AGENOR DE FARIA JUNIOR

**APRIMORAMENTO DO CONTROLE DE QUALIDADE DO MINÉRIO
NO PLANEJAMENTO DE LAVRA DE CURTO PRAZO: ESTUDO DE
CASO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, janeiro de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Faria Junior, Agenor de

Aprimoramento do controle de qualidade do minério no planejamento de lavra de curto prazo: estudo de caso / A. de Faria Junior. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.

140 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Mineração a céu aberto (Planejamento) 2. Fosfatos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

AGENOR DE FARIA JUNIOR

**APRIMORAMENTO DO CONTROLE DE QUALIDADE DO MINÉRIO
NO PLANEJAMENTO DE LAVRA DE CURTO PRAZO: ESTUDO DE
CASO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Minas

Orientador:
Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo
2010

Dedico esta obra a minha esposa Genilda e a meus filhos Agenor, Tharsis e Thiago, por serem meu porto seguro e que muito me incentivaram para meu aperfeiçoamento profissional.

AGRADECIMENTOS

Relacionar nome de pessoas envolvidas em um projeto desta envergadura pode ser uma tarefa ingrata. Corremos o risco de deixarmos de citar algumas pessoas que contribuíram em maior ou menor intensidade na condução do projeto. Entretanto, algumas pessoas desempenharam papel particularmente importante e não poderiam deixar de serem citadas, o que significaria uma injustiça ainda maior.

Agradeço a minha família por ter compartilhado comigo todos os momentos proporcionando as condições necessárias para que me dividisse entre o trabalho e estudo, dedicando-me especial atenção neste período.

À Bunge Fertilizantes S/A, representada pelos meus colegas de trabalho: Eng. de Minas Vicente Humberto Lobo Cruz, Eng. de Minas Nelson Shimabukuro, Eng. de Minas Marcelo Alves Pereira, Geol. Daniel Bernardes Raposo, Geol. Tereza Lee, Geol. Andreza Costa, Geraldo Marques dos Reis e Andréia Duca, por terem acreditado neste projeto, disponibilizando as horas e as informações necessárias para a execução deste trabalho.

Aos Prof. Dr. João Felipe Costa, Prof. Dr. Jorge Silva Bettencourt, Profa. Dra. Lilia M. Sant'Agostino, pelos muitos esclarecimentos prestados e sempre oportunos.

Agradeço ao Alcides Nascimento e Carmen Galera da área de Tecnologia Mineral e ao pessoal de preparação de amostras Pedro, Rodrigo e Tiago, pela boa vontade com que todos me ajudaram.

Ao Eng. Paulo Dias, da empresa Metal Ar, que sempre se dispôs a ajudar com sua grande capacidade criativa para fabricação de ferramentas e adaptações nas perfuratrizes.

Por último, mas não menos importante, ao meu Orientador Prof. Dr. Giorgio de Tomi que também apostou neste projeto proporcionando-me o suporte necessário.

Enfim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que colaboraram direta e indiretamente para esta realização.

“Hay hombres que luchan un día y son buenos
Hay otros que luchan un año y son mejores
Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos
Pero hay los que luchan toda la vida
Esos son los imprescindibles”

(Bertold Brecht)

Resumo

Melhorar o conhecimento sobre o minério lavrado é um desafio enfrentado diariamente pelas empresas de mineração. O presente trabalho trata de um estudo realizado na mina de apatita, localizada na cidade de Cajati, interior do Estado de São Paulo, de propriedade da Bunge Fertilizantes S/A, onde são abordados temas relacionados ao planejamento de lavra de curto prazo, visando o aprimoramento dos procedimentos de coleta de amostras de pó-de-perfuratriz, que são sistematicamente coletadas com o objetivo de controle de qualidade da lavra, contribuindo para uma efetiva melhoria na gestão do planejamento de lavra e na tomada de decisões. Os resultados obtidos mostram que, da forma como as amostras são coletadas, ocorre um enriquecimento do teor de P_2O_5 , podendo levar a tomada de decisões erradas por parte da operação da mina.

Palavras chaves: amostragem de pó-de-perfuratriz, planejamento de lavra de curto prazo, controle de qualidade da lavra.

Abstract

Improve knowledge of the ore mined is a challenge faced daily by mining companies. This paper is a study in apatite mine, located in the city of Cajati, within São Paulo, propriety of Bunge Fertilizantes S/A, where are treated issues related to short term planning of the mine to improve procedures for collecting dust samples drilling, which are systematically collected for the purpose of quality control of mining, contributing to an effective improvement in the management of planning of mining and decision making. The results show that the way the sampling is done, there is an enrichment of content in P_2O_5 , which can lead to making wrong decisions by the operation of the mine.

Keywords: Dust samples drilling, mine planning, quality control of mining.

Sumário

Capítulo 1	17
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos	19
1.3 Metodologia	19
1.4 Organização desta dissertação	20
Capítulo 2	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Planejamento	22
2.2 Controle	25
2.3 Planejamento e controle	27
2.4 Qualidade	27
2.5 Planejamento da qualidade	30
2.6 Planejamento de lavra	32
2.7 Análise estatística	36
2.7.1 Estatísticas descritivas de variáveis aleatórias	36
2.7.1.1 Média aritmética	38
2.7.1.2 Mediana	38
2.7.1.3 Moda	38
2.7.1.4 Variância e desvio padrão	39
2.7.1.5 Assimetria	39
2.8 Medidas de Tendência central	39
2.8.1 Intervalo de confiança da média	41
2.9 Amostragem	42
2.9.1 O universo amostral ou população	42
2.9.2 Tipos de amostragem	43

2.9.3	Amostragem de depósitos minerais para fins de exploração, avaliação e extração	46
2.9.4	Amostragem para o controle da lavra	49
2.10	Geoestatística	54
2.10.1	Características das variáveis regionalizadas	55
	Localização	56
	Continuidade	56
	Anisotropias	56
	Fenômenos de transição	56
2.10.2	O Variograma	56
2.10.2.1	Modelos teóricos de semivariogramas	61
2.10.2.2	Validação dos modelos	65
2.10.3	Estratégia de busca	67
2.10.4	Krigagem dos blocos	69
	Capítulo 3	71
3	LOCAL DA OPERAÇÕES	71
3.1	Contexto geológico	72
3.1.1.	Regional	72
3.1.2.	Geologia local	73
3.2	Histórico da Mina	76
3.3	Planejamento de Lavra da Mina de Cajati	78
	Capítulo 4	83
4	Amostragem de pó-de-perfuratriz na Mina de Cajati	83
4.1	GEOESTATÍSTICA	87
4.2	Variografia	90
4.1.1	Validação dos modelos variográficos	91
4.1.2	Krigagem dos blocos	93
4.1.3	Análise e Comentários Preliminares	95
4.3	O problema da representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz -	
	Desenvolvimento de amostrador	97
4.2.1	Primeiro teste do amostrador	99
4.2.2	Resultados dos ensaios granuloquímicos	103

4.4	Segundo teste do amostrador	110
4.5	Avaliação do método de coleta de amostras de pó-de-perfuratriz	113
4.5.1	Método de coleta das amostras	115
4.5.2	Resultados	115
4.6	Verificação do efeito da retirada da amostra no pó remanescente, não amostrado	117
4.6.1	Resultados dos furos CP234_P e CP_234_G	121
4.6.2	Comentários sobre os resultados dos furos CP234_P e CP234_G	125
4.6.3	Resultados dos furos CP126_P e CP126_G	125
4.6.4	Comentários sobre os resultados dos furos CP126_P e CP126_G	130
4.7	Conclusões	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		133
Anexo 1		137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Correlação entre teor (%) de P_2O_5 da alimentação da usina e teor da mina.	18
Figura 1.2 – Seqüência de atividades para a geração do modelo de blocos para o planejamento de lavra de curto prazo e estudos sobre a representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz.	20
Figura 2.1 – Premissas do planejamento. Adaptado de Chiavenato (2002).....	22
Figura 2.2 – O conceito de hierarquia de decisões de planejamento: agregação e horizonte de previsões contracompensam-se em seus efeitos sobre as incertezas de previsões. Modificado de Corrêa; Giancesi e Caon (2001), p. 46.	24
Figura 2.3 – Bases do controle. Campos (1992), p. 23.....	26
Figura 2.4 – As quatro fases do controle. Adaptado de Chiavenato (2000), pg. 206.	26
Figura 2.5 – O controle como forma de assegurar o alcance dos objetivos. Adaptado de Chiavenato, (2000) pg. 208.	26
Figura 2.6 – Diagrama da Trilogia de Juran. Modificado de Juran (2009), p. 17.....	32
Figura 2.7 – Representação de um modelo de blocos em que NX, NY e NZ significam número de blocos na direção Leste, Norte e cota, respectivamente. No destaque, os itens XINC, YINC e ZINC, significam o tamanho dos blocos em cada uma das direções, modificado de Yamamoto (2001), p.123.	34
Figura 2.8 – Amostragem estatística e amostragem de minerais, Sironvalle (2002).....	50
Figura 2.9 – Amostragem incorreta, modificado de Sironvalle (2002), p. 9.	51
Figura 2.10 – A) Preciso e não exato, B) Não preciso e não exato, C) Exato e não preciso, D) Preciso e exato, modificado de Sironvalle (2002), p 12.	51
Figura 2.11 – Segregação de uma amostra mineral. Sironvalle (2002), p. 24.....	52
Figura 2.12 – Incrementos amostrais, modificado de Sironvalle (2002), p. 25.....	53
Figura 2.13 – Variograma típico e suas propriedades, Yamamoto (2001), p.78.	58
Figura 2.14 – Anisotropia geométrica (A), anisotropia mista (B) e anisotropia zonal (C).	60
Figura 2.15 – Malha de amostragem – Clark (1979), pg. 11.....	60
Figura 2.16 – Cálculo dos pontos para a construção do variograma experimental. Em A para a distância de 100 pés e B para a distância de 200 pés. Clark (1979), pg. 17 e 19.	61
Figura 2.17 – Modelo esférico.	62
Figura 2.18 – Modelo de efeito pepita puro.....	63
Figura 2.19 – Modelo gaussiano.	63
Figura 2.20 – Modelo exponencial.	64
Figura 2.21– Resíduos de validação: (A) – Média do erro negativa mostrando que houve uma tendência geral de sub-estimativas; (B) – Média do erro positiva mostrando que houve uma tendência geral de super-estimativas e (C) equilíbrio entre sub-estimativas super-estimativas. Modificado de Isaaks e Srivastava (1989), pg. 261.	66
Figura 2.22 – Fluxograma da validação cruzada. Modificada de figura disponível em: www.solos.ufmt.br/docs/geoestatistica/aulapg.pdf	67
Figura 2.23 – Método das octantes – Modificado de Datamine (2002).	68
Figura 2.24 – Elipsóides de busca. (A) Elipsóide da primeira estrutura, (B) Elipsóide da segunda estrutura, Datamine Studio.	69

Figura 2.25 – Estudo comparativo entre a krigagem de um bloco e a krigagem dos pontos de discretização, Isaaks e Srivastava1(989), p. 328.	70
Figura 3.1 – Mapa de acessos e localização de Cajati.	71
Figura 3.2 – Mapa geológico do complexo alcalino de Jacupiranga (adaptado de Germann et al., 1987, apud Raposo 2002).	73
Figura 3.3 - Mapa geológico dos carbonatitos de Jacupiranga (Gaspar, 1989).	74
Figura 3.4 – Modelo geológico da mina de Cajati atualizado em 2004. Saito; Bonás e Bettencourt (2004).	75
Figura 3.5 – Modelo geológico, com as respectivas descrições dos domínios geológicos.	76
Figura 3.6 – Fluxograma de operações do Complexo Industrial de Cajati.	78
Figura 3.7 – Ciclo do planejamento de lavra da Mina de Cajati. Adaptado de Yamamoto (2001), p. 165.	80
Figura 3.8 – Modelo de reconciliação praticado na mina de Cajati.	82
Figura 4.1 – Perfuratriz hidráulica Atlas Copco Roc D7 – Detalhes do coletor de pó: 1) Fração fina (coletor de pó) e 2) Fração grossa (ciclone).	84
Figura 4.2 – Esquema para a coleta de amostra de pó-de-perfuratriz.	85
Figura 4.3 – Exemplo de agrupamento de amostras, conforme os blocos do modelo, bancada -30, fogo no 259.	85
Figura 4.4 – Ilustração do agrupamento de furos para composição das amostras.	86
Figura 4.5 – Localização das amostras de pó-de-perfuratriz na mina em planta (A) e sua posição, em perspectiva, no interior da litologia CBR (B).	88
Figura 4.6 – Teor de médio P_2O_5 de acordo com o comprimento da amostra.	89
Figura 4.7 – Distribuição de teor de P_2O_5 das amostras de pó-de-perfuratriz. Furos com comprimento $L \leq 10$ m.	89
Figura 4.8 – Comparação entre teor médio e quantidade de amostras de sondagem e de pó-de-perfuratriz, por nível (cota).	90
Figura 4.9 – Semivariogramas: Em (a) direção N47oE, (b) direção N137°E e (c) direção vertical.	91
Figura 4.10 – Gráfico comparativo entre distribuição de teor de P_2O_5 dos blocos e amostras.	95
Figura 4.11 – Coleta de amostras de pó-de-perfuratriz na Mina de Cajati.	96
Figura 4.12 – Perfuração de um fogo primário finalizada (a) e perfuratriz Atlas Copco ROC D9 em operação (b).	97
Figura 4.13 – Detalhe do amostrador e do anteparo instalados em uma perfuratriz Atlas Copco ROC D7.	98
Figura 4.14 – Ilustração indicando de onde foram retiradas as amostras AP e AG.	99
Figura 4.15 –Histograma comparativo entre os diferentes grupos de amostras.	101
Figura 4.16 –Correlação entre o teor de P_2O_5 das amostras grandes (AG) e pequenas (AP).	102
Figura 4.17 – Fluxograma de preparação das amostras de pó-de-perfuratriz dos furos 19, 26, 28, 34 e 35 do fogo 212 da bancada -20.	102
Figura 4.18 –Distribuição granulométrica das amostras pequenas.	104
Figura 4.19 –Distribuição granulométrica das amostras grandes.	104

Figura 4.20 – Média das distribuições granulométricas das amostras AG e AP.	105
Figura 4.21 – Resumo comparativo do teor de P_2O_5 entre amostras tal e teor composto das amostras AP e AG.	105
Figura 4.22 – Correlação entre teor de P_2O_5 das amostras AP e AG.	106
Figura 4.23 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 19.	107
Figura 4.24 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 26.	108
Figura 4.25 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 28.	108
Figura 4.26 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 34.	109
Figura 4.27 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 35.	109
Figura 4.28 – Amostragem do fogo 172 da bancada -40.	110
Figura 4.29 – Distribuição granulométrica das amostras AG e AP do fogo 172 da bancada -40.	112
Figura 4.30 – Distribuição granulométrica retida acumulada das amostras AG e AP do fogo 172 da bancada -40.	112
Figura 4.31 – Quarteamento por pilha cônica: (a) formação da pilha; (b) nivelamento da pilha; (c) quarteamento correto; (d) quarteamento incorreto. Modificado de Chiaregati, 2008.	114
Figura 4.32 – Quarteador desenvolvido para redução das amostras no momento da coleta no campo.	114
Figura 4.33 – Imagem ilustrando a seqüência de etapas para a redução da amostra: a) amostra cai sobre lona plástica; b) alimentação do quarteador; c) amostra escoando pelo quarteador; d) resultado de uma das fases de quarteamento	115
Figura 4.34 – Gráficos comparativos entre as amostras AP e AG.	116
Figura 4.35 – Correlação entre o teor de P_2O_5 das amostras grandes e pequenas.	117
Figura 4.36 – Posicionamento da perfuratriz Atlas Copco ROC D7 para execução do furo CP 234P.	118
Figura 4.37 – Fluxograma de preparação das amostras AP de pó-de-perfuratriz.	120
Figura 4.38 – Distribuição granulométrica acumulada das amostras. Furos CP234_P e CP234_G.	122
Figura 4.39 – Distribuição de P_2O_5 acumulada (acima) das amostras. Furos CP234_P e CP234_G.	122
Figura 4.40 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e G. Furos CP234_P e CP234_G.	123
Figura 4.41 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e PR. Furos CP234_P e CP234_G.	124
Figura 4.42 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras PR e G. Furos CP234_P e CP234_G.	124
Figura 4.43 – Comparação entre resultados das amostras de sondagem e das amostras dos furos CP234_P e CP234_G.	125
Figura 4.44 – Distribuição granulométrica acumulada das amostras. Furos CP126_P e CP126_G.	127
Figura 4.45 – Distribuição de P_2O_5 acumulada (acima) das amostras. Furos CP126_P e CP126_G.	127

Figura 4.46 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e G. Furos CP126_P e CP 126_G.....	128
Figura 4.47 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e PR. Furos CP126_P e CP126_G.....	129
Figura 4.48 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras PR e G. Furo CP126_P e CP126_G.....	129
Figura 4.49 – Comparação entre resultados das amostras de sondagem e das amostras dos furos CP126_P e CP126_G.....	130

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Os três níveis de planejamento – Chiavenato (2000).	25
Tabela 3.1 – Classificação tipológica da Mina de Cajati.	81
Tabela 4.1 – Resumo do agrupamento dos furos indicados na Figura 4.4.	87
Tabela 4.2 – Estatísticas das amostras de sondagem rotativa e de amostras de pó-de-perfuratriz.	88
Tabela 4.3 – Resultados da validação cruzada da variável P_2O_5 na unidade litológica CBR.	92
Tabela 4.4 – Resumo estatístico da validação cruzada da litologia CBR.	92
Tabela 4.5 – Parâmetros dos elipsóides de busca utilizados na estimativa de teores.	94
Tabela 4.6 – Resumo comparativo entre os teores dos blocos krigados por amostras de sondagem, por amostras de pó-de-perfuratriz e amostras de pó-de-perfuratriz.	94
Tabela 4.7 – Dados das amostras do fogo 212 da bancada -20.	100
Tabela 4.8 – Resumo estatístico das amostras.	101
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio granulométrico.	103
Tabela 4.10 – Resultado dos ensaios granulométricos das amostras do fogo 172 da bancada -40.	111
Tabela 4.11 – Resultados químicos, teor de P_2O_5 , das amostras do fogo 55 da bancada -100.	116
Tabela 4.12 – Dados dos furos CP126P e CP234P.	119
Tabela 4.13 – Dados dos furos CP126G e CP234G.	119
Tabela 4.14 – Dados dos furos inclinados CP234_P e CP234_G.	121
Tabela 4.15 – Dados dos furos inclinados CP126_P e CP126_G.	126
Tabela A1.1 – Amostras do furo 31.	137
Tabela A1.2 – Amostras do furo 32.	137
Tabela A1.3 – Amostras do furo 34.	138
Tabela A1.4 – Amostras do furo 36.	138
Tabela A1.5 – Amostras do furo 37.	138
Tabela A1.6 – Amostras do furo 39.	139
Tabela A1.7 – Amostras do furo 41.	139
Tabela A1.8 – Amostras do furo 42.	140

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

O complexo Ultramáfico-Alcalino de Cajati (SP), Brasil, também conhecido por complexo de Jacupiranga, constitui uma ocorrência clássica de intrusão carbonatítica em associação a rochas alcalinas e ultrabásicas. As rochas carbonatíticas apresentam mineralização a apatita, constituindo uma jazida que é lavrada desde a década de 1940, pela Bunge Fertilizantes S/A para a fabricação de produtos para nutrição animal, fertilizantes e uso em indústrias alimentícias, onde são reconhecidos doze domínios geológicos ou litologias diferentes (Saito, Bonás e Bettencourt, 2004).

A jazida é lavrada a céu aberto, em bancadas que possuem alturas de 10 e de 20 m, sendo o planejamento da lavra, tanto de longo como de médio ou curto prazos, feito baseado em um modelo de blocos único, gerado a partir de mapeamento geológico de detalhe à escala 1:500 e furos de sondagem de diferentes campanhas, que foram realizadas ao longo dos anos de operação da mina até a atualidade. Estas sondagens foram executadas em campanhas distintas em épocas diferentes e cada uma delas com objetivos específicos, fazendo com que a malha de sondagem delas resultante possua geometria irregular, contudo, a definição geométrica dos litotipos que formam o modelo geológico é considerada plenamente satisfatória, pois atende às expectativas de operação de lavra.

Embora o planejamento de lavra seja feito baseado neste modelo de blocos, o controle de qualidade do minério se apóia em amostras coletadas durante a perfuração primária para desmonte de rocha, denominadas amostras de pó-de-perfuratriz. Portanto, estas amostras é que darão o suporte necessário à tomada de decisão quanto ao destino do minério lavrado.

Historicamente, o teor médio de alimentação da usina de beneficiamento é sempre inferior ao teor esperado, que é aquele informado pela operação da mina, obtido através das amostras de pó-de-perfuratriz, como pode ser visto no gráfico mostrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Correlação entre teor (%) de P_2O_5 da alimentação da usina e teor da mina.

O gráfico acima mostra uma compilação dos teores médios de P_2O_5 da alimentação mensal da usina entre os meses de janeiro de 2003 até junho de 2008. Como pode ser visto, o teor médio da mina somente apresentou valores inferiores ao teor médio de alimentação da usina em três ocorrências, nas demais esteve sempre acima do reportado pela usina mas, na maioria dos casos, dentro de uma faixa de tolerância de 10%, como pode ser visto na linha tracejada na cor vermelha. Em termos percentuais, a variação entre o teor da mina e o teor da usina possui uma amplitude de 29,75%, indo de -25,20% a 4,55%.

Este trabalho está inserido em um programa de aprimoramento da amostragem de pó-de-perfuratriz, através de comparações realizadas entre a forma atual de coleta e outras formas como amostragem integral do pó-de-perfuratriz dos furos.

1.1 Objetivo geral

O objetivo global do presente estudo é o desenvolvimento de um procedimento para coleta de amostras de pó-de-perfuratriz, conciliando as atividades de perfuração e amostragem, com finalidade de criação e atualização sistemática de um modelo de blocos para o planejamento de lavra de curto prazo (MCP) utilizando técnicas geoestatísticas, baseado em informações provenientes de amostras de pó-de-perfuratriz, trazendo benefícios para todas as atividades relacionadas ao controle de qualidade da mina e contribuindo para uma significativa melhoria no desempenho da usina de concentração.

1.2 Objetivos específicos

A adoção de um procedimento para atualização sistemática do modelo de blocos para o planejamento de curto prazo, baseado em amostras de pó-de-perfuratriz, trará benefícios para toda a cadeia produtiva da mina, entre as quais destacam-se:

- Maior visibilidade do fluxo de processos atual e futuro pelos técnicos, supervisores e operadores da mineração – permitindo que o processo atual seja descrito em detalhes para avaliação e proposta de mudanças;
- Melhoria no processo de amostragem de furos para desmonte – obtendo um modelo que represente de maneira mais confiável os teores do minério lavrado.
- Estudo sobre a representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz através de comparações entre diferentes técnicas de coleta.

1.3 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho desenvolveu-se com a utilização de amostras de pó-de-perfuratriz, que são coletadas em todos os furos efetuados para desmonte de minério na mina. Estas amostras de rotina passam pelas seguintes etapas:

- i. Coleta;
- ii. Agrupamento das amostras de acordo com os blocos do modelo;
- iii. Preparação;
- iv. Análise química;
- v. Análise estatística e geoestatística;
- vi. Estudo sobre a representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz.

A seqüência de trabalhos para a elaboração do modelo de blocos de curto prazo e estudos sobre a representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz está representada na Figura 1.2, abaixo:

Figura 1.2 – Seqüência de atividades para a geração do modelo de blocos para o planejamento de lavra de curto prazo e estudos sobre a representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz.

1.4 Organização desta dissertação

A presente dissertação está estruturada em capítulos que estão organizados da seguinte forma:

- O Capítulo 1 apresenta a introdução, objetivos e metodologia para a execução do trabalho.
- O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura como conceitos de planejamento, controle, qualidade e planejamento de lavra; as principais técnicas de amostragem em mineração, estatística, geostatística e krigagem.
- O Capítulo 3 descreve o local das operações como a localização e formação do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Cajati, um breve histórico da instalação do Complexo Industrial de Cajati e sua evolução histórica.
- O Capítulo 4 trata da variografia e krigagem dos blocos e do problema da representatividade das amostras de pó de perfuratriz, e apresenta as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Planejamento

Segundo Chiavenato (2002), o planejamento é a primeira função administrativa, por ser aquela que serve de base para as demais funções e que determina antecipadamente quais são os objetivos que devem ser atingidos e como se deve fazer para alcançá-los. É, portanto, um modelo teórico para a ação futura, e detalha os planos necessários para atingir os objetivos traçados da melhor maneira possível, definindo quando, como e em que seqüência o objetivo deve ser perseguido. A Figura 2.1 mostra as premissas do planejamento.

Figura 2.1 – Premissas do planejamento. Adaptado de Chiavenato (2002).

O planejamento está subordinado a uma hierarquia, formada por três níveis de planejamento (Corrêa e Corrêa, 2006):

1. O Planejamento Estratégico: voltado para o longo prazo, podendo ter seus efeitos e conseqüências estendido a vários anos pela frente.

Envolve a empresa como uma totalidade, é definido pela cúpula da organização e corresponde ao plano maior ao qual todos os demais se subordinam;

2. O Planejamento Tático: projetado geralmente para o exercício anual e preocupa-se em atingir objetivos departamentais;
3. O Planejamento Operacional: abrange cada tarefa específica, sendo planejado para o curto prazo. Envolve cada tarefa ou atividade isoladamente, preocupa-se com o alcance de metas específicas e é definido no nível operacional, para cada tarefa ou atividade.

Duas definições válidas citadas por Corrêa; Gianesi e Caon (2001), podem auxiliar o entendimento do conceito de planejamento:

“Planejar é entender como a consideração conjunta da situação presente e da visão de futuro influencia as decisões tomadas no presente para que se atinjam determinados objetivos no futuro”; e

“Planejar é projetar o futuro diferentemente do passado, por causas sob nosso controle”.

Um bom processo de planejamento depende de uma visão adequada do futuro e o conhecimento fiel sobre a situação presente. Para que se tenha um bom processo decisório a partir do planejamento é necessário que os objetivos pretendidos sejam claros.

Pode-se, portanto, definir os objetivos como os resultados futuros que se pretende atingir, ou alvos escolhidos que se pretende alcançar dentro de um certo espaço de tempo, aplicando-se determinados recursos disponíveis ou possíveis. Podem existir vários objetivos a alcançar ao mesmo tempo, exigindo o estabelecimento de uma hierarquia, pois alguns deles são mais importantes e predominam sobre os demais.

Assim, no planejamento é estabelecida uma hierarquia de decisões que são restritas às decisões maiores, ou seja, as decisões de curto prazo são restringidas pelas decisões de médio prazo que, por sua vez, são subordinadas às decisões estratégicas ou os planos de longo prazo. A Figura 2.2 ilustra esta seqüência de hierarquia.

Figura 2.2 – O conceito de hierarquia de decisões de planejamento: agregação e horizonte de previsões contracomparam-se em seus efeitos sobre as incertezas de previsões. Modificado de Corrêa; Giansi e Caon (2001), p. 46.

Os diferentes níveis de planejamento possuem inércias distintas. As decisões de maior inércia em geral envolvem maiores recursos e são mais difíceis de reverter. São também chamadas de decisões estratégicas que, uma vez tomadas passam a representar restrições às alternativas de decisão das decisões de maior inércia (Corrêa e Corrêa, 2006).

