.3.6 é a superposição das Figuras 4.3.4 e 4.3.5, para permitir a comparação entre os dois suportes de blocos.

Tabela 4.3.1 – Resultados da Estimativa de Reservas

Suporte	Significado dos teores de corte (tc)	Valor dos tc (% He)	RESERVA MÍNIMA (%)	RESERVA MÉDIA (%)	RESERVA MÁXIMA (%)
Blocos 12,5 x 12,5 x 24 m	Mín_tc	24,16	51,25	55,82	58,62
	Q1_tc	26,29	48,36	53,35	56,15
	Média_tc	27,15	47,19	52,33	55,26
	Q2_tc	27,24	47,08	52,23	55,16
	Q3_tc	27,69	46,53	51,70	54,59
	Máx_tc	30,15	43,49	48,78	51,69
	KRIGAGEM	33,89	43,17		
Blocos 25 x 25 x 24 m	Mín_tc	25,39	49,53	54,40	57,05
	Q1_tc	28,27	45,82	51,02	53,88
	Média_tc	29,07	44,83	50,08	52,92
	Q2_tc	29,06	44,84	50,10	52,93
	Q3_tc	29,86	43,87	49,12	52,01
	Máx_tc	32,50	40,48	45,94	48,95
	KRIGAGEM	34,41	39,98		

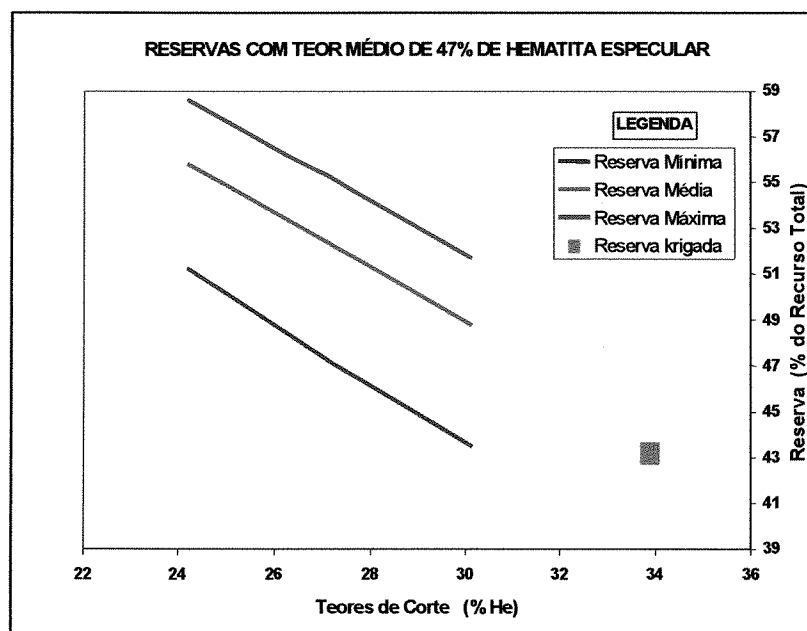


Figura 4.3.5 – Gráfico da Estimativa de Reservas para Blocos de 12,5 x 12,5 x 24m

