THAMMIRIS MOHAMAD EL HAJJ

RECONCILIAÇÃO ILUSÓRIA: COMPENSAÇÃO DE ERROS POR
AMOSTRAGEM MANUAL

São Paulo

2013

THAMMIRIS MOHAMAD EL HAJJ

RECONCILIAÇÃO ILUSÓRIA: COMPENSAÇÃO DE ERROS POR
AMOSTRAGEM MANUAL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências

São Paulo
2013

THAMMIRIS MOHAMAD EL HAJJ

RECONCILIAÇÃO ILUSÓRIA: COMPENSAÇÃO DE ERROS POR
AMOSTRAGEM MANUAL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Mineral
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Carolina Chierigati

São Paulo
2013

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

São Paulo, de agosto de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

El Hajj, Thammiris Mohamad

**Reconciliação ilusória: compensação de erros por amostragem manual / T.M. El Hajj. -- versão corr. -- São Paulo, 2013.
152 p.**

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

**1.Mineração 2.Ouro 3.Amostragem 4.Representatividade
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.**

AGRADECIMENTOS

À equipe de geologia da Mineração Maracá, pelo apoio nas atividades práticas desenvolvidas e, em especial, ao Engenheiro Luiz Eduardo Campos Pignatari, diretor corporativo de operações da Yamana Gold Inc., pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Agradeço também a todos os professores que participaram do meu aprendizado durante todos esses anos, em especial, à minha professora e orientadora, Dr^a. Ana Carolina Chieregati, por todo carinho e pelos ensinamentos e ao Dr. Homero Delboni Jr. por todas as oportunidades concedidas.

RESUMO

No contexto da indústria mineral, reconciliação pode ser definida como a prática de comparar a massa e o teor médio de minério previstos pelos modelos geológicos com a massa e o teor gerados na usina de beneficiamento. Esta prática tem se mostrado cada vez mais importante, visto que, quando corretamente executada, aumenta a confiabilidade no planejamento de curto prazo e otimiza as operações de lavra e beneficiamento do minério. No entanto, a utilidade da reconciliação depende da qualidade e confiabilidade dos dados de entrada, gerados por diferentes métodos de amostragem. Uma boa reconciliação pode ser ilusória. Em muitos casos, erros cometidos em determinado ponto do processo são compensados por erros cometidos em outros pontos, resultando em reconciliações excelentes. Entretanto, esse fato mascara os erros do sistema que, mais cedo ou mais tarde, podem se revelar. Frequentemente, os erros de amostragem podem levar a uma análise errônea do sistema de reconciliação, gerando consequências graves à operação, principalmente quando a lavra alcança regiões mais pobres ou mais heterogêneas do depósito. Como uma boa estimativa só é possível com práticas corretas de amostragem, a confiabilidade dos resultados de reconciliação depende da representatividade das amostras que os geraram. Este trabalho analisa as práticas de amostragem manual em uma mina de cobre e ouro em Goiás e propõe um método mais confiável para fins de reconciliação. Os resultados mostram que a reconciliação aparentemente excelente entre mina e usina é ilusória, consequência da compensação de diversos erros devidos às práticas de coleta de amostras para o planejamento de curto prazo.

Palavras-chave: Reconciliação. Amostragem. Representatividade.

ABSTRACT

In the mining industry context, reconciliation can be defined as the practice of comparing the tonnage and average grade of ore predicted by the geological models with the tonnage and grade generated by the processing or metallurgical plant. This practice has shown an increasingly importance, since, if correctly executed, allows to improve the reliability on short-term planning and to optimize the mining and processing operations. However, the usefulness of reconciliation relies on the quality and reliability of the input data, generated by different sampling methods. Successful reconciliation can be illusory. In many cases, errors generated at one point of the process are offset by errors generated at other points, resulting in excellent reconciliations. However, this fact can hide compensating biases in the system that may surface someday. Very often sampling errors can be masked and may lead to erroneous analysis of the reconciliation system, generating serious consequences to the operation, especially when mining reaches poorer or more heterogeneous areas of the deposit. Since good estimation is only possible with correct sampling practices, the reliability in the reconciliation results depends on the representativeness of the samples that generated them. This work analyzes the manual sampling practices carried out at a copper and gold mine in Goiás, proposing a more reliable sampling method for reconciliation purposes. Results show that the apparently excellent reconciliation between the mine and the plant is in fact illusory, consequence of the compensation of many errors due to sampling practices for short-term planning.

Keywords: Reconciliation. Sampling. Representativeness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conceitos de Precisão e Acurácia.....	23
Figura 2 – Forma Típica de uma Distribuição Normal.	26
Figura 3 – Erros Associados à Heterogeneidade do Material.	29
Figura 4 – Erros Sistemáticos.	30
Figura 5 – Representação dos Componentes do Erro Global de Estimativa.	30
Figura 6 – Problemas na Amostragem Devido à Subfuração.....	40
Figura 7 – Esquema de Processo de Reconciliação.	46
Figura 8 – Novo Modelo de Reconciliação.	49
Figura 9 – QA – QC para as Etapas de Amostragem em um Bloco de Minério.....	52
Figura 10 – Localização da Mineração Maracá.....	56
Figura 11 – Vista Aérea do Empreendimento.....	57
Figura 12 – Modelo Geológico da Mineração Maracá.....	59
Figura 13 – Pilha Frontal de Médios e Grossos.	61
Figura 14 – Procedimento de Coleta Manual de Amostras.	62
Figura 15 – Pá Utilizada para Amostragem das Pilhas.	62
Figura 16 – Esquema de Coleta de Amostras.....	63
Figura 17 – Amostras Antes de Serem Processadas no Quarteador Tipo Jones.	64
Figura 18 – Fluxograma de Processamento das Amostras no Laboratório Físico. ...	64
Figura 19 – Malha de Amostragem para o Domínio GNS.	66
Figura 20 – Malha de Amostragem para o Domínio BTO.	66
Figura 21 – Malha de Amostragem para o Domínio QSRT.....	67
Figura 22 – Malha de Amostragem para o Domínio ANX.	67
Figura 23 – Perfuratriz Furukawa Modelo HCR 1500.....	69
Figura 24 – Perfuratriz Atlas Copco ROC L8.....	70
Figura 25 – Procedimento de Coleta de Material Utilizado para os Furos Gêmeos. .	71
Figura 26 – Sistema Automático de Amostragem e suas Saídas.....	72
Figura 27 – (A) Caminho Realizado pela Amostra; (B) Quarteador Automático Acoplado à Perfuratriz.	73
Figura 28 – Gráficos de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre as Amostras A e B – GNS.	76

Figura 29 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro – GNS.	76
Figura 30 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Cobre – GNS.	77
Figura 31 – Gráfico de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre Amostra A e Amostra B – BTO.	79
Figura 32 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de ouro - BTO.	80
Figura 33 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro - BTO.	80
Figura 34 – Gráfico de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre Amostra A e Amostra B – QSRT/GNS.	82
Figura 35 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro - QSRT/GNS.	82
Figura 36 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Cobre - QSRT/GNS.	83
Figura 37 – Gráfico de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre Amostra A e Amostra B – ANX.	84
Figura 38 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro - ANX.	85
Figura 39 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Cobre - ANX.	85
Figura 40 – Porcentagem Retida Simples por Fração Granulométrica.	91
Figura 41 – Teor de Ouro por Fração Granulométrica.	91
Figura 42 – Teor de Cobre por Fração Granulométrica.	91
Figura 43 – Distribuição do Ouro por Amostra e por Fração Granulométrica.	93
Figura 44 – Distribuição do Cobre por Amostra e por Fração Granulométrica.	93
Figura 45 – Teor de Cobre e Ouro por Amostra.	93
Figura 46 – Massa recuperada por Equipamento para cada 5 metros de Furo.	95
Figura 47 – Comparação entre os Teores das Massas Recuperadas de Ouro e Cobre.	96
Figura 48 – Correlação entre a L8 e a Furukawa para Teores de Ouro.	96
Figura 49 – Correlação entre a L8 e a Furukawa para Teores de Cobre.	97
Figura 50 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro.	97

Figura 51 – Comparação entre os Teores da Pilha de Grossos e a Amostra.	99
Figura 52 – Correlação entre a Pilha de Grossos da Furukawa e a Amostra Manual para Ouro.	100
Figura 53 – Correlação entre a Pilha de Grossos da Furukawa e a Amostra Manual para Cobre.	100
Figura 54 – Distribuição Granuloquímica da Amostra Coletada da Pilha de Grossos para os Primeiros 10 m.	101
Figura 55 – Distribuição Granuloquímica da Amostra Coletada da Pilha de Grossos para os Últimos 10 m.	102
Figura 56 – Distribuição Granuloquímica da Pilha de Grossos da Furukawa para os Primeiros 10 m.	102
Figura 57 – Distribuição Granuloquímica da Pilha de Grossos da Furukawa para os Últimos 10 m.	103
Figura 58 – Distribuição Granulométrica do Au, do Cu e da Massa para o Material da Furukawa (grossos e finos) para os Primeiros 10 m.	104
Figura 59 – Distribuição Granulométrica do Au, do Cu e da Massa para o Material da Furukawa (grossos e finos) para os Últimos 10 m.	104
Figura 60 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para Amostra da Furukawa em Relação a Todo o Material Gerado pela Perfuratriz.	105
Figura 61 – Correlação entre o Material Recuperado pela Furukawa e sua Amostra para o Ouro.	106
Figura 62 – Correlação entre o Material Recuperado pela Furukawa e sua Amostra para o Cobre.	106
Figura 63 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para a Amostra da Furukawa em Relação à Amostra da L8.	107
Figura 64 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e a Amostra da Furukawa para o Ouro.	108
Figura 65 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e a Amostra da Furukawa para o Cobre.	108
Figura 66 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para os Grossos da Furukawa em Relação à perfuratriz L8.	109
Figura 67 – Erro Relativo do Cobre e do ouro para os finos da Furukawa em Relação à perfuratriz L8.	110

Figura 68 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para a Amostra da L8 em Relação ao Próprio Equipamento.....	111
Figura 69 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e sua a Amostra para Ouro.	112
Figura 70 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e sua a Amostra para Cobre.	112
Figura 71 – Distribuição Granuloquímica de Ouro da Amostra e de Todo o Material da L8 para os Primeiros 10 metros.	113
Figura 72 – Distribuição Granuloquímica de Ouro da Amostra e de Todo o Material da L8 para os Últimos 10 metros.....	113
Figura 73 – Distribuição Granuloquímica de Cobre da Amostra e de Todo o Material da L8 para os primeiros 10 metros.....	114
Figura 74 – Distribuição Granuloquímica de Cobre da Amostra e de Todo o Material da L8 para os Últimos 10 metros.....	114
Figura 75 – Elipse de Precisão.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis que Influenciam a Reconciliação	50
Tabela 2 – Teores de Ouro, em g/t, e Erros Relativos para cada Domínio Geológico.	74
Tabela 3 – Teores de Cobre, em %, e Erros Relativos para cada Domínio Geológico.	75
Tabela 4 – Teores de Ouro e Erros de Estimativa das Amostras Coletadas no Centro do Bloco ANX.....	88
Tabela 5 – Teores de Cobre e Erros de Estimativa das Amostras Coletadas no Centro do Bloco ANX.....	88
Tabela 6 – Teores de Ouro e Cobre Resultantes das Análises Granuloquímicas para o Domínio ANX.....	89
Tabela 7 – Distribuições Granulométricas Resultantes das Análises Granuloquímicas no Domínio ANX.....	90
Tabela 8 – Distribuição do Au e Cu por Amostra e por Fração Granulométrica.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OEE – *Overall Estimation Error*

TSE – *Total Sampling Error*

FSE – *Fundamental Sampling Error*

GSE – *Grouping and Segregation Error*

HFE – *Heterogeneity Fluctuation Error*

QFE – *Quality Fluctuation Error*

IWE – *Increment Weighting Error*

IME – *Increment Materialization Error*

IDE – *Increment Delimitation Error*

IEE – *Increment Extraction Error*

IPE – *Increment Preparation Error*

SE – *Sampling Error*

MCF – *Mine Call Factor*

MM – *Mine Model*

MP – *Mine Planning*

MO – *Mine Operation*

MR – *Mine Reconciliation*

PR – *Plant Reconciliation*

GNS – *Gnaissinho*

BTO – *Biotitita Xisto*

QSRT – *Quartzo Sericita Xisto*

ANX – *Anfibólio Xisto*

FK – *Furukawa*

RC – *Reverse Circulation*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVOS	18
1.2. JUSTIFICATIVA	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1. CONCEITO DE AMOSTRAGEM	19
2.2. CONCEITO DE AMOSTRA.....	19
2.3. CONCEITO DE HETEROGENEIDADE	20
2.3.1. Heterogeneidade Constitucional	21
2.3.2. Heterogeneidade Distribucional	21
2.4. ACURÁCIA, PRECISÃO E REPRESENTATIVIDADE DA AMOSTRA.....	22
2.5. ERROS ALEATÓRIOS E SISTEMÁTICOS.....	24
2.5.1. Teor da Amostra Obedecendo à Distribuição Normal	25
2.5.2. Teor da Amostra Obedecendo à Distribuição de Poisson.....	27
2.6. ERROS DE AMOSTRAGEM.....	29
2.6.1. Erro Fundamental de Amostragem (FSE)	31
2.6.2. O Erro de Segregação e Agrupamento de Amostragem (GSE).....	32
2.6.3. Erro de Flutuação de Heterogeneidade (HFE)	33
2.6.4. O Erro de Ponderação do Incremento (IWE) e o Erro de Flutuação de Qualidade (QFE) 34	
2.6.5. O Erro de Materialização do Incremento (IME)	35
2.6.6. O Erro Total de Amostragem (TSE)	36
2.6.7. O Erro Analítico (AE).....	36
2.6.8. O Erro Global de Estimativa (OEE)	37
2.7. CARACTERÍSTICAS DOS AMOSTRADORES	39
2.7.1. Amostragem de Furos de Desmonte.....	39
2.7.2. Amostragem Manual	41
2.7.3. Amostragem Automática por Perfuratriz com Circulação Reversa.	41
2.8. AMOSTRAGEM DE METAIS PRECIOSOS.....	43
2.8.1. Amostragem de Ouro.....	43
2.8.2. Efeito Pepita.....	44

2.9. CONCEITO DE RECONCILIAÇÃO.....	45
2.9.1. Os Modelos.....	46
2.9.2. Os Fatores.....	47
2.9.3. Reconciliação Reativa	50
2.9.4. Reconciliação Pró-Ativa	51
2.9.5. O Conceito QA – QC	51
2.9.6. O Conceito Mine-to-Plant.....	53
2.9.7. As Fontes de Erros	55
3. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1. EMPRESA.....	56
3.1.1. História da Empresa.....	57
3.1.2. Geologia do Depósito	58
3.2. ESCOPO DO TRABALHO	60
3.3. AMOSTRAGEM MANUAL	60
3.3.1. Procedimentos de coleta de amostras	61
3.3.2. Preparação das amostras e análise laboratorial	63
3.3.3. Malhas de amostragem.....	65
3.3.4. Perfuratrizes utilizadas	69
3.4. AMOSTRAGEM AUTOMÁTICA POR PERFURATRIZ COM CIRCULAÇÃO REVERSA	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1. AMOSTRAGEM MANUAL	74
4.1.1. GNS	75
4.1.2. BTO	79
4.1.3. QSRT/GNS.....	81
4.1.4. ANX	84
4.2. AMOSTRAGEM AUTOMÁTICA POR PERFURATRIZ COM CIRCULAÇÃO REVERSA	94
4.2.1. Acurácia das Perfuratrizes	94
4.2.2. Representatividade da Amostra – Furukawa.....	98
4.2.3. Finos da Furukawa.....	109
4.2.4. Representatividade da Amostra – L8/RC	111
4.3. ELIPSE DE PRECISÃO	115

5. CONCLUSÕES	118
REFERÊNCIAS.....	120
APÊNDICES	124
ANEXOS	139

1. INTRODUÇÃO

Os problemas teóricos e, principalmente, práticos da amostragem de materiais contendo metais preciosos foram objetos deste estudo. Estes metais contêm um valor agregado muito alto, assim, o monitoramento da representatividade das amostras, ou seja acurácia e precisão, é de fundamental importância.