Segundo Corrêa; Giansi e Caon (2001), no primeiro nível estão situadas as decisões de longo prazo, portanto as de maior inércia. Neste caso, a antecedência com que devem ocorrer tais decisões é grande, em geral o nível de agregação com que se trabalha também o é. O horizonte, que é o intervalo de tempo futuro sobre o qual se tenha interesse em desenvolver uma visão, considerado nesse nível pode chegar a um ano ou mais, e o período de planejamento é também agregado (grande), podendo ser o mês. Os produtos são agregados em famílias ou linhas de produtos e os recursos são agregados em setores produtivos.

Na medida em que o horizonte de planejamento diminui, a agregação vai diminuindo e, junto com ela, a incerteza também diminui, até chegar ao planejamento de curto prazo ou ao planejamento de curtíssimo prazo, conforme a política adotada pela organização, as operações são desagregadas em operações necessárias à execução de cada componente, e os recursos contemplados para a

execução do plano são aqueles de inércia pequena, em que as decisões são tomadas rapidamente para o atendimento do plano, como por exemplo, a necessidade ou não de se fazer horas extras. Nesse caso, o horizonte é de uma ou duas semanas e o período de planejamento é o dia. Na Mina de Cajati, é nesta fase do planejamento que entram as amostras de pó-de-perfuratriz para o controle da lavra.

Os três níveis de planejamento podem ser visualizados de modo resumido no Quadro 2.1.

Tabela 2.1 – Os três níveis de planejamento – Chiavenato (2000).

PLANEJAMENTO	CONTEÚDO	EXTENSÃO DE TEMPO	AMPLITUDE
Estratégico	Genérico, sintético e abrangente.	Longo Prazo	Macro-orientado: Aborda a empresa como uma totalidade.
Tático	Menos genérico e mais detalhado.	Médio Prazo	Aborda cada unidade da empresa separadamente.
Operacional	Detalhado, específico e analítico.	Curto Prazo	Micro-orientado: Aborda cada tarefa ou operação apenas.

2.2 Controle

Para Campos (1992), controle significa o planejamento do processo que inclui o estabelecimento de várias metas e vários procedimentos-padrão.

Normalmente quando ocorre um problema, faz-se a análise do processo, com objetivo de localizar a causa fundamental que, quando identificada, irá determinar um novo procedimento para execução da tarefa ou processo, de tal forma que a causa localizada seja evitada, o que significa que se está buscando uma padronização.

Portanto, manter sob controle é saber localizar o problema, analisar o processo, padronizar e estabelecer itens de controle de modo que o problema não se repita. A Figura 2.3 mostra as bases do controle.

Figura 2.3 – Bases do controle. Campos (1992), p. 23.

Chiavenato (2000), julga o controle como um processo analítico composto por quatro fases, como mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – As quatro fases do controle. Adaptado de Chiavenato (2000), pg. 206.

O objetivo do controle é manter as operações dentro dos padrões estabelecidos para que os objetivos sejam alcançados da melhor maneira possível. Assim, variações, erros ou desvios devem ser corrigidos para que as operações sejam normalizadas. A ação corretiva visa fazer com que aquilo que é feito o seja exatamente de acordo com o que se pretende fazer.. A Figura 2.5 mostra uma seqüência de ações que definem o controle como forma de assegurar o alcance dos objetivos (Chiavenato, 2000).

Figura 2.5 – O controle como forma de assegurar o alcance dos objetivos. Adaptado de Chiavenato, (2000) pg. 208.

2.3 Planejamento e controle

Segundo Slack; Chambers e Johnston (2002), algumas atividades são mais difíceis de planejar do que outras. As que têm alto grau de imprevisibilidade podem ser particularmente difíceis de planejar; da mesma forma que algumas operações são mais difíceis de controlar que outras. Assim, o propósito do planejamento e controle é garantir que os processos da produção ocorram de forma eficaz e eficiente e possam gerar produtos e serviços conforme requeridos pelos seus clientes.

Estes mesmos autores definem que um plano nada mais é que uma declaração de intenções, uma formalização do que se deseja que aconteça em determinado momento no futuro, mas não garante que tal evento de fato irá ocorrer, pois são baseados em expectativas as quais são apenas esperanças relativas ao futuro e, por fim, quando as operações tentam implementar os planos, nem sempre as coisas acontecem como o esperado, daí surge a necessidade da implementação de mecanismos de controle que irão lidar com as variações que naturalmente ocorrerão. Isto pode significar que os planos precisem ser redesenhados a curto prazo ou que sejam necessárias intervenções na operação de modo a conduzi-la de volta aos padrões planejados.

A natureza do planejamento e do controle muda ao longo do tempo. No longo prazo a ênfase está mais no planejamento que no controle e seus principais objetivos são o alcance de metas financeiras e o desenvolvimento de orçamentos que possam identificar as metas de custos e receitas que se pretende alcançar. No planejamento e controle a médio prazo o foco está em planejar com mais detalhes e até re-planejar, se for necessário (Slack; Chambers; Johnston, 2002).

2.4 Qualidade

Segundo Paladini (2008), o conceito de qualidade muda com o tempo. Isso faz com que organizações e pessoas invistam constantemente em conceitos de qualidade que chamam de modernos, novos, atuais ou contemporâneos. A dependência do conceito da qualidade em relação ao momento presente aflige quem atua em setores produtivos, particularmente nos mais produtivos, gerando uma importante prioridade em suas ações: o empenho pelas inovações em produtos, processos ou métodos de ação.

A qualidade deve ser considerada do ponto de vista do usuário, sendo que uma de suas definições se refere àquilo que melhora o produto do ponto de vista do cliente. Alguns aspectos da qualidade são identificados com facilidade, como o grau de funcionalidade, de confiabilidade e o tempo decorrido sem que o produto apresente algum defeito (Aguayo, 1993).

Assim, a qualidade não pode ser confundida com preferência, não sendo uma tecnologia nova ou determinadas características dos produtos, nem sistemas de apoio ou exageros no projeto. Desta maneira, a qualidade não é da responsabilidade do departamento que a controla ou de qualquer outro especialista, é de responsabilidade de todos, embora a alta administração tenha maior alavancagem nas suas decisões (Aguayo, 1993).

No caso das empresas, muitas metas se originam a partir das necessidades dos clientes, transformando cada uma dessas necessidades em metas a ser alcançada. Assim, pode-se afirmar que as metas são guiadas pelo mercado (Juran, 2009).

No caso de uma empresa de mineração, as metas são estabelecidas da mesma maneira, ou seja de acordo com as demandas do mercado. Fazendo uma analogia com o que ocorre em uma operação de lavra, a necessidade de fornecer à usina de concentração um minério que possua características mínimas para garantir um desempenho satisfatório, ou seja, a produção de toneladas de concentrado passa a ser a meta de produção da mina.

Campos (1992), define a qualidade como algo:

a.	... que atende perfeitamente...	Projeto perfeito.
b.	... de forma confiável...	Sem defeitos.
c.	... de forma acessível...	Baixo custo.
d.	... de forma segura...	Segurança do cliente.
e.	... no tempo certo...	Entrega no prazo certo, no local certo e quantidade certa.

Segundo Paladini (1990), em função de sua organização e abrangência, a qualidade pode ser abordada em cinco diferentes formas:

- A qualidade transcendental: abordagem em que a qualidade pode ser vista como um conceito que dificilmente pode ser fixado com precisão, em que é considerada uma característica, propriedade ou

estado que torna um produto ou um serviço aceitável plenamente, embora essa aceitação seja derivada não de análises e estudos feitos, mas da constatação prática, proveniente muitas vezes da experiência. Isso possibilita reconhecer a qualidade de um produto, embora não tenham sido feitas maiores análises à respeito dela, ou seja, a qualidade é apenas observável, mas não pode ser descrita.

- **Abordagem centrada do produto:** esta abordagem entende a qualidade como uma variável passível de medição e até precisa. As diferenças de qualidade são observáveis no produto pela diversidade de quantidades de elementos ou atributos que o produto possui. Isto significa que é plenamente possível avaliar a qualidade de um produto sem o uso de opiniões, preferências, pontos de vista, experiências e outras formas subjetivas, mas por meio de um padrão cujas unidades de medidas integram uma escala contínua e definida.
- **Abordagem centrada no valor:** esta abordagem agrega a qualidade aos custos de produção e considera que um produto é de boa qualidade se apresentar alto grau de conformação a um custo aceitável. Como consequência, o produto pode ser vendido a um preço razoável que, no final, é o que interessa.
- **Abordagem centrada na fabricação:** esta abordagem fixa-se no esforço feito, em termos de fabricação, para produzir um item em completo acordo com suas especificações básicas, determinadas desde o projeto. Isso significa que, se o processo de fabricação não pode desenvolver um produto conforme suas especificações, automaticamente a qualidade estará comprometida, ou seja, a excelência na fabricação é entendida como empenho para produzir, logo no primeiro esforço, um produto que atenda plenamente suas especificações, fazendo com o que a única saída que sobra para quem fabrica o produto é obedecer ao projeto sem fazer considerações ou questionamentos sobre suas especificações.
- **Abordagem centrada no usuário:** fixa o usuário como fonte de toda a avaliação sobre a qualidade do produto. Segundo essa abordagem, ninguém pode pensar em qualidade se não se fixar, primeiro, no que

o consumidor deseja e, a partir daí, procurar desenvolver um produto que o atenda. Isso significa que a qualidade de um produto fica condicionada ao grau com que ela atenda às necessidades e conveniência do consumidor.

2.5 Planejamento da qualidade

Juran (2009), define o planejamento da qualidade como (i) a atividade de fixação de metas de qualidade, e (ii) o desenvolvimento de produtos e processos necessários à realização daquelas metas. Isto significa que não é possível planejar em termos abstratos, só se pode planejar depois que a meta for estabelecida.

Ainda segundo Juran (2009), o planejamento da qualidade envolve uma série de passos universais que podem ser resumidos da seguinte forma:

- Estabelecer metas de qualidade;
- Identificar os clientes – aqueles que serão afetados pelos esforços para se alcançar as metas;
- Determinar as necessidades dos clientes;
- Desenvolver características do produto para atender às necessidades dos clientes;
- Desenvolver processos capazes de produzir aquelas características do produto;
- Estabelecer controles de processos e transferir os planos resultantes para as forças operacionais.

O controle da qualidade é um processo que consiste nos seguintes passos:

- Avaliar o desempenho real da qualidade;
- Comparar o desempenho real com as metas de qualidade;
- Atuar para reduzir as diferenças.

A melhoria da qualidade é um processo que tem por objetivo elevar o desempenho da qualidade a níveis sem precedentes, o que significa um grande avanço, que abrange uma série de passos universais (Juran, 1992):

- Estabelecer a infra-estrutura necessária para garantir o melhoramento anual da qualidade;
- Identificar as necessidades específicas de melhoras – os projetos de melhoramento;
- Estabelecer, para um projeto, uma equipe com clara responsabilidade para levá-lo a uma conclusão bem sucedida;

- Prover os recursos, a motivação e o treinamento das equipes para: diagnosticar as causas dos desvios, estimular o estabelecimento de reparações e estabelecer controles para manter os ganhos.

O planejamento, o controle e a melhoria da qualidade podem ser entendidos como a Trilogia de Juran, sendo um conceito unificante que se estende a toda a empresa, onde cada função possui características únicas, assim como cada produto ou processo. Os três processos da Trilogia são inter-relacionados e podem ser representados pelo Diagrama da Trilogia de Juran, mostrado na Figura 2.6.

Os planejadores determinam quem são os clientes e quais as suas necessidades e desenvolvem projetos de produtos e processos capazes de atender a essas necessidades. Finalmente, os planejadores passam os planos para as forças operacionais cuja tarefa é de executar os processos e produzir os produtos. A medida em que prosseguem as operações, fica claro que o processo não é capaz de produzir um trabalho 100% bom. A Figura 2.6 mostra que 20% do trabalho precisa ser refeito, devido à deficiência de qualidade. Esse desperdício passa a ser crônico porque assim foi planejado (Juran, 1992).

Pelos padrões convencionais de responsabilidade, as forças operacionais são incapazes de eliminar aquele desperdício planejado. O que elas fazem, em vez disso, é o controle da qualidade para impedir que as coisas piores.

A Figura 2.6 mostra também que, com o correr do tempo, o desperdício crônico é levado a um nível muito abaixo daquele originalmente planejado, esse ganho é conseguido pelo terceiro processo da Trilogia, a melhoria da qualidade.

Figura 2.6 – Diagrama da Trilogia de Juran. Modificado de Juran (2009), p. 17.

Existe, portanto, uma diferença entre o planejamento e o controle da qualidade, pois o planejamento trata da fixação de metas e do estabelecimento dos meios necessários para alcançar essas metas. O controle da qualidade trata da execução dos planos – da condução das operações de forma a atingir as metas e inclui a monitoração das operações, de forma a detectar as diferenças entre o desempenho real e as metas, também chamadas de variâncias e inclui ações para restaurar o padrão da operação, caso apareçam variâncias (Juran, 2009).

A melhoria da qualidade é exigida em problemas crônicos, necessitando de diagnósticos para a descoberta das causas e a criação de soluções para eliminá-las. Assim, o processo de planejamento da qualidade é um processo de duas vias. De um lado pode produzir planos de qualidade e, de outro, pode produzir planos que são mais suscetíveis a falhas (erros). A melhoria da qualidade pode cuidar dessas falhas, eliminando-as uma a uma (Juran, 2009).

2.6 Planejamento de lavra

Planejar e modelar uma mina é uma atividade altamente complexa, pois envolve, além de aspectos técnicos e financeiros, outros aspectos relacionados às fases em que o planejamento da lavra é executado em diferentes horizontes, como

por exemplo, o curto, médio e longo prazos que devem estar, logicamente, relacionados à vida útil da mina.

Todo empreendimento mineral requer um projeto de mineração no qual são delineadas a avaliação da jazida, a escala de produção prevista, os métodos de lavra e beneficiamento a serem adotados, a seleção e dimensionamento dos equipamentos, os impactos ambientais, a infra-estrutura industrial e sistemas de apoio, entre outros, conduzindo à viabilidade econômica do empreendimento. Nessa fase, no planejamento de lavra, é definida a evolução temporal ou o seqüenciamento da lavra, bem como são estabelecidos todos os parâmetros fundamentais que orientarão as atividades de mineração durante toda a sua vida útil.

Na fase de operação propriamente dita, é importante reavaliar sistematicamente as premissas estabelecidas à luz das novas informações obtidas ao longo do tempo de operação da mina, subsidiando a tomada de decisões que proporcionarão melhora no ciclo de vida do empreendimento.

A definição da geometria do corpo mineral para avaliação da quantidade de minério existente bem como a determinação de sua qualidade são problemas freqüentemente enfrentados pelas empresas de mineração.

Tradicionalmente, segundo Gambim; Costa e Koppe (2005), a operação de controle de teores é feita, através da utilização de um modelo de blocos gerado por um estimador tradicional, geralmente krigagem ordinária de blocos, a qual realiza a melhor estimativa (não tendenciosa e com menor erro) a partir das amostras disponíveis. No entanto, esse procedimento é incapaz de incorporar a incerteza associada à estimativa. A variabilidade dos valores estimados é menor que a variabilidade dos dados originais.

Este modelo de blocos pode ser considerado como o resultado de uma série de atividades multidisciplinares, que compõem a pesquisa geológica, onde são obtidos os dados morfológicos da jazida e os dados analíticos utilizados para a construção do modelo que irá servir de base para o planejamento de lavra.

Segundo Senhorinho (2001), a definição das dimensões dos blocos que formam o modelo da jazida depende de uma série de fatores e, para Yamamoto, 2001, a subdivisão ideal em blocos baseada na prática de avaliação de recursos, seria igual à metade do espaçamento médio entre os furos de sonda. A krigagem de

blocos com dimensões muito menores que a metade da malha de amostragem deveria ser evitada, pois tais estimativas exibem extrema variabilidade (Yamamoto, 2001).

Os blocos de cubagem têm a forma geral de paralelepípedos e suas dimensões devem ser compatíveis com a densidade média de amostragem nas três direções. Ao conjunto de blocos de cubagem que compõem o depósito denomina-se modelo tridimensional de blocos (Yamamoto, 2001).

A Figura 2.7 representa como são denominados os principais elementos de um modelo de blocos, no que se refere à sua localização espacial, de acordo com a terminologia adotada pelo programa Datamine Studio. Neste caso, a Figura representa um grande paralelepípedo que é dividido em blocos menores os quais receberão todos os atributos necessários para qualificar e quantificar o minério ou material estéril existente na jazida.

Figura 2.7 – Representação de um modelo de blocos em que NX, NY e NZ significam número de blocos na direção Leste, Norte e cota, respectivamente. No destaque, os itens XINC, YINC e ZINC, significam o tamanho dos blocos em cada uma das direções, modificado de Yamamoto (2001), p.123.

O bloco representa a mínima unidade usada em um modelo e suas dimensões dependem de aspectos técnico-mineiros, geológicos e práticos. Todas as informações referentes aos custos unitários, recuperações de lavra e beneficiamento, dados geotécnicos, econômicos e projeções de mercado podem ser inseridas no modelo de blocos (Senhorinho, 2001).

Segundo Pilger (2000), a pouca aderência do modelo de blocos para os planos de lavra de curto prazo, resulta do conhecimento relativamente baixo da variabilidade de teores ou da qualidade do minério a ser lavrado em determinados períodos. “A experiência tem demonstrado que a utilização de modelos determinísticos para representar fenômenos geológicos não contempla a natureza desses fenômenos [...]” (Peroni, 2002).

Ainda segundo o mesmo autor, a dificuldade da representação determinística de um fenômeno geológico está relacionada ao grau de incertezas, originada pela reduzida quantidade de amostras para representar tal fenômeno que, de acordo com Revuelta e Jimeno (1997) geralmente em geologia e, particularmente em mineração, nos melhores casos, o fenômeno observado pode ser representado por amostras que correspondem a $1/10^9$ do que se pretende avaliar.

Segundo Maranhão (1983), em todas as fases de uma prospecção sistemática são coletadas amostras nos corpos mineralizados; entretanto, durante a exploração e a prospecção em superfície, a amostragem é menos densa e pouco regular, já que as amostras são recolhidas apenas em afloramentos, trincheiras ou poços. O objetivo da amostragem nessas duas etapas é dar uma idéia do teor médio do minério na superfície. Na fase de avaliação a amostragem é mais completa e freqüentemente conduzida de forma regular, inclusive adotando-se a implantação de furos de sonda segundo malhas regulares de perfuração ou abrindo-se galerias de pesquisa.

O grande desafio em representar um modelo geológico está relacionado às técnicas que são empregadas para sua geração, ou seja, a modelagem geológica de depósitos minerais tem dois componentes, um empírico, que é baseado em dados que são observados para a modelagem (morfologia, espessuras de camadas, mineralogia, contatos, teores, etc), o outro aspecto é conceitual, ou seja, envolve a interpretação dos dados no contexto de uma teoria genética.

O aprimoramento do modelo geológico ou a confiabilidade na modelagem pode ser conseguido com campanhas adicionais de investigação e amostragem, geralmente por sondagens rotativas, onde um fator limitante será o custo envolvido. Isto leva à necessidade de local as investigações em regiões onde possam contribuir efetivamente para a diminuição da incerteza associada à estimativa, de modo a obter uma distribuição informações, que proporcione o melhor conhecimento

possível do corpo objeto de investigação, a do que, a adição novas investigações se torna irrelevante. Por exemplo, a locação de sondagens em locais de pouca variância do fenômeno de interesse pouco contribuirá para a redução da incerteza da estimativa, acarretando em perdas financeiras e de tempo por parte da empresa, (McKinstry, 1970).

Uma forma de diminuir as incertezas na estimativa de teores do modelo da jazida é a prática do controle que é feito durante as atividades de operação de uma mina. Este controle pode ser implementado através de várias formas de amostragem como, por exemplo, amostras de canaletas, furos de trado, amostras dos fogos desmontados e amostras de pó-de-perfuratiz.

Segundo Peroni (2002), uma mina a céu aberto é uma escavação feita com o propósito de extrair um bem mineral que, para ser obtido, normalmente é necessário extrair grandes quantidades de rochas, sem valor comercial, denominadas de estéril. A seleção dos parâmetros físicos do desenho da cava e o planejamento da extração de estéril e minério são decisões, em geral, muito complexas e que envolvem significativa contingência econômica, portanto, a prática atual de planejamento de lavra começa com o modelo de blocos e envolve a determinação de:

- Decisão se um bloco do modelo deve ser lavrado ou não;
- Se for lavrado, quando será lavrado; e
- Uma vez lavrado, então quando deverá ser enviado ao processo (beneficiamento).

2.7 Análise estatística

2.7.1 Estatísticas descritivas de variáveis aleatórias

A estatística descritiva pode ser interpretada como uma função cujo objetivo é a observação de fenômenos de mesma natureza, a coleta de dados numéricos referentes a esses fenômenos, a organização e a classificação desses dados observados e a sua apresentação através de gráficos e tabelas, além dos cálculos estatísticos que permitem descrever resumidamente os fenômenos (Ovalle de Toledo, 1985).

Em mineração, a análise estatística das amostras de sondagem tem como objetivo descrever estatisticamente as distribuições dos dados para melhor entendimento do comportamento das variáveis de interesse dentro do depósito e

permite a determinação de seu teor médio e sua dispersão. A dispersão dos teores está relacionada a diversos fatores como os erros de amostragem, erros analíticos e, sobretudo, com a variabilidade natural dos depósitos minerais. Uma aproximação dessa variabilidade pode ser dada, entre outras estatísticas possíveis, pelo coeficiente de variação (Yamamoto, 2001).

O coeficiente de variação está definido como a relação entre o desvio padrão e a média:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}, \quad (2.1).$$

Onde:

S = desvio padrão amostral;

$\bar{X}$ = média amostral.

O coeficiente de variação é adimensional, sendo freqüentemente utilizado para comparar a dispersão relativa de valores em torno da média entre diferentes dispersões e, segundo Martins (2005) existem algumas regras empíricas para sua interpretação:

se $CV < 15\%$ há baixa dispersão

se $15\% \leq CV < 30\%$ há média dispersão

se $CV \geq 30\%$ há elevada dispersão

Se a estimativa for o objetivo final de um estudo, o coeficiente de variação pode indicar a existência de alguns problemas. Um coeficiente de variação maior que 1 (um) indica a presença de alguns valores altos e erráticos que podem ter um impacto significativo sobre as estimativas finais Isaaks e Srivastava (1989).

Enquanto a amplitude total, a variância e o desvio padrão são medidas absolutas de dispersão, o coeficiente de variação mede a dispersão relativa, sendo freqüentemente empregado para descrever a forma da distribuição (Martins, 2005).

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a média, a mediana e a moda podem nos dar alguma idéia de onde os centros de uma distribuição estão localizados. Outros promédios menos usados são a média geométrica, média harmônica, média quadrática, média cúbica e média biquadrática (Ovalle e Toledo, 1985).

2.7.1.1 Média aritmética

A média ou esperança matemática é uma medida de tendência central e é calculada como:

$$E[X] = \sum_{i=1}^n X_i P(X_i) \quad (2.2)$$

Onde $P(X_i)$ é a probabilidade associada à ocorrência da i -ésima variável X .

É uma medida de fácil aplicação e leitura, usa todos os valores da distribuição e é sensível à presença de valores extremos. É também muito utilizada em sua forma simplificada, em que $E[X] = \bar{X}$:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.3)$$

Onde x_i representa cada uma das n observações disponíveis na distribuição, i varia de 1 (primeira observação) até n (última observação). Quando os valores x_i estão agrupados, com suas respectivas freqüências absolutas F_i , a média, neste caso, ponderada, é calculada com a fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2.4)$$

2.7.1.2 Mediana

A mediana M é o ponto central do valor observado se eles são organizados em ordem crescente, dividindo a população em duas partes iguais. Após a ordenação dos dados de forma $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, a mediana pode ser calculada com as seguintes equações:

$$M = \frac{x_n + 1}{2}, \text{ se } n \text{ for ímpar.} \quad (2.5)$$

$$M = \frac{\frac{x_n}{2} + \frac{x_n}{2} + 1}{2}, \text{ se } n \text{ for par.} \quad (2.6)$$

2.7.1.3 Moda

A moda Mo é o valor mais freqüente da distribuição para distribuições simples (sem agrupamento) e sua identificação é facilitada pela simples observação do

elemento que apresenta maior frequência. A moda é de fácil determinação, pois não é afetada por valores extremos, podendo ser aplicável em qualquer escala de valores (ordinal, nominal, intervalar, proporcional).

Uma das desvantagens da moda é que ela muda com a precisão dos valores de dados, ou seja, o uso de uma casa decimal a mais pode mudar sua posição. Por isso, a moda não é particularmente útil para aplicação em dados nos quais as medidas têm vários dígitos, casos em que pode ser facilmente observada, por exemplo, pela barra mais alta do histograma (Isaaks e Srivastava, 1989).

2.7.1.4 Variância e desvio padrão

A variância mede a dispersão dos valores em torno da média, e é calculada com a seguinte fórmula:

$$Var[X] = S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.7)$$

O desvio padrão é a raiz quadrada da variância.

2.7.1.5 Assimetria

A assimetria é o grau de desvio de uma curva em torno da média no sentido horizontal, podendo esse desvio ser positivo, com a cauda se alongando para a direita, e a mediana menor que a média, o que ocorre na maioria das distribuições de frequência de variáveis de depósitos minerais com alta variabilidade natural, ou é negativo com a cauda da curva se alongando mais para a esquerda e a mediana maior que a média. Normalmente implica em distribuições lognormais, sendo dada pela fórmula:

$$CA = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\sigma^3} \quad (2.8)$$

2.8 Medidas de Tendência central

É a determinação e o cálculo de medidas que oferecem o posicionamento da distribuição dos valores de uma variável que desejamos analisar (Martins, 2005). Estas medidas de posição podem se apresentar de várias formas, dependendo daquilo que se pretende conhecer a respeito dos dados estatísticos. As mais

importantes são as medidas de tendência central ou promédias, que são assim denominadas em virtude da tendência dos dados observados se agruparem em torno desses valores centrais (Ovalle e Toledo, 1985)

Segundo Barnes (1980, *apud* Yamamoto, 2001), o Teorema do Limite Central é um dos mais importantes teoremas da estatística matemática relacionada à distribuição de freqüências de amostragem, enunciado como: Se amostras aleatórias de tamanhos fixos são retiradas de uma população cuja distribuição teórica é de forma arbitrária, mas com média e variância finitas, a distribuição das amostras tende mais e mais a uma distribuição normal com média μ e variância σ^2/n tanto quanto o aumento do tamanho das amostras (Yamamoto, 2001).

Se $X_1, X_2, \dots, X_n$ são valores de uma variável aleatória, a média $\bar{X}$ é:

$$\bar{X} = \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_n)}{n} \quad (2.9)$$

O valor esperado de $\bar{X}$, usando as propriedades $E[KX] = K \times E[X]$ e $E[X \pm Y] = E[X] \pm E[Y]$ da média, é:

$$E[\bar{X}] = \frac{1}{n} (E[X_1] + E[X_2] + \dots + E[X_n]) \text{ ou,}$$

$$E[\bar{X}] = \frac{1}{n} (n \times \mu) = \mu \quad (2.10)$$

sendo μ a média populacional.