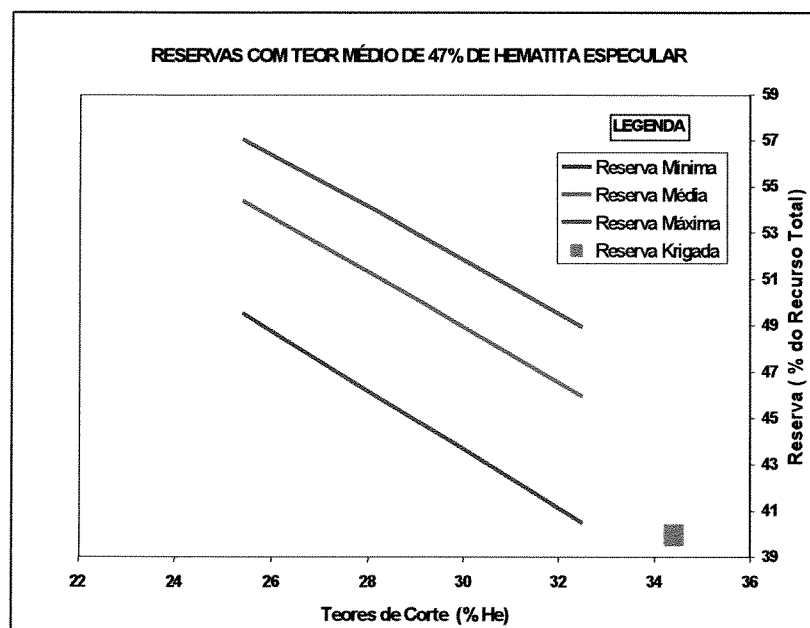


Figura 4.3.6 – Gráfico da Estimativa de Reservas para Blocos de 25 x 25 x 24m

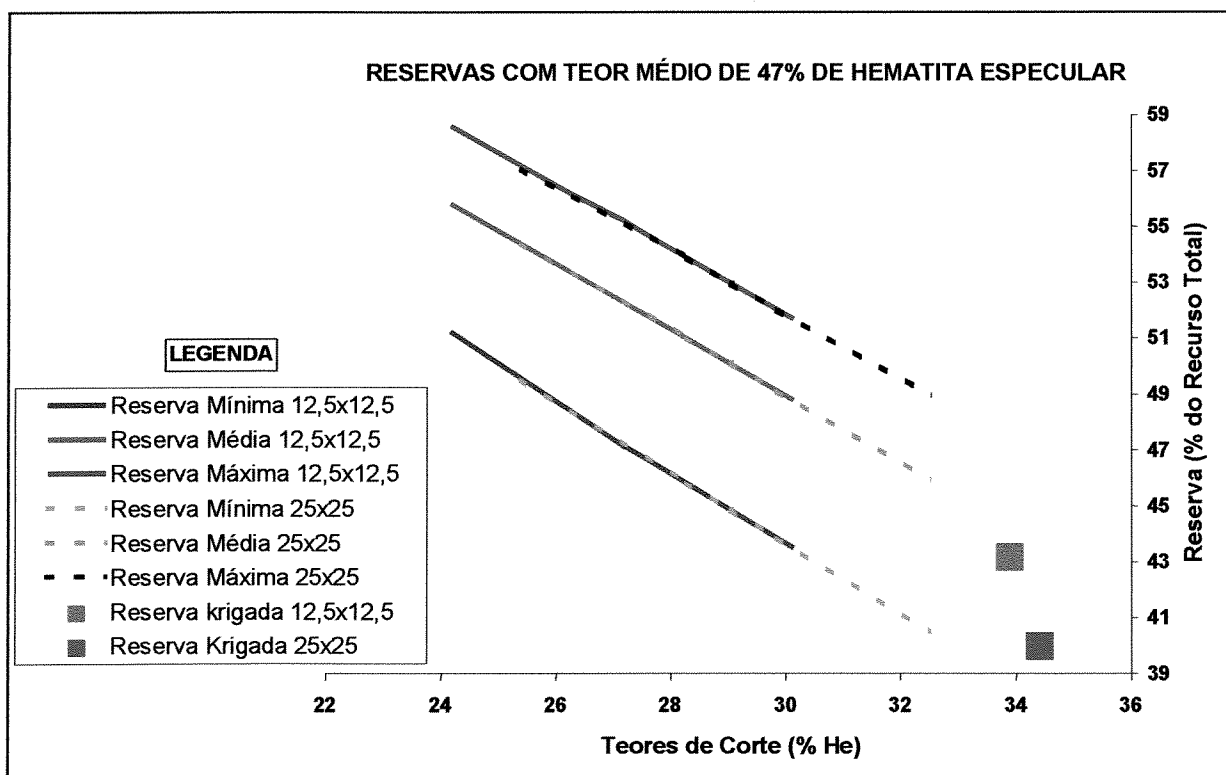


Figura 4.3.7 – Gráfico dos Resultados da Estimativa de Reservas

Resumindo os resultados obtidos, pode-se dizer que a seleção de reservas obtidas das simulações apresentou ganhos de tonelagem em relação à seleção de reservas obtidas pela krigagem, para todos os teores de corte analisados. Em termos médios, estas reservas foram de 52,33% e 50,08% para simulação em blocos de 12,5 x 12,5 x 24m e 25 x 25 x 24m, respectivamente, e de 43,17% e 39,98%, da krigagem em blocos correspondentes.