A garantia de acurácia e precisão exigida para um bom aproveitamento desta classe de bens minerais é obtida através de um bom controle nas seguintes etapas: coleta ou seleção da amostra, preparação da amostra e análise química da amostra (GRIGORIEFF et al., 2002).

No desenvolvimento de uma metodologia correta de amostragem, o método de coleta de amostras empregado deve gerar amostras representativas e, portanto, não-enviesadas. Este objetivo é alcançado quando se utilizam equipamentos adequados à operação e técnicas de amostragem baseadas em teorias que permitam minimizar os erros de amostragem.

No contexto da indústria mineral, reconciliação pode ser definida como a comparação entre uma estimativa (modelo de recursos, modelo de reservas, modelo de controle de teor) e uma medição (produção da usina de beneficiamento ou da metalurgia). A confiabilidade nos resultados de reconciliação depende da qualidade e da confiabilidade das amostras que geram as estimativas de massa e teor de minério.

A reconciliação é um dos mais convincentes métodos de se demonstrar precisão do modelo de recursos, boas práticas de operação e, conseqüentemente, saúde financeira da operação para os investidores (CRAWFORD, 2004). Entretanto, o impacto econômico de más práticas de amostragem e de reconciliação tem sido subestimado pelas empresas mineradoras.

A estimativa incorreta de teores, baseada em amostras incorretas, gera sérios problemas de reconciliação, que implicam, anualmente, em enormes perdas

financeiras às empresas de mineração (PITARD, 2008). Assim, a previsibilidade de qualquer operação mineira, desde a estimativa de recursos até a produção do metal, depende de boas práticas de reconciliação, que, por sua vez, dependem de práticas adequadas de amostragem, capazes de gerar amostras representativas.

1.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram: (1) quantificar os erros devidos à coleta manual das amostras e ao tipo de perfuratriz utilizada para a amostragem de curto prazo; e (2) verificar se a perfuratriz com mecanismo de limpeza por circulação reversa e com sistema de amostragem e quarteamento automatizados gera amostras representativas, de modo a minimizar os erros de estimativa de teores e aumentar a confiabilidade do modelo de curto prazo para fins de reconciliação.

1.2. JUSTIFICATIVA

Discrepâncias entre os teores de minério estimados pelos modelos da jazida e os teores produzidos na usina de beneficiamento são um problema comum em diversas minas de ouro e de metais básicos no mundo, fazendo-se necessária a adoção de estratégias que minimizem esse problema. Devido à falta de conhecimento dos fundamentos da teoria da amostragem, muitas empresas perdem milhões de dólares por ano devido a problemas de reconciliação (CHIEREGATI, 2007).

O presente estudo objetivou mostrar que a confiabilidade na amostragem é a base para um controle eficaz das operações mineiras, visto que a qualidade dos resultados gerados pelos modelos geoestatísticos depende da qualidade das amostras.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. CONCEITO DE AMOSTRAGEM

Segundo Gy (1998) *apud* Chieregati e Pitard (2011), "[...] o único objetivo da amostragem é reduzir a massa de um lote L sem inserir mudanças significativas em suas outras propriedades [...]". Assim, o processo de amostragem pode ser definido como um conjunto de operações que visam recolher, de um universo, uma parcela significativa que o represente da melhor maneira possível de forma a não modificar significativamente suas demais propriedades (CHIEREGATI; PITARD, 2011).

A Teoria da Amostragem, desenvolvida por Pierre Gy, é construída com base no conceito de que, se um número suficiente de unidades representativas de uma população é selecionado sem enviesamento, o valor médio das unidades irá se aproximar daquele da população total (YAMAMOTO, 1992).

O objetivo da teoria da amostragem de Pierre Gy é conhecer e quantificar os erros de amostragem, apresentados no item 2.6, através da análise de suas propriedades em função do processo de retirada de amostras e do material amostrado, e da seleção de equipamentos e de procedimentos que possibilitem eliminá-los ou, ao menos, minimizá-los (CHIEREGATI; PITARD, 2011). Este processo deve ser bastante rigoroso, de modo a permitir uma avaliação da representatividade das amostras e da confiabilidade dos resultados.

2.2. CONCEITO DE AMOSTRA

Uma amostra S é parte de um lote L e é frequentemente obtida pela união de diversos incrementos ou frações do lote L, devendo representar o lote nas operações subsequentes. A extração de uma amostra deve respeitar as regras estabelecidas

pela Teoria da Amostragem, ou seja, para que a amostra seja correta, a sua extração deve ser equiprobabilística (CHIEREGATI, 2012b).

Portanto, uma amostra pode ser considerada correta quando obedece a dois critérios essenciais:

- Todos os elementos do lote possuem a mesma probabilidade de seleção ou extração.
- Os incrementos e a amostra não são alterados de forma alguma.

2.3. CONCEITO DE HETEROGENEIDADE

Segundo Pitard (1993), “[...] homogeneidade é um conceito relativo, ou um conceito matemático abstrato que não existe na vida real [...]”. Ao observar os fragmentos de um determinado lote L separadamente, nota-se que há uma grande heterogeneidade entre eles: diferentes tamanhos, cores, composições, formas, densidades, durezas, entre outras características. Se uma pilha for vista de certa distância, talvez ela possa parecer homogênea. Entretanto, se a distância de visão for aproximada até esta ser vista com o auxílio de uma lupa, percebe-se que a noção de homogeneidade era apenas uma ilusão inicial. Portanto, no caso da amostragem, é necessário aceitar a hipótese de lidar somente com materiais heterogêneos (PITARD, 1993).

A diferença entre homogeneidade e heterogeneidade é quantitativa: homogeneidade é a condição inatingível de heterogeneidade zero, ou seja, é um caso limite da heterogeneidade. Há duas diferentes categorias de heterogeneidade que podem ser definidas na tentativa de medir a heterogeneidade de um lote de material: a heterogeneidade constitucional, no caso da unidade ser formada por um único elemento constituinte, e a heterogeneidade distribucional, no caso da unidade ser formada por um grupo de elementos constituintes vizinhos (CHIEREGATI; PITARD, 2011).

2.3.1. Heterogeneidade Constitucional

A heterogeneidade constitucional (CH_L) é aquela que aparece quando as propriedades fundamentais dos fragmentos de um lote são consideradas isoladamente. Por definição, o valor zero de heterogeneidade constitucional seria um lote constituído por fragmentos com características idênticas. Portanto, a heterogeneidade constitucional relativa aos fragmentos de um lote, a um determinado grau de cominuição, é uma propriedade intrínseca do lote e só pode variar caso seja realizada outra etapa de cominuição. As etapas de homogeneização não têm influência na heterogeneidade constitucional (CHIEREGATI, 2007).

Uma amostra S selecionada de um lote L é influenciada por um erro especificamente relacionado à heterogeneidade constitucional CH_L do mesmo lote. Este erro é chamado de erro fundamental de amostragem (FSE). Como apresentado no item 2.6.1, o FSE é o único erro que nunca vale zero. Sua importância pode ser secundária para a maior parte dos constituintes; porém, normalmente ela se torna maior para os constituintes que ocorrem em menor quantidade, e muito maior para os elementos-traço contidos em materiais de alta pureza ou para os metais preciosos de baixo teor (CHIEREGATI, 2007).

2.3.2. Heterogeneidade Distribucional

A heterogeneidade distribucional é aquela relacionada aos grupos de fragmentos individuais de um lote, cada qual formado por uma determinada quantidade de fragmentos vizinhos. Assim, podemos definir uma distribuição como homogênea quando todos os grupos ou subséries de fragmentos têm a mesma composição média. Caso contrário, o lote possui uma distribuição heterogênea (CHIEREGATI, 2007).

A heterogeneidade distribucional (DHL) depende de três fatores, para cada constituinte do lote:

1. Heterogeneidade constitucional CH_L .
2. Distribuição espacial dos constituintes.
3. Forma do lote.

A forma geométrica do lote é um fator muito importante, visto que a heterogeneidade de um lote é muito influenciada pelas forças gravitacionais atuantes (PITARD, 1993).

2.4. ACURÁCIA, PRECISÃO E REPRESENTATIVIDADE DA AMOSTRA

Um processo de amostragem correto deve fornecer uma amostra tanto acurada (não-enviesada) quanto precisa (reproduzível). Nestas condições, se uma amostra é correta e suficientemente reproduzível isto automaticamente a qualifica como representativa. O conceito de representatividade pode ser expresso, então, pela união de precisão e acurácia (CHIEREGATI, 2007).

Precisão refere-se a medir a variabilidade das amostras ao redor da média do lote do qual elas foram retiradas. Esta medida é geralmente expressa como a variância do erro de amostragem. Um plano de amostragem adequado é aquele que concilia os custos de amostragem com a precisão requerida para os resultados, visto serem elementos diretamente proporcionais (FERREIRA, 1989).

A equação para o cálculo da variância está apresentada na Equação 1 (DEVORE, 2006). A amostragem é dita precisa quando o erro de amostragem é pouco disperso ao redor de sua média, independentemente da média do lote da qual ela foi retirada.

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (1)$$

Na qual,

s^2 = variância amostral;

x_i = teor de cada amostra;

$\bar{x}$ = média dos teores das amostras;

n = número de amostras.

A acurácia é independente da precisão. Ela indica a proximidade da média das amostras com a média real do lote. A amostragem é dita acurada quando o erro de amostragem possui sua média próxima de zero e esta média representa o enviesamento da amostragem.

Os conceitos de precisão e acurácia estão ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Conceitos de Precisão e Acurácia.

(Fonte: CHIEREGATI, 2007).

Assim, uma amostra é dita representativa quando a média ao quadrado do erro de amostragem somada à variância deste erro, representadas na Equação 2, é menor que um dado valor padrão de representatividade $r_0^2(SE)$, considerado aceitável (CHIEREGATI, 2012).

$$r^2(SE) = m^2(SE) + s^2(SE) \leq r_0^2(SE) \quad (2)$$

Na qual,

$m^2(SE)$ = média do erro de amostragem ao quadrado;

$s^2(SE)$ = variância do erro de amostragem.

2.5. ERROS ALEATÓRIOS E SISTEMÁTICOS

Os erros aleatórios (média igual a zero e variância diferente de zero) e os erros sistemáticos (variância igual a zero e média diferente de zero) são tratados separadamente apenas por conveniência, pois todos os erros são formados por uma parcela aleatória e outra sistemática. Na realidade, todos os erros, tais como o erro fundamental de amostragem (FSE), o erro de delimitação do incremento (IDE), o erro de extração do incremento (IEE), entre outros, têm dois componentes: (1) um componente aleatório caracterizado unicamente pela variância e (2) um componente não-aleatório caracterizado unicamente pela média (PITARD, 1993).

A propriedade cumulativa dos erros sobre o resultado da amostragem faz a variância e a média de um erro serem fisicamente complementares, mesmo se tratando de propriedades distintas. Como a maior parte dos erros são independentes em probabilidade, as diversas variáveis aleatórias, tais como FSE, IDE, IEE, entre outras, também são cumulativas, o que justifica escrever as seguintes relações para o erro total de amostragem, TSE (CHIEREGATI, 2007):

1. Se esses erros ocorrem independentemente:

$$TSE = FSE + IDE + IEE + \dots \quad (3)$$

2. Para a média dos erros:

$$m(TSE) = m(FSE) + m(IDE) + m(IEE) + \dots \quad (4)$$

3. Para a variância dos erros:

$$s^2(\text{TSE}) = s^2(\text{FSE}) + s^2(\text{IDE}) + s^2(\text{IEE}) + \dots \quad (5)$$

As seguintes condições devem ser satisfeitas para que o erro sistemático de amostragem possa ser evitado: todo o lote deve ser perfeitamente acessível ao amostrador, de modo que exista, para cada constituinte do lote, uma chance idêntica de fazer parte da amostra. Além disso, a distribuição de teores da amostra deve obedecer a uma distribuição normal, o que é uma hipótese otimista no caso de elementos-traço ou metais preciosos de baixo teor (PITARD, 1993).

2.5.1. Teor da Amostra Obedecendo à Distribuição Normal

Uma consequência direta das leis de probabilidades é que o teor da amostra somente tem como valor central o teor do lote inicial se não existirem erros sistemáticos de amostragem e se a distribuição do teor da amostra obedecer a uma distribuição normal. Nem sempre se consegue prever que o teor da amostra seguirá uma distribuição normal. Para elementos-traço e metais preciosos, o teor da amostra provavelmente seguirá uma distribuição de Poisson, e, portanto, algumas precauções devem ser tomadas (PITARD, 1993). Estas precauções estão apresentadas no item 2.5.2.

2.5.1.1 O Modelo Gaussiano

Este modelo é o mais utilizado na estatística clássica e é caracterizado por uma propriedade única: se o conjunto dos possíveis conteúdos de um dado componente é constituído por uma quantidade suficientemente grande de amostras, a distribuição dos valores médios obtidos a partir destas amostras tenderá a uma distribuição

gaussiana em forma de sino (Figura 2). Esta propriedade é chamada de teorema do limite central (PITARD, 1993).

Figura 2 – Forma Típica de uma Distribuição Normal.

(Fonte: Arquivo pessoal).

Uma variável aleatória obedece a uma lei de distribuição normal quando sua densidade de probabilidade $f(x)$ pode ser escrita como:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-[(x-\mu)^2 / 2\sigma^2]} \quad (6)$$

Na Equação 6, μ é a média aritmética e σ é o desvio padrão real e desconhecido.

2.5.1.2 O Modelo Binomial

Este tipo de distribuição ocorre em geral quando dois componentes constituídos por fragmentos totalmente liberados são misturados. A forma da distribuição é ditada pelas proporções dos componentes. Uma variável aleatória obedece a uma lei

binomial quando sua distribuição de probabilidades pode ser escrita de acordo com a Equação 7.

$$P(x = r) = (c_n)^r (p)^r (q)^{n-r} \quad (7)$$

Na Equação 7, $(c_n)^r$ é a combinação de r objetos de um conjunto que contém n objetos, p é a chance de seleção do componente de interesse, q é a chance de seleção de outros componentes, n é o número de ensaios, e r é o número de sucessos. Esta distribuição tem diversas aplicações práticas e, a partir da análise da Equação 7, para elementos-traço, o valor de q torna-se muito grande e o valor de p muito pequeno, o que leva ao modelo de Poisson (PITARD, 1993).