A variância de $\bar{X}$ é calculada como:

$$Var[\bar{X}] = Var\left[\left(\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}\right)\right]$$

Aplicando as propriedades $Var[KX] = K^2 Var[X]$ e $Var[X \pm Y] = Var[X] + Var[Y]$ da variância, tem-se:

$$Var[\bar{X}] = \left(\frac{1}{n}\right)^2 (Var[X_1] + Var[X_2] + \dots + Var[X_n]) \text{ ou,}$$

$$Var[\bar{X}] = \left(\frac{1}{n}\right)^2 n \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (2.12)$$

Tanto no caso da média quanto da variância, a letra K é uma constante, pois, de acordo com as propriedades da média, a média de uma constante é a própria constante (Yamamoto, 2001):

$$E[K] = K$$

A distribuição $\bar{X}$ tem média μ e variância $\frac{\sigma^2}{n}$ que se aproxima da distribuição normal tanto quanto aumenta o tamanho da população. Na maioria dos casos, a aproximação é boa a partir de 40 amostras. (Yamamoto, 2001).

2.8.1 Intervalo de confiança da média

É o intervalo baseado em observações de uma população e construído de modo que haja uma probabilidade especificada de o verdadeiro valor desconhecido de um parâmetro estar contido nesse intervalo; nível de confiança é a probabilidade de o intervalo conter o verdadeiro valor do parâmetro. A probabilidade de o intervalo conter o parâmetro estimado é determinada pelo nível de confiança associado ao intervalo. A notação mais usual para o intervalo de confiança é $(1-\alpha)$.

O intervalo de confiança pode ser calculado a partir da estatística t :

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (2.13)$$

Onde $\bar{X}$ é a média da amostra, S é o desvio padrão da mesma, n representa a quantidade de dados disponíveis e t o processo utilizado, lembrando que estão relacionados a um valor de α pré-determinado.

A distribuição t é simétrica e depende somente do número de graus de liberdade, que no caso da estimativa da média é igual a $n-1$. Observa-se que o valor crítico de t com graus de liberdade tendendo ao infinito, em um nível de significância de 10%, corresponde à variável aleatória padronizada da distribuição normal para uma área equivalente a 10% (Yamamoto, 2001).

2.9 Amostragem

2.9.1 O universo amostral ou população

Dois conceitos utilizados largamente em estatística são população ou universo e amostras. O universo é o conjunto da totalidade de indivíduos ou atributos, sobre o qual se faz uma inferência. Assim, o universo congrega todas as observações que sejam relevantes para o estudo de uma ou mais características dos indivíduos, os quais podem ser concebidos tanto para seres animados ou inanimados.

Formalmente, o universo é o conjunto constituído por todos os indivíduos que apresentam pelo menos uma característica comum, cujo comportamento interessa analisar (inferir). Assim sendo, o objetivo das generalizações estatísticas (indução estatística) está em dizer-se algo acerca de diversas características da população estudada, com base em fatos conhecidos. Tal universo pode ser caracterizado por um ou mais atributos – podendo ser unidimensional ou multidimensional. A definição de um universo geológico tem sido objeto de numerosas discussões. Neste caso, definiremos o universo como sendo uma jazida mineral.

A amostra pode ser definida como um subconjunto, uma parte selecionada da totalidade de observações abrangidas pela população, através da qual se faz um juízo ou inferência sobre as características da população. A amostra pode ser tão pequena como um grama ou possuir centenas de toneladas (Gy, 1979).

A amostragem e em particular os processos de amostragem aplicam-se em variadas áreas do conhecimento e constituem, muitas vezes, a única forma de obter informações sobre uma determinada realidade que importa conhecer. No entanto, os processos de amostragem são freqüentemente negligenciados por diversas pessoas, indo desde o presidente da empresa de mineração até o preparador de amostras (Gy, 1979).

Segundo Gy (1979), a teoria da amostragem estuda as relações existentes entre uma população e as amostras extraídas dela. Como consequência, sempre existirá um erro associado ao resultado de qualidade de um lote. Como o resultado de qualidade de um lote nunca é um valor exato, interpreta-se que esse resultado apresenta um comportamento de natureza estocástica. Dessa forma, é possível estimar, para qualquer resultado de controle de qualidade, uma faixa de erro devida

a fatores relacionados à variabilidade existente entre as partículas do material amostrado (Grigorieff; Costa e Koppe, 2002).

Assim, uma boa estimativa do erro a ser gerado por um sistema de controle de qualidade é fundamental para a garantia da acurácia e precisão exigidas e para que os resultados deste controle não apresentem erros tendenciosos significativos, ou seja, a variabilidade dos resultados obtidos se restrinja àquela aceitável pelas partes interessadas (cliente), que neste caso, é a usina de concentração.

Difícilmente uma amostra apresentará características idênticas àsquelas do material de onde foi coletada devido aos erros de amostragem que surgem no decorrer das operações de coleta (Chieregati, 2007).

A amostragem é o processo de determinação ou escolha de uma amostra a ser pesquisada. Portanto, a amostragem consiste em selecionar parte de uma população e observá-la com vista a estimar uma ou mais características para a totalidade da população. No entanto, a representatividade de uma amostra não terá significado se o objetivo da amostragem não for definido previamente.

2.9.2 Tipos de amostragem

Para que uma amostragem seja representativa, é necessário cumprir algumas exigências tais como: o modo de coleta das amostras, a distância e a quantidade a ser coletada das amostras.

Existem basicamente três métodos de amostragem que podem ser considerados.:

1. *Amostragem Aleatória Simples*: Também conhecida por amostragem casual, randômica, acidental etc. Consiste basicamente em atribuir a cada elemento do universo um número único para, depois, selecionar alguns desses elementos de maneira casual. Neste tipo de amostragem, todos os elementos da população têm igual probabilidade de compor a amostra.

Uma amostra em que a probabilidade de escolher qualquer dos N elementos em uma única prova é igual a $1/N$ é uma amostra aleatória. Isso implica que grupos de elementos tenham a mesma chance de serem incluídos na amostra que outros grupos do mesmo tamanho. Embora possa não parecer óbvio, a extração de toda a amostra de uma só vez equivale à amostragem

sem reposição. Na amostragem com reposição, é possível extrair o mesmo elemento várias vezes, o que não é possível quando se extrai toda a amostra de uma só vez (Stevenson, 1981).

2. *Amostragem Estratificada*: Caracteriza-se pela seleção de uma amostra de cada subgrupo da população considerada. Os fundamentos para delimitar os subgrupos ou estratos podem ser encontrados em propriedades como sexo, idade ou classe social, ou seja, no caso de população heterogênea em que se podem distinguir subpopulações mais ou menos homogêneas, denominadas estratos, é possível utilizar o processo de amostragem estratificada (Smailes e McGrane, 2002)

No caso da amostragem estratificada não-proporcional, a extensão da amostra dos vários estratos não é proporcional à extensão desses estratos em relação ao universo. Há situações em que esse procedimento é o mais adequado, particularmente naqueles em que se tem interesse na comparação entre os vários estratos.

As estimativas obtidas com a amostragem estratificada são mais precisas do que as estimativas calculadas com base na amostragem aleatória simples.

3. *Amostragem Sistemática*: É uma variação da amostragem aleatória simples, conveniente quando a população está ordenada segundo algum critério, ou seja, sua aplicação requer o ordenamento da população de modo tal que cada um de seus elementos possa ser unicamente identificado pela posição (Smailes e McGrane, 2002). Apresentam condições para satisfação desse requisito uma população identificada a partir de uma lista que englobe todos os seus elementos, uma fila de pessoas ou o conjunto de candidatos a um concurso identificado pela ficha de inscrição.

Se os elementos da população já se encontram ordenados segundo algum critério, pode-se selecionar um elemento qualquer e escolher um “passo” que definirá qual será o próximo elemento escolhido, isto é, a amostra é coletada sistematicamente a cada intervalo.

Embora esse tipo de amostragem seja fácil de ser conduzido e economicamente acessível, sua desvantagem é dada pela dificuldade de

obter distribuições amostrais das estatísticas com os dados amostrais, comprometendo a qualidade das inferências sobre a população.

Devido à grande importância que tem a amostragem em mineração, freqüentemente se descarta o primeiro tipo, pois poderá conduzir a erros muito significativos, como por exemplo, a obtenção de um teor superior ao real, dado que a suposição básica para que este tipo de amostragem seja representativo é um conjunto absolutamente homogêneo, o que raramente ocorre em mineração. Por isso, se vale de métodos que se encontram entre o método estratificado e o método sistemático. De acordo com Revuelta e Jimeno (1997), o tipo e o número de amostras depende de muitos fatores:

- a. O tipo de ocorrência mineral e o tamanho da partícula da fase de interesse econômico;
- b. O estado em que se encontra o projeto mineiro;
- c. A acessibilidade que apresenta a mineralização; e
- d. O custo da coleta das amostras, os recursos financeiros disponíveis e o valor da mineralização.

Dentre os diversos tipos de amostragens que podem ser executados em uma operação mineira, a amostragem efetuada durante as operações de lavra pode ser chamada de controle de teores, e tem como objetivo definir da forma mais exata possível, os valores dos teores de metal contido no mineral de interesse que será enviado para a usina de concentração.

Os dados obtidos na fase exploração e planejamento de lavra de longo prazo não são, geralmente, suficientes para proporcionar um alto grau de confiança necessário para o desenvolvimento satisfatório da lavra. Por este motivo, se faz necessária a coleta de dados que possibilitem uma maior confiabilidade do minério que está sendo lavrado. Estas informações podem ser obtidas amostrando-se o pó que resulta da operação de perfuração para desmonte de rochas com explosivos, denominadas amostras de pó-de-perfuratriz. Este tipo de amostragem gera uma grande quantidade de informações e podem proporcionar, desde que coletadas de maneira correta, o grau de confiança necessário para uma estimativa mais realista (Revuelta e Jimeno, 1997):

- São suficientemente representativas do conjunto, a menos que a rocha seja muito friável (o que não ocorre com o carbonatito da mina de Cajati);
- Podem ser obtidas de acordo com geometria dos bancos de lavra;

- As malhas de perfuração são tão densas, que os teores que se calculam são muito similares aos que posteriormente alimentarão a usina de concentração, o que pode não ocorrer com relação aos teores obtidos na fase de estimativa das reservas, através das amostras de sondagem.

Estas características fazem com que a amostragem sistemática do pó-de-perfuratriz seja uma rotina, além de não representar um gasto excessivo, pois os furos para desmonte precisam ser feitos de qualquer maneira. Outra grande contribuição que tal amostragem proporciona é a verificação da qualidade da estimativa de teores efetuada a partir dos furos de sondagem.

2.9.3 Amostragem de depósitos minerais para fins de exploração, avaliação e extração

A prospecção mineral freqüentemente abrange áreas extensas, da ordem de centenas de milhares de quilômetros quadrados, sendo praticamente impossível efetuar o levantamento detalhado de toda a superfície a ser estudada. Por isso, áreas prioritárias devem ser selecionadas, após um trabalho inicial de reconhecimento geológico e de compilação de informações.

Na pesquisa mineral de um depósito, a amostragem tem por objetivo a exploração tridimensional do corpo de minério e, conseqüentemente, a determinação de parâmetros geológicos e geométricos, ou seja, o conhecimento de seus teores e sua distribuição espacial. Os modelos que permitem a investigação tridimensional do corpo de minério são baseados em sondagem, podendo estas ser de percussão, rotopercussão ou rotativas (Yamamoto, 2001).

Segundo Maranhão (1983), a escolha do método de prospecção a ser utilizado no reconhecimento em profundidade de um depósito mineral depende de vários fatores, especialmente a forma do corpo mineralizado, de suas dimensões, da regularidade da mineralização e da sua posição no espaço. Entretanto, a sondagem rotativa é a mais utilizada (Yamamoto, 2001).

Quando se estabelece uma malha de sondagem, uma das primeiras questões que surge é se ela será suficiente para o conhecimento das características do depósito ou se será necessário adensá-la. A segunda questão poderia ser onde a malha deveria ser adensada, isto dependerá de diversos fatores e, entre eles, a capacidade econômica da empresa. Evidentemente uma maior densidade de amostragem proporciona um melhor conhecimento da mineralização e, portanto, um

menor erro na estimativa. Entretanto, esta relação entre o número de amostras e a minimização do erro tem seus limites, ou seja, a relação não é uma equação linear que permita sempre um aumento proporcional da precisão às custas do maior número de sondagens.

Segundo Revuelta e Jimeno (1997), a amostragem em depósitos minerais, podendo ser metálicos ou de minerais industriais, é feita em diferentes estágios ao longo dos processos de exploração, avaliação e extração:

i. Durante a fase de exploração, a amostragem é pouco adensada e tem como objetivo primordial a análise dos testemunhos de sondagem, com a finalidade de avaliar as intersecções dos minério. Desta forma, é obtido o teor *in situ*, mas as informações obtidas sobre a continuidade da mineralização que seja potencialmente econômica são muito poucas e praticamente nulas do ponto de vista da lavra. Quando o projeto mineiro tem possibilidades de ir adiante, na fase de avaliação a malha de sondagem deve ser adensada, obtendo-se uma quantidade muito maior de amostras que possibilita a validação dos dados obtidos por ocasião da fase de exploração, aumentando significativamente a confiabilidade na estimativa de teores.

ii. No decorrer da fase inicial de lavra, a amostragem tem o objetivo de estabelecer ensaios sobre o processo que deverá ser empregado no beneficiamento do minério, bem como avaliar a diluição potencial por material estéril ou de baixo teor. Por este motivo, a amostragem nesta fase é muito mais intensa, obtendo-se dados para que sejam estabelecidos os blocos individuais de lavra, zonas internas de baixo teor ou de estéril, ou ainda contaminantes que poderão afetar o processo de beneficiamento, regiões com diferentes comportamentos minerometalúrgicos, etc.

iii. Finalmente, durante a fase de lavra, a amostragem se realiza para estabelecer o controle de teores, cujos objetivos podem ser muito variados, como por exemplo, comparação com os modelos de estimativa por sondagem, presença de zonas de teores baixos, etc. Serve também para detalhamento do contato entre a parte mineralizada, isto é, melhorando o delineamento do corpo de minério, com o objetivo de uma possível ampliação das reservas proporcionando aumento da vida útil do empreendimento mineiro, o que irá contribuir de maneira positiva para melhor amortização dos investimentos.

As condições para que a amostragem seja representativa estão implícitas no processo de seleção das amostras. Estas condições são: localização e distribuição das amostras, unidades de amostragem, preparação e determinação analítica (Yamamoto, 2001).

De acordo com McKinstry (1970), uma jazida é uma mistura de minerais em proporções que variam nas diferentes partes de sua massa. Em consequência disso, a proporção de metais contidos também varia de um lugar para outro. Portanto, uma só amostra tomada em um lugar qualquer não conterá a mesma proporção de metais que a jazida, exceto por uma coincidência altamente improvável. Isto significa buscar o equilíbrio entre o número de amostras e a exatidão destas; se existirem poucas amostras, o resultado não será confiável; se existirem em demasia, o tempo e o custo serão excessivos, isto significa que a coleta de amostras deve ser conduzida em conformidade com os princípios geológicos e nunca de maneira totalmente aleatória.

Assim, exatidão do processo depende não somente da quantidade de amostras, mas também de sua distribuição dentro da jazida, pois obviamente seria incorreto coletar todas as amostras em uma região rica ou em uma região pobre. Isto significa que é de fundamental importância escolher as regiões de coleta de tal forma que todas as partes da jazida estejam representadas.

A determinação exata da quantidade conveniente de amostras e os locais apropriados onde devam ser coletadas exige fazer pressuposições a respeito dos valores existentes e sua distribuição. Tais pressuposições não terão fundamento até que se conclua toda a amostragem projetada. Portanto, não existe um modo infalível de decidir isto antecipadamente, mesmo que se tenha coletado uma quantidade razoável de amostra, não é possível julgar se são ou não numerosas o suficiente e apropriadamente localizadas (McKinstry, 1970).

Todas as fases envolvidas nos processos de avaliação de uma jazida têm sua importância. A amostragem, por ser a primeira e a que vai condicionar, em grande parte, a viabilidade econômica da lavra, apresenta uma série de características que lhe conferem um caráter crítico. Como consta em Revuelta e Jimeno (1997) "... se as amostras não são representativas da jazida, o resto da avaliação carece de investigação". Por este motivo todos os fatores que envolvem a amostragem, tais como a quantidade a ser coletada, a disposição espacial, a redução de sua

quantidade inicial, etc., devem ser considerados de forma que assegurem a esperada representatividade.

Portanto, uma amostragem mal feita pode representar um prejuízo vultoso ou uma distorção dos resultados de sérias conseqüências técnicas, muito embora o método analítico empregado possa oferecer grande precisão

A coleta de amostras pode ter um caráter muito variado, como por exemplo, a estimativa de teores, análises físicas e/ou tecnológicas, mas ainda que as análises físicas e tecnológicas possuam uma importância muito grande, são normalmente as análises químicas, em um primeiro momento, que irão definir se a mineralização tem suficiente valor econômico para que seja plenamente viável continuar com o projeto mineiro (Jimeno e Revuelta, 1997).

Desde que a amostragem tenha sido feita de forma adequada, com distância correta entre as amostras e a quantidade suficiente de material, é possível ter uma certa segurança de que o processo foi conduzido de forma correta.

2.9.4 Amostragem para o controle da lavra

De acordo com Revuelta e Jimeno (1997), esta etapa cumpre uma função de controle de teores, tendo como objetivo definir o mais exatamente possível os valores de teores do minério que será enviado para a usina de beneficiamento mineral, visto que os dados obtidos na fase de estimativa não são suficientemente consistentes para que neles seja centrada a confiança necessária para a execução da lavra, sendo necessário o aporte de informações suplementares.

Segundo Sironvalle (2002), as características da amostragem estatística são diferentes da amostragem de minerais, como esquematizado na Figura 2.8. Na amostragem estatística, o lote ou população é formado por objetos de peso igual, enquanto na de minerais, o lote está composto por objetos de diferentes pesos.

Como já foi citado anteriormente, a maioria das decisões sobre a viabilidade e continuidade de um projeto mineiro, que vai desde a pesquisa mineral até a lavra, está subordinada aos valores obtidos em amostragens, as quais darão suporte a decisões sobre vultosos investimentos.

Figura 2.8 – Amostragem estatística e amostragem de minerais, Sironvalle (2002).

Em uma mina a céu aberto, durante o processo de extração do minério, os furos para desmonte podem ser amostrados rotineiramente através da coleta do pó-de-perfuratriz, como no caso da mina de Cajati. Os teores obtidos através destas amostragens são fundamentais para o planejamento de lavra de curto prazo, pois com estes resultados é que serão tomadas decisões com respeito ao destino dos materiais removidos, se serão britados (minério) ou se serão enviados para as pilhas de estéril (bota-fora).

No caso da indústria mineral, o processo de amostragem pode ser dividido em três etapas, segundo Grigorieff; Costa e Koppe (2002):

- i. Amostragem ou seleção da amostra.
- ii. Preparação da amostra.
- iii. Análise da amostra preparada.

De acordo com Sironvalle (2002), uma campanha de coleta de amostras, deve ser feita observando os seguintes tópicos que são fundamentais para que se alcance objetivos esperados:

- Qual o objetivo da amostragem;
- Qual população que deverá ser amostrada;
- Quais os atributos que serão medidos;
- Como serão obtidas as amostras (método de amostragem);
- Qual o grau de precisão desejado.

No caso dos minerais, a amostragem deve ser equiprovável, ou seja, todos os n fragmentos devem ter a mesma probabilidade de constituir a amostra. Segundo Pierre Gy (1979, *apud* Sironvalle, 2002), quando a condição de equiprobabilidade não se cumpre, temos um espécime (ou exemplar), ao invés de uma amostra. A

Figura 2.9 mostra um exemplo de um espécime, em que a amostra foi coletada de forma indesejável no que se refere à representatividade.

Figura 2.9 – Amostragem incorreta, modificado de Sironvalle (2002), p. 9.

A teoria da amostragem mineral utiliza noções, ou requisitos, de exatidão ou acurácia e precisão. A Figura 2.10 exemplifica estes conceitos. Em termos estatísticos, estes conceitos correspondem à média, que deve assegurar a exatidão e a variância, que deve ser baixa, caracterizando a precisão (Sironvalle, 2002).

Figura 2.10 – A) Preciso e não exato, B) Não preciso e não exato, C) Exato e não preciso, D) Preciso e exato, modificado de Sironvalle (2002), p 12.

De acordo com Chierigati (2007), a homogeneidade é a condição inatingível de heterogeneidade igual a zero. Portanto, no caso da amostragem, deve-se aceitar a inexistência de homogeneidade.

A amostragem de um material rigorosamente homogêneo é uma operação exata; os erros da amostragem são devidos à heterogeneidade da matéria e a sua

multiplicidade está relacionada com a multiplicidade de formas de que a heterogeneidade pode se revestir (Valente, 1990).

As partículas minerais possuem uma grande tendência em segregar-se, por exemplo, as mais pesadas tendem a sedimentar. A homogeneidade é uma condição muito difícil de ser encontrada na prática, havendo alguns autores que afirmam que isto não ocorre. Entretanto, o fenômeno da segregação é mais complexo e depende muito da granulometria, forma e pesos das partículas (Sironvalle, 2002).

Segundo Valente (1982), uma força aplicada é dita segregadora quando ela difere em direção ou intensidade de um fragmento para outro, sendo, portando, dependente das características físicas dos fragmentos. Essas forças agem em diferentes situações tais como:

- Quando da gênese da jazida;
- Durante o desmonte de rocha;
- Em todas as manipulações anteriores à formação do lote amostrado;
- Durante a formação do lote amostrado.

As forças de segregação podem ser de vários tipos como: gravimétricas, que é proporcional à massa de fragmentos; magnéticas; eletrostáticas; forças exercidas pelo fluído ambiente; forças de atrito; forças exercidas pelas vibrações de peças móveis, etc.

A Figura 2.11 ilustra um processo de segregação de uma amostra mineral.

Figura 2.11 – Segregação de uma amostra mineral. Sironvalle (2002), p. 24.

Uma forma de diminuir o efeito da natural segregação em amostras minerais é fazer uma amostragem com vários incrementos, ou seja, tomar um determinado número de “sub-amostras” para constituir a amostra primária, como ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Incrementos amostrais, modificado de Sironvalle (2002), p. 25

Geralmente, em uma operação de lavra, a amostragem carece de procedimentos sistemáticos que garantam uma execução correta da operação. Portanto, é de fundamental importância o estabelecimento de um processo de amostragem que garanta a precisão e a acurácia necessária para o desenvolvimento das atividades de lavra.

Segundo Yamamoto (2001), existem alguns erros de amostragem que não podem ser eliminados. O problema do erro de amostragem não termina com a coleta da amostra, ou seja, ele continua a existir através da preparação, subdivisão e análise em laboratório. Cada um destes erros pode afetar a precisão ou exatidão. Isto significa que por mais que se melhore toda a sistemática de coleta e preparação de amostras, sempre existirá um erro associado, que irá refletir nos resultados químicos de tais amostras, são eles:

- a. Erros de preparação que visam a redução do tamanho da amostra geológica que são geralmente muito grandes para fins de análise, que pode ser quantificado através da fórmula de Gy que considera uma série de operações não seletivas, de: redução da granulometria, mistura, homogeneização e subdivisão.
- b. Erros analíticos classificados em dois tipos:
 - i. Erros fortuitos: aqueles cometidos de forma casual, freqüentemente por falha dos analistas. Pode-se afirmar que eles sempre existem.
 - ii. Erros sistemáticos: são os que geram desvios sempre em um mesmo sentido, por exemplo, positivos ou negativos. Afetam as análises de maneira uniforme e decorrem da imperfeição dos instrumentos, da incorreção da técnica analítica, da impureza dos reagentes e de outros pequenos problemas. Estes erros são passíveis de controle ou atenuação.
- c. Erro total de amostragem que representa a soma dos erros decorrentes das etapas de amostragem e da preparação da amostra primária.

Portanto, o resultado de uma amostragem mineral nunca será um valor exato, ou seja, o resultado das amostras possui uma natureza estocástica.

A acurácia de um processo amostral pode ser entendida como sendo a minimização do erro sistemático da amostragem. A reprodutibilidade, ou precisão é a medida da dispersão dos resultados de qualidade obtidos para um mesmo lote. A representatividade de uma amostra ocorre quando existe a combinação da acurácia e da reprodutibilidade (Grigorieff; Costa e Koppe, 2002).

De acordo com Sironvalle (2002), a média do erro e a variância do erro nunca são nulas estruturalmente. A representatividade de uma amostra ocorre quando a combinação destes dois fatores apresenta valores menores que o máximo estabelecido entre as partes interessadas, usualmente o produtor e o consumidor (Gambin; Costa e Koppe, 2002).

2.10 Geoestatística

A geoestatística estuda uma variável considerando sua posição no espaço e a sua correlação com as demais vizinhas (Souza, 2002). Este conceito é descrito na Teoria das Variáveis Regionalizadas de Matheron, que tem por objetivo o estudo e a representação das propriedades estruturais das variáveis regionalizadas para a resolução de problemas de estimativa (Yamamoto, 2001).

As variáveis regionalizadas não podem ser tratadas pela estatística clássica, visto as seguintes implicações:

- a. Na estatística clássica as provas podem ser indefinidamente repetidas.
- b. As provas são independentes (o resultado de uma prova não pode ser influenciado pelo resultado daquelas provas pendentes).

Estas imposições da estatística clássica não são respeitadas pelas variáveis tratadas nas Ciências da Terra, pois quando se tira uma amostra num determinado ponto de coordenada x , o teor da referida amostra é um valor único, fisicamente determinado, e é impossível a repetição desta experiência se fosse retirada outra amostra num ponto muitíssimo próximo ao x considerado poder-se-ia dizer que a condição *a*, do item anterior, estaria satisfeita, porém, neste caso não se estaria respeitando o condicionante *b*.

Um dos aspectos fundamentais das variáveis regionalizadas é a continuidade do fenômeno mineralizante, isto é, a maneira mais ou menos regular que as mesmas evoluem no espaço. Este aspecto não é considerado pela estatística clássica.

Na prática a variável regionalizada não é medida em pontos no espaço, mas sim em suportes de dimensões finitas e perfeitamente determinadas. Caso se altere o suporte, obtém-se outra regionalização diferente da primeira. O histograma dos dados de testemunhos de sondagem apresentará sempre maior dispersão (variância ou desvio padrão) do que o histograma dos blocos que formam o modelo matemático da jazida.

Em geoestatística o termo suporte se refere ao tamanho e volume de uma amostra ou bloco, sendo seu tamanho menor que o tamanho do bloco (Armstrong, 1998). Geralmente o intervalo de amostragem nos furos de sonda não corresponde ao intervalo de trabalho na fase de avaliação de reserva ou de lavra, são sempre menores que o intervalo de trabalho (Yamamoto, 2001).

Segundo Pilger (2000), o ideal é que as amostras tivessem o suporte do volume do bloco a ser estimado, o que na grande maioria dos casos é impossível. Sendo, portanto, necessária a composição matemática das amostras, corrigindo a variância da distribuição, com a finalidade de formar unidades amostrais.

A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes, (Isaaks e Srivastava, 1989).

Alguns métodos estimadores geoestatísticos da autocorrelação espacial são usados como ferramentas de continuidade espacial como o variograma ou semivariograma, o covariograma e o correlograma. Essas ferramentas são usadas para investigar a magnitude da correlação entre amostras e sua similaridade ou não com a distância.

2.10.1 Características das variáveis regionalizadas

As variáveis regionalizadas possuem algumas características, sendo as mais importantes:

Localização

As variáveis regionalizadas são definidas dentro de uma determinada região do espaço, denominado de campo geométrico que pode ser uma formação geológica, em que as variáveis têm um conjunto de ligações entre elas que é dado pela própria gênese ou fenômeno estruturante.