Comparando agora os resultados entre os dois suportes para cada nível de teor de corte, verifica-se que a seleção de reservas por blocos de 25 x 25 x 24m resultou em perdas de tonelagem em relação à seleção por blocos de 12,5 x 12,5 x 24m, tanto para o modelo estimado por krigagem (perda absoluta de 3,19% de reserva), quanto para o modelo de simulação (perdas variando de 1,41 a 3,01% de reservas, em termos absolutos). A princípio, estes resultados sugerem a mudança da malha de controle de pré-lavra de hematita especular, da atual malha de 25x 25m para uma malha de 12,5 x 12,5m. A viabilidade desta mudança é discutida no Capítulo 4.3.1 a seguir.

4.3.1 – Análise Relativa de Custos para Mudança da Malha de Controle de Pré-Lavra da Hematita Especular

Para definir a viabilidade de se mudar a malha de controle de pré-lavra da hematita especular, de 25 x 25m para 12,5 x 12,5m, foi verificado se o aumento de custos proveniente da execução e das análises mineralógicas de um número maior de furos de perfuratriz pode ser compensado pela economia proporcionada através de remoção de toneladas menores de estéril para blocos de 12,5 x 12,5 x 24m. De fato, para cada furo de perfuratriz da malha de 25 x 25m há 4 furos correspondentes na malha de 12,5 x 12,5m. Por outro lado, de acordo com os resultados mostrados no Capítulo 4.3, a seleção por blocos de 12,5 x 12,5 x 24m resultou na obtenção de reservas maiores em relação à seleção por blocos de 25 x 25 x 24m e a diferença entre as reservas destes dois suportes, para cada nível de teor de corte, é igual à tonelagem de estéril adicional que seria gerada no caso de blocos de 25 x 25 x 24m.

A Tabela 4.3.1.1 fornece os dados de custos necessários. Nesta tabela, o símbolo \$ se refere a uma unidade monetária fictícia, criada para manter o sigilo das informações de custo da SAMARCO. Entretanto, os valores foram estabelecidos de forma a guardarem entre si relações numéricas reais, para garantir que a comparação relativa não seja invalidada.

Tabela 4.3.1.1 – Planilha de Custos
(Modificada dos Custos de Processo da SAMARCO MINERAÇÃO)

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	VALOR (em \$ / porcentagem de recurso mineral total)
C ₂₅	Custo de execução e de análise mineralógica na malha de 25 x 25m	0,052
C ₁₂	Custo projetado de execução e de análise mineralógica na malha de 12,5 x 12,5m	0,208
CE	Custo de estéril	100

Para que seja compensatória a mudança da malha de controle de pré-lavra de 25 x 25m para 12,5 x 12,5m, deve-se obedecer à seguinte condição:

$(R_{12} - R_{25}) \cdot (CE - (C_{12} - C_{25})) > 0$ (4.1), onde R_{12} e R_{25} são as reservas obtidas da seleção em blocos de 12,5 x 12,5 x 24m e de 25 x 25 x 24m, respectivamente. O termo $(R_{12} - R_{25})$ é igual à perda de reserva que seria transformada em estéril no caso de blocos de 25 x 25 x 24m e o termo $(C_{12} - C_{25})$ é o custo adicional de se executar e analisar mineralogicamente mais furos de controle de pré-lavra que seriam gerados na malha de 12,5 x 12,5 m. Dessa forma, a Condição 4.1 significa verificar se o custo adicional de manutenção da malha de 12,5 x 12,5 pode ser suplantado pela oportunidade de uma menor relação estéril / minério.