2.5.2. Teor da Amostra Obedecendo à Distribuição de Poisson

Caso existam dados suficientes, o teor a_s de uma amostra pode obedecer a uma distribuição de Poisson, e a média estimada de tal distribuição deve ser um estimador não enviesado da média real a_L do lote, assumindo que a amostragem tenha sido realizada de modo correto. No entanto, quando a heterogeneidade do material é alta e poucos dados estão disponíveis, a média aparente deriva suavemente da média real para a moda da distribuição. Quanto menos dados, maior a deriva. Esta situação deve ser evitada, ou pelo menos é necessário encontrar um meio de conhecer plenamente a sua existência (PITARD, 1993).

2.5.2.1 O Modelo de Poisson

Este modelo é um caso limite do modelo binomial. Este tipo de distribuição geralmente acontece quando o componente de um lote ocorre em uma quantidade que o caracteriza como elemento-traço. A experiência mostra que geralmente este componente ocorre como grãos raros e pequenos, formados por minerais puros

facilmente observáveis a um microscópio eletrônico. Esses grãos podem ou não estar liberados. Como as amostras tornam-se muito pequenas, a probabilidade de haver um desses grãos presente em uma determinada amostra diminui drasticamente; além disto, quando há um grão presente, o estimador a_s do teor a_L médio verdadeiro (e desconhecido) torna-se tão alto, que frequentemente ele é desconsiderado por um operador inexperiente (PITARD, 1993).

Aplicando-se a Equação 7 a uma situação onde o número de ensaios ou amostras n é muito grande, e a chance p de se selecionar um grão é muito pequena, podemos escrever P para dois valores sucessivos de x , como apresentado nas Equações 8 e 9.

$$P(r) = \frac{n!}{(n-r)!r!} p^r q^{n-r} \quad (8)$$

$$P(r-1) = \frac{n!}{(r-1)!(n-r+1)!} p^{r-1} q^{n-r+1} \quad (9)$$

Após tirar a razão de $P(r)$ por $P(r-1)$ e realizar algumas operações matemáticas, chega-se à Equação 10.

$$P(x=r) = \frac{\lambda^r}{r!} e^{-\lambda} \quad (10)$$

Onde, λ é o produto de p por n , definido como o número médio hipotético de grãos de interesse por amostra. Uma distribuição de Poisson possui a propriedade única de média igual à variância, que, por sua vez, é igual ao número médio hipotético de grãos por amostra (PITARD, 1993).

2.6. ERROS DE AMOSTRAGEM

Os conceitos sobre erros que se seguem estão baseados em Chieregati (2007). As nomenclaturas dos erros foram atualizadas com base em publicação posterior da mesma autora no livro de Chaves (2011).

A diferença entre o teor da amostra, obtida a partir de um lote de material L, e o teor verdadeiro (e desconhecido) deste lote de material é definido como erro de amostragem. Toda amostra possui erros associados. Cada erro individual contribui para um erro total de amostragem que pode ser minimizado, mas nunca eliminado por completo. Segundo Gy (1998), “[...] a heterogeneidade é vista como a única fonte de todos os erros de amostragem [...]”.

Os erros de amostragem podem ser divididos em duas categorias. Uma delas diz respeito aos erros associados à heterogeneidade do material amostrado (Figura 3) e compreendem: o erro fundamental de amostragem (FSE), o erro de flutuação de heterogeneidade (HFE), também conhecido como erro de integração, e o erro de segregação e agrupamento (GSE).

Figura 3 – Erros Associados à Heterogeneidade do Material.

Na outra categoria estão os erros sistemáticos (Figura 4), que fazem com que o valor médio de uma série de resultados seja persistentemente maior ou menor do que os resultados obtidos através de um método de referência. Nestes erros incluem-

se o erro de delimitação do incremento (IDE), o erro de extração do incremento (IEE) e o erro de preparação do incremento (IPE).

Figura 4 – Erros Sistemáticos.

O sumário dos erros de amostragem explicados neste item encontra-se na Figura 5.

Figura 5 – Representação dos Componentes do Erro Global de Estimativa.

(Fonte: PITARD, 2010 *apud* CHIEREGATI; PITARD, 2011).

2.6.1. Erro Fundamental de Amostragem (FSE)

O erro fundamental de amostragem pode ser definido como aquele que ocorre quando a seleção dos incrementos é correta e quando cada incremento que compõe a amostra é composto por apenas um fragmento escolhido aleatoriamente. Sabe-se que este erro é gerado apenas pela heterogeneidade constitucional CHL, que é uma propriedade intrínseca do lote a ser amostrado. Pierre Gy demonstrou em detalhes que a média do erro fundamental é desprezível para a maior parte dos casos, com exceção dos elementos-traço que devem ser tratados com maior atenção (PITARD, 1993).

Assim, quando uma amostra de massa M_s é coletada aleatoriamente, fragmento por fragmento cada um com a mesma probabilidade, a partir de um lote de material fragmentado de massa M_L , surge um erro de amostragem entre o teor real (e desconhecido) do lote e o teor da amostra. Este erro é o menor erro existente para uma amostra coletada em condições ideais, e, por isto, é chamado de erro fundamental de amostragem.

Nessas condições ideais, que nunca ocorrem na prática, assume-se que cada fragmento tem a mesma probabilidade de seleção que qualquer outro e, ainda, que cada fragmento é selecionado independentemente dos outros, ou seja, um por um, sequencialmente (FRANÇOIS-BONGARÇON; GY, 2002).

Por ter a média desprezível para a maior parte dos casos, este erro é caracterizado por sua variância. Esta é calculada relativamente ao teor real do lote utilizando uma fórmula muito conhecida (Equação 11), chamada ‘fórmula de Gy’.

$$s^2(FSE) = c f g l d^3 \left(\frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right) \quad (11)$$

Onde:

$s^2(\text{FSE})$ é a variância relativa do possível resultado de teor da amostra;

d é o tamanho nominal dos fragmentos;

c , f , g e l são fatores que podem ser calculados ou obtidos experimentalmente, a descrição destes fatores encontram-se no Anexo A.

Entre todos os componentes do erro total de amostragem TSE, o erro fundamental FSE, é o único que não pode ser reduzido a zero, mesmo que sejam aceitas as hipóteses mais favoráveis. O erro fundamental é, portanto, o erro de amostragem mínimo, irreduzível e, assim, justifica o seu nome.

2.6.2. O Erro de Segregação e Agrupamento de Amostragem (GSE)

O erro de segregação e agrupamento é consequência da heterogeneidade distribucional. Este tipo de heterogeneidade de um lote zero-dimensional pode ser definido como uma heterogeneidade distribucional de pequena escala, que é simplesmente a consequência lógica de variações aleatórias de constituição entre fragmentos vizinhos. Essas variações, ou flutuações, não só geram o erro fundamental FSE, mas também oferecem às forças gravitacionais uma oportunidade de realizar rearranjos entre os fragmentos, segregando famílias de fragmentos de acordo com sua constituição (PITARD, 1993).

Quanto maior a diferença de constituição (composição, forma, tamanho, densidade, entre outras características), maior a possibilidade de segregação. Dois fatores são responsáveis pelo erro de amostragem introduzido pela heterogeneidade distribucional: (1) o fator de segregação, que é uma medida dos rearranjos espaciais, e (2) o fator de agrupamento, que é uma medida da seletividade aleatória.

Intuitivamente, percebe-se que o erro fundamental FSE é o erro mínimo gerado ao se coletar uma amostra de um determinado lote. O mínimo somente é alcançado sob uma condição estatística: os fragmentos da amostra devem ser coletados

aleatoriamente, um a um. Na prática isto não acontece. Ao coletar um incremento para formar uma amostra, este incremento geralmente é composto por vários fragmentos. Portanto, estatisticamente, uma amostra não é composta estritamente por fragmentos aleatórios, mas por grupos aleatórios de fragmentos. Consequentemente, acrescenta-se um erro a esta seleção, e quanto maior o grupo, maior esse erro. Esse erro é definido como erro de segregação e agrupamento, GSE.

2.6.3. Erro de Flutuação de Heterogeneidade (HFE)

As atividades industriais são caracterizadas por uma necessidade constante de transporte de material. A execução dessas atividades gera pilhas alongadas, materiais transportados em transportadores de correia e fluxos em tubulações de polpa, os quais podem ser classificados como lotes unidimensionais.

Os lotes podem ser classificados como: tridimensionais (o conteúdo de um navio, de uma caçamba de caminhão, ou um bloco de um depósito mineral); bidimensionais (um lote tridimensional cuja espessura pode ser desprezada); unidimensionais (pilhas alongadas, material sobre transportadores de correia, fluxos); ou zero-dimensionais (o conteúdo de um navio, de uma caçamba de caminhão etc., desde que esses objetos sejam considerados unidades descontínuas e aleatórias). Na prática, sempre é possível implementar um procedimento de amostragem correto em lotes unidimensionais, entretanto, uma amostragem correta em lotes de duas ou três dimensões normalmente é impraticável.

As regras apresentadas para lotes zero-dimensionais também valem para um lote unidimensional, no entanto, um lote unidimensional é quase sempre gerado por operações cronológicas. Consequentemente, ele será influenciado por variações que refletem essencialmente as atividades humanas, as quais levam a um novo conceito de heterogeneidade, que pode ser dividido em três componentes: (1) o erro de variação de heterogeneidade de curto prazo, (2) o erro de variação de heterogeneidade de longo prazo e (3) o erro de variação periódica de heterogeneidade (fenômenos cíclicos), conforme a Equação 12.

$$HFE = HFE_1 + HFE_2 + HFE_3 \quad (12)$$

O erro de flutuação de heterogeneidade HFE era antes chamado de erro de seleção contínua CE ou erro de integração IE. Este erro é considerado como a soma de dois erros complementares (Equação 13): o erro de flutuação da qualidade QFE (variação de teor) e o erro de flutuação da quantidade ou erro de ponderação IWE (variação de massa).

$$HFE = QFE + IWE \quad (13)$$

2.6.4. O Erro de Ponderação do Incremento (IWE) e o Erro de Flutuação de Qualidade (QFE)

Uma amostra deve ser ponderada de forma a selecionar incrementos proporcionais à vazão mássica de material no instante da amostragem. Tanto o erro de ponderação do incremento IWE como o erro de flutuação da qualidade QFE possuem os três componentes de heterogeneidade apresentados no item 2.6.3 e, portanto:

$$IWE = IWE_1 + IWE_2 + IWE_3 \quad (14)$$

$$QFE = QFE_1 + QFE_2 + QFE_3 \quad (15)$$

Onde:

$$QFE_1 = FSE + GSE.$$

Note-se que, tanto para o IWE (Equação 14), quanto para o QFE (Equação 15), o índice 1 representa o componente aleatório, o índice 2 representa o componente não-aleatório e o índice 3 representa o componente periódico do erro.

Um sistema de amostragem correto deve ser razoavelmente proporcional. Por exemplo, a massa de cada incremento selecionado por um amostrador corta-fluxo deve ser proporcional à vazão mássica naquele instante. Um desvio excessivo na proporcionalidade leva ao enviesamento.

Se o sistema de amostragem não for proporcional, o IWE provavelmente terá um valor significativo. Por outro lado, se o sistema de amostragem for proporcional, o IWE será desprezível. No entanto, se a vazão de um fluxo de material variar muito com o tempo, isto também afetará IWE. Portanto, a regulação das vazões é importante de modo que o erro de ponderação permaneça desprezível durante a etapa de materialização do incremento.

2.6.5. O Erro de Materialização do Incremento (IME)

Os erros previamente apresentados são aqueles gerados pela heterogeneidade do material que compõe o lote. Para os erros analisados, o lote foi considerado um objeto unidimensional contínuo e o raciocínio baseou-se na seleção de pontos imaginários dentro do domínio de interesse. Porém, na realidade, esses pontos são formados por fragmentos ou grupos de fragmentos e a natureza particular dessas unidades deve ser levada em conta. O mesmo raciocínio pode ser feito para o processo de divisão de um lote zero-dimensional.

A materialização de tais grupos de fragmentos fornece os incrementos de uma amostra. A materialização é alcançada primeiramente realizando uma delimitação correta do incremento e então uma extração correta do incremento, as quais são operações que geram erros. O erro de materialização do incremento IME pode ser definido como a soma do erro de delimitação IDE com o erro de extração IEE (Equação 16).

$$\text{IME} = \text{IDE} + \text{IEE} \quad (16)$$

2.6.6. O Erro Total de Amostragem (TSE)

Este erro considera todos os diversos estágios de amostragem realizados para gerar sucessivas amostras. Essas operações que geralmente acontecem entre cada estágio de amostragem são definidas como estágio de preparação. Um estágio de preparação também é um processo gerador de erros, o qual pode consistir em transferência, cominuição, peneiramento, mistura, secagem, filtragem, pesagem, entre outros. O erro gerado, normalmente acidental, é denominado erro de preparação do incremento IPE e faz parte do erro de materialização do incremento IME.

O erro total de amostragem TSE é definido como a combinação de duas categorias de operações: um processo de seleção imaterial que leva ao erro de flutuação de heterogeneidade HFE, e um processo de materialização que leva ao erro de materialização IME gerado em cada etapa de amostragem (Equação 17).

$$TSE = HFE + IME \quad (17)$$

2.6.7. O Erro Analítico (AE)

O erro analítico AE não faz parte do erro total de amostragem, entretanto, ele sempre fará parte do erro global de estimativa OEE, apresentado no item 2.6.8.

2.6.8. O Erro Global de Estimativa (OEE)

O erro global de estimativa OEE pode ser expresso de acordo com a Equação 18.

$$OEE = AE + TSE \quad (18)$$

A Equação 18 é a simplificação da Equação 19 que mostra todos os seus componentes básicos.

$$OEE = AE + \sum_{n=1}^N (FSE_n + GSE_n + QFE_{2n} + QFE_{3n} + IWE_n + IDE_n + IEE_n + IPE_n) \quad (19)$$

O erro analítico (AE), associado às análises químicas, não faz parte do erro total de amostragem, contudo, ele faz parte do erro global de estimativa, pois tanto a amostragem quanto as etapas de análise são processos geradores de erro.

O erro fundamental de amostragem (FSE) é gerado em cada etapa de amostragem e é devido à existência de heterogeneidade entre as partículas do material amostrado. O erro fundamental é o menor erro existente para uma amostra coletada em condições ideais e geralmente apresenta uma média insignificante, sendo caracterizado por sua variância.

O erro de flutuação de heterogeneidade (HFE) é consequência da necessidade do transporte de material e é gerado pela variabilidade entre as partículas e entre grupos de partículas transportadas pelos fluxos de material.

O erro de segregação e agrupamento (GSE) deve-se ao fato de que, não sendo possível coletar fragmento por fragmento do lote para formar a amostra, coletamos um incremento composto por vários fragmentos vizinhos e, desta forma, introduzimos o erro chamado erro de segregação e agrupamento.

O erro de preparação (IPE) é resultado das operações posteriores à coleta da amostra e que antecedem a análise química. Todas essas operações são potencialmente geradoras de erros e podem adulterar o teor do lote amostrado. Geralmente, esses erros resultam de negligência, falta de informação, de cuidado, fraudes e erros não intencionais.

O erro de materialização (IME) é a soma do erro de delimitação do incremento (IDE), do erro de extração do incremento (IEE) e do erro de preparação do incremento (IPE), os quais influenciam a média (acurácia) e a variância do erro de amostragem (precisão). O uso de amostradores incorretos no processo de amostragem na maior parte das vezes é o responsável por estes tipos de erro e, portanto, a única estratégia eficiente para a solução deste problema é a eliminação prévia destes erros através do dimensionamento, fabricação, manutenção e utilização de amostradores que garantam a correta delimitação e extração de amostras.