Continuidade

É a variação espacial da variável regionalizada. Apesar da complexidade das flutuações existe, em geral, uma continuidade média. Há casos em que esta continuidade não se verifica, configurando o chamado efeito pepita (C_0), que corresponde a cota do ponto onde o semivariograma corta o eixo das ordenadas. Segundo Valente (1989), este ponto reflete as microestruturas não captadas pela menor escala da amostragem, erros de amostragem, de análises laboratoriais, etc.

Anisotropias

Em certos casos, ligados a fenômenos geológicos particulares, a continuidade numa determinada direção pode ser diferente da verificada noutra direção.

A continuidade de uma variável regionalizada ao longo de um depósito pode variar segundo a direção, convertendo a variável em anisótropa, em contraposição ao comportamento isótropo quando isto não ocorre, ou seja, não são observadas variações na continuidade com a direção. Este fato tem importância intrínseca, pois irá gerar semivariogramas diferentes segundo a direção que se considere.

Fenômenos de transição

No interior de um campo geométrico da variável, podem surgir estruturas particulares como sejam conjuntos lenticulares com continuidade no interior de cada unidade e variação brusca de unidade para unidade. Este conjunto de descontinuidade realiza uma partição do espaço mineralizado em compartimentos mais ou menos independentes.

2.10.2 O Variograma

Segundo Revuelta e Jimeno (1997), o variograma é uma função intrínseca que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas – pelas covariâncias – que existem entre as amostras espaçadas de sucessivos valores de

h . É uma função crescente com h até um determinado valor de h , valor conhecido como amplitude. A estatística clássica considera as amostras como completamente independentes entre si, enquanto que a geoestatística assume uma correlação entre elas, e a forma de expressar esta correlação é através de uma função denominada variograma ou semivariograma (Andriotti, 2003).

Define-se variograma como a variância do erro que se comete ao estimar um teor desconhecido em $(x + h)$ pela ajuda de um ponto dado em (x) . Em Yamamoto (2001), a função variograma $2\gamma(h)$ é definida como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h , conforme a seguinte equação:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (2.14)$$

Onde:

$2\gamma(h)$ é a função variograma; n é o número de pares de pontos separados por uma distância h ;

$Z(x)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x .

$Z(x+h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto $(x+h)$.

Para que um variograma seja representativo do fenômeno é necessário um número grande de amostras, além de que cada amostra represente o mesmo volume, pois do contrário, sendo o suporte diferente, não será possível concluir a comparação entre valores das amostras.

Assim, Yamamoto (2001), define o variograma como sendo a ferramenta básica que permite descrever a variação no espaço de um fenômeno regionalizado.

A Figura 2.13 mostra um exemplo clássico de um variograma experimental.

Figura 2.13 – Variograma típico e suas propriedades, Yamamoto (2001), p.78.

Onde:

- Amplitude: é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes. A amplitude reflete o grau de homogeneização entre as amostras, ou seja, quanto maior for a amplitude maior será a homogeneidade entre as amostras. Nesse sentido, o variograma dá um significado preciso da noção tradicional de zona de influência. A amplitude (a) é a distância que separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes). Um semivariograma de alcance finito caracteriza o que se chama de fenômeno de transição; além da distância, espera-se independência, e o alcance dá a escala das estruturas elementares do fenômeno regionalizado correspondente.
- Patamar: é o valor no qual o variograma estabiliza-se (no campo aleatório), é o ponto a partir do qual as amostras tornam-se independentes devido à grande distância que as separa, corresponde à variância total que pode ser obtida pela estatística clássica.
- Efeito pepita: o semivariograma por definição é nulo na origem, mas na prática as funções obtidas podem apresentar descontinuidade na origem, à qual se dá o nome de efeito pepita, que pode ser obtido traçando-se uma linha reta entre os primeiros pontos do semivariograma teórico de modo que esta linha intercepte o eixo Y. Se esta interseção ocorre abaixo do valor zero, então o valor assumido por este efeito é também zero. O efeito pepita é

representado por C_0 e é o valor da função variograma na origem ($h=0$). Teoricamente esse valor deveria ser zero, pois duas amostras tomadas no mesmo ponto ($h=0$) deveriam ter os mesmos valores; entretanto quando não é assim, atribui-se esta diferença, geralmente, a erros de amostragem e/ou análise. Como os erros analíticos são desprezíveis com os equipamentos disponíveis atualmente, o efeito pepita deve-se a erros de amostragem decorrentes da variabilidade natural do depósito; o efeito pepita também é chamado de variância aleatória. Quando o efeito pepita for aproximadamente igual ao patamar ($C + C_0$), recebe o nome de efeito pepita puro, demonstrando que as amostras não recebem influência espacial.

- Variância espacial: é dada pela diferença entre a variância a priori e o efeito pepita.
- Anisotropia: todas as variáveis apresentam uma continuidade espacial similar ao longo das diferentes direções do plano ou do espaço, gerando o chamado efeito de anisotropia. A principal incidência que este fenômeno tem no processo de estimativa é o maior peso que dá às amostras incluídas na direção de máxima continuidade, o eixo maior da elipse teórica de busca, frente a uma menor importância nas amostras situadas na direção de menor continuidade, o eixo menor da elipse de busca. Esta situação é relevante, mesmo que as amostras localizadas na direção de menor continuidade estejam mais próximas geometricamente que as outras, (Revuelta e Jimeno, 1997).

A anisotropia pode ser geométrica, quando a amplitude varia conforme a direção, mas sob um patamar constante; zonal quando a amplitude permanece constante e o patamar varia de acordo com a direção; e, por fim, a anisotropia mista onde variam tanto a amplitude quanto o patamar, ou seja, quando as várias direções resultam em diferentes variogramas (Yamamoto, 2001), Figura 2.14.

Figura 2.14 – Anisotropia geométrica (A), anisotropia mista (B) e anisotropia zonal (C).

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a determinação das direções de anisotropia pode ser feita através da construção de um variograma omnidirecional, embora isto não implique em uma convicção de que a continuidade espacial é a mesma em todas as direções e serve somente como um ponto de partida que estabelece alguns dos parâmetros necessários para cálculo dos variogramas.

Clark (1979) mostra o exemplo de uma amostragem em uma malha quadrada de onde é coletada uma série de amostras, separadas segundo em um intervalo de 100 pés, com determinados valores, Figura 2.15.

Figura 2.15 – Malha de amostragem – Clark (1979), pg. 11.

O primeiro ponto da função $\gamma(h)$ é dado por $\gamma(100)$, isto é, a média dos quadrados das diferenças entre todos os pares de amostras separados por uma distância de 100 pés, desta maneira é calculado o primeiro ponto para a construção do variograma experimental, em que o eixo Y($\gamma(h)$) terá um valor de 1,46 e no X(h) 100. Para conseguir o segundo ponto, a 200 pés, calcula-se novamente a função e assim sucessivamente, até a distância máxima amostrada que é de 800 pés, Figura 2.16.

Figura 2.16 – Cálculo dos pontos para a construção do variograma experimental. Em A para a distância de 100 pés e B para a distância de 200 pés. Clark (1979), pg. 17 e 19.

Para a estimativa de um ponto através da krigagem é necessária a utilização do semivariograma, mas não na forma de semivariograma experimental, pois este possui numerosas zonas onde não existem valores concretos, desde que, somente existem valores onde a amostragem ocorreu, ou seja, o semivariograma experimental deve ser ajustado a um dos vários modelos teóricos, obtendo-se um modelo ou função analítica que caracteriza a continuidade espacial da variável estudada. Portanto, é necessário definir o valor da variável em pontos onde o semivariograma experimental não oferece a informação. Por isso é necessário ajustar a função matemática que descreva continuamente a variabilidade ou correlação espacial existente nos dados (Yamamoto, 2001).

Nas ciências da terra é necessário admitir a existência de incertezas no comportamento do fenômeno entre os pontos amostrados (Revuelta e Jimeno, 1997). Por esta razão, as estimativas geoestatísticas se baseiam em modelo probabilísticos.

2.10.2.1 Modelos teóricos de semivariogramas

Os modelos de variograma teórico utilizados no processo de estimativa ou simulação devem satisfazer certas condições, ou seja, têm que ser 'definido positivo' ou de 'tipo positivo' do contrário pode existir o risco de encontrar variâncias negativas que não tem sentido. Geralmente o ajuste a modelos teóricos para a determinação dos parâmetros do semivariograma se realiza de forma visual (Gil, 2006).

Isaaks e Srivastava (1989), demonstram que existem numerosos caminhos para conhecer se o modelo escolhido cumpre esta propriedade matemática, e

apresentam como sendo mais útil e mais rápido escolher um que está incluído na lista de modelos que cumprem a citada propriedade.

Ainda que o ajuste de um modelo de semivariograma experimental seja a forma mais comum de aproximação da continuidade espacial, não é a única e nem necessariamente a melhor. Existem numerosas situações nas quais a seleção do modelo adequado deve se basear principalmente em aproximações qualitativas.

Os modelos aqui apresentados são considerados modelos básicos, denominados de modelos isotrópicos por Isaaks e Srivastava (1989), e podem ser agrupados em duas grandes categorias: (a) os que alcançam um patamar, ou modelos de transição e (b) os que não alcançam um patamar.

O primeiro grupo inclui aqueles modelos em que a curva é ascendente de forma continuada até alcançar um nível que é conhecido como patamar; a distância em que alcançam o patamar é denominada de alcance ou amplitude. Entre estes modelos os mais utilizados são o modelo exponencial, o modelo esférico ou Matheron e o modelo gaussiano. No segundo grupo estão os que vão recebendo incrementos à medida que a distância aumenta, sem chegar a alcançar um patamar. Os mais representativos são o modelo linear e o modelo de Wijsian, utilizados para modelar fenômenos com capacidade infinita de dispersão.

Por serem os modelo de transição os mais comumente utilizados, julga-se necessário uma breve descrição destes modelos. O modelo esférico ou Matheron, mostrado na Figura 2.17, é o que o melhor se ajusta quando se trata de variáveis mineiras.

Figura 2.17 – Modelo esférico.

Este modelo possui a seguinte expressão matemática:

$$\gamma(h) = C_o + C \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a$$

$$\gamma(h) = C_o + C \text{ para } h > a \quad (2.15)$$

Onde C_o é o efeito pepita, $C_o + C$ é o valor do patamar, a é o alcance ou amplitude e h é o valor do correspondente passo (lag). A tangente à origem encontra o patamar no ponto de abscissa em $(2/3)a$. $C_o + C$ representa o equivalente geoestatístico da variância do conjunto de dados. Caso o variograma mostre flutuações aleatórias em torno de $C_o + C$ (em uma linha horizontal), ocorre o que se denomina de efeito pepita puro, como indicado na Figura 2.18, sendo melhor que neste caso, se faça a estimativa da reserva por métodos clássicos. Entretanto, a presença de efeito pepita puro não significa, necessariamente, uma ausência de continuidade na estrutura do semivariograma, podendo significar, por exemplo, uma amostragem com distâncias muito grandes entre as amostras (Revuelta e Jimeno, 1997).

Figura 2.18 – Modelo de efeito pepita puro.

O modelo gaussiano, indicado na Figura 2.19, é um modelo extremamente contínuo, inicialmente apresenta um comportamento parabólico na origem e depois, como no modelo exponencial, alcança um patamar de forma assintótica. O alcance prático tem um valor $a' = 1.73a$, que é igual ao valor da abscissa de onde é alcançado 95% do patamar.

Figura 2.19 – Modelo gaussiano.

Sua expressão matemática é dada por:

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp \left(- \left[\frac{h^2}{a^2} \right] \right) \right] + C_0 \quad (2.16)$$

A diferença entre o modelo esférico e o exponencial cresce inicialmente mais rápida e depois se estabiliza de forma assintótica, como ilustrado na Figura 2.20. Como o patamar não é alcançado em uma distância finita, se utiliza com finalidades práticas o “alcance efetivo” ou “alcance prático” a' , valor obtido no ponto de abscissa para o qual o modelo obtém 95% do patamar, com um valor de $a' = 3a$, onde a é o parâmetro de escala. A tangente a origem alcança o patamar em um ponto $a = (1/3) a'$.

Figura 2.20 – Modelo exponencial.

A expressão matemática deste modelo de variograma é:

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp \left(- \left[\frac{h}{a} \right] \right) \right] + C_0 \quad (2.17)$$

Existem situações em que não é possível o ajuste imediato de um tipo concreto de modelo. Existem muitas possibilidades para se fazer o ajuste do modelo; Revuelta e Jimeno (1997) citam algumas das características:

- Semivariogramas com tendências.
- Anisotropismo direcional.
- Semivariogramas compostos.
- Semivariogramas em dois estágios.

2.10.2.2 Validação dos modelos

Uma questão chave na hora de realizar a krigagem é a escolha do melhor modelo ajustável ao semivariograma experimental obtido, visto que os valores do efeito pepita, patamar e o alcance do modelo são calculados visualmente, não existindo a possibilidade de saber *a priori* e matematicamente se é a escolha mais correta.

A melhor solução para resolver este problema é por meio da re-estimativa dos pontos amostrados, em um procedimento conhecido por validação cruzada, que é um critério “preditivo” de avaliação do modelo que prioriza sua capacidade de aproximar suas predições a dados não inclusos na análise, simulando respostas futuras ainda não mensuradas (Piovesan, 2007).

A seguir é feita uma comparação entre os valores reais e os valores krigados, a diferença entre eles é chamada de resíduo da validação cruzada (Isaaks e Srivastava, 1989), sendo que estes resíduos são utilizados para verificar a performance do modelo, como ilustrado na Figura 2.21. Como a krigagem utiliza o semivariograma, variando os valores deste poderá ser obtida a melhor opção que gere a menor diferença entre os valores estimados e os valores reais. Portanto, quão mais próxima de zero for o valor médio das amostras, tão melhor será a estimativa.

Quando a diferença entre o valor estimado Z^* e o valor real Z é positiva os valores foram superestimados, quando ocorre o inverso, ou seja, a diferença entre o valor estimado e o valor real é negativa, os valores foram subestimados, sendo o melhor resultado quando ocorre um balanceamento entre estes valores e Z tem um valor igual zero, atestando boa qualidade dos parâmetros estabelecidos para a krigagem. A média da distribuição do erro não é a única medida que se pode tomar para a definição de uma estimativa com parcialidade. A meta de qualquer método de estimativa é produzir um resultado imparcial. Como a média não é a única medida de tendência central, o ideal é que a moda e a mediana da distribuição do erro seja também igual a zero (Isaaks e Srivastava, 1989).

Figura 2.21– Resíduos de validação: (A) – Média do erro negativa mostrado que houve uma tendência geral de sub-estimativas; (B) – Média do erro positiva mostrando que houve uma tendência geral de super-estimativas e (C) equilíbrio entre sub-estimativas e super-estimativas. Modificado de Isaaks e Srivastava (1989), pg. 261.

Segundo Armstrong (1998), fazendo Z_{ij}^* representar o valor calculado do i -ésimo ponto, obtido usando o j -ésimo modelo de variograma e sendo σ_{ij}^2 a variância de krigagem. O valor verdadeiro Z_i , e $Z_{ij}^* - Z_i$ que corresponde ao erro de estimação,

$$E(Z_{ij}^* - Z_i) = 0 \quad (2.18)$$

$$E\left(\frac{Z_{ij}^* - Z_i}{\sigma_{ij}}\right) = 0 \quad (2.19)$$

$$Var\left(\frac{Z_{ij}^* - Z_i}{\sigma_{ij}}\right) = 1 \quad (2.20)$$

Isto leva a calcular as seguintes estatísticas:

$$\sum (Z_{ij}^* - Z_i) \quad (2.21)$$

$$\sum \frac{(Z_{ij}^* - Z_i)}{\sigma_{ij}} \quad (2.22)$$

$$\sum \frac{(Z_{ij}^* - Z_i)^2}{\sigma_{ij}^2} \quad (2.23)$$

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), a estimação depende do modelo variográfico escolhido, devendo ser aquele que oferece o melhor ajuste.

“A validação cruzada não prova que o modelo de variograma esteja correto; tão somente prova que ele não é grosseiramente incorreto” (Andriotti, 2003). A Figura 2.22 apresenta um fluxograma que explica como é feita a validação cruzada.

Figura 2.22 – Fluxograma da validação cruzada. Modificada de figura disponível em:
www.solos.ufmt.br/docs/geoestatistica/aulapg.pdf

2.10.3 Estratégia de busca

Após o ajuste do semivariograma experimental, a etapa seguinte é a determinação da estratégia de busca a ser adotada, ou seja, quais as características que a área de busca deverá apresentar, de acordo com Revuelta e Jimeno (1997), isto poderá ser feito definindo-se alguns parâmetros:

- A forma da área de busca – Normalmente pode ser uma elipse cujo centro será o ponto a ser estimado. A orientação de tal elipse é definida pela anisotropia do esquema de continuidade espacial, com o eixo maior na direção de máxima continuidade. Caso não exista anisotropia, a área de busca será definida por um círculo. No caso de uma estimativa em 3D, a forma da área de busca tomará a forma de uma elipsóide ou uma esfera.
- Quantidade de amostras a serem utilizadas – Refere-se à determinação de quantos pontos para efetuar a estimativa deverão existir dentro da área de busca. A quantidade de amostras está condicionada à morfologia da malha de amostragem. Uma forma de evitar o agrupamento de amostras utilizadas é selecioná-las através de quadrantes ou octantes, segundo Yamamoto (2001). Estes critérios proporcionam melhor amostragem espacial com as amostras

sendo igualmente distribuídas em torno do ponto a ser interpolado. A Figura 2.23 ilustra como é utilizado o método das octantes.

Figura 2.23 – Método das octantes – Modificado de Datamine (2002).

O diagrama anterior ilustra o método por octante, segundo Datamine (2002), onde a elipse de busca contém 16 amostras (x, #, +, *); neste exemplo, todas as amostras estão no plano XY. Se for determinada quantidade máxima de 16 ou mais amostras, todas as amostras serão selecionadas, entretanto, se o número máximo de amostras for igual a 8, somente serão selecionadas as amostras * e +, assim, o teor da célula será determinado pelas amostras localizadas a NE da elipse de busca. Pode também ser determinada a quantidade mínima de octante para a estimativa do teor da célula.

É regra comum utilizar como semi-seixo da elipse um valor próximo ao alcance do semivariograma na direção considerada, desta forma garante-se a manutenção de estacionariedade e uma correta estimativa. No entanto, de acordo com Isaaks e Srivastava (1989), aumentar este valor, não de forma excessiva, quando existe uma quantidade insuficiente de amostras melhora o processo de estimativa. A Figura 2.24, mostra as elipsóides de busca, feitas no software Datamine Studio, de um semivariograma de duas estruturas onde, em A está representada a forma da elipsóide para a primeira estrutura e, em B da segunda. Na prática, a elipsóide menor estará no interior da elipsóide maior. No caso da Figura 2.24, foram feitas separadamente para melhor entendimento.

Figura 2.24 – Elipsóides de busca. (A) Elipsóide da primeira estrutura, (B) Elipsóide da segunda estrutura, Datamine Studio.

2.10.4 Krigagem dos blocos

A krigagem de blocos é uma ferramenta utilizada com muita frequência em planejamento de mina cuja estimativa de teores é feita através de furos de sondagem, mesmo assim, é o tipo de avaliação mais utilizada para se obter o conhecimento de jazidas minerais, onde o valor médio de uma função aleatória em uma zona determinada (bloco) é simplesmente a média aritmética de todas as variáveis pontuais aleatórias incluídas dentro desta zona.

Uma demonstração de como é efetuado o cálculo da krigagem de blocos é dada por Isaaks e Srivastava (1989), mostrada na Figura 2.25, onde, na parte superior (a) está o bloco a estimar discretizado em quatro pontos; o resultado da estimativa do bloco é 337. O restante do esquema, de (b) até (e), mostra o resultado da krigagem do ponto de cada um dos quatro pontos dentro da área sombreada em (a). A média dos pontos estimados de (b) até (e) é idêntica ao bloco estimado em (a), que é igual a 337.

Os valores que se obtém com a krigagem (tanto pontual como de blocos) contêm os correspondentes valores da variância de krigagem, o que permite fazer um estudo da qualidade da estimativa.

Figura 2.25 – Estudo comparativo entre a krigagem de um bloco e a krigagem dos pontos de discretização, Isaaks e Srivastava1(989), p. 328.

Na Figura 2.25 o bloco sombreado mostrado em (a) é estimado diretamente como um bloco (krigagem de blocos), sendo estimado pelos quatro pontos mais próximos. As amostras localizadas mais próximas, cujos valores estão marcados à direita, são marcadas com o sinal (+) e o valor mostrado entre parêntesis corresponde ao peso de krigagem.

Capítulo 3

3 LOCAL DA OPERAÇÕES

O Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga localiza-se no Vale do Ribeira, sudoeste de Estado de São Paulo, no município de Cajati, às margens da Rodovia Régis Bittencourt (BR 116), que une a cidade de São Paulo ao sul do país, aproximadamente entre as coordenadas $48^{\circ}09'W$ e $24^{\circ}41'S$, próximo à divisa com o Estado do Paraná, Figura 3.1.

O Município de Cajati, antigo distrito pertencente a Jacupiranga, dista cerca de 230 km da cidade de São Paulo e 180 km da cidade de Curitiba.

Figura 3.1 – Mapa de acessos e localização de Cajati.

3.1 Contexto geológico

3.1.1. Regional

O Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga foi descoberto por Bauer em (1877, *apud* Ruberti et al., 1992) que publicou um artigo na revista de Engenharia do Rio de Janeiro, denominado “As minas de ferro de Jacupiranga”.

O complexo exhibe forma ovalada (10,5 x 6,7 km), com alongamento NNW (Germann et al 1987, *apud* Raposo, 2002). Acha-se encaixado em rochas pré-cambrianas do Grupo Açungui. Gaspar (1989 *apud* Barros, 2001), relatou ter encontrado, em seu mapeamento, biotita gnaisse ao norte e centro e biotita-quatzos xistos ao sul.

Em 1891 foram publicadas as primeiras descrições do complexo, realizadas por Derby, onde foi definida a rocha denominada jacupiranguito. Esta rocha é, exclusivamente, a encaixante dos carbonatitos. Originalmente, jacupiranguitos correspondem a rochas alcalinas constituídas essencialmente por titanita-augita, com magnetita, biotita, nefelina e olivina (Barros, 2001).

Dois corpos intrusivos principais formam o complexo: dunitos, parte norte, e magnetita clinopiroxenitos (jacupiranguitos), na porção sul. O magnetita clinopiroxenito é intrudido por um corpo de ijolito com forma de meia lua, e por outro, e forma alongada, de carbonatito (em menor tamanho). Fenitos ocorrem principalmente nas margens do Complexo, Figura 3.2.

A idade absoluta aproximada para as rochas que compõem o complexo, determinada pelos métodos K/Ar e Rb/Sr, é de $131 \pm 3\text{Ma}$ (Amaral, 1978 e Roden, Murthy e Gaspar, 1985, *apud* Barros, 2001). Este valor situa o complexo entre as diversas ocorrências de rochas alcalinas cretáceas que acompanham as bordas da Bacia de Paraná. Tais ocorrências estão supostamente associadas à abertura inicial do Oceano Atlântico Sul e, provavelmente, tectonicamente condicionadas ao Arco de Ponta Grossa (Ruberti et al. 1992, *apud* Raposo, 2002).

Estudos sobre a história das pesquisas minerais na região, realizados por Menezes Júnior & Martins (1984), indicam que no início do século passado já se sabia sobre o alto teor de fósforo e titânio no manto de intemperismo. Nesta época a

origem dessa mineralização era interpretada como produto do metamorfismo de contato entre o jacupiranguito e carbonatito.

Melcher (1966, apud Raposo, 2002), concluiu que o minério residual foi produto de alteração intempérica do carbonatito, e não produto do metamorfismo de contato entre o jacupiranguito e carbonato, como se acreditava até então.

Figura 3.2 – Mapa geológico do complexo alcalino de Jacupiranga (adaptado de Germann et al., 1987, apud Raposo 2002).

3.1.2. Geologia local

Menezes Júnior e Martins (1984), dividiram os minerais da assembléia do depósito em dois grupos: aqueles encontrados no carbonatito e os encontrados no jacupiranguito. A lista completa consiste em 42 espécies. No carbonatito esses autores observam: ancilita, aragonita (secundária), baddeleita, barita, brucita, calcita (primária e secundária), calcopirita, titano-clinohumita, dolomita, fluorapatita, forsterita, galena, geiquelita, magnésio-ilmenita, magnetita, quintinita, flogopita, pirita, pirrotita, quartzo (secundário), serpentina, estroncianita, uranpirocloro, valeriita.

No jacupiranguito os minerais encontrados, segundo os mesmos autores, são: titano-andratita, titano-augita, barita, calcita, calzirquita, diopsídio, dolomita, edingtonita, fluorapatita, forsterita, hornblenda, magnésio-ilmenita, magnetita, natrolita, nefelina, perovskita, flogopita, pirita, pirrotita, richterita, schorlomita, tazheranita, titanita, tremolita, vesuvianita, wolastonita, zircão e zirkelita.

Gaspar (1989), após efetuar um mapeamento em escala de detalhe, com suporte de petrografia e determinações em microsonda eletrônica, revelou a ocorrência de cinco intrusões carbonatíticas distintas, de idades diferentes na seguinte ordem (mais velha para mais nova): C1, C2, C3, C4 e C5, Figura 3.3.

Figura 3.3 - Mapa geológico dos carbonatitos de Jacupiranga (Gaspar, 1989).

Segundo o mesmo autor, C1 é um sovito, com granulação grossa e bandamento espesso, composto por calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos (a mineralogia é descrita na ordem de maior para menor abundância). O bandamento é geralmente subvertical mergulhando para Norte. A lineação da apatita é sempre sub-horizontal. Duas regiões ao Sul podem ser individualizadas por serem pobres em minerais não carbonáticos, fora dessas regiões o sovito é rico em olivina, magnetita e apatita.

A intrusão C2 é descrita pelo autor como um sovito dolomítico com granulação fina a média e nessa porção a rocha é finamente bandada, composta por: calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos. Possui mergulho vertical, paralelo ao contato com C1 e a lineação da apatita é sub-horizontal. No contato entre C2 e C3 observam-se sovito e beforsito com bandamento difuso.

A intrusão C3 também é um sovito com granulação média a grossa. O bandamento é menos evidente e composto por calcita, apatita, magnetita, flogopita, dolomita, olivina e sulfeto, sendo que tem uma característica diferente dos outros

locais: no centro o mergulho é para Norte, entre 20 a 400, já nas bordas torna-se mais íngreme e em alguns locais, vertical. A lineação da apatita é geralmente paralela ao mergulho.

Na porção Norte, C4 é descrita como um sovito com granulação média, composta por calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos. Essa região narrada como uma intrusão cilíndrica com bandamento vertical paralelo às bordas com lineação sub-horizontal.

E por último C5, que é descrita como um rauhaugito, com granulação média a grossa composta por dolomita, apatita, flogopita, magnetita, sulfetos e calcita. Para o autor C5 corta C4 e possui bandamento com mergulhos próximos a 800 para Norte. A lineação da apatita é paralela ao mergulho.

O modelo geológico tem passado por atualizações sistemáticas desde 1999, através da incorporação de mais furos de sondagem, em campanhas que finalizaram em 1999, 2001 e 2003. Finalmente, após a integração de todas estas informações, foi possível a divisão do modelo em doze diferentes litologias, Saito; Bonás e Bettencourt (2004), formando assim o modelo que hoje é utilizado nos trabalhos de planejamento de lavra, Figuras 3.4 e 3.5.