Pelo fato do custo de estéril ser muito maior que a diferença entre os custos das malhas consideradas, a Condição 4.1 foi verificada para todos os resultados mostrados anteriormente na Tabela 4.3.1, pela comparação de seleção de reservas em níveis de teores de corte correspondentes para os dois suportes, tanto para resultados das simulações quanto para resultados da krigagem. Por exemplo, aplicando os resultados médios da Tabela 4.3.1, isto é, comparando os valores médios de reservas obtidos pela aplicação da média de teores de corte das simulações para os dois suportes, tem-se: $(52,33 - 50,08) \times (100 - (0,208 - 0,052)) = \$ 224 > 0$. A Tabela 4.3.1.2 foi obtida pela aplicação da Condição 4.1 nos resultados da Tabela 4.3.1 e mostra ser compensatória a mudança de malha proposta.

Tabela 4.3.1.2 – Resultados do Balanço Financeiro da Mudança de Malha de Controle de Pré-lavra da He.

Significado dos teores de corte	Balanço financeiro : mudança da malha de 25 x 25m para 12,5x12,5m (\$)		
Mín_tc	+171	+141	+156
Q1_tc	+254	+232	+227
Média_tc	+235	+224	+233
Q2_tc	+223	+213	+222
Q3_tc	+266	+257	+258
Máx_tc	+300	+284	+274
KRIGAGEM	+318		

CONCLUSÕES

De maneira geral, os objetivos propostos foram atingidos e mostrou-se que é possível estabelecer uma metodologia adequada para estimar reservas recuperáveis de minério de ferro, usando a variável mineralógica teor de hematita especular como parâmetro de qualidade de interesse.

De maneira específica, destacam-se as seguintes conclusões:

1. A média global dos teores de hematita especular foi bem reproduzida nos modelos de blocos estimados por krigagem e também nos modelos de blocos das simulações, o que pôde ser confirmado pelos reduzidos valores das diferenças entre as médias obtidas nestes modelos e a média representativa da área em estudo.
2. Ficou evidenciada a superioridade da análise da escolha de teores de corte e da estimativa de reservas recuperáveis através da utilização do modelo de simulação condicional, em relação ao modelo estimado por krigagem, pelos seguintes aspectos:
 - a. A simulação condicional pode reproduzir melhor a realidade dos teores em termos de sua variabilidade, distribuição espacial e continuidade. Dessa forma, ao se buscar a especificação estabelecida de He a partir das curvas da função teor médio $m(z)$ das simulações dos teores de He nos blocos, obtiveram-se teores de corte que conduziram a estimativas de reservas que representam aproximações potenciais da reserva recuperável real desconhecida.
 - b. A característica de atenuação inerente à krigagem faz com que a variabilidade dos teores krigados de blocos fique reduzida em relação à variabilidade real. Como resultado disto, ao se buscar a especificação estabelecida de He a partir da curva da função teor médio $m(z)$ da krigagem, obteve-se um teor de corte krigado que, aplicado à curva da função tonelagem $T(z)$, levou a uma

estimativa conservadora de reservas, ou subestimação, em relação às estimativas obtidas pelas simulações, para ambos os suportes considerados.

- c. Através dos modelos de simulação condicional implementados, foram estipulados dois conjunto de teores de corte equiprováveis. O primeiro, para blocos de 12,5 x 12,5 x 24m, apresentou valores de 24 a 30% de hematita especular, que permitiram apontar reservas recuperáveis dentro do espectro possível de 43 a 58% do recurso mineral total. O segundo conjunto, para blocos de 25 x 25 x 24m, apresentou valores de 25 a 32% de hematita especular, que permitiram apontar reservas recuperáveis dentro do espectro possível de 40 a 57% do recurso mineral total. Em ambos os casos, os intervalos de variação das reservas representam a incerteza na quantificação das mesmas. O conhecimento desta incerteza vai suportar a tomada de decisão na escolha de um valor específico dentro do intervalo de teores de corte e a conseqüente determinação da reserva correspondente, em função do grau de tolerância ao risco, com o qual se queira trabalhar. No caso da krigagem não é possível acessar esta incerteza, pois, para cada suporte de bloco, obtém-se uma única estimativa de reserva.
3. Os resultados obtidos mostraram que o aumento da seletividade da lavra, quando as dimensões do modelo de blocos são mudadas de 25 x 25 x 24m para 12,5 x 12,5 x 24m, provocou reduções nos valores dos teores de corte e trouxe ganhos de tonelagem de minério das reservas, seja no caso do modelo estimado por krigagem, seja no caso do modelo de simulação. Estas variações são provenientes da degradação diferenciada das curvas das funções de recuperação $m(z)$ e $T(z)$ nos dois suportes, explicadas pelos efeitos de suporte e de informação somados.
 4. O custo do acréscimo do número de furos de perfuratriz e de análises mineralógicas, resultante da mudança da malha de controle lavra, de 25 x 25m para 12,5 x 12,5m, foi amplamente compensado pela economia proporcionada através da redução da relação estéril / minério para blocos de 12,5 x 12,5 x 24 m, o que validou o aumento da seletividade da lavra.