O erro total de amostragem (TSE) inclui o processo de seleção imaterial e o processo de materialização, ou seja, a soma dos erros de flutuação de heterogeneidade e de materialização, gerados em cada estágio de amostragem.

Para completar o estudo dos erros no processo de amostragem, podemos expressar o erro global de estimativa (OEE) como a soma do erro total de amostragem e o erro analítico. A Figura 5, apresentada no item 2.6, ilustra todos os componentes do erro global de estimativa.

Todos os erros que compõem o erro global de estimativa podem ser eliminados ou minimizados. Os erros sistemáticos e de análise química podem ser eliminados utilizando-se equipamentos e protocolos adequados de amostragem. O erro fundamental é o único erro que não pode ser eliminado, pois está relacionado unicamente à heterogeneidade constitucional do material.

2.7. CARACTERÍSTICAS DOS AMOSTRADORES

2.7.1. Amostragem de Furos de Desmonte

A amostragem correta do material proveniente de furos de desmonte ou pó de perfuratriz é um problema constante para o engenheiro de minas. Isso se deve ao fato de que esse tipo de amostragem gera uma série de erros estruturais, alguns deles sem solução. Os erros mais visíveis ocorrem na delimitação, extração, preparação e determinação da massa mínima da amostra. Além disso, alguns erros estão relacionados ao tipo de perfuratriz utilizada para a amostragem, bem como os instrumentos utilizados para realizá-la (PITARD, 2008).

Segundo Pitard (2008), os maiores problemas relacionados à amostragem de furos de desmonte são:

- (1) Contaminação ascendente: durante a perfuração de um furo de desmonte, pequenos fragmentos de rocha atitam-se constantemente contra a parede do furo, criando uma contaminação ascendente. Quanto mais profundo for o furo, maior a contaminação.
- (2) Contaminação descendente: durante a perfuração, a broca da perfuratriz aplica uma grande tensão no material que restou da subfuração do desmonte anterior. Isso pulveriza o material, gerando mais um fator de contaminação da amostra.
- (3) Perda de material: fragmentos de rocha que sobem pelo furo durante a perfuração podem se alojar em fraturas ou fissuras dentro do furo, gerando perda de material.
- (4) Necessidade de subfuração: a subfuração é necessária para que o desmonte em bancada seja bem executado, evitando a formação de repés, de modo a preparar um melhor acesso aos equipamentos da mina. No entanto, o maior problema resultante da subfuração é que o material correspondente a esta

furação extra aparece em lugar crítico na pilha formada pela perfuratriz, ou seja, no topo da pilha resultante do furo, local de mais fácil acesso para o operador coletar material para a amostra. Muitas vezes o material da subfuração é incluído na amostra, quando não deveria ser. Além disto, o material referente à subfuração do bloco superior (Figura 6, região A) é pouco recuperado para a amostra do bloco inferior, devido à fragmentação gerada pelo desmonte anterior. A Figura 6 ilustra o problema.

Figura 6 – Problemas na Amostragem Devido à Subfuração.

(Fonte: Adaptado de PITARD, 2008).

- (5) Segregação da pilha: Devido a diversos fatores, como tamanho, densidade e forma dos fragmentos, vento, velocidade de rotação da broca e do ar comprimido, uma grande segregação pode ser observada na pilha resultante de um furo de desmonte. Essa segregação pode ser lateral (quando o topo da pilha está deslocado lateralmente do centro), ou vertical (quando a segregação ocorre nas camadas da pilha).
- (6) Interferência na produção da mina: Ao longo dos anos, criou-se o conceito de que a amostragem atrapalha a produtividade da mina, já que interfere na produtividade da perfuratriz. O impacto econômico que uma amostragem inadequada pode ter é geralmente subestimado na maioria das minas.

Até hoje não se encontrou uma solução que satisfaça tanto a produção quanto a amostragem. No entanto, existem técnicas e novos sistemas de amostragem automática em perfuratrizes que procuram minimizar o erro de delimitação do incremento, sem tentar resolver todos os problemas da amostragem.

2.7.2. Amostragem Manual

A amostragem manual em pilha é efetuada através do uso de uma pá, frequentemente sendo coletadas somente as partículas que se encontram posicionadas nas porções superficiais da pilha. A inconformidade dessa prática de amostragem com a teoria da amostragem reside no fato de que a mesma não é probabilística, pois pressupõe que as partículas dispostas nas porções interiores da pilha e, portanto, inalcançáveis pela pá, apresentem exatamente as mesmas características de qualidade das partículas posicionadas na superfície.

Assim, nesse tipo de amostragem, além da variabilidade existente entre as partículas, os erros de amostragem são influenciados pela disposição das partículas no interior do lote (GRIGORIEFF et al., 2002).

2.7.3. Amostragem Automática por Perfuratriz com Circulação Reversa

A amostragem por perfuratriz com circulação reversa consegue recuperar uma massa muito maior de material, variando de 95% a 99%, principalmente porque minimiza a perda de material fino pelas fraturas na trajetória ascendente das partículas.

O equipamento conta com uma tubulação ao redor da haste de perfuração que permite, através da circulação reversa, a recuperação do material por dentro das tubulações, evitando o contato do material do furo com o resto do maciço. Esses

equipamentos possuem diversas vantagens; de acordo com Pitard (2008), algumas delas são:

- 1- Ausência de subfuração: a ausência de material de subfuração elimina o erro de delimitação da amostra. A eliminação desse erro de amostragem é uma vantagem econômica que pode representar de 5 a 15% da receita total da operação.
- 2- Possibilidade de perfurar vários bancos ao mesmo tempo: o controle do modelo geológico para vários trimestres pode ser feito ao mesmo tempo, o que melhora os modelos de médio e curto prazo.
- 3- Possibilidade de perfurar com um ângulo escolhido: a possibilidade de perfuração em ângulo com maior precisão permite uma melhor amostragem de veios subverticais. O sistema de circulação reversa tem tal flexibilidade, levando a uma melhor avaliação do bloco.
- 4- Minimização da contaminação e das perdas: os fragmentos estão protegidos dentro da haste de perfuração, minimizando a contaminação ascendente, refluxo e perda do material dentro das fraturas.
- 5- Capacidade de perfurar em bancos fora da área de detonação: blocos que não estão sendo preparados para o desmonte podem ser amostrados. Esta vantagem pode economizar tempo quando associada a um bom planejamento de amostragem.
- 6- A amostragem não interfere na produção: o aumento do tráfego do equipamento pode ser minimizado com planejamento adequado. A amostragem por circulação reversa não deve interferir com a produção da mina.
- 7- Controle de teor mais preciso e acurado.

Entre as desvantagens do sistema, podemos mencionar os custos extras e aumento do tráfego na mina, o que, dependendo do tipo de acesso aos bancos, pode ser um grande inconveniente. No entanto, "é altamente recomendável que as empresas de mineração analisem com cuidado a viabilidade da implantação de um sistema de amostragem automática com circulação reversa para controle de reservas, ao invés de se prender às velhas práticas que podem levar a grandes problemas de reconciliação no futuro" (PITARD, 2008).

2.8. AMOSTRAGEM DE METAIS PRECIOSOS

Uma das principais diferenças entre os metais preciosos e os outros metais é o fato de que os metais preciosos são econômicos a teores muito baixos, ou seja, quantidades relativamente pequenas de material podem envolver grandes quantidades de dinheiro. Assim, os problemas de precisão e acurácia são ainda mais relevantes e se tornam a preocupação principal dos empreendimentos que exploram estes metais (CHIEREGATI, 2007).

2.8.1. Amostragem de Ouro

Os minérios de ouro, que são o objeto de estudo deste trabalho, ocorrem na natureza de diferentes maneiras e apresentam dificuldades de amostragem que devem ser resolvidas de um modo particular para cada caso. Assim, os diferentes depósitos de ouro podem ser classificados em três categorias:

- Depósitos aluvionares, ou de outro material no qual o ouro está completamente liberado.
- Depósitos primários, onde o ouro ocorre em pequenos veios, ou de outro material no qual o ouro não está liberado. Nesta categoria encontramos a

maioria dos depósitos não-aluvionares de ouro, tais como os depósitos em veios associados a rochas ígneas, os depósitos de sulfetos maciços (caso estudado), entre outros.

- Associações de ouro com outros minerais.

Das diversas dificuldades que a amostragem do ouro possui, citamos as principais:

- O conteúdo de ouro de uma subamostra analítica pode ser completamente diferente do conteúdo de ouro da amostra inicial.
- A densidade do ouro é elevadíssima ($19,3 \text{ g/cm}^3$), promovendo uma forte segregação assim que as partículas de ouro são liberadas.
- As partículas de ouro não cominuem bem, podendo criar um fino filme metálico que cobre a superfície dos amostradores.

Todos esses problemas são ampliados em depósitos marginais de baixo teor e quando a distribuição do ouro na rocha é irregular.

2.8.2. Efeito Pepita

O efeito pepita descreve a reprodutibilidade dos resultados para amostragens sucessivas em um mesmo ponto. Assim, quanto maior a reprodutibilidade amostral, menor o efeito pepita. Este efeito inclui tanto a variabilidade natural inerente ao material (heterogeneidade constitucional) quanto à variabilidade devida ao tamanho, preparação e análise das amostras (CHIEREGATI, 2007).

Em ambientes onde existe um efeito pepita elevado, como é o caso dos depósitos de metais preciosos e das mineralizações heterogêneas, a dificuldade de

se definirem os limites entre minério e estéril é enorme, devido à baixa reprodutibilidade das amostras (ELLIOT et al., 2001).

Portanto, devido ao fato de estes tipos de mineralização serem muito sensíveis aos métodos de amostragem, é de extrema importância o reconhecimento do efeito pepita, de modo a evitar que valores incorretos de efeito pepita sejam considerados nos modelos de reservas e de controle de teor (CHIEREGATI, 2007).

2.9. CONCEITO DE RECONCILIAÇÃO

No contexto da indústria mineral, reconciliação pode ser definida como a comparação entre uma estimativa (modelo de recursos, modelo de reservas, modelo de controle de teor) e uma medição (produção oficial da usina de beneficiamento ou da metalurgia). Segundo Morley (2003), os principais objetivos da reconciliação são:

- Medir o desempenho da operação com base nas metas iniciais.
- Garantir uma avaliação acurada dos ativos minerais.
- Confirmar a eficiência das estimativas de massa e teor.
- Fornecer indicadores de desempenho (em especial para o controle de teor).

A Figura 7 ilustra um processo típico de reconciliação, desde a estimativa de recursos até a produção de metal, incluindo as perguntas que deveriam ser feitas durante o processo. Respostas não favoráveis a qualquer uma das perguntas mencionadas na Figura 7 indicam a necessidade de se realizarem análises adicionais, visando a identificação das causas das variâncias observadas e permitindo a tomada de ações para corrigi-las. Por exemplo, diferenças consistentes entre as estimativas do modelo de recursos e a quantidade de metal realmente produzida podem indicar que o método de definição do teor de corte precisa ser reavaliado ou que o método de estimativa de teor está inadequado. Tendo sido identificada a causa do problema, o procedimento poderá ser modificado, de modo a minimizar as variâncias.

Portanto, a reconciliação pode ser vista como um método de validação das estimativas dos modelos de reservas e de controle de teor, permitindo o replanejamento das práticas inadequadas de amostragem, modelagem, planejamento e lavra, e o desenvolvimento de estratégias que visem aumentar a eficiência das operações. Assim, o conceito de reconciliação poderia ser resumido nestas três palavras: “medir, controlar e melhorar” (NOPPÉ, 2004).

Figura 7 – Esquema de Processo de Reconciliação.

(Fonte: Adaptado de MORLEY, 2003).

2.9.1. Os Modelos

As estimativas de reservas visam prever massa e teor de minério, gerando um produto vendável e rentável. Espera-se que o modelo de recursos no qual a

estimativa de reservas se baseia forneça, para um período de médio a longo prazo, estimativas razoáveis de massa e teor de minério que será processado na usina.

A definição dos limites entre minério e estéril na lavra geralmente se baseia em outro modelo de distribuição de teores, um modelo de curto prazo, denominado modelo de controle de teor. Frequentemente esse modelo é gerado a partir de amostragens adicionais de pó de perfuratriz, resultante dos furos de desmonte ou de furos especialmente executados para o controle de teor, cujo espaçamento é bem menor que o utilizado para a geração do modelo de recursos. Portanto, os modelos de controle de teor permitem uma identificação mais precisa dos limites entre minério e estéril e, desde que tenha sido realizada uma amostragem correta, fornecem uma base confiável para o planejamento de curto prazo, geralmente para períodos de menos de um mês.

As práticas de reconciliação comparam as estimativas dos modelos descritos anteriormente com a produção (massa e teor médio de minério) registrada na usina, por determinados períodos de tempo. Raramente os valores estimados coincidem com os valores registrados, e isto pode ser solucionado multiplicando-se a produção estimada por um número constante. Este número, expresso em porcentagem, é chamado de *mine call factor*, ou MCF, e expressa a diferença entre a produção prevista pelos modelos e a produção registrada na usina.

Apesar de ambos os valores – o previsto e o registrado – serem calculados a partir de amostras, os valores registrados na usina em geral são considerados mais acurados (BANKES et al., 2003 e CRAWFORD, 2004), e é por isto que o MCF é aplicado às estimativas dos modelos e não aos valores registrados na usina.

2.9.2. Os Fatores

A reconciliação é uma atividade comum desenvolvida na maior parte das empresas de mineração do mundo e, como visto anteriormente, pode ser definida como uma comparação entre estimativas e medições. O resultado dessas

comparações é geralmente um grupo de fatores que são aplicados a estimativas futuras, na tentativa de melhorar a previsão do desempenho de uma operação. Esses fatores fornecem, portanto, uma indicação de quão acurada foi uma determinada estimativa.

Alguns exemplos de fatores são: o fator de recursos e reservas, o fator de volume e o *mine call factor*, citado no item anterior. Juras (2002) define outros dois fatores, o fator *model to mine* e o fator *mine to mill*, que, multiplicados, resultam no mesmo MCF.

Um novo modelo de reconciliação foi proposto por Chieregati; Pignatari e Delboni Jr. (2011). Este define cinco outros fatores de reconciliação que são utilizados como indicadores de controle ou desempenho de cada etapa individual do empreendimento mineiro, como ilustrado na Figura 8.

Os fatores propostos estão enumerados abaixo e são calculados dividindo-se o valor da variável estudada (massa, teor ou conteúdo metálico) de uma etapa pelo valor da variável na etapa anterior (CHIEREGATI; PIGNATARI; DELBONI JR., 2011).

1. MCF ou *Mine Call Factor*: indica a previsibilidade do modelo de longo-prazo.
2. MM ou *Mine Model*: indica a consistência do modelo de longo-prazo.
3. MP ou *Mine Planning*: indica a utilidade do modelo de curto-prazo para o planejamento.
4. MO ou *Mine Operation*: indica o desempenho da operação de lavra.
5. MR ou *Mine Reconciliation*: indica a qualidade das estimativas do modelo de longo-prazo.
6. PR ou *Plant Reconciliation*: indica o desempenho da operação de beneficiamento.

Figura 8 – Novo Modelo de Reconciliação.