Figura 3.4 – Modelo geológico da mina de Cajati atualizado em 2004. Saito; Bonás e Bettencourt (2004).

Figura 3.5 – Modelo geológico, com as respectivas descrições dos domínios geológicos.

3.2 Histórico da Mina

O início da exploração da mina em Cajati se deu em 21 de outubro de 1938. Nesta ocasião, o minério lavrado possuía teores de P_2O_5 elevados (ao redor de 20%), que consistia basicamente em apatita, magnetita alguns argilo-minerais (informação verbal)¹.

A base econômica da mina que, àquela época, estava centrada na apatita como principal e praticamente único mineral, começou a passar por uma transformação nos anos de 1960, com a perspectiva de esgotamento do material residual. Abaixo da camada do material residual encontrava-se o que, até então, era considerado como protominério, constituído por carbonatito são, com teores médios em torno de 5,5% de P_2O_5 .

Em 1969, com a exaustão do minério residual, através do desenvolvimento de novo processo tecnológico de tratamento mineral que permitiu a separação física dos minerais por meio de flotação, iniciou-se a lavra de carbonatito são, que assumiu a condição de minério. Nesta ocasião foi estabelecido um parque industrial composto também por unidades químicas visando à produção de fertilizantes. A partir de então, a apatita deixou de ser a única base econômica da mina, passando-se a aproveitar subprodutos como calcário e magnetita.

¹. Informações obtidas em apresentações que são feitas a pessoas ou grupo de pessoas que visitam as instalações industriais da Bunge Fertilizantes S/A, em Cajati.

Em 1972, visando o aproveitamento do rejeito de calcário da planta de concentração de apatita, que possui um teor de $\text{MgO} < 4,50\%$, foi implantada no Parque Industrial, uma fábrica de cimento, utilizando este subproduto como matéria prima.

Em 1974, no caminho da verticalização do complexo, instalaram-se as unidades de fabricação de ácido sulfúrico e ácido fosfórico. Na década de 1980, a crise na indústria de fertilizantes incentivou o desenvolvimento de novas aplicações industriais visando os subprodutos da mina. Desde então, o ácido fosfórico produzido a partir do concentrado de apatita é aplicado em matéria prima carbonática para a fabricação de fosfato bicálcico que é um suplemento mineral para alimentação animal.

Hoje, o produto principal da Mina de Cajati continua sendo o concentrado de apatita utilizado na produção de ácido fosfórico, que é utilizado na fabricação de fosfato bicálcico, além de ser comercializado na forma de ácido. Uma pequena porção do estéril da mina, constituído por carbonatitos e piroxenitos (jacupiranguito), é britada e vendida como matéria-prima para construção civil além de ser utilizado na pavimentação dos acessos e praças de carregamento da mina. Magnetita e carbonatos são obtidos como rejeitos da usina de concentração da apatita, sendo a primeira utilizada como matéria-prima para o cimento e o segundo, dependendo das especificações, utilizado para fabricação de fosfato bicálcico, cimento ou corretivos agrícolas. Além disso, o gesso, resultado do processo de fabricação do ácido fosfórico, também é aproveitado e vendido como matéria-prima para produtos agrícolas e fabricação de cimento.

O aproveitamento industrial do minério apatítico é feito através de blendagens com as diferentes litologias que compõem a jazida, buscando o pleno atendimento das necessidades de produção da usina de concentração. A alimentação da usina é feita através de uma retomadora, instalada no pátio de homogeneização que é formado por duas pilhas com 400 m de comprimento e capacidade para 25000 toneladas de minério britado com granulometria inferior a $1\frac{3}{4}$ ".

O fluxograma de operações do complexo é mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Fluxograma de operações do Complexo Industrial de Cajati.

3.3 Planejamento de Lavra da Mina de Cajati

Segundo Yamamoto (2001), para a atividade de planejamento de lavra existe uma série de etapas que devem ser seguidas e incluem o acesso ao banco de dados, estruturação do banco de dados, validação dos dados, interpretação geológica (geometria dos corpos, falhas, fraturas, juntas, etc), superfície topográficas (topográfica), modelagem de teores, avaliação das reservas lavráveis, restrições de lavra, programação e controle de produção.

O planejamento de lavra de curto prazo na Mina Cajati é feito baseado em um plano anual de produção que visa o atendimento das metas estabelecidas para alimentação da usina de concentração que, por sua vez está, subordinado às metas de venda de ácido fosfórico e fosfato bicálcico além do fornecimento de rejeito de calcário calcítico para terceiros. Diante disso, a complexidade da lavra assume grandes proporções devido às diferentes misturas que devem ser feitas durante as tarefas de carregamento, em que o controle da qualidade do minério lavrado é feito

basicamente com os dados provenientes das análises químicas das amostras de pó-de-perfuratriz.

Para a elaboração dos planos de lavra são utilizados programas de computação especializados, como o Datamine Studio e o Geopit, e todos os trabalhos são feitos tendo como fonte de informações o modelo de blocos feito a partir do modelo geológico. Este modelo é utilizado para todas as atividades de planejamento da lavra, podendo ser de longo ou de curto prazos, e que serve de suporte a todos os projetos mineiros do Complexo Industrial de Cajati (CIC).

A primeira etapa para a elaboração dos planos de lavra é a obtenção de uma cava final ótima que, segundo Peroni (2002), o ótimo, neste caso, seria a configuração resultante de um algoritmo que apresentasse, por exemplo, maior lucratividade, maior valor presente líquido e maior aproveitamento dos recursos minerais. Esta tarefa é feita pelo programa Geopit sendo que os procedimentos adotados para a geração da cava final não fazem parte deste trabalho. A Figura 3.7 mostra o ciclo do planejamento de lavra na Mina de Cajati.

Figura 3.7 – Ciclo do planejamento de lavra da Mina de Cajati. Adaptado de Yamamoto (2001), p. 165.

Apesar do projeto final de uma mina ser chamado de cava final, o que sugere um estudo definitivo, ele é dinâmico, podendo ser influenciado pela quantidade de informações (conhecimento geológico), alteração de parâmetros geotécnicos (ângulo de talude), variações de parâmetros econômicos e financeiros (custo, preço de venda, variação cambial, oportunidade, etc.), aspectos tecnológicos (aproveitamento de materiais mais pobres) e ambientais (preservação ambiental, áreas para deposição de rejeitos, área de influência com a comunidade, etc). Todas estas informações podem ser sistematicamente atualizadas à luz de novos conhecimentos que as empresas vão adquirindo ao longo do tempo de vida do projeto, fazendo com que este mesmo projeto possa ser alterado na medida em que se julgar necessário.

Na fase de obtenção da cava final são atribuídas restrições como o teor de MgO do bloco e coloração do carbonatito para a classificação tipológica do minério,

o que é feita pelo Geopit, através do agrupamento das diversas litologias que compõem o modelo geológico, podendo uma mesma litologia fazer parte de um ou mais tipo de minério. A Tabela 3.1 mostra quais as litologias formam os tipos de minério da Mina de Cajati.

Tabela 3.1 – Classificação tipológica da Mina de Cajati.

TIPO	LITOLOGIA	DESTINAÇÃO DO REJEITO DE CALCÁRIO
A	CCS, CPS, COX, FCS, CBN, FCN	Foscálcio
B	CCS, CPS, COX, FCS, ZFA, CBI, CBF, CBR, CBN, FCN	Cimento
C	CCS, CPS, COX, FCS, ZFA, CBI, CBF, CBR, CBN, FCN, DOL, XEN	Magnesiano

Uma etapa importante no planejamento de lavra é a reconciliação da lavra que é conduzida de modo a obter índices de aderência dos planos, visando o conhecimento da medida de desempenho da atividade, ou seja, nem tudo que é planejado é executado, do mesmo modo que nem tudo que é executado está inserido no planejamento. O grau de eficiência do planejamento de lavra é afetado por inúmeros fatores, como por exemplo, mudanças de rota para o atendimento de metas inesperadas que podem surgir por problemas imprevisíveis, como quebra de equipamentos (da mineração ou da usina de concentração) ou a constatação de baixa aderência do modelo geológico e da estimativa de teores. Assim, a atividade de planejamento de lavra precisa ser flexível para lidar com situações inesperadas, dando o suporte necessário à operação de lavra.

No caso da Mina de Cajati, a reconciliação da lavra, tanto de aspectos geométricos, quanto de teores, é uma atividade ainda em implementação sendo feita mensalmente e contabilizada trimestralmente. Esta atividade é feita conforme ilustrado na Figura 3.8.

As informações geradas no planejamento de lavra são demonstradas em forma de tabelas, gráficos e mapas indicando os locais onde a lavra deverá ser executada em cada período.

Figura 3.8 – Modelo de reconciliação praticado na mina de Cajati.

Capítulo 4

4 Amostragem de pó-de-perfuratriz na Mina de Cajati

A utilização de amostras de pó-de-perfuratriz que são provenientes dos furos para desmonte de rocha cumpre de maneira satisfatória, desde que coletada de forma correta, os objetivos de controle dos teores do minério lavrado principalmente devido à grande quantidade de informações colocadas à disposição das operações de lavra. “[...] a confiabilidade de uma estimativa é crescente com o aumento da informação disponível, assim, quanto maior a quantidade de informações utilizadas, menor tende a ser o erro associado a um valor estimado” (Pilger, 2000).

O minério que é lavrado de acordo com a meta anual de produção, é desmontado por explosivos através de furos verticais que possuem diâmetro de 3,5 polegadas, distribuídos em malhas triangulares (pé-de-galinha) ou retangulares de 3,0 x 4,0m, afastamento e espaçamento, respectivamente. A perfuração é feita por perfuratrizes hidráulicas Atlas Copco Roc D7 e Roc F7 e Roc F9, dotadas de coletores de pó que possuem dois estágios, o primeiro formado por um ciclone que separa as partículas mais grossas, agora passa a ser denominada de fração grossa e o segundo estágio é formado por um conjunto de filtros que irá coletar as partículas finas, sendo agora denominada de fração fina, conforme mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Perfuratriz hidráulica Atlas Copco Roc D7 – Detalhes do coletor de pó: 1) Fração fina (coletor de pó) e 2) Fração grossa (ciclone).

Os furos para o desmonte de rocha são locados topograficamente no campo, ou seja, as suas coordenadas X (Leste), Y (Norte), Z (Cota) e profundidade, são levantadas e lançadas em planilhas eletrônicas, em arquivos em formato texto, para posterior utilização no programa Datamine Studio. Este procedimento possibilita a exata localização tridimensional dos furos.

Todos os furos em minério são amostrados por amostradores manuais nas duas frações, grossa e fina, nas pilhas cônicas formados pela deposição natural do pó ao ser expelido pelo ciclone frontal e pelo coletor de pó. A Figura 4.2 mostra, de maneira esquemática, o procedimento de coleta.

O amostrador é formado por um tubo de PVC com 50 mm de diâmetro e possui comprimento suficiente para alcançar o centro da pilha cônica formada pela descarga do pó-de-perfuratriz. O tubo é então introduzido de forma a alcançar o centro da pilha, em três posições diferentes para cada uma das frações representadas pelas setas 1, 2 e 3, na Figura 4.2. Estas amostras são acondicionadas em sacos plásticos, que possuem tamanho suficiente para conter todo o material amostrado. Esta operação de amostragem é realizada em todos os furos para desmonte em minério.

Figura 4.2 – Esquema para a coleta de amostra de pó-de-perfuratriz.

Como já foi citado anteriormente, o modelo geológico da Mina de Cajati é formado por doze litologias. Devido à complexidade do modelo e das dimensões dos diferentes corpos de minério (litologias) e visando a redução da quantidade de análises químicas e a garantia de entrega dos resultados das análises químicas dos fogos antes de seu desmonte, as amostras são agrupadas de acordo com sua litologia, através do programa Datamine Studio.

Este agrupamento é feito respeitando a litologia e os blocos do modelo, fazendo com que os furos de desmonte que estiverem posicionados no interior de cada bloco sejam agrupados, formando apenas uma amostra. A Figura 4.3 mostra um croqui de um plano de perfuração e ilustra como esta operação é feita.

Figura 4.3 – Exemplo de agrupamento de amostras, conforme os blocos do modelo, bancada -30, fogo no 259.

A quantidade de furos em cada bloco, que formarão as amostras a serem analisadas, depende exclusivamente da posição da frente a ser desmontada, uma

vez que os avanços de lavra não são definidos pelos blocos do modelo e sim por metas de produção estabelecidas previamente. Na execução da lavra são feitas diferentes misturas de minério para o cumprimento dos planos de produção. A composição química das amostras de pó-de-perfuratriz é que irá efetivamente orientar a classificação do minério lavrado.

Assim, cada amostra, quando composta, irá representar um bloco do modelo, para aquela detonação. No caso de detonações subsequentes, o mesmo bloco será amostrado novamente, sendo a nova amostra composta por um outro conjunto de furos que novamente pertencem ao mesmo bloco. A Figura 4.4 ilustra como isso é feito.

Figura 4.4 – Ilustração do agrupamento de furos para composição das amostras.

Na Figura acima estão representados os furos dos fogos 324 e 327 da bancada -10, CBN, conforme a legenda. Assim temos que o bloco A, terá como teor o resultado dado pela amostra formada pelas amostras dos furos 37, 39, 40, 41 e 42, do fogo 327. O bloco B, para o fogo 324, o teor obtido será o resultado da composição de amostras dos furos 28, 30 e 31, mas para o fogo 327, será o resultado do grupo de amostras 35, 36 e 38. Situação semelhante ocorre com o bloco C que também apresentará dois resultados diferentes, o primeiro o resultado do grupo de amostras dos furos 36, 37 e 38 do fogo 324 e o segundo o resultado do grupo de amostras dos furos 43 e 45 do fogo 327. No caso específico deste exemplo, o bloco D estará estimado pelo grupo de amostras dos furos 32, 33, 34 e 35. A Tabela 4.1 mostra um resumo deste agrupamento.

Tabela 4.1 – Resumo do agrupamento dos furos indicados na Figura 4.4.

BLOCO	FOGO/FUROS	
	324	327
A	-	37, 39, 40 41 e 42
B	28, 30 e 31	35, 36 e 38
C	36, 37 e 38	43 e 45
D	32, 33, 34, e 35	-

A posição espacial da amostra que será formada com os furos, em cada bloco, é dada pela média aritmética das coordenadas X, Y e Z, como mostrado abaixo:

- Coordenada Leste (X): $X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$;
- Coordenada Norte (Y): $Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$; e
- Cota (Z): $Z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$.

Onde n é a quantidade de furos em cada bloco.

4.1 GEOESTATÍSTICA

Para os estudos geoestatísticos foi selecionado um grupo de amostras de pó-de-perfuratriz existentes no CBR que foram separadas, através do programa Datamine Studio, das demais amostras existentes no banco de dados e que não faziam parte deste domínio geológico. No total, foram separadas 773 amostras que representavam, cada uma, furos de desmonte com comprimentos que variavam de 0,99 m a 14,54 m.

Entretanto, para os estudos geoestatísticos, devido a recomendação dada por Armstrong (1998) que o suporte amostral deve ser menor que o bloco e por Yamamoto (2001) que os intervalos de amostragem devem ser menores que o intervalo de trabalho, as amostras com comprimento superior a 10 m não foram utilizadas, pois as dimensões dos blocos do modelo são de 10 m, nas direções X (Leste), Y (Norte) e Z (Cota), e as bancadas na mina possuem a altura de um bloco. Assim, o banco de dados utilizado para a variografia e krigagem passou a ser formado por 203 amostras, não compositadas, com comprimento (L) menor que 10 m.

Embora as amostras de sondagens existentes para a geração do modelo de blocos não façam parte deste trabalho, a comparação dos teores destas amostras com os teores das amostras de pó-de-perfuratriz é uma etapa importante. As duas formas de amostragem são muito diferentes, mas os teores de uma não podem apresentar valores muito discrepantes quando comparados aos da outra, pois a seleção de amostras é feita respeitando rigorosamente os domínios geológicos.

A Figura 4.5 mostra a localização das amostras de pó-de-perfuratriz em planta e uma vista em perspectiva no interior da litologia CBR

Como as 203 amostras de pó-de-perfuratriz estão distribuídas no intervalo vertical entre as cotas -70 e -20 m, foram separadas as amostras de sondagem existentes neste mesmo intervalo. A Tabela 4.2 mostra um resumo estatístico, da variável P_2O_5 , das amostras de pó-de-perfuratriz e de sondagem.

Figura 4.5 – Localização das amostras de pó-de-perfuratriz na mina em planta (A) e sua posição, em perspectiva, no interior da litologia CBR (B).

Tabela 4.2 – Estatísticas das amostras de sondagem rotativa e de amostras de pó-de-perfuratriz.

Estatísticas - Variável P_2O_5	Amostras		
	Pó-de-perfuratriz		Sondagem rotativa
	Todas	L ≤ 10	
Média (%)	4,68	4,65	4,24
Mediana (%)	4,65	4,58	4,03
Moda (%)	5,29	4,66	3,28
Desvio padrão	1,07	1,04	1,15
Intervalo (m)	8,59	6,66	6,10
Mínimo (m)	1,07	1,25	2,62
Máximo (m)	9,66	7,91	8,72
Número de amostras (un)	773	203	43

L é o comprimento da amostra em metros

Pode-se verificar que o teor médio de P_2O_5 das amostras de pó-de-perfuratriz, tanto de todas as amostras (773 amostras), quanto das amostras selecionadas com

comprimento ≤ 10 m (203 amostras), apresentam valor superior ao das amostras de sondagem.

A Figura 4.6 mostra que, das 203 amostras de pó-de-perfuratriz, 134 possuem comprimento médio de 9,50 m e que, embora exista certa variação no teor de P_2O_5 , não é possível identificar alguma tendência que relacione o teor da amostra com seu comprimento.

Figura 4.6 – Teor de médio P_2O_5 de acordo com o comprimento da amostra.

A Figura 4.7 mostra a distribuição de teor de P_2O_5 das amostras com comprimento $L \leq 10$ m.

Figura 4.7 – Distribuição de teor de P_2O_5 das amostras de pó-de-perfuratriz. Furos com comprimento $L \leq 10$ m.

A Figura 4.8 mostra a comparação entre o teor médio de P_2O_5 , por cotas, separadas por intervalo de 10 m, das amostras de pó-de-perfuratriz e das amostras de sondagem e indica que 109 amostras de pó-de-perfuratriz estão localizadas no intervalo entre as cotas -45 e -65 m, com ponto médio na cota -55 m e que os teores médios das amostras de pó-de-perfuratriz possuem valores mais elevados que as amostras de sondagem, menos na cota -65 m.

Figura 4.8 – Comparação entre teor médio e quantidade de amostras de sondagem e de pó-de-perfuratriz, por nível (cota).

4.2 Variografia

O primeiro passo para a construção de um semivariograma experimental é a análise crítica dos dados levantados disponíveis que é, em muitos casos, trabalhosa e estafante e é uma condição fundamental para dar segmentos aos trabalhos práticos de estudos variográficos e as demais atividades subsequentes como a krigagem, parametrização, otimização de cava, seqüenciamento da lavra, etc. No presente caso, a variografia e krigagem foram realizadas no programa Datamine Studio e foi variografada a variável P_2O_5 , do CBR.

A Figura 4.9 mostra os semivariogramas obtidos nas direções N47°E, N137°E e vertical.

Figura 4.9 – Semivariogramas: Em (a) direção N47°E, (b) direção N137°E e (c) direção vertical.

Foram obtidos semivariogramas esféricos, isotrópicos, com duas estruturas. A equação mostrada a seguir apresenta o modelo de semivariograma ajustado, com efeito pepita (C_0) de 0,054, variância espacial da primeira estrutura (C_1) de 0,420 e variância espacial da segunda estrutura (C_2) de 0,606. O patamar do semivariograma é 1,08. As distâncias (range) possuem alcances distintos para cada uma das direções de continuidade, caracterizando anisotropia geométrica.

$$\gamma(h) = 0,054 + 0,420 Sph\left(\frac{hN47}{10}, \frac{hN137}{14}, \frac{hVert}{12}\right) + 0,606 Sph\left(\frac{hN47}{38}, \frac{hN137}{26}, \frac{hVert}{23}\right)$$

4.1.1 Validação dos modelos variográficos

São procedimentos para avaliação da qualidade dos modelos de variografia e de inferência utilizados, dentre eles a validação cruzada, que foi utilizada neste trabalho.

A validação cruzada não garante que se obteve o melhor semivariograma ou que, por conseguinte, será obtida uma boa estimativa dos blocos, ela apenas indica que os erros cometidos no ajuste do semivariograma não foram demasiadamente

grandes. Na prática, a condição ideal é a possibilidade de conferir os diferentes resultados das estimativas e escolher o que apresentar o melhor resultado (Isaaks e Srivastava, 1989).

Com os parâmetros variográficos e de estimativa obteve-se uma correlação de 53% entre o valor real (das amostras) e o valor estimado, mostrado da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados da validação cruzada da variável P_2O_5 na unidade litológica CBR.

Parâmetros do variograma			
Modelo	Esférico		
Direção	N47°E		
Número de estruturas	2		
Efeito pepita (Co)	0,054		
Azimute			
47°		137°	
1ª Estrutura		2ª Estrutura	
Alcance em X (m) a ₁	10	Alcance em X (m) a ₂	38
Alcance em Y (m) a ₁	14	Alcance em Y (m) a ₂	26
Alcance em Z (m) a ₁	12	Alcance em Z (m) a ₂	23
Variância espacial (C ₁)	0,420	Variância espacial (C ₂)	0,606
Patamar (sill)	1,08		
Parâmetros de busca			
	a ₁	Fator multiplicativo	a ₂
Distância em X (m)	30,40	1,25	38,00
Distância em Y (m)	20,50	1,25	25,63
Distância em Z (m)	18,40	1,25	23,00
Estatística da validação cruzada - Variável P ₂ O ₅			
Número mínimo de amostras	10		
Número máximo de amostras	24		
Número de amostras estimadas	201		
Número de amostras não estimadas	2		
Média das amostras (%)	4,65		
Média dos valores estimados (%)	4,64		
Diferença entre médias (amostras - estimados)	0,009		
Porcentagem da diferença em relação às amostras	0,187		
Variância das amostras (%) ²	1,081		
Variância dos valores estimados (%) ²	0,401		
Coefficiente de correlação (%)	53,00		

A Tabela 4.4 mostra o resumo estatístico das amostras (Real) e dos valores estimados, além da diferença entre tais valores (Z-Z*).

Tabela 4.4 – Resumo estatístico da validação cruzada da litologia CBR.

Estatísticas da variável P_2O_5 - CBR	Teores em % de P_2O_5		Z - Z*
	Real (Z)	Estimado (Z*)	
Média	4,65	4,64	0,0087
Mediana	4,58	4,62	-0,0067
Moda	5,29		
Desvio padrão	1,04	0,64	0,8879
Intervalo (Mínimo - Máximo)	6,66	3,49	6,3289
Mínimo	1,25	2,96	-3,1985
Máximo	7,91	6,45	3,1304
Variância da amostra (%) ²	1,08	0,40	0,7884
Quantidade de amostras (unidade)	203	201	201

Como pode ser visto na Tabela 4.3, com os parâmetros variográficos, foi possível realizar a estimativa de 201 amostras, sendo que média dos valores estimados apresentou valor acima do valor real. Foram utilizadas no mínimo 10 amostras e no máximo de 24 amostras por bloco, além de utilizar no mínimo 2 octantes e, nestas, no mínimo duas e no máximo 10 amostras por octante.

4.1.2 Krigagem dos blocos

A krigagem é feita após a conclusão dos estudos goestatísticos que levam à definição de um modelo que de variograma que servirá para inferir os valores da função variograma ou covariograma que serão utilizados pelos métodos goestatísticos de interpolação (Yamamoto, 2001).

As amplitudes variográficas, nas direções norte, leste e cota, definem a distância a partir da qual as amostras se tornam independentes umas das outras e determinam os raios de busca das amostras para a estimativa do teor de P_2O_5 dos blocos. Neste caso, foram utilizadas elipsóides de busca com os raios definidos pela amplitude variográfica, divididos em duas estruturas, sendo que a primeira estrutura possui um alcance de 75% da amplitude variográfica total, em cada uma das três direções. Os raios da segunda estrutura é 25% maior que os raios da primeira, alcançando, desta maneira, a amplitude variográfica máxima.

A escolha das amostras que irão estimar os blocos é um passo importante e deve ser feita de tal modo que garanta uma boa amostragem espacial, o que implica evitar subconjuntos de agrupamentos de amostras, que ocorrem preferencialmente em arranjos aleatórios e semi-regulares. Portanto, é necessário o estabelecimento de critérios de seleção de amostras que evitem agrupamentos de amostras (Yamamoto, 2001).

Assim, para evitar o agrupamento das amostras, foram estabelecidos critérios de seleção de amostras por quadrantes ou octantes, que dividem a região do ponto a ser interpolado em quatro ou oito setores, respectivamente, e selecionam as amostras mais próximas por setor até completar um número desejado de amostras para fins de interpolação (Yamamoto, 2001). Neste trabalho foram utilizadas octantes.

A krigagem foi realizada no programa Datamine Studio, que permite selecionar quantas octantes se deseja utilizar para estimar o bloco, além das quantidades

mínima e máxima de amostras para cada uma das octantes. A Tabela 4.5 mostra os parâmetros utilizados para a krigagem dos blocos.

Tabela 4.5 – Parâmetros dos elipsóides de busca utilizados na estimativa de teores.

Parâmetros do primeiro elipsóide de busca (1ª. Estrutura)								Fator multiplicativo para 2ª. estrutura	2ª. Estrutura		
Distância em metros			Azimute (Graus)	Quantidade mínima de octante	Amostra por octante		Quantidade de amostras		Quantidade de amostras		
X	Y	Z			Mínimo	Máximo	Mínimo		Máximo	Mínimo	Máximo
30.40	20.50	18.40	47	2	2	10	10	24	1.25	1	8

Os resultados obtidos com a da krigagem são apresentados na Tabela 4.6, onde pode ser observado que o teor médio de P_2O_5 dos blocos obtidos através de estimativa com as amostras de sondagem possui valor inferior obtido através da estimativa realizada com as amostras de pó-de-perfuratriz, todavia, com valor próximo ao teor médio das amostras.

Como a média das diferenças entre o valor real e o valor estimado, obtidos na validação cruzada, possui valor acima de zero, já se esperava que os blocos seriam superestimados, apresentado média de 4,69% contra 4,65% das amostras.

Tabela 4.6 – Resumo comparativo entre os teores dos blocos krigados por amostras de sondagem, por amostras de pó-de-perfuratriz e amostras de pó-de-perfuratriz.

Estatísticas-Variável P_2O_5 em porcentagem (%)	Blocos krigados por amostras de:		Amostras de pó-de-perfuratriz
	Sondagem	Pó-de-perfuratriz	
Média	4,20	4,69	4,65
Mediana	4,14	4,71	4,58
Modo	4,28	4,70	5,29
Desvio padrão	0,42	0,60	1,04
Intervalo (máximo-mínimo)	2,88	4,09	6,66
Mínimo	3,35	2,38	1,25
Máximo	6,23	6,47	7,91
Coefficiente de variação	0,10	0,13	0,22
Variância da amostra (%) ²	0,18	0,36	1,08
Quantidade de blocos ou amostras (unidade)	718	718	203

A Figura 4.10 mostra os histogramas comparativos da distribuição de teores das amostras de pó-de-perfuratriz e dos blocos krigados.

Figura 4.10 – Gráfico comparativo entre distribuição de teor de P_2O_5 dos blocos e amostras.