Referências Bibliográficas

- BLEINER C. *et al* (2000), Isatis Software Manual, Geovariances & Ecole des Mines de Paris, Paris, France. 585p.
- BOTELHO, M. C. (2001), O Uso da Cokrigagem Co-locada ("Collocated Cokriging") na Integração de Dados Químicos e Mineralógicos no Minério de Ferro, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, SP.
- COSTA, A. G. D. *et al* (1998), A Importância do Modelamento Geológico-Tipológico no Controle de Qualidade dos Concentrados e Pelotas de Minério de Ferro da Samarco Mineração S.A., Aceito para publicação no XXIV Seminário de Redução e Matérias Primas da ABM, 30 de Novembro a 02 de Dezembro de 1998, Belo Horizonte, MG.
- CRUZ JÚNIOR, A. C. (1998), Análise das Funções de Recuperação para a Parametrização de Reservas Minerais, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, SP.
- ISAAKS, E. and SRIVASTAVA, R. (1989), An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press Inc., New York.
- JOURNAL, A. and HUIJBREGTS, C. J. (1978), Mining Geostatistics, Academic Press, New York.
- JOURNAL, A. and ALABERT, F. (1989), Non-gaussian data expansion in the earth sciences, Terra Nova, Vol. 1, p. 123-134.
- KANEKO, K. M. (1999), Caracterização Tipológica-Mineralógica, Estrutural e Modelagem Geométrica Tridimensional da Jazida de Ferro de Alegria 1 e 6 – Quadrilátero Ferrífero, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP.

MATHERON, G. (1984), The Selectivity of the Distributions and “The Second Principle of Geostatistics”, In: GEOSTATISTICS FOR NATURAL RESOURCES CHARACTERIZATION, Lake Tahoe USA, D. Reidel Publishing Company, p. 421-433.

NORONHA, R. A. (2001), Tomada de Decisão em Projeto de Mineração: Quantificação de Riscos e Incertezas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, MG.

OLIVEIRA, M. L. (1997), Análise das Incertezas Envolvidas na Modelagem de Reservatórios no Contexto Geoestatístico, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, SP.

REMACRE, A. Z. (1997), Revisão de Conceitos Probabilísticos, Apostila de Nivelamento.

RIVOIRARD, J. (1987), Advanced Geostatistics, Fontainebleau, France: Centre de Géostatistique, École des Mines de Paris, (C - 131).

RIVOIRARD, J. (1994), Introduction to Disjunctive Kriging and Non-Linear Geostatistics, Oxford, England. Oxford University Press, 180p.

ROCHA, J. M. P. (1999), Tipologia Geológica dos Minérios de Ferro – Mina de Alegria da Samarco Mineração S.A., Relatório Interno da Samarco Mineração S.A.

Bibliografia

DAVID, M. (1977), Geostatistical Ore Reserve Estimation, New York, USA, Elsevier Scientific Publishing Company, 364p. (Developments in Geomathematics 2).

DIMITRAKOPOULOS, R. (2001), Geostatistical Simulations for the Mining Industry. Orebody Uncertainty, Risk Assessment and Profitability in Ore Reserves, Grade Control and Mine Planning, Notas de Aula.

GOOVAERTS, P. (1997), Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press Inc., New York, Oxford.

REMACRE, A. Z. (1995), Seletividade: Krigagem-Histórico, Notas de Aula.