(Fonte: Adaptado de CHIEREGATI; PIGNATARI; DELBONI JR., 2011).

Esses fatores frequentemente são aplicados às estimativas de reservas e de controle de teor, com o objetivo de fornecer uma aproximação da quantidade de metal que deverá ser produzida na usina. Por exemplo, se historicamente a usina produziu 10% a mais de ouro do que o previsto pelo modelo de recursos, a prática comum é aplicar um MCF de 110% à quantidade de ouro prevista pelo modelo, de modo a estimar qual deverá ser a quantidade de ouro total produzida.

O cálculo desses fatores pode indicar o desempenho de uma operação, porém, admitindo-se um cenário ideal, não deveria haver fatores: a estimativa da quantidade de metal de um modelo de recursos deveria ser igual à quantidade de metal produzida mais a quantidade de metal nos rejeitos. Os dois números raramente se igualam, devido às diversas variáveis envolvidas no processo, que podem ter diferentes causas, como mostra a Tabela 1.

Se o complexo problema da reconciliação for dividido nos componentes básicos da Tabela 1, e cada componente for resolvido de cada vez, o problema pode ser resolvido ou, pelo menos, minimizado.

Tabela 1 – Variáveis que Influenciam a Reconciliação

CAUSAS	VARIÁVEIS
Modelo Geológico	1- efeito pepita in situ real
	2- erros de amostragem e sub-amostragem
	3- erros analíticos
	4- erros de estimativa
	5- rejeição excessiva de outliers
	6- resultados da metodologia de estimativa
	7- suposições da densidade do minério
	8- definição dos limites do minério
Modelo de Controle de Teor	1- efeito pepita in situ
	2- erros de amostragem e sub-amostragem
	3- erros analíticos
	4- furos de desmonte paralelos à mineralização
	5- resultados da metodologia de krigagem e cálculo da média
	6- contorno do teor do minério
	7- métodos de amostragem não acurados
Lavra	1- modelo de lavra paralelo para cruzar a mineralização
	2- deslocamento dos limites da mineralização sobre desmonte
	3- métodos de amostragem não acurados
	4- métodos de transporte por caminhão não acurados
	5- perda de finos
	6- estimativa de massa
	8- diluição
Usina	1- retenção de metal dentro do moinho ou em outros locais
	2- métodos de análise não acurados
	3- ciclos do processo desconhecidos ou mal interpretados
	4- calibração dos medidores de massa e de fluxo
	5- sub-amostragem de laboratório inadequada
	6- reconciliação calculada para períodos muito curtos de tempo
	7- perdas não contabilizadas

Fonte: Adaptado de PITARD, 2001 *apud* CHIEREGATI, 2007.

2.9.3. Reconciliação Reativa

Segundo Morley (2003), o problema de se aplicarem fatores às estimativas é que esses fatores podem mascarar as causas dos erros responsáveis pelas discrepâncias observadas. O autor chamou este tipo de reconciliação como 'reativa', afirmando que o uso desses fatores não é a melhor prática industrial de reconciliação.

As causas reais de qualquer variância só podem ser identificadas analisando-se as informações referentes a cada variância e, em seguida, modificando metodologias e processos. Só assim poderão ser tomadas ações que reduzam a variância a um nível aceitável.

2.9.4. Reconciliação Pró-Ativa

A reconciliação 'pró-ativa' é uma alternativa a reconciliação reativa e consiste em se coletarem e se analisarem dados críticos, que são usados para calibrar estimativas em um processo iterativo (MORLEY, 2003). Os erros são analisados com a finalidade de se tornarem ações corretivas para assegurar que a diferença entre os valores estimados e os valores reais seja mínima, ou seja, tornar o valor dos fatores o mais próximo possível de 1.

Este é um processo iterativo de recalibração constante das entradas de dados e dos cálculos, levando ao conceito de 'prognosticação', quando as estimativas tornam-se prognósticos e podem formar uma base para a tomada de decisões da empresa, assegurando que o que acontecerá no futuro corresponde ao que foi planejado no presente.

2.9.5. O Conceito QA – QC

Uma vez que os pontos de medição para o cálculo de reconciliação estejam definidos, deve-se garantir que seja realizado um número suficiente de medições para permitir o controle e o monitoramento da confiabilidade dos dados (precisão e acurácia), principalmente no caso da amostragem. Isto requer o estabelecimento de um sistema de garantia de qualidade (*quality assurance*, ou QA) e de procedimentos de controle de qualidade (*quality control*, ou QC). Este é o chamado sistema QA-QC (CHIEREGATI, 2007).

A garantia de qualidade é conseguida pelo estabelecimento e documentação de sistemas e padrões para garantir a qualidade a um nível mais abrangente. O controle de qualidade utiliza ferramentas estatísticas para assegurar que os sistemas estão estatisticamente controlados a um nível mais específico (CHIEREGATI, 2007).

Um sistema QA-QC bem projetado e implementado – por exemplo, um bom sistema de reconciliação – não deve adicionar uma carga de trabalho extra à equipe técnica. Os processos devem ser automatizados e os mais transparentes e acessíveis possível, de modo que se possa despendar mais tempo na interpretação dos resultados do que na comparação entre os dados. Como veremos mais adiante, os dados não são informações até que eles sejam apresentados de uma maneira útil (NOPPÉ, 2004).

A garantia e o controle de qualidade das etapas de amostragem de um bloco de minério só podem ser controlados se as seguintes questões puderem ser respondidas (Figura 9):

- Quão bem a amostra primária representa o lote ou a pilha de material fragmentado gerada pela perfuratriz?
- Quão bem a pilha gerada pela perfuratriz representa o furo amostrado?
- Quão bem o(s) furo(s) representa(m) o bloco?

Figura 9 – QA – QC para as Etapas de Amostragem em um Bloco de Minério.

De acordo com a Teoria da Amostragem, a representatividade deve ser mantida em todas as etapas do processo de amostragem. Assim, a garantia de qualidade (acurácia) se torna imprescindível neste processo. A qualidade das amostras pode ser analisada por estudos específicos de amostragem em campo. A escolha da malha de amostragem, por sua vez, é baseada em estudos geoestatísticos, que definem o espaçamento entre os furos bem como quantos furos são necessários para representar o bloco a uma determinada precisão.

2.9.6. O Conceito Mine-to-Plant

Na década de 90, esforços contínuos foram realizados para se reduzirem os custos de um empreendimento mineiro, ao mesmo tempo em que os custos dos suprimentos e serviços cresciam e os preços do produto final tendiam a cair. Neste contexto, alguns profissionais decidiram integrar os processos de mineração, desde a geologia até a usina, utilizando a tecnologia da informação para fornecer, aos operadores da usina, informações acuradas sobre a qualidade do minério.

Com esta abordagem, esses profissionais conseguiram reduzir a variabilidade do teor do material alimentado na usina, aumentando sua previsibilidade. E, assim, eles puderam visualizar o processo como um todo, e não cada parte isoladamente. O resultado dessas operações foi um aumento de 2 a 5% na recuperação e de até 2% no teor do concentrado (IMRIE, 2001).

O objetivo de se introduzir o conceito *mine-to-plant* é mostrar os benefícios de se transformar dados desordenados e desconexos em dados ordenados e consistentes, que permitam criar um sistema integrado que se estenda da geologia à metalurgia.

A reconciliação entre a mina e a usina (*mine-to-plant*) consiste na prática de se compararem as estimativas de produção baseadas em dados da mina com as estimativas de produção baseadas em dados da usina e, a partir dos resultados, sugerir medidas que minimizem a discrepância entre as estimativas.

Em geral existe uma discrepância relevante entre as estimativas da mina e as estimativas da usina. Frequentemente a mina conta com amostras de furos de desmonte para o desenvolvimento de modelos de controle de teor. Estes modelos, do mesmo modo que os modelos de recursos, são estimativas e, portanto, estão sujeitos aos problemas comuns da estimativa.

Como visto anteriormente, as estimativas da usina são consideradas mais acuradas que as da mina e, portanto, na maioria dos casos elas são a base para os cálculos de reconciliação. Estas estimativas são consideradas mais acuradas por diversas razões (CRAWFORD, 2004):

- (1) Uma das dificuldades mais comuns da amostragem é a coleta de amostras com distribuições de tamanho semelhantes. Na usina, as amostras são coletadas após a cominuição, o que minimiza este problema.
- (2) Os fluxos dos produtos da usina podem ser mais facilmente amostrados a intervalos regulares.
- (3) Os sistemas de controle de processos das usinas modernas, com analisadores de fluxo e amostradores automáticos, permitem o controle total do fluxo de material.
- (4) Há diversas verificações possíveis na usina, permitindo um balanço de massas mais efetivo, o que nada mais é do que uma reconciliação interna.

Entretanto, a usina não está imune aos problemas da amostragem. Os resultados dos diversos pontos de amostragem utilizados no processo de balanço de massas da usina geralmente contêm erros, e as causas típicas desses erros incluem: calibração inadequada das balanças, protocolos inadequados de análises, retenção de metal nas bombas (particularmente para o ouro), dentre outros.

2.9.7. As Fontes de Erros

Uma reconciliação bem-sucedida pode ser ilusória. Em muitos casos, erros cometidos em algum ponto do processo são compensados por erros cometidos em outro ponto, resultando em reconciliações excelentes (CRAWFORD, 2004). Porém, isto mascara os enviesamentos do sistema, que, mais cedo ou mais tarde, podem vir à tona.

A qualidade dos resultados de reconciliação depende da qualidade e da confiabilidade dos dados de entrada, ou seja, das estimativas e das medições. As estimativas dos modelos de recursos são, por si só, dependentes da qualidade das amostras coletadas e do processo utilizado para gerar as estimativas. As medições realizadas na mina e na usina, por sua vez, são dependentes da acurácia dos equipamentos de medição, tais como balanças e medidores de fluxo, e também da qualidade das amostras coletadas. Todas essas medições contêm um erro associado, que deve ser identificado e, quando possível, minimizado (NOPPÉ, 2004).

Segundo Schofield (2001), para muitos profissionais, a reconciliação é o teste final de qualidade das estimativas de massa e teor resultantes dos modelos de reservas e dos modelos de controle de teor. Entretanto, sem antes termos realizado um diagnóstico de todos os processos geradores de dados para os cálculos de reconciliação, não devemos considerá-la um teste final de qualidade, pois diversos fatores podem influenciar seus resultados, como as práticas inadequadas de amostragem e de seleção de minério na lavra.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. EMPRESA

A Mineração Maracá Indústria e Comércio S.A. (MMIC) foi constituída em 11 de março de 1994 e tem como atividade comercial a extração e o beneficiamento de minério de cobre e ouro. Sua sede e operação estão localizadas na Fazenda Genipapo, no município de Alto Horizonte, estado de Goiás. A localização é mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Localização da Mineração Maracá.

(Fonte: YAMANA, 2010).

Em 2003, a MMIC foi adquirida pela Yamana Gold Inc., empresa canadense que possui diversos projetos de mineração na América do Sul, principalmente no Brasil. Atualmente a Yamana possui 100% do capital acionário da MMIC.

As operações na mina de Chapada tiveram início em 2005, e a produção em escala comercial em 2007, com a produção de concentrado de cobre e ouro, visando

principalmente à comercialização no mercado externo. Os principais países consumidores são: Índia, Espanha, Alemanha e, em menor proporção, o Brasil.

A lavra da mina é a céu aberto. A capacidade de produção está em torno de 22 Mt/ano, calculada com base em uma reserva de 368 Mt, com teores médios de 0,280% de cobre e 0,190 g/t de ouro. O período de operação previsto é de 17 anos. A Figura 11 apresenta uma vista superior do empreendimento (YAMANA, 2010).

Figura 11 – Vista Aérea do Empreendimento.

(Fonte: Arquivo Pessoal).

3.1.1. História da Empresa

O depósito de Chapada foi descoberto em 1973 durante uma campanha de exploração da INCO. Essa empresa descobriu o depósito através de estudos

geoquímicos, geofísicos, trincheiras e sondagens exploratórias. No programa de sondagem a empresa utilizou uma malha de 2.000 m x 500 m na área e, então, a Parsons-Eluma Projectos de Consultoria S/C adquiriu 50 % das ações do projeto.

Em 1979, o DNPM publicou a Portaria de Lavra nº 2.394/79, para uma área de 3.000 ha, em nome da Mineração Alonte S.A., incorporada pela MMIC. Dois anos depois, a Parsons-Eluma completou o estudo de viabilidade econômica.

Em 1994/95, a partir da campanha de sondagem rotativa de 4.500 m, foi avaliado o depósito em subsuperfície, após o que a Mineração Santa Elina Indústria e Comércio S.A. adquiriu o Projeto Chapada através de sua subsidiária, a MMIC. No final de 1995 foi aprovada a *joint venture* entre a MMIC e a *Echo Bay*. Após alguns estudos de viabilidade, realizados pela *Independent Mining Consultants*, SNCLavalin Group e Hatch, o projeto foi adquirido, em 2003, pela Yamana Gold Inc¹.

3.1.2. Geologia do Depósito

O depósito de Chapada está inserido na Província Tocantins, que teve desenvolvimento entre dois blocos continentais, os crátons Amazônico (oeste) e São Francisco (leste). A porção leste desta província é ocupada pela Faixa Brasília, sendo esta correspondente a espessos pacotes metassedimentares e, em alguns locais, ocorrendo como exposições de rochas juvenis de idade neoproterozóica (Arco Magmático de Goiás).

O Arco Magmático de Goiás se estende por mais de 1.000 km a oeste e norte de Goiás até o Tocantins, onde é sobreposto pela cobertura fanerozóica da Bacia do Parnaíba.

Na Mina de Chapada não há uma correlação direta do minério com uma litologia específica, mas a um grupo de rochas. As interpretações feitas nas seções

¹ Todas as informações sobre a empresa foram obtidas de Relatório Interno. Inclusive as informações sobre a geologia do depósito.

verticais (100 m de espaçamento entre elas), a partir dos furos de sondagem, resultaram em uma série de polígonos representando corpos litológicos subparalelos arqueados, compondo um anticlinal, cujos flancos mergulham para NW e SE (Figura 12).

Figura 12 – Modelo Geológico da Mineração Maracá.

(Fonte: YAMANA, 2010).

Em cada seção vertical construíram-se linhas ligando as interseções dos intervalos (ao longo dos furos) de minério oxidado e minério misto; o mesmo se fez para as interseções entre os intervalos de minério misto e minério sulfetado. Assim, acima da primeira linha encontra-se a zona de minério oxidado, entre as linhas está a zona de minério misto e abaixo da segunda linha está a zona de minério sulfetado.

Após a interpretação das seções verticais foram criados os sólidos correspondentes aos diversos litotipos identificados na área da mina, os quais correspondem às seguintes rochas: anfibólio xisto, biotita xisto, sericita xisto, quartzo-sericita xisto, gnaissinho e pegmatito.

3.2. ESCOPO DO TRABALHO

O escopo do trabalho incluiu a realização de testes em campo para verificar a adequabilidade do método de amostragem manual do material fragmentado gerado por dois tipos de perfuratrizes sem o mecanismo de circulação reversa e, posteriormente, foram realizados testes com uma perfuratriz que utiliza o mecanismo de limpeza por circulação reversa com amostrador automático acoplado. A seguir estão apresentadas as metodologias empregadas em cada um dos testes.