O gráfico acima mostra que tanto as amostras de pó-de-perfuratriz, quanto os blocos krigados por tais amostras possuem uma distribuição aproximadamente normal e maior dispersão em relação aos blocos estimados com amostras de sondagem, o que pode ser observado pelos seus respectivos coeficientes de variação, mostrados na Tabela 4.6.

4.1.3 Análise e Comentários Preliminares

Embora tenham sido realizados estudos geoestatísticos e a estimativa de teores, o problema das diferenças, sempre a maior, entre os teores médios informados pela mina à usina de concentração e os resultados por ela obtidos é uma constante.

Apesar de o plano de lavra ser realizado tendo como base um modelo de blocos estimado por amostras de sondagem, é o teor obtido pelas amostras de pó-de-perfuratriz que orienta a lavra sendo, portanto, o teor esperado. Isto conduz a questionamentos sobre a representatividade das amostras.

Como foi citado anteriormente, sobre a maneira que amostragem de pó-de-perfuratriz é realizada na Mina de Cajati, a representatividade das amostras pode ser afetada por diversos fatores, como vazamentos de pó pelo centralizador da perfuratriz, deficiências no sistema de aspiração do pó ou de sopro da perfuratriz, etc.

Vários destes problemas podem ser solucionados através de reparos mecânicos, treinamento dos operadores, etc; mas um problema fundamental, que mesmo que a perfuratriz estivesse em perfeitas condições, todos os procedimentos operacionais fossem identificados e melhorados, continuaria a existir, trata-se do procedimento de coleta das amostras, como pode ser observado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Coleta de amostras de pó-de-perfuratriz na Mina de Cajati.

A amostragem de pó-de-perfuratriz é formada por seis incrementos das pilhas que formam na descarga do pó, sendo três retirados da parte frontal, próximo à torre de perfuração e três da parte descarregada pelo coletor de pó da perfuratriz.

A Figura 4.11e mostra como, em teoria, deveria se formar a pilha de pó ao ser descarregado pela perfuratriz. Um cone “perfeito” onde o amostrador, representado pelas setas, seria introduzido em três posições, na base do cone.

A Figura 4.11a mostra o cone formado na parte frontal da máquina, ao lado da torre de perfuração é irregular e o operador introduz o amostrador a meia altura do cone e, em 4.11b, introduz novamente o amostrador em uma posição muito próxima de onde retirou o primeiro incremento.

Na Figura 4.11c e 4.11d, mostra que sequer o cone é formado após a descarga do pó, ocorrendo grande espalhamento do material devido a grande pressão de descarga do coletor de pó, além de os incrementos serem retirados praticamente um ao lado do outro.

Além da descarga do pó não formar o cone esperado, a coleta da amostra não é feita corretamente, ou seja, o amostrador deveria ter comprimento suficiente para alcançar o centro do cone e ser introduzido em sua base em três pontos eqüidistantes.

Um outro questionamento aceitável é que mesmo que o amostrador possua as dimensões adequadas e o procedimento de coleta seja corretamente aplicado, qual seria a quantidade a ser coletada das pilhas de material fino e de material grosso, ma vez que não se sabe em que proporção o pó é dividido no momento em que é aspirado pela perfuratriz?

Estas dúvidas levaram a estudos sobre a representatividade das amostras, que são relatados a seguir.

4.3 O problema da representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz - Desenvolvimento de amostrador

Uma amostra de uma unidade litológica deve possuir todas as características presentes na unidade que se pretende representar ou modelar. Os problemas de coleta de amostras de pó-de-perfuratriz são recorrentes e dependem, além de outros fatores, do tipo de equipamento utilizado na perfuração primária.

No caso da Mina de Cajati, a perfuração primária é executada por perfuratrizes hidráulicas Atlas Copco modelos ROC D7, ROC D9 e ROC F9. Estas máquinas possuem alta performance e elevada produtividade. A Figura 4.12 mostra uma frente de lavra perfurada e uma perfuratriz ROC D9.

Figura 4.12 – Perfuração de um fogo primário finalizada (a) e perfuratriz Atlas Copco ROC D9 em operação (b).

As amostras de pó-de-perfuratriz tem como finalidade o controle de teores na lavra no curtíssimo prazo e são coletadas durante a atividade de perfuração primária para desmonte de rocha na mina, em furos verticais, distribuídos em malha regular de 3,0 x 4,5 m.

Este tipo de amostragem, se conduzida de forma correta, possui alguma vantagem financeira sobre diferentes tipos de amostragem que podem ser conduzidos em uma operação de lavra que necessite de desmonte de rochas com explosivos, uma vez que a perfuração primária é uma fase do processo de produção pois, de qualquer maneira, a perfuração precisa ser realizada e a decisão de realizar amostragem é uma questão gerencial, pois estará associada à melhoria do processo, embora proporcionando custos de coleta, preparação e análises químicas.

Neste contexto, foi proposto pela equipe de controle de qualidade da mina, desenvolvimento de um sistema de amostragem que corta o fluxo do pó aspirado durante a perfuração, através da instalação de um anteparo antes do primeiro ponto de descarga do pó, localizado na parte frontal da perfuratriz. A Figura 4.13 mostra detalhes deste sistema.

Figura 4.13 – Detalhe do amostrador e do anteparo instalados em uma perfuratriz Atlas Copco ROC D7.

Neste caso, o pó a ser aspirado se choca com o anteparo instalado antes do primeiro ciclone que separa a fração grossa e cai dentro de um saco para coleta, como mostrado da Figura 4.13, somente esta amostra é retirada por furo.

A expectativa é de que a amostra coletada represente o furo amostrado, pois ao se chocar com o anteparo e cair no saco de coleta, todas as características do que se pretende amostrar estejam preservadas.

A fração fina descarregada pelo coletor de pó, que é espalhada pela pressão de descarga e muito afetada pelo vento não foi amostrada.

Foram realizados testes com este amostrador na mina. A seguir são apresentados os detalhes de realização de dois testes.

4.2.1 Primeiro teste do amostrador

Com o objetivo de avaliar a eficiência do amostrador proposto, em relação à representatividade das amostras com ele obtidas, foram realizados testes comparativos com amostragem convencional na mina pela equipe de controle de qualidade da mina.

No primeiro teste, todos do furos do fogo 212 da bancada -20 foram amostrados, na litologia Carbonatito Intermediário (CBI), obtendo duas amostras de cada furo, como mostrado na Figura 4.14, da seguinte forma:

- Amostra Grande (AG): refere-se à amostra coletada pelo amostrador proposto.
- Amostra Pequena (AP): refere-se à amostra obtida do pó remanescente, que não era coletado pelo amostrador, sendo esta coletada da maneira convencional, já descrita anteriormente,

Figura 4.14 – Ilustração indicando de onde foram retiradas as amostras AP e AG.

A amostra AG do furo 43, as amostras AP dos furos número 3, 6 e 36, foram descartadas por ocorrer problema operacional de transporte da mina até o

laboratório. Ao todo foram tratadas 45 amostras pequenas e 47 amostras grandes. A Tabela 4.7 mostra os dados referentes à localização espacial, profundidade e massa das amostras coletadas.

Tabela 4.7 – Dados das amostras do fogo 212 da bancada -20.

Fogo 212 - Bancada -20													
Furo	Profundidade (m)	Coordenadas (m)			Massa da Amostra (kg)		Furo	Profundidade (m)	Coordenadas (m)			Massa da Amostra (kg)	
		Leste	Norte	Cota	AG	AP			Leste	Norte	Cota	AG	AP
1	11,90	790.406,84	7.265.602,22	-9,12	18,270	3,962	25	11,80	790.397,15	7.265.611,58	-9,18	15,260	3,820
2	11,90	790.406,25	7.265.608,34	-9,11	17,860	3,551	26	12,00	790.395,57	7.265.617,95	-9,04	25,810	4,538
3	12,10	790.404,69	7.265.614,24	-8,95	17,210		27	12,40	790.394,07	7.265.622,79	-8,64	20,160	3,819
4	12,00	790.403,11	7.265.620,60	-8,97	13,810	5,120	28	11,80	790.398,86	7.265.596,06	-9,19	15,500	4,380
5	11,90	790.401,50	7.265.626,30	-9,12	26,680	4,902	29	11,50	790.397,60	7.265.601,96	-9,50	19,460	3,587
6	11,90	790.399,69	7.265.632,05	-9,10	26,630		30	11,80	790.396,07	7.265.607,92	-9,18	18,350	3,620
7	12,00	790.406,17	7.265.598,66	-8,99	13,190	4,661	31	11,90	790.394,40	7.265.614,22	-9,14	18,100	5,280
8	11,80	790.405,06	7.265.604,87	-9,21	10,680	3,002	32	12,20	790.392,61	7.265.620,33	-8,77	14,380	4,065
9	12,10	790.403,56	7.265.610,73	-8,93	16,410	4,033	33	11,50	790.396,56	7.265.598,38	-9,46	18,630	4,249
10	12,10	790.401,91	7.265.617,00	-8,88	14,550	4,124	34	11,50	790.394,99	7.265.604,22	-9,48	12,660	4,088
11	12,10	790.400,24	7.265.623,09	-8,92	19,420	4,974	35	11,70	790.393,37	7.265.610,25	-9,30	11,880	3,388
12	11,70	790.398,19	7.265.628,78	-9,33	19,910	4,449	36	11,90	790.391,79	7.265.616,63	-9,08	19,240	
13	12,00	790.404,03	7.265.601,21	-9,03	14,660	4,266	37	11,40	790.395,17	7.265.594,59	-9,56	9,930	4,133
14	11,80	790.402,49	7.265.607,00	-9,24	25,160	3,766	38	11,30	790.393,68	7.265.600,43	-9,66	18,100	3,576
15	11,90	790.400,92	7.265.612,91	-9,06	18,600	3,800	39	11,70	790.392,32	7.265.606,52	-9,31	17,240	3,865
16	12,00	790.399,34	7.265.619,28	-9,00	21,160	5,046	40	11,70	790.390,65	7.265.612,83	-9,27	19,240	4,863
17	12,10	790.397,35	7.265.624,94	-8,90	22,000	4,517	41	11,30	790.392,59	7.265.596,88	-9,70	12,890	4,304
18	12,20	790.402,78	7.265.597,49	-8,78	23,030	4,558	42	11,20	790.391,41	7.265.599,21	-9,76	18,940	3,599
19	11,60	790.401,33	7.265.603,41	-9,36	14,950	3,327	43	11,40	790.391,07	7.265.602,77	-9,61		3,906
20	11,90	790.399,81	7.265.609,32	-9,06	14,440	4,049	44	11,60	790.389,60	7.265.608,92	-9,42	17,060	3,959
21	12,00	790.398,15	7.265.615,61	-9,01	20,630	4,854	45	11,90	790.388,10	7.265.615,33	-9,11	8,840	3,808
22	12,20	790.396,47	7.265.621,73	-8,84	25,880	4,845	46	11,60	790.388,25	7.265.604,99	-9,44	15,600	4,166
23	11,80	790.400,29	7.265.599,80	-9,25	19,160	4,082	47	11,60	790.386,82	7.265.611,41	-9,40	16,720	3,707
24	11,60	790.398,75	7.265.605,61	-9,36	18,260	3,861	48	11,50	790.385,76	7.265.607,57	-9,54	21,670	3,730

As amostras AG tiveram uma grande variabilidade em suas massas, indo de 8,84 a 26,68 kg com um coeficiente de variação de 25%, enquanto que as amostras AP variaram de 3,00 a 5,28 kg e coeficiente de variação de 13%, aproximadamente a metade das amostras AG. A Tabela 4.8 mostra um resumo estatístico do teor de P_2O_5 das amostras e a Figura 4.15 os histogramas comparativos.

Tabela 4.8 – Resumo estatístico das amostras.

Estatísticas em % de P_2O_5	Amostras	
	AP	AG
Média	6,32	4,94
Mediana	6,20	4,93
Desvio padrão	1,92	1,64
Intervalo (Máximo - Mínimo)	8,78	7,72
Mínimo	2,71	2,17
Máximo	11,49	9,89
Coefficiente de variação	0,30	0,33
Variação da amostra (%) ²	3,69	2,70
Quantidade de amostras (unidade)	45	47

Figura 4.15 –Histograma comparativo entre os diferentes grupos de amostras.

Como pode ser visto na Figura 4.15, as distribuições apresentam grande diferença entre o teor médio de P_2O_5 das amostras AP muito superior ao teor das amostras AG, existindo uma correlação de 44,70%, que é mostrada na Figura 4.16, onde pode ser verificado que grande parte das amostras AP ficaram acima de uma faixa de variação de 10% do teor em relação às amostras AG.

Destes 48 furos executados, foram selecionados de maneira aleatória, os furos 19, 26, 28, 34 e 35, para a realização de ensaios granuloquímicos, em que todas as frações granulométricas foram analisadas. As amostras foram preparadas conforme fluxograma de preparação mostrado na Figura 4.17.

Figura 4.16 –Correlação entre o teor de P_2O_5 das amostras grandes (AG) e pequenas (AP).

Figura 4.17 – Fluxograma de preparação das amostras de pó-de-perfuratriz dos furos 19, 26, 28, 34 e 35 do fogo 212 da bancada -20.

Antes da classificação granulométrica das amostras, foi retirada uma alíquota para análise química da amostra tal qual, com a finalidade de comparar o resultado químico de teor de P_2O_5 obtido com o resultado do teor médio composto, calculado através dos teores das diferentes frações granulométricas.

Todas as etapas mostradas no fluxograma de preparação de amostras são realizadas por pessoal ligado diretamente ao planejamento de lavra. Após a pulverização, as amostras são encaminhadas ao laboratório interno, onde passarão pelas etapas de confecção de pastilhas fundidas e análise química por fluorescência de RX.

4.2.2 Resultados dos ensaios granuloquímicos

A Tabela 4.9 mostra a classificação granulométrica dos furos selecionados, todos identificados pela letra T, seguidos pelo número do furo e das letras P ou G, referindo às amostras AP ou AG, respectivamente.

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio granulométrico.

Amostras	T19P	T26P	T28P	T34P	T35P
Massa (g)	479,00	516,80	745,82	529,70	607,80
Malhas	% de massa retida				
+28 #	8,88	11,83	17,06	13,98	16,94
+35 #	9,82	11,33	8,61	13,19	14,78
+48 #	6,04	6,74	8,86	6,93	8,30
+100 #	17,13	17,46	17,28	18,08	18,49
+200 #	16,40	10,51	16,84	15,61	14,09
+325#	13,71	16,69	12,19	10,49	8,89
-325 #	28,02	25,44	19,16	21,71	18,52
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Recuperação	99,92	99,94	99,99	99,91	99,95
Perdas (%)	0,08	0,06	0,01	0,09	0,05

Amostras	T19G	T26G	T28G	T34G	T35G
Massa (g)	1998,00	1989,50	1975,00	1905,58	1928,00
Malhas	% de massa retida				
+28 #	40,52	48,43	55,34	46,31	45,58
+35 #	12,33	11,58	8,31	9,22	12,45
+48 #	9,06	7,14	4,70	5,94	8,25
+100 #	17,18	13,80	10,15	12,24	16,12
+200 #	11,00	9,20	9,14	7,82	10,80
+325#	3,51	3,53	4,85	8,77	3,78
-325 #	6,39	6,32	7,51	9,71	3,02
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Recuperação	99,88	99,68	99,97	99,91	99,92
Perdas (%)	0,12	0,32	0,03	0,09	0,08

Como pode ser observado na Figura 4.18, as amostras pequenas possuem distribuição heterogênea, em que as curvas das porcentagens de massa retida por fração se cruzam, como por exemplo, a curva de distribuição granulométrica da amostra T19P possui um comportamento inverso ao da amostra T35P.

Figura 4.18 –Distribuição granulométrica das amostras pequenas.

A distribuição granulométrica das amostras AG possui comportamento mais uniforme, existindo certo paralelismo e maior proximidade entre as respectivas curvas granulométricas de cada furo, embora ocorra também o cruzamento entre curvas, como pode ser observado na Figura 4.19.

Figura 4.19 –Distribuição granulométrica das amostras grandes.

A Figura 4.20 mostra as curvas médias das faixas granulométricas das amostras AP e AG. Nas amostras grandes, a maior parte da massa se concentra nas frações mais grossas.

Nas amostras pequenas, o comportamento da distribuição granulométrica é mais suavizado, com maior porcentagem nas frações mais finas, que possuem massas maiores.

Figura 4.20 – Média das distribuições granulométricas das amostras AG e AP.

Os resultados analíticos indicam que as amostras AP possuem teor de P_2O_5 mais elevados que as amostras AG, tanto das amostras tal qual, quanto do teor médio ponderado das diferentes frações granulométricas, como pode ser visto na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Resumo comparativo do teor de P_2O_5 entre amostras tal e teor composto das amostras AP e AG.

Na Figura 4.22, é verificado que o teor de P_2O_5 das amostras AP tal qual e o teor médio composto das frações granulométricas apresentam valores acima de 10% mais elevados que suas respectivas amostras AG, embora tenham uma boa correlação entre si.

As amostras AP tal qual possuem correlação de 96% com as amostras AG e, entre as amostras AP e AG compostas, esta correlação é de 97%.

Figura 4.22 – Correlação entre teor de P_2O_5 das amostras AP e AG.

As Figuras 4.23 a 4.27 mostram os gráficos de distribuição granulométrica dos furos amostrados, onde pode ser observado que em todos os furos analisados, a distribuição granulométrica das amostras AP é muito diferente das amostras AG.

Em relação ao teor de P_2O_5 , as Figura 4.23 a 4.27 mostram que em todos os furos, as amostras AG apresentaram valores mais elevados na maioria das frações granulométricas mas esta tendência se inverte à medida que diminui a granulometria da amostra e, no final, as amostras AP apresentam teor acumulado maior.

As amostras AP apresentam ligeira tendência ascendente, à medida que diminui o diâmetro das partículas. Nas amostras AG, à medida que o diâmetro das partículas diminui, a curva de teores vai ficando menos inclinada, finalizando com um teor acumulado menor que das amostras AP.

Este teste confirmou o fato de as amostras AP apresentarem teor médio de P_2O_5 mais elevado que o teor das AG, indicando que da forma como a amostra é obtida, sua representatividade realmente é afetada pelo procedimento de coleta. No entanto, seria ainda necessário testar a eficiência do amostrador.

Figura 4.23 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 19.

Figura 4.24 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 26.

Figura 4.25 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 28.

Figura 4.26 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 34.

Figura 4.27 – Comparação entre distribuição granulometria e teor de P_2O_5 acumulado. Furo 35.

4.4 Segundo teste do amostrador

O segundo teste foi realizado no fogo número 172, na bancada -40, de onde foram amostrados seis furos, com o objetivo de verificar a representatividade das amostras obtidas com o amostrador em desenvolvimento, através da comparação entre a distribuição granulométrica da amostra obtida com o amostrador testado e o pó remanescente, que não foi coletado pelo amostrador.

Como pode ser observado na Figura 4.28, as amostras AP se referem àquelas coletadas pelo amostrador testado e, as amostra AG se referem ao restante do pó que não foi coletado pelo amostrador, tanto da parte frontal da perfuratriz (fração grossa) quanto do material expelido pelo coletor de pó (fração fina). Teoricamente, as curvas de distribuição granulométrica dos dois tipos de amostras deveriam possuir alguma semelhança, o que confirmaria a representatividade da amostra.

Figura 4.28 – Amostragem do fogo 172 da bancada -40.

Como as amostras AG eram compostas por duas partes, uma de material mais grosso e outra do material fino que sai pelo coletor de pó, elas foram homogeneizadas manualmente. Tanto as amostras AG, quanto as amostras AP foram reduzidas através de processo de quarteamento em quarteadores tipo Jones, até cerca de 230 g e classificadas em peneiras.

No total, os seis furos amostrados, F38, F40, F41, F42, F43 e F45, resultaram em 168 amostras que não foram analisadas quimicamente, pois o objetivo final do

teste era a verificação da similaridade granulométrica entre as amostras AG e AP. A Tabela 4.10 mostra o resultado do ensaio granulométrico das amostras.

Tabela 4.10 – Resultado dos ensaios granulométricos das amostras do fogo 172 da bancada -40.

F38 (AG)				F38 (AP)				F40 (AG)				F40 (AP)			
Massa (g)	225,30	Rec.Massa	98,98%	220,00	Rec.Massa	97,73%		230,20	Rec.Massa	97,87%		234,00	Rec.Massa	97,78%	
MALHA	% Massa	Acumulado		% Massa	Acumulado			% Massa	Acumulado			% Massa	Acumulado		
		% Retido	% Passante		% Retido	% Passante			% Retido	% Passante			% Retido	% Passante	
+5#	2,69	2,69	97,31	9,53	9,53	90,47		1,82	1,82	98,18		7,56	7,56	92,44	
+7#	2,42	5,11	94,89	9,67	19,21	80,79		2,04	3,86	96,14		9,44	17,00	83,00	
+10#	2,29	7,40	92,60	6,65	25,86	74,14		1,91	5,77	94,23		6,69	23,69	76,31	
+12#	1,16	8,57	91,43	1,86	27,72	72,28		1,15	6,92	93,08		2,40	26,09	73,91	
+14#	0,54	9,10	90,90	0,56	28,28	71,72		0,62	7,55	92,45		0,87	26,97	73,03	
+20#	3,77	12,87	87,13	4,37	32,65	67,35		4,04	11,58	88,42		5,33	32,30	67,70	
+28#	2,15	15,02	84,98	2,70	35,35	64,65		2,00	13,58	86,42		2,84	35,14	64,86	
+35#	5,61	20,63	79,37	4,65	40,00	60,00		7,06	20,64	79,36		6,60	41,74	58,26	
+48#	6,73	27,35	72,65	4,51	44,51	55,49		6,13	26,76	73,24		6,56	48,30	51,70	
+65#	7,94	35,29	64,71	5,86	50,37	49,63		8,57	35,33	64,67		7,34	55,64	44,36	
+100#	9,64	44,93	55,07	8,14	58,51	41,49		11,05	46,38	53,62		9,05	64,69	35,31	
+200#	19,42	64,35	35,65	15,12	73,63	26,37		20,11	66,49	33,51		16,17	80,86	19,14	
+325#	9,81	74,17	25,83	8,47	82,09	17,91		9,63	76,12	23,88		5,81	86,67	13,33	
-325#	25,83	100,00	0,00	17,91	100,00	0,00		23,88	100,00	0,00		13,33	100,00	0,00	
	100,00			100,00				100,00				100,00			
F41 (AG)				F41 (AP)				F42 (AG)				F42 (AP)			
Massa (g)	255,30	Rec.Massa	97,34%	224,00	Rec.Massa	97,41%		215,60	Rec.Massa	98,33%		237,50	Rec.Massa	98,32%	
+5#	2,25	2,25	97,75	11,18	11,18	88,82		2,92	2,92	97,08		15,07	15,07	84,93	
+7#	1,41	3,66	96,34	11,64	22,82	77,18		2,36	5,28	94,72		17,43	32,51	67,49	
+10#	1,61	5,27	94,73	6,92	29,74	70,26		2,59	7,88	92,12		12,16	44,67	55,33	
+12#	0,76	6,04	93,96	2,25	31,99	68,01		0,85	8,73	91,27		5,65	50,32	49,68	
+14#	0,20	6,24	93,76	0,87	32,86	67,14		0,47	9,20	90,80		1,37	51,69	48,31	
+20#	2,17	8,41	91,59	5,27	38,13	61,87		3,63	12,83	87,17		7,71	59,40	40,60	
+28#	2,09	10,50	89,50	1,92	40,05	59,95		2,36	15,19	84,81		3,64	63,04	36,96	
+35#	4,43	14,93	85,07	5,18	45,23	54,77		6,08	21,27	78,73		6,00	69,04	30,96	
+48#	5,59	20,52	79,48	4,90	50,14	49,86		6,27	27,55	72,45		5,35	74,39	25,61	
+65#	6,84	27,36	72,64	6,60	56,70	43,30		7,74	35,28	64,72		5,05	79,44	20,56	
+100#	10,95	38,31	61,69	7,52	64,25	35,75		9,81	45,09	54,91		4,24	83,68	16,32	
+200#	23,18	61,49	38,51	15,03	79,29	20,71		20,38	65,47	34,53		6,77	90,45	9,55	
+325#	11,55	73,04	26,96	7,29	86,57	13,43		11,46	76,93	23,07		2,36	92,81	7,19	
-325#	26,96	100,00	0,00	13,43	100,00	0,00		23,07	100,00	0,00		7,19	100,00	0,00	
	100,00			100,00				100,00				100,00			
F43 (AG)				F43 (AP)				F45 (AG)				F45 (AP)			
Massa (g)	256,60	Rec.Massa	98,25%	280,00	Rec.Massa	98,39%		254,60	Rec.Massa	97,72%		227,60	Rec.Massa	98,74%	
+5#	3,09	3,09	96,91	13,54	13,54	86,46		2,17	2,17	97,83		12,65	12,65	87,35	
+7#	2,22	5,32	94,68	11,94	25,48	74,52		1,93	4,10	95,90		12,65	25,31	74,69	
+10#	2,14	7,46	92,54	8,24	33,72	66,28		2,09	6,19	93,81		9,18	34,49	65,51	
+12#	0,99	8,45	91,55	3,01	36,73	63,27		0,80	6,99	93,01		4,39	38,88	61,12	
+14#	0,36	8,81	91,19	0,94	37,68	62,32		0,68	7,68	92,32		0,44	39,32	60,68	
+20#	3,09	11,90	88,10	4,86	42,54	57,46		3,58	11,25	88,75		7,12	46,44	53,56	
+28#	1,63	13,53	86,47	2,79	45,34	54,66		2,33	13,59	86,41		4,00	50,44	49,56	
+35#	3,97	17,49	82,51	5,48	50,82	49,18		6,07	19,65	80,35		7,38	57,82	42,18	
+48#	5,87	23,36	76,64	5,74	56,55	43,45		7,23	26,89	73,11		5,49	63,31	36,69	
+65#	5,99	29,35	70,65	7,66	64,21	35,79		7,68	34,57	65,43		5,40	68,72	31,28	
+100#	9,80	39,15	60,85	7,70	71,91	28,09		10,89	45,46	54,54		6,28	75,00	25,00	
+200#	19,91	59,06	40,94	14,77	86,68	13,32		20,74	66,20	33,80		9,45	84,45	15,55	
+325#	8,37	67,43	32,57	3,05	89,73	10,27		8,60	74,80	25,20		0,75	85,19	14,81	
-325#	32,57	100,00	0,00	10,27	100,00	0,00		25,20	100,00	0,00		14,81	100,00	0,00	
	100,00			100,00				100,00				100,00			

O gráfico da Figura 4.29 mostra a distribuição granulométrica das amostras AG e AP.

Figura 4.29 – Distribuição granulométrica das amostras AG e AP do fogo 172 da bancada -40.

A Figura 4.29 mostra que, em termos de distribuição granulométrica, as amostras AG e AP não apresentam nenhuma semelhança entre si. Nas amostras AP existe uma maior quantidade material com granulometria grossa em relação às amostras AG. A Figura 4.30 mostra as distribuições granulométricas do material retido acumulado dos dois tipos de amostras.

Figura 4.30 – Distribuição granulométrica retida acumulada das amostras AG e AP do fogo 172 da bancada -40.