Anexos

Anexo 1

Resultados da simulação condicional da He no *grid* de 3,125 x 3,125 x 8m

SIMULAÇÃO	% He				% He ²
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância
1	0,25	94,03	27,07	21,64	468,34
2	0,29	94,03	28,13	22,19	492,20
3	0,25	94,03	26,56	22,05	486,28
4	0,27	94,03	28,29	22,20	492,83
5	0,29	94,03	27,43	22,51	506,62
6	0,29	94,03	27,20	21,99	483,49
7	0,31	94,03	27,82	22,57	509,53
8	0,29	94,03	27,60	22,17	491,45
9	0,27	94,03	24,99	21,65	468,77
10	0,25	94,03	27,73	22,38	501,06
11	0,28	94,03	28,34	22,50	506,27
12	0,30	94,03	26,45	22,23	494,18
13	0,28	94,03	28,31	22,71	515,71
14	0,27	94,03	27,81	22,43	503,18
15	0,28	94,03	28,04	22,28	496,33
16	0,28	94,03	27,84	21,85	477,23
17	0,24	94,03	27,86	22,49	505,84
18	0,26	94,03	26,26	22,26	495,49
19	0,30	94,03	28,43	22,56	509,12
20	0,30	94,03	26,18	22,40	501,63
21	0,30	94,03	25,80	21,80	475,34
22	0,25	94,03	28,29	22,41	502,31
23	0,26	94,03	27,07	22,99	528,61
24	0,25	94,03	25,13	21,58	465,50
25	0,28	94,03	27,21	22,18	491,93
26	0,26	94,03	27,79	21,97	482,84
27	0,24	94,03	27,60	22,38	500,73
28	0,30	94,03	28,04	22,12	489,36
29	0,29	94,03	28,44	22,59	510,22
30	0,27	94,03	26,68	22,03	485,43
31	0,30	94,03	27,37	22,38	501,00
32	0,26	94,03	28,00	22,92	525,14
33	0,23	94,03	27,64	22,31	497,82
34	0,26	94,03	27,34	22,34	499,28
35	0,29	94,03	28,30	22,52	507,11
36	0,25	94,03	27,10	22,23	494,24
37	0,30	94,03	27,94	23,13	534,94
38	0,29	94,03	26,92	22,02	484,94
39	0,27	94,03	28,60	22,63	512,09
40	0,27	94,03	28,06	22,62	511,70
41	0,28	94,03	26,92	22,22	493,62
42	0,28	94,03	28,38	22,44	503,57
43	0,27	94,03	27,21	22,46	504,30
44	0,30	94,03	27,20	22,07	486,87
45	0,31	94,03	27,36	22,73	516,75
46	0,26	94,03	28,20	22,50	506,25
47	0,27	94,03	28,40	22,42	502,85
48	0,28	94,03	26,75	22,36	499,78
49	0,26	94,03	27,98	22,88	523,45
50	0,27	94,03	28,16	22,13	489,88