3.3. AMOSTRAGEM MANUAL

Os trabalhos incluíram a execução de campanhas de amostragem para quatro polígonos, aqui chamados de "blocos", com dimensões 30 × 30 × 5 m (largura × comprimento × profundidade). Os blocos foram previamente selecionados segundo quatro domínios geológicos: Gnaissinho (GNS), Biotita Xisto (BTO), Quartzo Sericita Xisto (QSRT) e Anfibólio Xisto (ANX). A adequabilidade do método de amostragem manual foi verificada através da comparação sistemática entre o teor da amostra (aproximadamente 10 kg) e o teor do material restante na pilha formada a cada perfuração (aproximadamente 190 kg) para os 29 furos de cada bloco.

O monitoramento dos erros gerados pelo tipo de perfuratriz utilizada para o planejamento de curto prazo foi realizado através da comparação da perfuratriz

comumente utilizada na rotina de amostragem com outra perfuratriz que gera aproximadamente 50% mais massa por furo.

Os resultados das duas perfuratrizes foram comparados com os resultados dos testemunhos de sondagem gerados por uma sonda rotativa que amostrou uma das litologias, visando à comparação entre diferentes perfuratrizes.

Todos os procedimentos adotados estão apresentados nos itens 3.3.1 a 3.3.4.

3.3.1. Procedimentos de coleta de amostras

A amostragem de curto prazo realizada em Maracá é manual e utiliza o material fragmentado proveniente de perfuratriz Furukawa modelo HCR1500, que gera dois produtos, um de material fino e outro de médios e grossos.

Da pilha frontal (Figura 13), de médios e grossos, são retirados 12 incrementos radialmente ao cone formado (Figura 14) e da pilha de finos é retirado um único incremento, o que gera uma amostra composta por 13 incrementos. A Figura 15 mostra a pá utilizada para a amostragem das pilhas.

Figura 13 – Pilha Frontal de Médios e Grossos.

Figura 14 – Procedimento de Coleta Manual de Amostras.

Figura 15 – Pá Utilizada para Amostragem das Pilhas.

Para o presente estudo, foram retiradas duas amostras por furo (A e B), conforme a Figura 16. A primeira amostra (Amostra A) foi coletada usando o procedimento padrão de amostragem manual com pá (apresentado anteriormente). Após coletada a Amostra A (de aproximadamente 10 kg), todo o restante do material (aproximadamente 190 kg) – grossos e finos – foi recolhido para gerar a Amostra B.

Figura 16 – Esquema de Coleta de Amostras.

3.3.2. Preparação das amostras e análise laboratorial

Os 190 kg de material (grossos e finos) que restaram após a coleta da Amostra A foram recolhidos, homogeneizados e quarteados (Figura 17), de modo a gerar uma nova Amostra B de 20 a 25 kg.

Ambas as amostras A e B passaram pelo mesmo processo no laboratório físico, com posterior análise química para ouro, cobre, enxofre e ferro. A Figura 18 ilustra o fluxograma do processo.

Figura 17 – Amostras Antes de Serem Processadas no Quarteador Tipo Jones.

Figura 18 – Fluxograma de Processamento das Amostras no Laboratório Físico.

3.3.3. Malhas de amostragem

As campanhas de amostragem incluíram quatro domínios litológicos:

1. GNS (Gnaissinho): rocha cinza, friável, de granulação média, xistosa, composta essencialmente por biotita e feldspato caulinizado. Malha de amostragem mostrada na Figura 19.

2. BTO (Biotita Xisto): rocha cinza escuro, média a grossa, com xistosidade pronunciada, composta por biotita, feldspato caulinizado e quartzo. Malha de amostragem mostrada na Figura 20.

3. QSRT/GNS (Quartzo Sericita Xisto/Gnaissinho): rocha de cor branca acinzentada, média a grossa, xistosa, com quartzo, sericita, biotita e feldspato caulinizado. Malha de amostragem mostrada na Figura 21.

4. ANX (Anfibólio Xisto): rocha de granulação média, com xistosidade pouco desenvolvida, composta por cristais de anfibólio (60%) de cor verde, orientados em matriz formada por quartzo e feldspato. Malha de amostragem mostrada na Figura 22.

Figura 19 – Malha de Amostragem para o Domínio GNS.

Figura 20 – Malha de Amostragem para o Domínio BTO.

Figura 21 – Malha de Amostragem para o Domínio QSRT.

Figura 22 – Malha de Amostragem para o Domínio ANX.

A malha principal para a campanha de amostragem foi de 10 × 10 m e o afastamento entre furos da cruz central foi de 5 m, para todos os domínios geológicos. Idealmente, todos os furos da malha de amostragem seriam realizados com 5 m de profundidade, e o furo central com 10 m de profundidade. Além disso, foi sugerida a realização de um furo de sonda o mais próximo possível do furo central, com testemunhagem a cada 2,5 m, visando à comparação entre as duas perfuratrizes estudadas e ao cálculo da variância do erro de amostragem com a profundidade do furo.

As perfuratrizes estudadas foram a Furukawa (HCR 1500), especialmente utilizada para amostragem de curto-prazo na Mineração Maracá, e a ROC L8 (Atlas Copco). Visto que nos domínios GNS, BTO e QSRT não foi possível realizar a sondagem diamantada, utilizou-se a ROC L8 com amostragem a cada 2 m para a mesma finalidade. A amostra referente ao furo central perfurado pela Furukawa também foi coletada a cada 2 m de profundidade para esses três domínios. Apenas para o domínio ANX realizou-se o furo de sonda sugerido.

Durante a campanha de amostragem no domínio geológico GNS, devido à ameaça de chuva, todos os furos foram amostrados com a perfuratriz Furukawa, Figura 23, inclusive a cruz central e um furo central, o qual gerou duas amostras representando 5 m cada. A campanha de amostragem no domínio geológico BTO seguiu o esquema recomendado.

Durante a campanha de amostragem no domínio geológico QRST/GNS, no que diz respeito à profundidade do furo central perfurado pela Furukawa, devido à presença de água este furo foi realizado com apenas 4 m de profundidade e gerou duas amostras representando 2 m cada. Houve também a perda de duas amostras deste domínio (números 8 e 26) durante o manuseio em campo.

Por fim, durante a campanha de amostragem no domínio geológico ANX, foram realizados três furos centrais próximos – utilizando a Furukawa, a ROC L8 (Figura 24) e uma sonda rotativa –, gerando amostras a cada 2,5 m.

3.3.4. Perfuratrizes utilizadas

A perfuratriz da marca Atlas Copco, modelo ROC L8 (Figura 24), foi utilizada para perfurar a cruz central das malhas dos domínios geológicos apresentados no item 3.3.3, exceto para o GNS (devido à ameaça de chuva no dia da campanha). Os demais furos foram realizados com a perfuratriz da marca Furukawa, modelo HCR 1500.

A campanha de amostragem foi realizada com duas diferentes perfuratrizes para avaliar a adequabilidade do método de amostragem manual para cada perfuratriz, com diâmetros de perfuração diferentes. Tendo a ROC L8 um diâmetro de bit maior e, conseqüentemente, gerando uma massa de amostra aproximadamente 50% maior que a da Furukawa, considerou-se esta perfuratriz como mais adequada no que diz respeito à geração de amostras representativas. Portanto, adotou-se a ROC L8 como referência para o cálculo dos erros.

Vale salientar que tanto a Furukawa quanto a ROC L8 têm filtros internos que minimizam a emissão de poeira para o ambiente. Assim, é improvável que o material fino descarregado na parte traseira das perfuratrizes seja proveniente do mesmo furo, pois parte do material do furo anterior fica retida nos filtros das perfuratrizes e pode ser uma fonte de erro (por contaminação) importante a ser avaliada.

Figura 23 – Perfuratriz Furukawa Modelo HCR 1500.

Figura 24 – Perfuratriz Atlas Copco ROC L8.

3.4. AMOSTRAGEM AUTOMÁTICA POR PERFURATRIZ COM CIRCULAÇÃO REVERSA

Para a validação da perfuratriz com mecanismo de limpeza por circulação reversa, optou-se pela execução de três pares de furos gêmeos com coleta da amostra e do rejeito (todo o restante do material recuperado do furo) a cada 5 m. Os procedimentos de preparação consistiram no quarteamento de todo o material coletado até a obtenção de uma massa próxima a 15 kg a ser enviada ao laboratório físico. A Figura 25 apresenta as sete etapas realizadas durante a coleta de amostras.

Na ocasião do teste, a empresa modificou a coleta da amostra que representa os teores dos furos para o planejamento de curto prazo. A amostragem manual passou a ser realizada apenas com os 12 incrementos retirados da pilha de grossos e médios, descartando os finos. O motivo alegado foi que a reconciliação era “melhor” utilizando a amostra sem os finos. Os resultados dos testes explicam essa tendência e estão apresentados na próxima seção.

Os furos gêmeos foram realizados com a Furukawa e com a ROC L8/RC (com circulação reversa), conforme Figura 25.

Figura 25 – Procedimento de Coleta de Material Utilizado para os Furos Gêmeos.

Os números da Figura 25 indicam as etapas de coleta de amostras dos furos gêmeos, listadas a seguir:

1. Perfuração usando a Furukawa com coleta de amostra a cada 5 metros;
2. Coleta da amostra pelo atual protocolo de amostragem manual com a pá (12 incrementos);
3. Coleta de todo o restante do material da pilha de grossos;
4. Coleta de toda a pilha de material fino;
5. Perfuração usando a ROC L8/RC com coleta de amostra a cada 5 metros;
6. Coleta da amostra gerada pela perfuratriz ROC L8/RC;
7. Coleta do restante do material recuperado durante a perfuração.

Os materiais coletados foram quarteados em quarteador tipo rifle para gerar amostras destinadas às análises química e granulométrica.

As perfuratrizes utilizadas foram a Furukawa, apresentada no item 3.3.4 e a ROC L8/RC com circulação reversa do fabricante Atlas Copco. De acordo com o fabricante, a L8/RC consegue recuperar aproximadamente 98% do material do furo porque o material passa por dentro da haste externa, permitindo que a circulação reversa minimize perdas de material pelas fraturas e evite também a contaminação do material.

O material recuperado é enviado para o amostrador automático acoplado à perfuratriz. Além disso, o equipamento possui uma coifa coletora de material particulado que retira o material acumulado na boca do furo e o envia para uma saída lateral do equipamento. A Figura 26 mostra o equipamento e suas duas saídas de material.

Figura 26 – Sistema Automático de Amostragem e suas Saídas.

O ar comprimido se desloca entre os tubos de perfuração, recuperando o material e enviando-o para um defletor de cerâmica para diminuir a velocidade das partículas, que depois são enviadas para um ciclone. Ao atingir a profundidade desejada, a perfuração é interrompida e o ciclone descarrega o material. O material descarregado passa então pelo sistema automático de amostragem e quarteamento por quarteador tipo rifle (Figura 27).

Figura 27 – (A) Caminho Realizado pela Amostra; (B) Quarteador Automático Acoplado à Perfuratriz.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. AMOSTRAGEM MANUAL

Os apêndices A, B, C e D mostram os resultados para o ouro e cobre das Amostras A (coleta manual por pá) e B (coleta total da amostra remanescente) para as campanhas de amostragem nos blocos GNS, BTO, QSRT/GNS e ANX respectivamente. As Tabelas 2 e 3 contêm o sumário desses dados, apresentando os resultados médios, respectivamente para o ouro e o cobre. Os erros relativos referem-se ao erro gerado ao se coletar a Amostra A de 13 incrementos em relação à amostra representada por todo o material do furo (Amostra B), referência para este cálculo.

Vale salientar que a Amostra B refere-se a todo o material do furo menos o material que formou a Amostra A e, portanto, não se pode afirmar que esta é a amostra ideal representativa das pilhas de grossos, médios e finos. Entretanto, como a massa da Amostra A é de somente 10 kg e a da Amostra B aproximadamente 190 kg, esta última pode ser considerada uma aproximação do teor real das pilhas. Este método foi escolhido em preferência à realização de furos gêmeos, menos acurados quando a heterogeneidade da jazida é elevada.

Tabela 2 – Teores de Ouro, em g/t, e Erros Relativos para cada Domínio Geológico.

Litologia		Teor Amostra A (g/t)	Teor Amostra B (g/t)	Erro Absoluto (g/t)	Erro Relativo (%)
GNS	Média	0,482	0,473	0,009	0,29
BTO		0,295	0,306	-0,010	-4,71
QSRT/GNS		0,222	0,231	-0,009	-3,59
ANX		0,419	0,463	-0,044	-7,69
GNS	Desvio Padrão	0,286	0,190	0,205	43,36
BTO		0,197	0,182	0,098	20,33
QSRT/GNS		0,087	0,071	0,045	18,76
ANX		0,256	0,307	0,074	10,07

Tabela 3 – Teores de Cobre, em %, e Erros Relativos para cada Domínio Geológico.

Litologia		Teor Amostra A (%)	Teor Amostra B (%)	Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
GNS	Média	0,633	0,627	0,007	1,79
BTO		0,466	0,471	-0,005	-2,91
QSRT/GNS		0,441	0,459	-0,018	-3,26
ANX		0,505	0,484	0,021	3,69
GNS	Desvio Padrão	0,203	0,208	0,064	11,25
BTO		0,312	0,273	0,098	13,62
QSRT/GNS		0,078	0,083	0,043	10,11
ANX		0,230	0,209	0,044	9,06

A seguir são apresentadas as análises dos resultados deste estudo para cada domínio geológico.

4.1.1. GNS

O Apêndice A mostra os resultados para ouro e cobre das Amostras A (coleta manual por pá) e B (coleta total da amostra remanescente) para os 30 furos realizados pela Furukawa no bloco GNS. As amostras 20-1 e 20-2 representam as duas amostras de 5 m referentes ao furo central.

A Figura 28 mostra a correlação entre as Amostras A e B para ouro e cobre. Nota-se nessa figura uma baixa correlação para o ouro ($R^2=0,49$), o que é de se esperar no caso de metais preciosos, onde o efeito pepita é elevado. As Figuras 29 e 30 mostram os gráficos de diferenças relativas entre Amostra A e Amostra B, organizados por ordem crescente de teor de ouro e de cobre respectivamente.

O gráfico de diferenças relativas é construído com base na antepenúltima coluna (*pair index*) e última coluna (*relative error*) das tabelas dos Apêndices e mostra possíveis enviesamentos do sistema de amostragem (erros sistemáticos) no caso de

médias muito elevadas, lembrando que a acurácia da amostragem é representada pela média do erro de amostragem (linha verde do gráfico).

Figura 28 – Gráficos de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre as Amostras A e B – GNS.

Figura 29 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro – GNS.

Figura 30 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Cobre – GNS.

Com base nos resultados apresentados, podem ser feitas as seguintes observações:

- Não há erro sistemático significativo entre Amostra A e Amostra B provenientes de mesma perfuratriz, visto que a média do erro foi de -0,3% para o ouro e de 1,8% para o cobre, o que significa que as amostras manuais para o domínio GNS são acuradas comparativamente à Amostra B.
- A precisão da amostragem é baixa para o ouro ($\pm 46,36\%$ relativa) e mediana para o cobre ($\pm 11,25\%$ relativa), o que indica uma baixa reprodutibilidade das amostras (baixa precisão), fenômeno comum de ambientes com efeito pepita elevado. O gráfico de correlação da Figura 28 confirma esta baixa reprodutibilidade no caso do ouro.
- Os gráficos de diferenças relativas indicam que não há enviesamento da amostra e que o erro não é função do teor. No caso do cobre, a amostragem pode ser considerada suficientemente representativa. No caso do ouro,

havendo uma boa acurácia mas uma baixa precisão, não é possível qualificar a amostragem manual de 13 incrementos como representativa.