A maior quantidade de material grosso nas amostras AP pode ser explicada pela maneira que a amostra é coletada: durante o processo de perfuração, a perfuratriz injeta ar em alta pressão para limpeza do furo e, ao mesmo tempo, aspira o pó que sai do furo. Quando o pó que está sendo aspirado se choca com o anteparo instalado no amostrador, fica retido no tubo que forma o próprio amostrador. No entanto, o pó que está retido no tubo ou no saco de coleta continua sendo aspirado e, justamente parte do material mais fino é novamente aspirado, fato que foi observado em campo após a verificação dos resultados dos ensaios granulométricos.

Este teste comprova que o amostrador testado não proporciona a obtenção de amostras representativas. Portanto, sua utilização foi descartada até que se encontre uma maneira de evitar que a amostra, após cair no saco de coleta, seja novamente aspirada pelo coletor de pó da perfuratriz.

4.5 Avaliação do método de coleta de amostras de pó-de-perfuratriz

Dando continuidade aos estudos de representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz, foi realizado outro teste que teve como objetivo comparar os resultados obtidos com a amostragem rotineira, da forma como é tradicionalmente a amostra é coletada, e a coleta de todo o pó remanescente após a retirada desta amostra.

O primeiro obstáculo encontrado para a amostragem integral do furo se refere a questões de manuseio e transporte das amostras até o laboratório. A quantidade de pó resultante da perfuração primária pode variar de 17,50 a 19,00 kg por metro perfurado. Como os furos possuem, em média profundidade de 11,0 m, as amostras integrais dos furos podem pesar mais de 200 kg.

Por este motivo, foi desenvolvido pela equipe envolvida nesta pesquisa, um quarteador para ser utilizado no campo com finalidade de substituir o quarteamento por pilhas cônicas que "...é um método antigo, muito utilizado nas minas de estanho do século XIX. É provavelmente o método mais antigo de amostragem probabilística." Chierigati, 2007.

Este método consiste na formação de um cone com o vértice achatado e dividido em quatro partes iguais, como mostrado na Figura 4.31, de onde são

tomadas duas partes opostas entre si, repetindo-se o método quantas vezes for necessário, até que a amostra atinja um tamanho previamente determinado.

Figura 4.31 – Quarteamento por pilha cônica: (a) formação da pilha; (b) nivelamento da pilha; (c) quarteamento correto; (d) quarteamento incorreto. Modificado de Chieregati, 2008.

É praticamente impossível a formação manualmente de uma pilha cônica perfeita, nivelá-la e proceder ao corte conforme mostrado na Figura 4.26c. Vários questionamentos podem surgir como, por exemplo, qual seria a altura da pilha? Qual o seu diâmetro ideal? Quanto desta pilha deveria ser nivelado? Como encontrar o centro da pilha de modo a seccioná-la em quatro partes iguais?

Foram estes questionamentos levaram a criação do quarteador mostrado na Figura 4.32.

Figura 4.32 – Quarteador desenvolvido para redução das amostras no momento da coleta no campo.

O quarteador foi feito a partir de um tambor onde foi adaptado um funil centralizado de modo que, quando alimentado manualmente, conduz o material para o centro o tambor, onde existem quatro saídas formadas por quatro tubos de 1,50” de diâmetro x 15” de comprimento, proporcionando o fracionamento da amostra em quatro alíquotas com tamanhos (massa) semelhantes.

4.5.1 Método de coleta das amostras

O local onde a perfuratriz efetua a descarga do pó foi forrado com lona plástica de modo que todo o pó resultante da perfuração não tivesse contato com o solo. Após a execução do furo, a amostra é coletada da forma tradicional, tomando-se três alíquotas na fração grossa e três na fração fina, formando a amostras pequena AP.

Após a coleta da amostra AP, o pó que restou das duas frações foram misturados, homogeneizados manualmente e quarteados, até se obter a quantidade de aproximadamente 4 kg, formando as amostras grandes AG e encaminhadas para o laboratório para a realização dos ensaios granuloquímicos.

As Figura 4.33 mostra como o quarteamento em campo foi realizado.

Figura 4.33 – Imagem ilustrando a seqüência de etapas para a redução da amostra: a) amostra cai sobre lona plástica; b) alimentação do quarteador; c) amostra escoando pelo quarteador; d) resultado de uma das fases de quarteamento

As amostras foram enviadas para o laboratório onde passaram por processos de redução, peneiramento em diversas malhas e análises químicas de cada fração granulométrica.

4.5.2 Resultados

Os testes foram realizados em amostras coletadas de oito furos na litologia CBR do fogo número 55 da bancada -100. As amostras foram nomeadas de acordo com o número do furo, acompanhado das letras AP e AG, referindo-se a amostras pequena e amostra grande, respectivamente.

Em laboratório, cada uma das amostras (AP e AG) foi dividida em duas partes após o primeiro quarteamento realizado com quarteador Jones, uma das partes foi preparada e analisada integralmente, obtendo-se o teor tal qual e a outra parte foi

utilizada para a realização de ensaio granuloquímicos de cada fração. No total, foram geradas 224 amostras de ensaios granuloquímicos e 32 amostras tal qual.

A Tabela 4.11 mostra o resumo dos teores das amostras. As colunas AP (Amostra) e AG (Amostra) se referem ao resultado analítico das amostras tal qual. As colunas AP (Frações) e AG (Frações) são referentes à média composta com os teores de cada fração granulométrica analisada.

Tabela 4.11 – Resultados químicos, teor de P_2O_5 , das amostras do fogo 55 da bancada -100.

Teor de P_2O_5 das amostras dos furos				
Amostra/Furo	AP (Amostra)	AG (Amostra)	AP (Frações)	AG (Frações)
31	5,42	5,17	5,91	5,49
32	6,18	5,79	5,86	6,13
34	4,44	4,20	4,94	4,56
36	5,73	4,57	5,34	5,19
37	5,41	5,41	6,05	5,94
39	5,92	5,08	5,69	5,28
41	4,69	3,99	4,78	3,89
42	5,67	5,08	5,55	4,44

A Figura 4.34 mostra o gráfico feito a partir dos dados da tabela acima.

Figura 4.34 – Gráficos comparativos entre as amostras AP e AG.

A Figura 4.34a mostra que todas as amostras AP tal qual possuem teor de P_2O_5 superior ao teor das amostras AG.

A Figura 4.34b mostra que o fato se repete com o teor médio composto das frações granulométricas, menos da amostra do furo 32, em que a amostra AG possui teor de P_2O_5 mais elevado que a amostra AP

Os dados completos das amostras deste teste consta do Anexo 1.

A Figura 4.35 mostra que tanto o teor de P_2O_5 das amostras AP podendo ser tal qual, ou das amostras compostas são mais elevados que das amostras AG, embora estejam dentro de uma variação de $\pm 10\%$, conforme delimitação mostrada pelas linhas tracejadas na cor vermelha dos gráficos.

Figura 4.35 – Correlação entre o teor de P_2O_5 das amostras grandes e pequenas.

Novamente neste teste ficou comprovado que as amostras AP apresentam resultados analíticos de P_2O_5 mais elevados que as amostras AG. No entanto, neste caso, quando as amostras AG foram coletadas, já havia sido retirada uma parte do pó-de-perfuratriz, que era a amostra AP. Buscando a verificação do efeito da retirada destas amostras, procedeu-se um outro teste realizado em mais quatro furos gêmeos.

4.6 Verificação do efeito da retirada da amostra no pó remanescente, não amostrado

Embora o teste anterior tenha confirmado que as amostras AP apresentam teor de P_2O_5 mais elevados que as amostras AG, deve-se levar em conta que, no caso

da coleta das amostras AG, parte do pó-de-perfuratriz já havia sido coletada para formação das amostras AP, o que poderia levar a questionamentos relativos aos efeitos que isso poderia causar no pó remanescente.

Com o objetivo de investigar o efeito da retirada da amostra AP, foi realizada outra amostragem, através da perfuração de quatro furos gêmeos, executados ao lado de furo de sondagem, a uma distância de 0,50 m deste furo e com a mesma atitude do furo de sondagem, como pode ser observado na Figura 4.36.

Os resultados das análises químicas de P_2O_5 destas amostras de pó-de-perfuratriz podem ser comparados com os resultados das amostras de sondagem rotativa, uma vez que as amostras coletadas representam o mesmo intervalo de 5 m adotados para as amostras de sondagem. As Tabelas 4.12 e 4.13 mostram os dados dos furos realizados.

Figura 4.36 – Posicionamento da perfuratriz Atlas Copco ROC D7 para execução do furo CP 234P.

As amostras de pó-de-perfuratriz foram retiradas obedecendo ao mesmo intervalo que as amostras de sondagem. Portanto, o primeiro intervalo de cada furo, como por exemplo, CP126_P0, que corresponde à primeira amostra do furo CP126_P com comprimento de 1,20 m não foi coletado. Assim, o próximo intervalo perfurado, que vai de 1,20 m a 6,20 m, corresponde ao mesmo intervalo da amostra de sondagem rotativa. Este procedimento foi adotado em todos os furos.

Tabela 4.12 – Dados dos furos CP126P e CP234P.

Furo	CP126P	CP234P
Coord. Leste (m)	790.404,46	790.426,20
Coord. Norte (m)	7.265.314,96	7.265.210,44
Cota (m)	-79,52	-89,83
Litologia	CBF	CBF
Direção	N153°	N153°
Inclinação	45°	45°

FURO	Código das amostras pequenas	Intervalo (m)		Comprimento (m)	Massa real das amostras (kg)			Massa Teórica (kg)	Codigo das amostras restantes
		De	Ate		Pequena	Restante	Total		
CP126P	CP126_P0	0,00	1,20	1,20					
	CP126_P1	1,20	6,20	5,00	5,75	70,30	76,05	87,79	CP126_P1R
	CP126_P2	6,20	11,20	5,00	6,30	85,45	91,75	87,79	CP126_P2R
	CP126_P3	11,20	16,20	5,00	6,00	80,50	86,50	87,79	CP126_P3R
	CP126_P4	16,20	21,20	5,00	6,25	81,75	88,00	82,52	CP126_P4R
	Total			21,20	24,30	318,00	342,30	345,88	
CP234P	CP234_P0	0,00	0,60	0,60					
	CP234_P1	0,60	5,00	4,40	5,55	67,85	73,40	76,98	CP234_P1R
	CP234_P2	5,00	10,00	5,00	5,55	85,30	90,85	87,48	CP234_P2R
	CP234_P3	10,00	15,00	5,00	6,25	78,80	84,95	87,48	CP234_P3R
	CP234_P4	15,00	19,40	4,40	5,50	71,05	76,55	76,98	CP234_P4R
	Total			19,40	22,85	302,90	325,75	328,91	

Tabela 4.13 – Dados dos furos CP126G e CP234G.

Furo	CP126G	CP234G
Coord. Leste (m)	790.405,34	790.427,09
Coord. Norte (m)	7.265.315,43	7.265.210,90
Cota (m)	-79,50	-89,83
Litologia	CBF	CBF
Direção	N153°	N153°
Inclinação	45°	45°

FURO	Código das amostras pequenas	Intervalo (m)		Comprimento (m)	Massa real das amostras (kg)			Massa Teórica (kg)
		De	Ate		Grosso	Fino	Total	
CP126G	CP126_G0	0,00	1,20	1,20				
	CP126_G1	1,20	6,20	5,00	30,50	27,95	58,45	87,79
	CP126_G2	6,20	11,20	5,00	60,80	44,40	105,20	87,79
	CP126_G3	11,20	16,20	5,00	50,30	42,30	92,60	87,79
	CP126_G4	16,20	20,80	4,60	45,30	42,85	88,15	81,47
	Total			20,80	186,90	157,50	344,40	344,83
CP234G	CP234_G0	0,00	0,60	0,60				
	CP234_G1	0,60	5,60	5,00	36,00	34,60	70,60	87,48
	CP234_G2	5,60	10,60	5,00	44,60	40,10	84,70	87,48
	CP234_G3	10,60	15,60	5,00	51,20	40,60	91,80	87,48
	CP234_G4	15,60	20,60	5,00	52,90	47,60	100,50	87,48
	Total			20,60	184,70	162,90	347,60	349,91

Os furos executados foram identificados com as letras P, G e PR. As amostras com o código P se referem àquelas obtidas da forma rotineira de trabalho (três alíquotas de cada monte de pó resultante da perfuração). O pó que sobrou em cada intervalo foi também amostrado, recebendo o código PR, que significa amostra restante. As amostras com a letra G são aquelas das quais não foi retirada a amostra pequena.

Assim, ao lado do furo de sondagem CP234, foi executado o furo CP234P, daí foram coletadas as amostras CP234_P1, CP234_P2, CP234_P3 e CP234_P4. Estas amostras representam intervalos com comprimento de cerca de 5 m, conforme Tabela 4.11. Após a coleta de cada uma destas amostras, o pó remanescente foi recolhido em sua totalidade, formando as amostras CP234_P1R até a amostra CP234_P4R.

Da mesma maneira, ao lado do mesmo furo de sondagem rotativa foi executado o furo CP234_G. Neste caso, somente foram coletadas as amostras de cada intervalo integralmente, recebendo o código CP_234G1, até CP_234G4, não sendo, portanto, coletada as amostras AP.

O valor da massa teórica das amostras foi obtido pela multiplicação do volume do furo pela densidade do minério amostrado que, no caso do CBI e CBF são 2,82 e 2,83, respectivamente. Esta informação é importante pois irá proporcionar o conhecimento sobre a recuperação do pó amostrado, que neste caso foi muito satisfatória.

As amostras AG e R, foram preparadas de acordo com o fluxograma mostrado anteriormente na Figura 4.17.

No total foram obtidas 264 amostras, das quais 240 de ensaios granuloquímicos e 24 amostras tal qual. As amostras AP foram preparadas de acordo com o fluxograma na Figura 4.37.

Figura 4.37 – Fluxograma de preparação das amostras AP de pó-de-perfuratriz.

4.6.1 Resultados dos furos CP234_P e CP_234_G

A Tabela 4.14 mostra os dados das amostras dos furos CP234_P e G.

Tabela 4.14 – Dados dos furos inclinados CP234_P e CP234_G.

Amostra	234 G1		234 G2		234 G3		234 G4	
Malha	%M. G1	P ₂ O ₅	%M. G2	P ₂ O ₅	%M. G3	P ₂ O ₅	%M. G4	P ₂ O ₅
+10#	1,16	0,66	2,09	1,31	1,25	2,01	0,92	1,90
-10+20#	2,16	0,55	3,36	0,75	3,36	1,54	2,46	2,19
-20+28#	2,71	0,60	3,46	1,02	3,88	1,84	3,33	2,59
-28+35#	5,42	0,77	7,02	1,83	6,67	2,23	6,45	2,95
-35+48#	5,52	1,06	6,56	2,83	7,15	2,66	6,25	4,20
-48+65#	7,38	1,14	7,74	3,71	8,20	3,26	8,81	5,17
-65+100#	10,25	0,96	10,38	4,41	11,46	3,56	10,45	6,25
-100+200#	20,59	1,03	19,95	5,08	20,96	4,17	22,07	6,90
-200+325#	10,70	0,94	9,82	4,31	10,94	4,64	10,65	7,26
-325#	34,10	1,12	29,62	3,62	26,14	5,25	28,62	7,56
Composto	100,00	1,01	100,00	3,65	100,00	3,92	100,00	6,18
Tal Qual		1,11		3,82		4,04		6,22

Amostra	234 P1		234 P2		234 P3		234 P4	
Malha	%M. P1	P ₂ O ₅	%M. P2	P ₂ O ₅	%M. P3	P ₂ O ₅	%M. P4	P ₂ O ₅
+10#	4,21	1,54	4,00	1,09	3,69	1,88	3,07	1,88
-10+20#	4,79	0,78	4,70	0,48	3,19	2,94	3,72	2,94
-20+28#	5,52	0,57	5,15	0,60	3,84	3,20	4,18	3,20
-28+35#	8,58	0,78	8,60	1,03	6,88	4,25	7,95	4,25
-35+48#	7,18	0,98	9,30	1,79	6,67	5,61	8,25	5,61
-48+65#	10,30	1,16	10,15	2,78	8,65	6,42	9,91	6,42
-65+100#	12,02	1,28	13,20	3,44	12,34	7,51	13,74	7,51
-100+200#	18,26	1,46	21,00	3,56	25,08	8,21	23,60	8,21
-200+325#	8,53	1,63	8,65	2,72	11,98	8,59	10,22	8,59
-325#	20,60	1,89	15,25	2,52	17,69	9,15	15,35	9,15
Composto	100,00	1,34	100,00	2,46	100,00	7,14	100,00	6,99
Tal Qual		1,98		3,83		1,24		6,34

Amostra	234 P1R		234 P2R		234 P3R		234 P4R	
Malha	%M. P1R	P ₂ O ₅	%M. P2R	P ₂ O ₅	%M. P3R	P ₂ O ₅	%M. P4R	P ₂ O ₅
+10#	4,35	1,57	3,97	1,55	3,22	2,92	3,04	3,56
-10+20#	3,69	0,93	4,23	0,78	3,27	1,90	4,31	3,48
-20+28#	3,49	0,59	3,62	0,79	3,22	2,26	4,26	4,03
-28+35#	5,81	0,58	6,72	1,14	6,97	2,59	7,70	4,65
-35+48#	5,46	1,05	6,47	1,92	5,28	2,94	7,20	5,67
-48+65#	7,13	1,29	7,69	2,71	7,50	3,42	8,77	6,44
-65+100#	9,15	1,58	9,88	3,45	10,19	4,00	11,15	7,27
-100+200#	17,14	2,23	17,11	3,48	21,22	4,92	19,51	7,79
-200+325#	10,97	2,37	9,37	3,04	10,77	4,91	9,68	8,25
-325#	32,81	2,27	30,96	2,80	28,35	5,40	24,38	8,91
Composto	100,00	1,84	100,00	2,62	100,00	4,33	100,00	7,06
Tal Qual		1,89		2,38		4,39		6,87

A Figura 4.38 mostra as distribuições das massas retidas nas amostras, comparando %M.Gn, %M.Pn e %M.PnR, que significam a porcentagem de massa retida em cada fração granulométrica de cada amostra. Pode-se notar que, em todas os casos, as curvas das amostras G e PR são mais semelhantes entre si que das amostras P que, embora tenha um comportamento parecido, possui patamares diferentes e, em determinada faixa granulométrica, cruza com as curvas das outras duas amostras.

Figura 4.38 – Distribuição granulométrica acumulada das amostras. Furos CP234_P e CP234_G.

A Figura 4.39 mostra a distribuição do teor de P_2O_5 retido acumulado das diferentes frações granulométricas. Novamente, pode-se notar que as amostras G possuem comportamento similar às amostras PR, apresentando as mesmas tendências e um certo “paralelismo”, o que não ocorre com as amostra P em relação a estas.

Figura 4.39 – Distribuição de P_2O_5 acumulada (acima) das amostras. Furos CP234_P e CP234_G.

Os gráficos mostrados nas figuras a seguir, apresentam as correlações das massas retidas nas diferentes frações granulométricas, entre as amostras P e G, P e PR e PR e G, onde a linha azul representa uma correlação de 100% o que é altamente desejável, as linhas vermelhas uma variação de $\pm 10\%$ em torno da correlação de 100% e a linha preta a correlação entre as amostras observadas no gráfico.

Figura 4.40 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e G. Furos CP234_P e CP234_G.

A Figura 4.40 mostra que comparativamente, as amostras G tiveram, na maioria dos casos, menor quantidade de material retido nas respectivas malhas, que as amostras P. Fato que pode ser observado pela reta, na cor preta, de correlação entre as amostras.

A Figura 4.41 mostra os gráficos de correlação entre as amostras P e PR do furo CP 234. É facilmente observável a semelhança entre os gráficos mostrados na Figura 4.40. Isto significa que, o efeito de retirada da amostra pequena não causa grande modificação nas distribuições granulométricas do material restante.

Figura 4.41 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e PR. Furos CP234_P e CP234_G.

Como pode ser visto na Figura 4.42, todas as amostras PR e G observadas apresentam boa correlação com valores inferiores a $\pm 10\%$.

Figura 4.42 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras PR e G. Furos CP234_P e CP234_G.

Figura 4.43 – Comparação entre resultados das amostras de sondagem e das amostras dos furos CP234_P e CP234_G.

4.6.2 Comentários sobre os resultados dos furos CP234_P e CP234_G

A Figura 4.43 mostra as comparações entre os resultados das amostras de sondagem do furo CP234 e das amostras de pó-de-perfuratriz. Os teores de P_2O_5 das amostras tal qual do furo CP234_P (P1, P2 e P3) apresentam a mesma tendência que as amostras de sondagem, embora com valores inferiores, o que não ocorre com as amostras P4.

No entanto, os valores das amostras tal qual e das médias das frações granulométricas das amostras P são muito diferentes entre si.

Quando comparadas entre si, os valores das amostras PR tal qual e das médias das frações granulométricas possuem valores muito semelhantes, mas divergem muito dos resultados das amostras de sondagem.

Os resultados das amostras tal qual e das médias das frações granulométricas do furo CP234_G, apresentam a mesma tendência de teor de P_2O_5 , inclusive, as amostras G1, G2 e G3 apresentam a mesma tendência que os valores das amostras de sondagem, fato que não se repete com as amostras G4.

4.6.3 Resultados dos furos CP126_P e CP126_G

Como pode ser visto na Figura 4.44, a distribuição granulométrica das amostras G, PR e P dos furos CP126_P e CP126_G indica que, em todos os casos, as curvas das amostras G e PR são mais semelhantes entre si que das amostras P que, embora tenha um comportamento parecido, apresentam patamares diferentes

e, em determinada faixa granulométrica, cruza com as curvas das outras duas amostras. A Tabela 4.15 mostra os dados das amostras dos furos CP126_P e G.

Tabela 4.15 – Dados dos furos inclinados CP126_P e CP126_G.

Amostra	126 G1		126 G2		126 G3		126 G4	
Malha	%M. G1	P ₂ O ₅	%M. G2	P ₂ O ₅	%M. G3	P ₂ O ₅	%M. G4	P ₂ O ₅
+10#	3,55	1,36	5,13	1,97	3,72	1,66	2,30	1,49
-10+20#	5,59	0,97	6,34	1,39	4,70	1,44	3,54	1,05
-20+28#	5,92	0,75	5,18	1,07	5,56	0,99	3,79	0,71
-28+35#	8,34	0,82	9,21	0,88	9,61	0,69	8,74	0,63
-35+48#	6,64	1,74	7,39	1,22	7,61	0,66	6,49	1,17
-48+65#	8,20	4,13	8,40	2,55	9,39	1,32	8,39	3,14
-65+100#	9,72	7,81	9,71	5,81	9,61	3,89	11,43	6,19
-100+200#	17,87	10,71	18,11	8,95	18,89	7,23	19,87	7,42
-200+325#	8,72	9,09	8,65	7,87	8,26	5,69	8,74	5,43
-325#	25,45	6,61	21,88	5,48	22,67	4,06	26,71	5,02
Composto	100,00	5,82	100,00	4,69	100,00	3,55	100,00	4,49
Tal Qual		5,26		4,55		3,53		4,62

Amostra	126 P1		126 P2		126 P3		126 P4	
Malha	%M. P1	P ₂ O ₅	%M. P2	P ₂ O ₅	%M. P3	P ₂ O ₅	%M. P4	P ₂ O ₅
+10#	6,75	1,53	5,35	1,02	2,99	1,85	1,30	1,74
-10+20#	9,34	0,92	6,22	1,27	4,61	1,29	3,44	1,10
-20+28#	8,22	0,70	7,78	0,78	6,60	0,94	4,74	0,81
-28+35#	11,52	0,80	10,55	0,66	10,07	0,76	9,22	0,60
-35+48#	8,73	1,97	10,55	1,07	10,64	0,92	9,02	0,89
-48+65#	9,99	4,83	10,50	2,47	12,26	2,06	11,62	2,53
-65+100#	10,91	8,81	13,08	5,26	13,68	4,73	13,71	5,69
-100+200#	17,00	11,64	19,74	8,41	21,95	8,30	23,18	8,23
-200+325#	6,09	10,06	6,90	7,18	7,22	6,59	9,57	6,36
-325#	11,47	7,38	9,33	5,46	9,98	4,97	14,21	4,80
Composto	100,00	5,39	100,00	3,99	100,00	4,04	100,00	4,51
Tal Qual		5,55		3,64		3,98		4,67

Amostra	126 P1		126 P2		126 P3		126 P4	
Malha	%M. P1R	P ₂ O ₅	%M. P2R	P ₂ O ₅	%M. P3R	P ₂ O ₅	%M. P4R	P ₂ O ₅
+10#	3,37	1,67	3,50	1,40	2,51	1,83	1,85	2,15
-10+20#	4,86	1,05	4,89	1,02	4,03	1,37	3,06	1,31
-20+28#	4,96	0,75	5,47	0,81	5,41	0,96	3,89	0,91
-28+35#	7,54	0,92	8,92	0,69	8,68	0,72	8,51	0,77
-35+48#	5,46	2,25	7,19	1,02	7,02	0,87	6,42	1,09
-48+65#	6,99	5,14	8,01	2,32	8,30	1,78	8,70	2,52
-65+100#	7,69	8,95	10,26	5,18	10,44	4,78	11,33	5,30
-100+200#	16,87	11,38	18,18	8,33	19,83	7,69	20,71	7,64
-200+325#	8,98	9,51	9,59	7,37	8,63	6,28	10,50	6,27
-325#	33,28	7,20	23,98	5,22	25,14	4,51	25,04	5,16
Composto	100,00	6,55	100,00	4,47	100,00	4,12	100,00	4,60
Tal Qual		6,33		4,55		4,09		4,66

Figura 4.44 – Distribuição granulométrica acumulada das amostras. Furos CP126_P e CP126_G.

A Figura 4.45 mostra que, em relação ao teor de P_2O_5 retido acumulado, novamente as amostras G e PR são mais parecidas entre si e ambas são mais diferentes que as amostras P, que apresentam teor acumulado mais elevado por fração.

Figura 4.45 – Distribuição de P_2O_5 acumulada (acima) das amostras. Furos CP126_P e CP126_G.

Figura 4.46 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e G. Furos CP126_P e CP 126_G.

A Figura 4.46 mostra a correlação existente entre as distribuições de massas retidas das amostras P e G e indica, em geral, as amostras G possuem menor quantidade de relativa de material retido.

Comparativamente, a correlação entre a porcentagem de massa retida das amostras P e PR é semelhante à correlação entre as amostras P e G, como mostrado na Figura 4.47. Pode-se notar que as tendências são exatamente as mesmas, embora com valores diferentes. A correlação entre as amostras P1 e G1, estão com valores fora da faixa de tolerância de -10%. Com as amostras P1 e P1R, ocorre o mesmo comportamento.

Da mesma maneira, pode ser observado que a correlação entre as amostras P2 e G2 estão muito próximas do limite demarcado de variação de -10%, assim como as amostras P2 e P2R. O mesmo fenômeno se observa no restante das amostras.

Figura 4.47 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras P e PR. Furos CP126_P e CP126_G.

As melhores correlações sobre a porcentagem de massa retida foram obtidas entre as amostras PR e G, que é mostrada na Figura 4.48.

Figura 4.48 – Correlação entre as distribuições de massas retidas das amostras PR e G. Furo CP126_P e CP126_G.

A Figura 4.49 mostra a comparação entre o teor de P_2O_5 das amostras tal qual e compostas de pó-de-perfuratriz dos dois furos, CP126_P e CP126_G, com as amostras de sondagem do furo CP126. Nitidamente pode-se notar a grande semelhança entre os valores das amostras G tal qual com as amostras de sondagem.

As amostras P3 e P4 tal qual e compostas apresentam valores muito próximos dos valores das amostras de sondagem, assim como as amostras P3R e P4R.