Anexo 2

Resultados da simulação condicional da He nos blocos de lavra

SIMULAÇÃO EM BLOCOS DE 12,5 x 12,5 x 24m	% He				% He ²
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância
1	0,33	90,79	27,48	20,36	414,44
2	0,35	89,19	28,28	21,00	441,16
3	0,33	88,16	27,09	20,87	435,63
4	0,33	92,23	28,65	21,03	442,43
5	0,33	87,46	27,77	21,39	457,50
6	0,33	89,24	27,60	20,86	435,27
7	0,35	89,28	28,12	21,55	464,47
8	0,36	82,94	27,70	20,95	438,75
9	0,34	91,46	25,59	20,47	418,96
10	0,33	88,40	27,85	21,30	453,59
11	0,36	93,98	28,59	21,36	456,10
12	0,36	86,23	26,72	21,17	448,22
13	0,33	92,61	28,66	21,61	467,20
14	0,32	92,11	28,28	21,45	460,27
15	0,34	88,25	28,24	21,18	448,76
16	0,34	82,94	28,14	20,71	428,78
17	0,32	85,39	28,19	21,47	461,14
18	0,32	91,25	26,77	21,32	454,46
19	0,36	89,59	28,73	21,48	461,42
20	0,36	89,99	26,75	21,33	454,90
21	0,35	90,61	26,23	20,61	424,95
22	0,32	90,65	28,59	21,33	454,87
23	0,31	89,59	27,50	22,04	485,63
24	0,33	86,97	25,59	20,31	412,45
25	0,36	88,58	27,50	21,15	447,20
26	0,38	90,40	27,91	20,92	437,64
27	0,30	91,79	27,82	21,17	448,13
28	0,36	85,22	28,12	20,92	437,68
29	0,33	88,65	28,80	21,57	465,44
30	0,34	90,88	27,16	20,90	436,74
31	0,36	92,68	27,50	21,17	447,97
32	0,30	87,38	28,14	21,92	480,70
33	0,26	90,91	28,09	21,25	451,49
34	0,35	87,48	27,66	21,32	454,62
35	0,36	86,06	28,51	21,44	459,48
36	0,36	91,13	27,34	21,15	447,37
37	0,36	93,13	28,07	22,13	489,53
38	0,35	90,88	27,42	20,95	438,91
39	0,33	92,30	28,84	21,64	468,28
40	0,33	92,21	28,36	21,64	468,32
41	0,33	92,28	27,42	21,03	442,46
42	0,33	89,85	28,85	21,30	453,73
43	0,32	90,99	27,51	21,47	460,86
44	0,36	90,28	27,64	20,85	434,60
45	0,35	92,06	27,70	21,76	473,43
46	0,31	91,54	28,37	21,43	459,34
47	0,32	88,55	28,58	21,39	457,44
48	0,32	86,97	27,04	21,41	458,38
49	0,35	87,31	28,17	21,91	479,83
50	0,35	93,10	28,48	20,97	439,75

SIMULAÇÃO EM BLOCOS DE 25 x 25 x 24m	% He				% He ²
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância
1	0,36	85,05	26,66	19,57	382,99
2	0,36	81,91	27,85	20,34	413,71
3	0,33	85,45	26,05	20,20	408,21
4	0,36	86,14	27,71	20,35	414,06
5	0,36	80,29	26,95	20,84	434,19
6	0,34	86,85	26,54	20,16	406,42
7	0,37	85,19	27,11	21,05	443,18
8	0,36	78,37	26,91	20,26	410,51
9	0,35	85,14	24,69	19,69	387,75
10	0,36	84,68	27,07	20,44	417,94
11	0,38	92,95	27,76	20,85	434,66
12	0,37	82,59	25,97	20,38	415,27
13	0,32	89,18	27,73	20,96	439,47
14	0,35	90,37	27,51	20,85	434,70
15	0,36	79,52	27,51	20,54	421,72
16	0,35	77,58	27,33	19,89	395,72
17	0,33	77,58	27,29	20,95	438,91
18	0,33	85,17	25,86	20,66	426,98
19	0,37	83,40	27,89	20,83	433,70
20	0,37	87,94	25,99	20,68	427,80
21	0,37	83,39	25,30	19,79	391,55
22	0,34	82,03	27,61	20,62	425,25
23	0,33	85,88	26,74	21,48	461,52
24	0,34	77,56	24,77	19,56	382,71
25	0,38	80,70	26,62	20,46	418,58
26	0,39	85,20	27,11	20,19	407,73
27	0,33	84,68	26,91	20,59	424,02
28	0,37	87,59	27,34	20,27	410,84
29	0,35	80,31	27,92	20,95	438,71
30	0,35	88,50	26,21	20,11	404,39
31	0,37	85,03	26,70	20,44	417,93
32	0,29	85,85	27,37	21,25	451,55
33	0,30	91,26	27,22	20,70	428,56
34	0,36	82,58	26,80	20,52	421,15
35	0,37	79,99	27,81	20,85	434,59
36	0,37	80,73	26,54	20,53	421,37
37	0,37	92,42	27,13	21,66	469,37
38	0,36	80,37	26,49	20,27	410,95
39	0,35	86,41	27,84	20,95	439,00
40	0,35	86,98	27,57	20,96	439,33
41	0,35	84,65	26,45	20,40	416,23
42	0,35	83,15	27,94	20,68	427,74
43	0,34	83,93	26,78	20,72	429,30
44	0,35	82,42	26,74	20,02	400,78
45	0,37	89,12	26,70	21,12	445,92
46	0,32	86,82	27,49	20,82	433,35
47	0,33	82,24	27,82	20,73	429,60
48	0,35	81,41	25,94	20,84	434,26
49	0,37	84,02	27,41	21,37	456,77
50	0,36	92,68	27,90	20,45	418,22