Valem aqui duas considerações:

1- A prática usual para o cálculo da precisão da amostragem é a coleta de duas amostras do mesmo furo utilizando o mesmo método de amostragem. Neste trabalho, a precisão da amostragem foi calculada a partir do erro entre a coleta manual de 13 incrementos (Amostra A) e a coleta de todo o material proveniente do furo (Amostra B), ou seja, utilizando dois métodos diferentes de amostragem. Portanto, neste caso, a precisão da amostragem indica a capacidade de a Amostra A de reproduzir o resultado da Amostra B, neste caso considerada mais representativa devido à sua maior massa e pelo fato de não ser manual. Entretanto, isto não significa que a Amostra B seja representativa do furo, pois a perfuratriz pode ser inadequada para amostragem. Esta adequabilidade da perfuratriz só pode ser avaliada comparando os resultados de teores provenientes do pó de perfuratriz com os resultados provenientes de testemunhos de sondagem.

2- O efeito pepita descreve quão bem os resultados de uma campanha de amostragem são reproduzidos repetindo-se a amostragem no mesmo ponto, e assim, quanto maior a reprodutibilidade amostral, menor o efeito pepita. Sabe-se que, para os metais preciosos e para os depósitos com elevada heterogeneidade, a reprodutibilidade amostral é baixa. Portanto, é de essencial importância conhecer o efeito pepita do ambiente em que se está trabalhando e tomar as devidas providências para eliminar ou, pelo menos, minimizar os demais erros de amostragem. É importante deixar claro que ambientes com efeito pepita elevado não inviabilizam a amostragem, entretanto, este assunto deve ser tratado com atenção e precaução durante toda a vida útil do empreendimento mineiro.

4.1.2. BTO

O Apêndice B mostra os resultados para ouro e cobre das Amostras A (coleta manual por pá) e B (coleta total da amostra remanescente) para os 33 furos realizados no bloco BTO. Vale salientar que os furos 1 a 16 representam a malha de amostragem 10 x 10 m perfurada pela Furukawa, os furos 17 a 29 representam a cruz central perfurada pela ROC L8, e as amostras 20-F1 a 20-F5 representam o furo central realizado pela Furukawa com amostragem a cada 2 m (total de 10 m).

A Figura 31 mostra a correlação entre as Amostras A e B para ouro e cobre. Nota-se a partir dessa figura uma baixa correlação para ouro ($R^2=0,755$).

As Figuras 32 e 33 mostram os gráficos de diferenças relativas entre Amostra A e Amostra B, organizados por ordem crescente de teor de ouro e de cobre respectivamente.

Figura 31 – Gráfico de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre Amostra A e Amostra B – BTO.

Figura 32 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de ouro - BTO.

Figura 33 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro - BTO.

Com base nos resultados apresentados, podem ser feitas as seguintes observações:

- Não há erro sistemático significativo entre Amostra A e Amostra B proveniente de mesma perfuratriz, visto que a média do erro foi de -4,7% para o ouro e de -2,9% para o cobre, o que significa que as amostras manuais para o domínio BTO são razoavelmente acuradas comparativamente às Amostras B. Entretanto, nota-se que a média do erro é negativa em ambos os casos, o que significa que a amostra coletada por pá manual tende a subestimar tanto o teor de ouro quanto o teor de cobre do bloco.
- A precisão da amostragem é baixa para o ouro ($\pm 20,33\%$ relativa) e mediana para o cobre ($\pm 13,62\%$ relativa), o que indica uma baixa reprodutibilidade das amostras (baixa precisão). O gráfico de correlação da Figura 31 confirma esta baixa reprodutibilidade no caso do ouro.
- Os gráficos de diferenças relativas indicam que não há enviesamento da amostra e que o erro não é função do teor. No caso do cobre, a amostragem pode ser considerada suficientemente representativa. No caso do ouro, havendo uma boa acurácia mas uma baixa precisão, não é possível qualificar a amostragem manual de 13 incrementos como representativa do furo.

4.1.3. QSRT/GNS

O Apêndice C mostra os resultados para ouro e cobre das Amostras A (coleta manual por pá) e B (coleta total da amostra remanescente) para os 28 furos realizados no bloco QSRT/GNS. Vale salientar que os furos 1 a 16 representam a malha de amostragem 10 x 10 m perfurada pela Furukawa, os furos 17 a 29 representam a cruz central perfurada pela ROC L8, e as amostras 20-F1 e 20-F2 representam o furo central realizado pela Furukawa com amostragem a cada 2 m (total de 4 m). Vale lembrar que duas amostras foram perdidas e que a Furukawa não pôde realizar o furo completo de 10 m devido à presença de água.

A Figura 34 mostra a correlação entre as Amostras A e B para ouro e cobre. Nota-se a partir dessa figura uma baixa correlação tanto para o ouro ($R^2=0,734$) quanto para o cobre ($R^2=0,735$). As Figuras 35 e 36 mostram os gráficos de diferenças relativas entre Amostra A e Amostra B, organizados por ordem crescente de teor de ouro e de cobre respectivamente.

Figura 34 – Gráfico de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre Amostra A e Amostra B – QSRT/GNS.

Figura 35 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro - QSRT/GNS.

Figura 36 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Cobre - QSRT/GNS.

Com base nos resultados apresentados, podem ser feitas as seguintes observações:

- Não há erro sistemático significativo entre Amostra A e Amostra B proveniente de mesma perfuratriz, visto que a média do erro foi de -3,6% para o ouro e de -3,3% para o cobre, o que significa que as amostras manuais para o domínio QSRT/GNS são razoavelmente acuradas comparativamente à Amostra B. Entretanto, nota-se que a média do erro é negativa em ambos os casos, o que significa que a amostra coletada por pá manual tende a subestimar tanto o teor de ouro quanto o teor de cobre do bloco.
- A precisão da amostragem é baixa para o ouro ($\pm 18,76\%$ relativa) e mediana para o cobre ($\pm 10,11\%$ relativa), o que indica uma baixa reprodutibilidade das amostras (baixa precisão). Os gráficos de correlação da Figura 34 confirmam esta baixa reprodutibilidade.
- Os gráficos de diferenças relativas indicam que não há enviesamento da amostra e que o erro não é função do teor. No caso do cobre, a amostragem

pode ser considerada suficientemente representativa. No caso do ouro, havendo uma boa acurácia mas uma baixa precisão, não é possível qualificar a amostragem manual de 13 incrementos como representativa do furo.

4.1.4. ANX

O Apêndice D mostra os resultados para ouro e cobre das Amostras A (coleta manual por pá) e B (coleta total da amostra remanescente) para os 28 furos realizados no bloco ANX. Vale salientar que os furos 1 a 16 representam a malha de amostragem 10×10 m perfurada pela Furukawa, e os furos 17 a 29 representam a cruz central, com espaçamento de 5 m entre os furos, perfurada pela ROC L8.

A Figura 37 mostra a correlação entre as Amostras A e B para ouro e cobre. Nota-se uma boa correlação tanto para ouro quanto para cobre ($R^2=0,964$ e $0,970$ respectivamente). As Figuras 38 e 39 mostram os gráficos de diferenças relativas entre Amostra A e Amostra B, organizados por ordem crescente de teor de ouro e de cobre respectivamente.

Figura 37 – Gráfico de Correlação dos Teores de Ouro e Cobre entre Amostra A e Amostra B – ANX.

Figura 38 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Ouro - ANX.

Figura 39 – Gráfico de Diferenças Relativas entre Amostra A e Amostra B, ordenadas por Teor de Cobre - ANX.

Com base nos resultados apresentados, podem ser feitas as seguintes observações:

- No caso do ouro, há um erro sistemático significativo entre Amostra A e Amostra B proveniente de mesma perfuratriz, visto que a média do erro foi de -7,7%. Este valor significa que, para o domínio ANX, as amostras manuais de 13 incrementos apresentam valores 7,7% menores que os valores da amostra total. Portanto, as amostras manuais não são acuradas para o teor de ouro e tendem a subestimar o teor de ouro do bloco em se comparando com a amostra total do furo. No caso do cobre a amostra manual não apresentou erro sistemático significativo, com a média do erro igual a 3,7%.
- A precisão da amostragem é adequada tanto para o ouro ($\pm 10,07\%$ relativa) quanto para o cobre ($\pm 9,06\%$ relativa), o que indica uma boa reprodutibilidade das amostras manuais em relação à amostra total, especialmente para o cobre.
- No caso do ouro, o gráfico de diferenças relativas indica que existe um enviesamento da amostra e que este enviesamento é função do teor, ou seja, quando maior o teor de ouro, maior a subestimativa da amostra manual (ver linha tracejada azul da Figura 38). No caso do cobre, o gráfico de diferenças relativas indica que não há enviesamento da amostra e que o erro não é função do teor.
- No caso do cobre, a amostragem pode ser considerada suficientemente representativa. No caso do ouro, havendo uma boa precisão mas uma baixa acurácia, não é possível qualificar a amostragem manual de 13 incrementos como representativa de todo o furo.

Em todos os casos apresentados anteriormente, é importante salientar que considerou-se um enviesamento mínimo de $\pm 5\%$ para qualificação da amostra como incorreta no que diz respeito à existência de erro sistemático significativo. Entretanto, se quisermos ser mais restritivos e considerarmos como erro sistemático significativo os enviesamentos maiores que $\pm 3\%$, todas as amostras manuais passariam a ser

classificadas como não-acuradas, ou não-representativas da pilha de material proveniente das perfuratrizes.

4.1.4.1 Furo de Sondagem e Análises Granuloquímicas

O domínio ANX (Anfibólio-Xisto) é constituído de rocha de granulação média, com xistosidade pouco desenvolvida, composta por cristais de anfibólio (60%) de cor verde, orientados em matriz formada por quartzo e feldspato. Este domínio é considerado pela empresa o mais complexo e heterogêneo da jazida e, por esta razão, foi o escolhido para se realizar a sondagem rotativa.

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados das amostras coletadas pela Furukawa, pela ROC L8 e pela sonda rotativa a cada 2,5 m de profundidade no centro do bloco ANX selecionado. Não foi realizada amostragem padrão de 13 incrementos nos furos centrais para o domínio ANX, pois se optou pela coleta de toda a amostra. As Amostras B e B' para este domínio referem-se ao quarteamento da amostra total (grossos, médios e finos) coletada pela Furukawa e pela L8. No caso da sonda rotativa, as Amostras B e B' referem-se aos resultados das duas metades dos testemunhos de sondagem, as quais foram analisadas separadamente.

As três últimas colunas das Tabelas 4 e 5 mostram os erros de estimativa das amostras coletadas pela Furukawa e pela ROC L8 em relação aos testemunhos de sondagem (referência para estes cálculos) para cada intervalo de 2,5 m de profundidade, bem como para a profundidade total (10 m).

Tabela 4 – Teores de Ouro e Erros de Estimativa das Amostras Coletadas no Centro do Bloco ANX.

Furo Central	Teor Amostra B (g/t)	Teor Amostra B' (g/t)	Média dos Teores B e B' (g/t)	Erro Absoluto (B - B')	Erro Relativo (%)	Equipamento	Erro de Estimativa (%)	Teor do Furo - Média (g/t)	Erro de Estimativa - Média (%)
20-F1	0,33	0,33	0,33	0,00	-0,30	Furukawa	52,3	0,486	75,5
20-F2	0,68	0,60	0,64	0,08	13,25		72,4		
20-F3	0,59	0,60	0,60	-0,01	-1,49		109,6		
20-F4	0,37	0,36	0,37	0,00	1,10		60,2		
20-L1	0,16	0,17	0,17	-0,01	-4,65	ROC L8	-23,3	0,366	32,4
20-L2	0,34	0,59	0,46	-0,26	-43,15		24,1		
20-L3	0,48	0,47	0,47	0,02	4,09		66,2		
20-L4	0,35	0,37	0,36	-0,02	-5,16		56,9		
20-S1	0,26	0,18	0,22	0,07	40,66	Sonda Rotativa		0,277	
20-S2	0,34	0,41	0,37	-0,07	-17,36				
20-S3	0,31	0,26	0,29	0,05	18,77				
20-S4	0,22	0,23	0,23	-0,01	-3,86				

Tabela 5 – Teores de Cobre e Erros de Estimativa das Amostras Coletadas no Centro do Bloco ANX.

Furo Central	Teor Amostra B (%)	Teor Amostra B' (%)	Média dos Teores B e B' (%)	Erro Absoluto (B - B')	Erro Relativo (%)	Equipamento	Erro de Estimativa (%)	Teor do Furo - Média (%)	Erro de Estimativa - Média (%)
20-F1	0,31	0,30	0,30	0,01	3,02	Furukawa	-9,2	0,513	34,8
20-F2	0,64	0,65	0,64	-0,01	-1,54		38,7		
20-F3	0,66	0,67	0,67	-0,01	-2,08		82,5		
20-F4	0,47	0,41	0,44	0,06	13,32		22,2		
20-L1	0,19	0,19	0,19	0,00	0,53	ROC L8	-42,8	0,435	14,2
20-L2	0,43	0,43	0,43	0,00	-0,93		-7,9		
20-L3	0,66	0,69	0,67	-0,03	-3,94		84,0		
20-L4	0,42	0,48	0,45	-0,05	-11,13		24,7		
20-S1	0,39	0,27	0,33	0,12	44,85	Sonda Rotativa		0,381	
20-S2	0,43	0,50	0,46	-0,08	-14,97				
20-S3	0,37	0,36	0,37	0,02	4,48				
20-S4	0,36	0,36	0,36	0,01	-1,96				

Os resultados das tabelas permitem observar que tanto as amostras geradas pela Furukawa quanto as geradas pela L8 superestimam o teor real estimado de ouro e de cobre. Os erros de estimativa da Furukawa foram de 75,5% para o ouro e 32,4% para o cobre. Os erros de estimativa da ROC L8 foram de 34,8% para o ouro e 14,2% para o cobre. Salienta-se, novamente, que os erros foram calculados em relação aos resultados obtidos pela sonda rotativa.

Os resultados apresentados nas tabelas anteriores devem ser validados por meio de análises granuloquímicas, que permitem avaliar a influência da composição

da amostra com massas não proporcionais de fragmentos médios, grossos e finos no teor resultante.

A campanha de amostragem incluiu a realização de três furos de 5 m de profundidade no bloco ANX. Os furos foram realizados com a perfuratriz Furukawa na região central do bloco. As Tabelas 6 a 8 apresentam os resultados obtidos, onde:

- A Amostra 20-1 representa todo o material do furo (grossos, médios e finos) coletado por meio de sacos plásticos dispostos nas descargas da perfuratriz. As Amostras 20-1-A e 20-1-B foram obtidas por quarteamento da amostra total e apresentaram massas de 2.982 g e 2.583 g respectivamente. Este é o método mais representativo entre os três analisados.
- A Amostra 20-2 representa todo o material do furo (grossos, médios e finos) coletado por meio de lonas dispostas sob as descargas da perfuratriz. As Amostras 20-2-A e 20-2-B foram obtidas por quarteamento da amostra total e apresentaram massas de 2.959 g e 2.972 g respectivamente.
- A Amostra 20-3 representa a amostra padrão da empresa com 13 incrementos, apresentando uma massa de 5.642 g. Este é o método menos representativo entre os três analisados.