Figura 4.49 – Comparação entre resultados das amostras de sondagem e das amostras dos furos CP126_P e CP126_G.

4.6.4 Comentários sobre os resultados dos furos CP126_P e CP126_G

O teste realizado com furos gêmeos demonstrou, de forma muito clara, que as amostras, da forma como são rotineiramente coletadas (as amostras P), possuem distribuição granulométrica muito diferente daquela apresentada pelas amostras PR e G, evidenciando o problema do método de coleta.

No caso dos furos CP126_P e CP126_G, o teste indicou que os resultados analíticos que mais se aproximaram do teor das amostras de sondagem foram das amostras integrais dos furos (amostras G), embora com patamares diferentes.

Pode-se notar que as maiores diferenças, quando se compara o teor de P_2O_5 das amostras tal qual e das médias das frações granulométricas, ocorrem nas amostras P.

Os testes realizados nos quatro furos gêmeos realçaram que de fato ocorre um viés nas amostras pequenas. As amostras PR e G apresentam maior semelhança

tanto em seus resultados analíticos de P_2O_5 , quanto em suas distribuições granulométricas, indicando que a coleta do furo integral seria a melhor solução.

4.7 Conclusões

O problema da representatividade das amostras de pó-de-perfuratriz na Mina de Cajati é um desafio presente que precisa ser enfrentado. Nos testes realizados ficou evidente que, da forma que as amostras de pó-de-perfuratriz são coletadas, não podem ser utilizadas para controle de lavra.

Em todos os ensaios conduzidos nesta pesquisa, o teor de P_2O_5 das amostras de pó-de-perfuratriz coletadas de forma rotineira (amostras pequenas) apresentaram valores mais elevados que quando se amostra o furo integral. Isto comprova que o controle de qualidade do minério lavrado, feito com base nestas nas informações obtidas com estas amostras, proporciona uma informação errada para o cliente da mina, que é a usina de concentração.

Os conflitos gerados por estas informações incorretas causam muito desgastes entre as operações da mina e da usina e, na maioria dos casos, consome grande quantidade de tempo e energia na busca de justificativas quando o processo vai mal, pois, é justamente sobre as informações fornecidas pelas amostras de pó-de-perfuratriz que são tomadas decisões para adequação de todo o processo produtivo, tanto da mina, quanto da usina.

A amostragem de pó-de-perfuratriz, embora seja prática adotada em várias empresas de mineração e nos mais variados tipos de minério, carece de maior atenção por parte dos responsáveis das operações envolvidas. Caso não se desenvolva alguma técnica para melhorar a representatividade, que ao que tudo indica está associada ao método de obtenção, este tipo de amostragem deve ser definitivamente abolido para fins de controle de qualidade da lavra.

No entanto, as amostras de pó-de-perfuratriz carregam em si uma vantagem econômica atraente e desde que seja desenvolvido procedimento de coleta correto, é perfeitamente aceitável que se dedique esforços em encontrar meios para sua viabilização pois, o simples fato de ter amostras disponíveis e economicamente atrativas, não garante absolutamente sua representatividade. Neste caso, existe a necessidade de desenvolver técnicas de coleta que sejam suficientemente

produtivas e que proporcionem amostras representativas e que causem o menor impacto possível nos custos e nas operações de lavra.

Os testes realizados mostraram também que, caso não seja possível a adaptação de um sistema de amostragem, será totalmente impraticável associar a amostragem de furo integral com as operações rotineiras de perfuração. Na prática, se busca o aproveitamento de uma amostra disponível, a custo zero, pois o pó-de-perfuratriz, de qualquer maneira, será gerado, o que não significa que poderá ser amostrado sem o rigor que tal atividade exige.

Como as perfuratrizes utilizadas na Mina de Cajati são máquinas de alta performance e elevada produtividade, é impossível realizar a amostragem integral dos furos sem que seja provocado algum prejuízo para a operação de perfuração.

O amostrador testado mostrou-se ineficiente. No entanto, sua utilização depende ainda de novos testes que deverão ser realizados na tentativa de conseguir sua viabilizá-lo. Caso isto seja conseguido, teríamos uma solução econômica, inovadora e funcional

Assim, na Mina de Cajati, caso se queira dar continuidade a amostragem de pó-de-perfuratriz, só serão válidas amostras de furo integral, com a respectiva alocação de uma perfuratriz para esta finalidade. Esta atividade deverá ser feita em perfeita sintonia com o planejamento de lavra de curto prazo, antecipando a amostragem nas frentes onde a lavra será realizada.

Deve-se ressaltar, entretanto, que estas amostras servirão somente para o controle de teores no curto e curtíssimo prazo, não substituindo de forma alguma as sondagens rotativas a diamante que possui finalidades muito mais abrangentes e complexas que o simples controle de teores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUAYO, R. **Dr. Deming o americano que ensinou a qualidade total aos japoneses**. Rio de Janeiro: Record, 1993. 349 p.

AMARAL, G. Potassium-argon age studies on the Jacupiranga alkaline district, Satate of Sao Paulo, Brazil. In: First Symp. Carbonatites, 1. Poços de Caldas, 1978. **Procededings..** Poços de caldas. P. 297-298.

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 165 p.

ARMSTRONG, M. **Basic Linear Goestatistics**. Neu York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg., 1998. 146 p.

BARNES, M.P. **Computer assisted mineral appraisal and feasibility**. New York: Soc. Min. Eng, 1980. 167p.

BARROS, G. **Reavaliação geoestatística dos recuros/reservas de fosfato da mina de Cajati, SP**. 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CAMPOS, V. F. TQC – **Controle da qualidade total (no estilo japonês)**. 4^a. ed. Bloch Ed. Rio de Janeiro, 1992. 229 p.

CHIAVENATO, I. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 6^a ed. Atlas: São Paulo, 2002.

CHIEREGATI, A. C. **Reconciliação pró-ativa em empreendimentos mineiros**. 2007. 201 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Edição revisada, São Paulo, 2007.

CLARK, I. **Pratical geoestatistics**. London: Applied Science Publishers LTD., 1979. 129 p.

CORRÊA, C. A., CORRÊA, H. L. **Administração de Produção e Operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 2^a ed. Atlas, São Paulo, 2006. 694 p.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção: MRP II/ ERP: conceitos, uso e implantação**. 4^a ed. São Paulo: Atlas, 2001. 452 p.

DATAMINE. Tutorial Estima Datamine. Junho 2002.

DERBY, O. A. **The magnetite ore districts of Jacupiranga and Ipanema, São Paulo, Brazil**. American Journal of Science. Series 3. v. 141, p. 311-321, 1891.

GAMBIM, F.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. **Estratégia de controle de qualidade de minérios na lavra utilizando simulação geoestetística**. Revista da Escola de Minas, n. 58(3), p. 193-200, jul. set. 2005.

GASPAR, J. C. **Gelologie et mineralogie du complexe carbonatitique de Jacupiranga, Bresil.** 1989. 344 f. Tese (Doutorado) – U. E. R. de Sciences Fondamentales et Appliquées, Université d'Orleans, França, 1989.

GERMAN, A.; MARKER, A.; FRIEDRICH, G. **The alkaline complex of Jacupiranga, São Paulo, Brazil, Petrology and genetic consideration.** Zentralblatt fuer Geologie und Paleontologie. n. 7/8, p. 807-818, 1987.

GIL, J. Q. C. **Elementos de geoestadística.** Departamento de Informática Universidad de Pinar del Río. Cuba. Disponível em: <http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>. Acessado em 07 Ago.2006.

GRIGORIEFF, A.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. **O problema de amostragem manual na indústria mineral.** Revista da Escola de Minas, n. 55(3), p. 229-233, jul. set. 2002.

GY, P. **Sampling of particulate materials, theory and practice.** Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979. 431 p.

Introdução à Geoestatística. Análise de Continuidade Espacial por Variograma. Modelagem do Variograma Experimental. Isotropia e Anisotropia. Validação Cruzada. Disponível em: www.solos.ufmt.br/docs/geoestatistica/aulapg.pdf - Acessado em 02 Nov 2007.

ISAAKS, E. H.;SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geoestistics.** New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JURAN, J. M. **A qualidade desde o projeto: Os novos passos para o planejamento da qualidade em produtos e serviços.** São Paulo: Cengage Learning, 2009. 551 p.

MARANHÃO, R. J. L **Introdução à pesquisa mineral.** 2ª ed. Fortaleza: ETENE, 1982. 682 p.

MARTINS, G. A. **Estatística geral e aplicada.** 3ª ed. São Paulo. Atlas, 2005. 428 p.

McKINSTRY, H. E. **Geología de Minas.** 2.ª ed. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1970. 671 p.

MELCHER, G. C. **O carbonatito de Jacupiranga.** São Paulo: Boletim da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Sociais da Universidade de São Paulo, 1966.

MENEZES JR., L. A. D.; MARTINS, J. M. **The Jacupiranga Mine, São Paulo, Brazil.** The Mineralogical Record. v. 15. n. 5, p. 261-270, 1984.

OVALLE, I. I.;TOLEDO, G. L. **Estatística básica.** 2ª ed. São Paulo: Atlas, 1985. 459 p.

PALADINI, E. P. **Controle de qualidade – uma abordagem abrangente.** São Paulo: Atlas, 1990. 239 p.

_____, E. P. **Gestão estratégica da qualidade: princípios, métodos e processos**. São Paulo: Atlas, 2008. 202 p.

PERONI, R. L. **Análise da sensibilidade do seqüenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico**. 2002. 143 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2002.

PILGER, G.G. **Critérios para locação amostral baseados em simulação estocástica**. 2000. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2000.

PIOVESAN, P. **Validação cruzada com correção de autovalores e regressão isotônica nos modelos AMMI**. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2000.

RAPOSO, D. B. **Investigação tecnológica em minério carbonatítico de Cajati-SP, utilizado como matéria prima na produção de foscálcio**. 2002. 28 f. Monografia (Trabalho de formatura) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

REVUELTA, M. B.; JIMENO, C. L. **Manual de evaluacion y diseño de explotaciones mineras**. 1. ed. Madrid: Editora Entorno Gráfico S.L., 1997. 708 p.

RODEN, M. F., MURTHY, V. R., GASPAR, J. C. **Sr and Nd isotropic composition of the Jacupiranga carbonatite**. J. Geol. n. 93, p. 212-220.

RUBERTI, E.; MARGUTI, R. L.; GOMES, C. B. O Complexo Carbonatítico de Jacupiranga, SP: Informações gerais. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia, 1992. São Paulo. **Roteiro das excursões**. São Paulo: SBG, 1992. v. 4, 16 p.

SAITO, M.; BONÁS, T. B.; BETTENCOURT, J. S. Mapeamento geológico de detalhe da Mina de Cajati (SP): Modelo conceitual e aplicação à lavra, produção e beneficiamento. **XLII Congresso Brasileiro de Geologia – Expogeo 2004 – Exposição Brasileira de Geologia. Recursos Minerais e Desenvolvimento Sócio-Econômico**. 17 a 22 de outubro de 2004. Araxá, MG. 1:CD.

SENHORINHO, N. S. **Otimização de cava em minas de calcário pra cimento**. 2001. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SIRONVALLE, M. A. A. **Introducción al mustreo minero**. Santiago: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2002. 83 p.

SLACK, N.; STUART, C.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2002. 747 p.

SMAILES, J.; McGRANE, A. **Estatística aplicada à administração com Excel**. São Paulo: Atlas, 2002. 321 p.

SOUZA, L.E. **Estimativa de incerteza e sua aplicação na classificação de recursos minerais**. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2002.

STEVENSON, W. J. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: Ed. Harbra Ltda, 1981. 495 p.

VALENTE, J.M.G.P **Amostragem de minérios para análise de elementos com “baixos teores”**. In. Simpósio EPUSP de caracterização tecnológica na engenharia e indústria mineral. São Paulo, 1990. **Anais**. São Paulo. EPUSP, 1990. p. 101-123.

_____, J.M.G.P. **Geomatématica – Lições e geoestatística**. Ouro Preto: Fundação Gorciex, 1982. v. 6, p. 1403-1724.

YAMAMOTO, J.K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. São Paulo: Edusp, 2001. 226 p.

Tabela A1.1 – Amostras do furo 31.

Tabela A1.2 – Amostras do furo 32.

FURO 32												
MALHA	Amostra Grande (AG)			Massa (g) 169,10			Amostra Pequena (AP)			Massa (g) 214,70		
	% Massa		Recuperação em massa (%)			96,87	% Massa		Recuperação em massa (%)			96,55
	Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima	Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima
+5#	1,16	1,16	2,44	0,46	0,03	0,03	1,83	1,83	1,68	0,53	0,03	0,03
+7#	2,38	3,54	2,71	1,05	0,06	0,09	2,46	4,29	2,36	0,99	0,06	0,09
+10#	2,01	5,56	1,85	0,61	0,04	0,13	3,38	7,67	1,84	1,06	0,06	0,15
+12#	1,71	7,26	1,49	0,42	0,03	0,16	1,45	9,12	1,48	0,37	0,02	0,17
+14#	0,43	7,69	1,44	0,10	0,01	0,16	0,00	9,12		0,00	0,00	0,17
+20#	3,85	11,54	1,13	0,71	0,04	0,21	5,69	14,81	1,19	1,16	0,07	0,24
+28#	4,09	15,63	0,96	0,64	0,04	0,24	6,75	21,56	0,96	1,11	0,06	0,30
+35#	6,65	22,28	1,09	1,18	0,07	0,32	10,03	31,60	1,29	2,21	0,13	0,43
+48#	5,13	27,41	2,29	1,92	0,12	0,43	6,37	37,96	2,65	2,88	0,17	0,60
+65#	6,29	33,70	5,16	5,29	0,32	0,76	8,15	46,12	5,17	7,20	0,42	1,02
+100#	10,07	43,77	8,64	14,20	0,87	1,63	11,63	57,74	9,97	19,79	1,16	2,18
+200#	16,30	60,07	10,16	27,02	1,66	3,29	15,30	73,13	11,50	30,22	1,77	3,95
+325#	10,50	70,57	8,33	14,27	0,87	4,16	8,44	81,57	8,51	12,27	0,72	4,67
-325#	29,43	100,00	6,69	32,12	1,97	6,13	18,43	100,00	6,43	20,13	1,18	5,86
Total	100,00		6,13	100,00	6,13		100,00		5,86	100,00	5,86	
Teor da amostra tal qual			5,79							6,18		

Tabela A1.3 – Amostras do furo 34.

FURO 34												
MALHA	Amostra Grande (AG)					Massa (g)	222,90	Amostra Pequena (AP)				
	% Massa		Recuperação em massa (%)			96,95		% Massa		Recuperação em massa (%)		
	Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima		Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração
+5#	2,92	2,92	2,41	1,54	0,07	0,07		1,59	1,59	2,61	0,84	0,04
+7#	3,19	6,11	1,66	1,16	0,05	0,12		2,34	3,93	1,75	0,83	0,04
+10#	4,16	10,27	1,51	1,38	0,06	0,19		2,99	6,92	1,81	1,10	0,05
+12#	1,80	12,08	1,29	0,51	0,02	0,21		1,17	8,09	1,48	0,35	0,02
+14#	0,37	12,45	1,35	0,11	0,005	0,21		0,33	8,42	1,24	0,08	0,004
+20#	6,76	19,20	1,08	1,60	0,07	0,29		4,58	13,00	0,74	0,69	0,03
+28#	7,77	26,98	0,88	1,50	0,07	0,36		6,83	19,82	0,70	0,97	0,05
+35#	11,94	38,92	0,85	2,22	0,10	0,46		9,77	29,59	0,93	1,84	0,09
+48#	6,71	45,63	2,18	3,21	0,15	0,60		6,59	36,19	1,90	2,54	0,13
+65#	7,96	53,39	4,00	6,98	0,32	0,92		8,13	44,32	4,14	6,82	0,34
+100#	10,92	64,51	7,82	18,71	0,85	1,78		11,83	56,15	6,98	16,72	0,84
+200#	13,56	78,07	9,88	29,35	1,34	3,12		16,55	72,70	9,25	31,00	1,53
+325#	6,20	84,27	8,38	11,39	0,52	3,64		7,81	80,50	7,79	12,32	0,61
-325#	15,73	100,00	5,90	20,34	0,93	4,56		19,50	100,00	6,06	23,92	1,18
Total	100,00		4,56	100,00	4,56			100,00		4,94	100,00	4,94
Teor da amostra tal qual			4,20	4,44								

Tabela A1.4 – Amostras do furo 36.

FURO 36												
MALHA	Amostra Grande (AG)					Massa (g)	215,60	Amostra Pequena (AP)				
	% Massa		Recuperação em massa (%)			97,68		% Massa		Recuperação em massa (%)		
	Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima		Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração
+5#	2,66	2,66	1,80	0,92	0,05	0,05		0,80	0,80	1,83	0,28	0,01
+7#	3,61	6,27	1,85	1,28	0,07	0,11		2,55	3,35	2,07	0,99	0,05
+10#	4,80	11,06	1,95	1,80	0,09	0,21		2,93	6,28	1,88	1,03	0,06
+12#	2,14	13,20	1,36	0,56	0,03	0,24		1,98	8,27	1,43	0,53	0,03
+14#	0,71	13,91	1,48	0,20	0,01	0,25		0,43	8,69	1,05	0,08	0,00
+20#	6,27	20,18	1,13	1,37	0,07	0,32		4,20	12,90	0,75	0,59	0,03
+28#	6,89	27,07	0,94	1,25	0,06	0,38		6,90	19,79	0,70	0,90	0,05
+35#	10,68	37,75	1,01	2,08	0,11	0,49		9,83	29,62	0,69	1,27	0,07
+48#	7,83	45,58	1,80	2,71	0,14	0,63		6,33	35,95	1,50	1,78	0,09
+65#	7,41	52,99	4,43	6,32	0,33	0,96		8,93	44,87	4,45	7,44	0,40
+100#	10,30	63,30	8,63	17,12	0,89	1,85		12,28	57,16	8,17	18,79	1,00
+200#	13,68	76,97	11,48	30,23	1,57	3,42		16,72	73,88	11,08	34,69	1,85
+325#	6,79	83,76	9,11	11,91	0,62	4,04		8,22	82,10	7,97	12,26	0,65
-325#	16,24	100,00	7,11	22,24	1,155	5,19		17,90	100,00	5,77	19,36	1,03
Total	100,00		5,19	100,00	5,19			100,00		5,34	100,00	5,34
Teor da amostra tal qual			4,57	5,73								

Tabela A1.5 – Amostras do furo 37.

FURO 37

MALHA	Amostra Grande (AG)					Massa (g)	215,60	Amostra Pequena (AP)					Massa (g)	205,40
	% Massa		Recuperação em massa (%)			96,85	% Massa		Recuperação em massa (%)			97,52		
	Retida	Acumul.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima	Retida	Acumul.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima		
+5#	2,20	2,20	3,02	1,12	0,07	0,07	0,45	0,45	1,25	0,09	0,01	0,01		
+7#	1,82	4,02	2,83	0,87	0,05	0,12	1,80	2,25	2,03	0,60	0,04	0,04		
+10#	3,02	7,04	1,94	0,99	0,06	0,18	2,95	5,19	1,79	0,87	0,05	0,09		
-+12#	2,11	9,15	1,49	0,53	0,03	0,21	1,65	6,84	1,28	0,35	0,02	0,12		
+14#	0,43	9,58	1,61	0,12	0,01	0,21	0,45	7,29	1,47	0,11	0,01	0,12		
+20#	4,07	13,65	1,14	0,78	0,05	0,26	4,54	11,83	1,00	0,75	0,05	0,17		
+28#	6,47	20,11	0,89	0,97	0,06	0,32	5,74	17,57	0,82	0,78	0,05	0,22		
+35#	6,51	26,63	1,16	1,27	0,08	0,39	10,53	28,11	1,15	2,00	0,12	0,34		
+48#	6,90	33,52	2,60	3,02	0,18	0,57	7,39	35,50	2,32	2,83	0,17	0,51		
+65#	5,80	39,32	4,85	4,73	0,28	0,85	8,64	44,13	4,90	6,99	0,42	0,93		
+100#	10,68	50,00	8,91	16,03	0,95	1,81	11,28	55,42	8,62	16,06	0,97	1,90		
+200#	14,85	64,85	10,8	27,01	1,60	3,41	16,03	71,44	10,99	29,09	1,76	3,66		
+325#	8,62	73,47	8,90	12,92	0,77	4,18	7,49	78,93	6,88	8,51	0,52	4,18		
-325#	26,53	100,00	6,63	29,63	1,76	5,94	21,07	100,00	8,90	30,97	1,88	6,05		
Total	100,00		5,94	100,00	5,94		100,00		6,05	100,00		6,05		
Teor da amostra tal qual				5,41		5,41								

Tabela A1.6 – Amostras do furo 39.

FURO 39

MALHA	Amostra Grande (AG)					Massa (g)		228,50		Amostra Pequena (AP)					Massa (g)		229,10	
	% Massa		Recuperação em massa (%)			95,80		% Massa		Recuperação em massa (%)			97,69					
	Retida	Acumul.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima	Retida	Acumul.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima						
+5#	2,28	2,28	2,85	1,23	0,07	0,07	0,80	0,80	1,73	0,24	0,01	0,01						
+7#	3,11	5,39	2,10	1,23	0,07	0,13	1,92	2,73	1,58	0,53	0,03	0,04						
+10#	4,16	9,55	1,94	1,52	0,08	0,21	2,41	5,14	1,88	0,80	0,05	0,09						
+12#	2,19	11,74	1,17	0,49	0,03	0,24	1,70	6,84	1,65	0,49	0,03	0,12						
+14#	0,64	12,38	1,34	0,16	0,01	0,24	0,45	7,28	1,16	0,09	0,01	0,12						
+20#	6,81	19,19	0,99	1,27	0,07	0,31	4,42	11,71	1,04	0,80	0,05	0,17						
+28#	8,13	27,32	0,67	1,03	0,05	0,37	5,85	17,56	0,67	0,69	0,04	0,21						
+35#	11,24	38,56	1,05	2,24	0,12	0,48	9,74	27,30	0,76	1,31	0,07	0,28						
+48#	7,40	45,96	2,06	2,89	0,15	0,64	7,42	34,72	1,72	2,24	0,13	0,41						
+65#	7,90	53,86	4,53	6,78	0,36	1,00	9,29	44,01	4,46	7,28	0,41	0,82						
+100#	10,37	64,24	8,80	17,30	0,91	1,91	12,15	56,17	8,51	18,17	1,03	1,86						
+200#	14,12	78,35	11,70	31,30	1,65	3,56	17,11	73,28	10,67	32,09	1,83	3,68						
+325#	6,85	85,20	9,29	12,07	0,64	4,20	7,73	81,01	9,49	12,89	0,73	4,42						
-325#	14,80	100,00	7,30	20,48	1,08	5,28	18,99	100,00	6,70	22,37	1,27	5,69						
Total	100,00		5,28	100,00	5,28		100,00		5,69	100,00	5,69							
Teor da amostra tal qual			5,08					5,92										

Tabela A1.7 – Amostras do furo 41.

FURO 41

GRS 41

MALHA	Amostra Grande (AG)					Massa (g)	229,50	Amostra Pequena (AP)					Massa (g)	215,10
	% Massa		Recuperação em massa (%)				3,99	% Massa		Recuperação em massa (%)				96,79
	Retida	Acumul.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima	Retida	Acumul.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima		
+5#	1,84	1,84					1,34	1,34	1,66	0,47	0,02	0,02		
+7#	3,05	4,88	2,21	1,73	0,07	0,07	2,74	4,08	1,79	1,03	0,05	0,07		
+10#	4,39	9,27	1,43	1,62	0,06	0,13	2,79	6,87	1,42	0,83	0,04	0,11		
+12#	1,39	10,66	0,89	0,32	0,01	0,14	1,63	8,50	1,04	0,35	0,02	0,13		
+14#	0,63	11,29	0,77	0,12	0,005	0,15	0,67	9,17	1,06	0,15	0,01	0,12		
+20#	7,61	18,90	0,69	1,34	0,05	0,20	5,14	14,31	0,93	1,00	0,05	0,18		
+28#	8,28	27,18	0,46	0,97	0,04	0,24	5,91	20,22	0,73	0,87	0,04	0,22		
+35#	11,78	38,96	0,43	1,29	0,05	0,29	9,80	30,02	0,62	1,27	0,06	0,29		
+48#	7,88	46,84	1,43	2,89	0,11	0,40	7,73	37,75	1,36	2,19	0,10	0,39		
+65#	8,02	54,86	2,89	5,95	0,23	0,63	7,73	45,49	3,15	5,09	0,24	0,63		
+100#	10,98	65,79	6,56	18,42	0,72	1,35	11,96	57,44	6,93	17,32	0,83	1,46		
+200#	13,97	79,76	9,27	33,28	1,29	2,64	15,85	73,29	9,87	32,71	1,56	3,03		
+325#	6,27	86,03	6,72	10,83	0,42	3,06	8,21	81,51	7,83	12,45	0,64	3,67		
-325#	13,97	100,00	5,92	21,25	0,83	3,89	18,49	100,00	6,03	23,29	1,11	4,78		
Total	100,00		3,89	100,00	3,89		100,00		4,78	100,00	4,78			
Teor da amostra tal qual			3,99							4,69				

Tabela A1.8 – Amostras do furo 42.

MALHA	Amostra Grande (AG)					Massa (g)	220,10	Amostra Pequena (AP)					Massa (g)	228,70
	% Massa		Recuperação em massa (%)				98,00	% Massa		Recuperação em massa (%)				96,90
	Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima	Retida	Acum.	Teor de P ₂ O ₅	Dist P ₂ O ₅ por fração	% P ₂ O ₅ por fração	Acumul. Acima		
+5#	0,93	0,93	2,19	0,46	0,02	0,02	0,77	0,88	0,91	0,13	0,01	0,01		
+7#	2,69	3,62	1,56	0,94	0,04	0,06	1,62	2,39	1,26	0,37	0,02	0,03		
+10#	3,71	7,32	1,44	1,20	0,05	0,12	1,99	4,38	1,44	0,52	0,03	0,06		
+12#	1,99	9,32	1,23	0,55	0,02	0,14	0,95	5,32	1,29	0,22	0,01	0,07		
+14#	0,70	10,01	1,69	0,26	0,01	0,15	0,41	5,73	1,40	0,10	0,01	0,07		
+20#	6,68	16,69	0,96	1,45	0,06	0,22	4,20	9,93	0,98	0,74	0,04	0,12		
+28#	6,82	23,50	0,78	1,20	0,05	0,27	5,32	15,25	0,81	0,78	0,04	0,16		
+35#	11,13	34,63	0,82	2,05	0,09	0,36	9,66	24,91	0,78	1,36	0,08	0,23		
+48#	7,23	41,86	1,65	2,69	0,12	0,48	6,54	31,45	1,39	1,63	0,09	0,32		
+65#	8,02	49,88	3,57	6,44	0,29	0,77	8,57	40,03	3,22	4,98	0,28	0,60		
+100#	11,31	61,20	7,30	18,56	0,83	1,59	12,09	52,12	7,33	15,98	0,89	1,49		
+200#	14,51	75,71	7,83	25,56	1,14	2,73	18,41	70,53	9,57	31,77	1,76	3,25		
+325#	7,14	82,85	8,56	13,73	0,61	3,34	8,57	79,11	9,78	15,11	0,84	4,09		
-325#	17,15	100,00	6,46	24,91	1,11	4,45	20,89	100,00	6,98	26,31	1,46	5,55		
Total	100,00		4,45	100,00	4,45		100,00		5,55	100,00	5,55			
Teor da amostra tal qual			5,08								5,67			