Anexo 3

Norma para preparação de pastilhas para análises mineralógicas da SAMARCO MINERAÇÃO S.A.

Objetivo

Esta norma estabelece o procedimento para preparação de pastilhas.

Documentos complementares

Não disponível.

Registros

Livro de controle interno.

- A. Responsável: Técnico de Pesquisa
- B. Local de Arquivo: Laboratório Embarcadouro Samarco
- C. Tempo Mínimo: 02 anos
- D. Disposição: Arquivar

Recursos necessários

QUANT.	UNID.	DESCRIÇÃO
01	l	Resina
60	ml	Diluyente
30	ml	Cobalto
60	ml	Catalisador
02	un	Lixas 40
05	un	Lixas 180
05	un	Lixas 400
01	Tubo	Pasta de Alumínio
01	m ²	Pano Brim Santista
01	un	Lupa
01	un	Politriz

Atividades

- Ao receber o material para confeccionar a pastilha, faz-se sua identificação determinando o tipo de pastilha a ser confeccionada. Sendo ela Global o material é proveniente da deslamagem ou seja, não teremos etapas complementares, pois o mesmo já encontra na granulometria padrão (35 #), para confecção desta pastilha é reservada uma alíquota de 50 a 60 gramas.
- A pastilha 2 x 1 necessita de uma etapa complementar, ou seja, o material recebido , é deslamado na peneira de 35 # e com seus produtos é feito a pastilha (-325 #, +325 #) para deslamar esta amostra necessário uma alíquota de 150 a 200 gramas.
- A pastilha 3 x 1 é proveniente de uma Análise Granulométrica, não necessitam de etapas complementares pois o material retido nas malhas de 100 # , 200 # , 325 #, são individualmente quarteados, sendo que o retido na peneira de 325 é homogeneizado com o seu passante, e retirando-se 10 gramas de cada malha para confecção da pastilha.
- Na pastilha 4 x 1 o procedimento é o mesmo da pastilha 3 x 1, só que utilizamos o - 325 #.
- Inicia-se a preparação, seguindo os seguintes parâmetros:
- Limpar com álcool e untar com vaselina a superfície do vidro de forma quadrangular lisa e a forma de PVC.
- Em um copo descartável (50 ml), adicionar 10 g de amostra do minério, 10 ml de resina, 1 gota de acelerador cobalto e 3 gotas de catalisador MEK M50. Homogeneizar os produtos usando um bastão de vidro previamente limpo com álcool em movimentos circulares.
- Colocar a mistura na forma de PVC até atingir 2/3 de sua altura e aguardar o tempo de secagem de 10 min.
- Rotular a face e completar a forma com resina utilizando os componentes do item 5.2, sem o minério, ou seja, somente resina.
- Aguardar secagem do material por um período de 10 min.
- Desformar a pastilha e esperar um período no mínimo de 24 hs para continuar o processo.
- Lixar as faces e a lateral da pastilha após o período de 24 horas, utilizando a lixa 40, eliminando o excesso de resina.
- Repetir o procedimento 5.7, utilizando a lixa 180 e desbastar as arestas da pastilha.
- Lixar a face que irá ser analisada utilizando a lixa de 400, este procedimento deve ser feito a úmido. Logo após passar a mesma face no abrasivo 3000, todo o processo continua sendo a úmido.
- Polir as faces da pastilha utilizando a politriz impregnada com pasta de diamante, em movimentos circulares, começando do centro para as extremidades e em sentidos contrários da rotação do aparelho para que a pastilha fique polida e nivelada.
- Verificar polimento utilizando uma lupa petrográfica.