Tabela 6 – Teores de Ouro e Cobre Resultantes das Análises Granuloquímicas para o Domínio ANX.

Malha Tyler	mm	20-1-A		20-1-B		20-2-A		20-2-B		20-3	
		Au g/t	Cu %	Au g/t	Cu %	Au g/t	Cu %	Au g/t	Cu %	Au g/t	Cu %
10 #	2,000	1,002	0,897	1,056	0,889	0,954	0,918	0,881	0,884	0,119	0,147
18 #	1,000	1,017	0,825	1,080	0,806	0,795	0,755	0,760	0,767	0,148	0,169
35 #	0,500	0,596	0,542	0,645	0,488	0,686	0,554	0,724	0,561	0,142	0,148
50 #	0,297	0,600	0,448	0,518	0,392	0,586	0,490	0,917	0,977	0,135	0,128
100 #	0,149	0,494	0,593	0,953	0,592	0,447	0,608	0,896	1,087	0,142	0,185
150 #	0,100	0,684	1,086	0,641	0,963	0,526	0,857	0,599	0,731	0,144	0,251
< 150 #	-	2,214	1,652	1,905	1,727	1,403	1,572	1,550	1,544	0,355	0,429
Teor Médio		1,219	1,021	1,158	0,998	0,978	1,077	1,041	1,077	0,203	0,245

Tabela 7 – Distribuições Granulométricas Resultantes das Análises Granuloquímicas no Domínio ANX.

Malha		% Retida Simples				
<i>Tyler</i>	mm	20-1-A	20-1-B	20-2-A	20-2-B	20-3
10 #	2,000	6,7	7,5	4,3	3,8	13,1
18 #	1,000	18,0	16,5	9,7	8,2	15,7
35 #	0,500	11,5	13,5	10,1	9,4	11,8
50 #	0,297	11,1	10,0	8,2	34,8	8,3
100 #	0,149	11,1	12,4	14,2	14,6	15,0
150 #	0,100	9,3	9,5	8,2	2,7	6,1
< 150 #	-	32,3	30,6	45,3	26,6	29,9
Total		100	100	100	100	100

Tabela 8 – Distribuição do Au e Cu por Amostra e por Fração Granulométrica.

Malha		Distribuição (%)									
<i>Tyler</i>	mm	20-1-A		20-1-B		20-2-A		20-2-B		20-3	
		Au	Cu	Au	Cu	Au	Cu	Au	Cu	Au	Cu
10 #	2,000	5,5	5,9	6,8	6,7	4,2	3,7	3,2	3,1	7,7	7,8
18 #	1,000	15,0	14,5	15,4	13,3	7,9	6,8	6,0	5,8	11,5	10,8
35 #	0,500	5,6	6,1	7,5	6,6	7,1	5,2	6,5	4,9	8,3	7,1
50 #	0,297	5,5	4,9	4,5	3,9	4,9	3,7	30,6	31,5	5,5	4,4
100 #	0,149	4,5	6,5	10,2	7,3	6,5	8,0	12,6	14,8	10,5	11,3
150 #	0,100	5,2	9,9	5,3	9,2	4,4	6,5	1,5	1,8	4,3	6,2
< 150 #	-	58,7	52,3	50,3	52,9	65,0	66,1	39,5	38,1	52,2	52,2

A Figura 40 mostra a porcentagem retida simples para cada amostra individualmente e para a média das Amostras 20-1-A e 20-1-B. As Figuras 41 e 42 mostram a variação de teor de ouro e cobre por faixa de tamanho para cada amostra individualmente e para a média das Amostras 20-1-A e 20-1-B.

Novamente, vale lembrar que, entre as três amostragens realizadas, o método de coleta da amostra 20-1 foi o mais adequado e, portanto, a amostra 20-1 foi considerada como referência para este estudo comparativo.

Figura 40 – Porcentagem Retida Simples por Fração Granulométrica.

Figura 41 – Teor de Ouro por Fração Granulométrica.

Figura 42 – Teor de Cobre por Fração Granulométrica.

Os resultados obtidos permitem fazer as seguintes observações:

- Não é possível comparar os teores das Amostras 20-1 e 20-2 com os da Amostra 20-3, visto que esta última apresentou valores de teor muito mais baixos. De acordo com a equipe de amostragem, este fato foi devido a uma grande oscilação de teores nas diferentes regiões escolhidas para as amostras 20-1, 20-2 e 20-3 do bloco estudado.
- Todas as amostras apresentaram variação similar de teores nas diversas frações granulométricas, com maiores teores de cobre e ouro na fração mais fina. As distribuições mássicas apresentadas nas Figuras 43 e 44 confirmam a presença preferencial do cobre e do ouro na fração mais fina.
- A amostra composta por 13 incrementos apresentou uma porcentagem maior de fragmentos grossos (13,1% contra 7,1% da amostra total) e uma porcentagem similar de fragmentos finos (29,9% contra 31,5% da amostra total). Isto significa que a amostra composta tende a apresentar um teor relativamente menor de cobre e de ouro, em se comparando com a amostra total coletada pela Furukawa (Figura 45). Portanto, a amostra composta tende a subestimar a amostra total.
- Levando-se em consideração que a Furukawa tende a superestimar o teor do bloco em 75,5% para ouro e 34,8% para cobre (Tabelas 4 e 5), os resultados das análises granuloquímicas indicam uma compensação de erros, o que justifica os resultados satisfatórios, mas ilusórios, de reconciliação obtidos pela empresa.

Figura 43 – Distribuição do Ouro por Amostra e por Fração Granulométrica.

Figura 44 – Distribuição do Cobre por Amostra e por Fração Granulométrica.

Figura 45 – Teor de Cobre e Ouro por Amostra.

4.2. AMOSTRAGEM AUTOMÁTICA POR PERFURATRIZ COM CIRCULAÇÃO REVERSA

Os dados analisados neste item foram obtidos de acordo com o procedimento apresentado no item 3.4. O tratamento dos dados teve como objetivo realizar as seguintes análises:

1. Acurácia das perfuratrizes.
2. Representatividade das amostras geradas por perfuratriz.
3. Problema do descarte dos finos da Furukawa.

Os Anexos B e C apresentam os dados utilizados para o tratamento estatístico apresentado nesse trabalho a partir das análises químicas e granulométricas das amostras enviadas para o laboratório físico.

4.2.1. Acurácia das Perfuratrizes

O primeiro resultado diz respeito à massa recuperada pelas duas perfuratrizes. A Figura 46 apresenta as massas recuperadas para cada 5 metros de furo.

Figura 46 – Massa recuperada por Equipamento para cada 5 metros de Furo.

Considerando que não há erro de delimitação e erro de extração do incremento, uma amostra com maior massa representa melhor o lote. Assim, a perfuratriz L8/RC gera amostras mais representativas que a Furukawa e, por isso, o erro de estimativa da Furukawa foi calculado em relação à L8/RC.

As Figuras 47 a 49 apresentam a comparação entre as perfuratrizes. É possível notar que a Furukawa tende a superestimar o teor real estimado do furo, apresentando erros relativos de até 192% para o caso do ouro e 60% para o cobre. Além disso, nota-se que essa perfuratriz gera maiores erros na estimativa do ouro que do cobre. Estes resultados validam os resultados de superestimativa apresentados anteriormente nas Tabelas 4 e 5.

Au					Cu				
Furo Profundidade	L8	Furukawa	Erro	Erro Relativo	Furo Profundidade	L8	Furukawa	Erro	Erro Relativo
F1 0-5	0,306	0,345	0,038	12%	F1 0-5	0,425	0,435	0,010	2%
F1 5-10	0,071	0,110	0,039	56%	F1 5-10	0,140	0,179	0,039	28%
F2 0-5	0,532	0,907	0,375	71%	F2 0-5	0,538	0,522	-0,016	-3%
F2 5-10	0,096	0,185	0,088	92%	F2 5-10	0,166	0,205	0,039	23%
F2 10-15	0,028	0,081	0,053	192%	F2 10-15	0,086	0,138	0,052	60%
F2 15-20	0,025	0,048	0,023	92%	F2 15-20	0,096	0,115	0,019	20%
F3 0-5	0,282	0,294	0,011	4%	F3 0-5	0,446	0,483	0,037	8%
F3 5-10	0,095	0,100	0,005	5%	F3 5-10	0,187	0,172	-0,015	-8%
F3 10-15	0,040	0,045	0,005	13%	F3 10-15	0,102	0,155	0,053	52%
F3 15-20	0,031	0,043	0,012	39%	F3 15-20	0,104	0,105	0,001	1%
Média			0,065		Média			0,022	
Variância			0,013		Variância			0,001	
Desvio Padrão			0,112		Desvio Padrão			0,026	
Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,02		Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,001	

Figura 47 – Comparação entre os Teores das Massas Recuperadas de Ouro e Cobre.

Comparando a representatividade das amostras, é possível verificar que a Furukawa é mais representativa para o cobre que para o ouro, pois quanto menor o valor de r^2 ($r^2 = me^2 + se^2$), menores os valores de média e variância do erro e, portanto, maior a representatividade da amostra (ver Equação 2).

Figura 48 – Correlação entre a L8 e a Furukawa para Teores de Ouro.

Figura 49 – Correlação entre a L8 e a Furukawa para Teores de Cobre.

Figura 50 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro.

A Figura 50 mostra que a dispersão do ouro é muito maior que a de cobre (menor precisão para o ouro) e que o ouro possui todas as suas amostras superestimadas, enquanto o cobre possui 80% de suas amostras superestimadas.

4.2.2. Representatividade da Amostra – Furukawa

A representatividade da amostra gerada pela Furukawa pode ser estimada de três diferentes maneiras, as quais são discutidas nos itens 4.2.2.1 a 4.2.2.3

1. Comparando o teor da amostra com o teor do lote (somente pilha de médios e grossos), estima-se quão bem a amostragem manual por pá representa a pilha de médios e grossos.
2. Comparando o teor da amostra com o teor do furo (grossos, médios e finos), estima-se quão bem a amostragem manual por pá representa todo o material recuperado pela Furukawa.
3. Comparando a amostra gerada pela Furukawa com a gerada pela L8, estima-se quão bem a amostra manual coletada a partir da pilha de grossos da Furukawa representa a amostra ideal do furo (coletada pelo sistema automático da L8/RC).

4.2.2.1 Representatividade da Amostra Manual x Lote (Médios e Grossos)

As Figuras 51 a 53 apresentam comparações entre a amostra e a pilha de material descarregado na parte frontal da perfuratriz (composto preferencialmente por fragmentos grossos e médios).

Au					Cu				
Furo	Amostra	Grossos	Erro	Erro	Furo	Amostra	Grossos	Erro	Erro
Profundidade			Absoluto	Relativo	Profundidade			Absoluto	Relativo
F1 5-10	0,294	0,320	-0,026	-8%	F1 5-10	0,408	0,408	0,000	0%
F1 10-15	0,081	0,092	-0,011	-12%	F1 10-15	0,141	0,150	-0,009	-6%
F2 0-5	0,825	0,919	-0,094	-10%	F2 0-5	0,503	0,518	-0,015	-3%
F2 5-10	0,131	0,144	-0,013	-9%	F2 5-10	0,188	0,178	0,010	6%
F2 10-15	0,060	0,064	-0,004	-6%	F2 10-15	0,128	0,125	0,003	2%
F2 15-20	0,037	0,043	-0,006	-13%	F2 15-20	0,111	0,108	0,003	3%
F3 0-5	0,282	0,304	-0,022	-7%	F3 0-5	0,506	0,505	0,001	0%
F3 5-10	0,111	0,096	0,015	16%	F3 5-10	0,193	0,163	0,030	18%
F3 10-15	0,047	0,038	0,009	25%	F3 10-15	0,102	0,159	-0,057	-36%
F3 15-20	0,038	0,044	-0,006	-13%	F3 15-20	0,102	0,107	-0,005	-4%
Média			-0,016		Média			-0,004	
Variância			0,001		Variância			0,000	
Desvio Padrão			0,030		Desvio Padrão			0,022	
Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,0012		Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,0005	

Figura 51 – Comparação entre os Teores da Pilha de Grossos e a Amostra.

Novamente, nota-se que a representatividade para o cobre é muito melhor que para o ouro.

Pelas correlações apresentadas nas Figuras 52 e 53, observa-se que a amostra coletada a partir da pilha de grossos gerada pela Furukawa tende a subestimar os teores no caso do ouro e é bem mais satisfatória para os teores de cobre. A justificativa para essa tendência de subestimativa pode ser entendida através das análises granulométricas do material que representa o furo e do material referente à amostra.

Figura 52 – Correlação entre a Pilha de Grossos da Furukawa e a Amostra Manual para Ouro.

Figura 53 – Correlação entre a Pilha de Grossos da Furukawa e a Amostra Manual para Cobre.

As Figuras 54 a 57 apresentam a distribuição granulométrica da pilha de grossos da Furukawa. As Figuras 54 e 55 representam a amostra e as Figuras 56 e 57 representam toda a pilha de grossos. Comparando a distribuição granulométrica da pilha de grossos com a distribuição da amostra, verifica-se que amostragem manual por pá tende a selecionar prioritariamente os fragmentos maiores, caracterizando a geração dos erros de delimitação do incremento (IDE), de extração do incremento (IEE) e de segregação e agrupamento (GSE).

Essa segregação explica a tendência de subestimativa da amostra, já que o ouro encontra-se associado às frações mais finas e a amostragem prioriza a coleta de fragmentos grossos que possuem menor teor de metal.

Figura 54 – Distribuição Granuloquímica da Amostra Coletada da Pilha de Grossos para os Primeiros 10 m.

Figura 55 – Distribuição Granuloquímica da Amostra Coletada da Pilha de Grossos para os Últimos 10 m.

Figura 56 – Distribuição Granuloquímica da Pilha de Grossos da Furukawa para os Primeiros 10 m.

Figura 57 – Distribuição Granuloquímica da Pilha de Grossos da Furukawa para os Últimos 10 m.

4.2.2.2 Representatividade da Amostra Manual x Furo (Grossos, Médios e Finos)

Para calcular a qualidade da amostra (composta por 12 incrementos de material grosso) em relação a todo o material gerado pela Furukawa, novamente foi feita uma comparação granuloquímica. Nota-se, a partir das Figuras 58 e 59, a associação do ouro às frações mais finas. Mais uma vez, o método de amostragem manual por pá apresenta os mesmos erros descritos no item anterior.

Figura 58 – Distribuição Granulométrica do Au, do Cu e da Massa para o Material da Furukawa (grossos e finos) para os Primeiros 10 m.

Figura 59 – Distribuição Granulométrica do Au, do Cu e da Massa para o Material da Furukawa (grossos e finos) para os Últimos 10 m.

As Figuras 60 a 62 apresentam o cálculo do erro entre os teores das amostras e a perfuratriz que as gerou. Nota-se, novamente, que há uma tendência de a amostra subestimar o teor do furo, sendo esta tendência maior para o ouro. Estes resultados validam os resultados de subestimativa apresentados anteriormente nas Tabelas 6 a 8. Note-se que, neste caso, não se coletaram incrementos da pilha de finos, o que aumenta a tendência de subestimativa ao se comparar com os resultados apresentados no item 4.1.4.

Au					Cu				
Furo Profundidade	Furukawa	Amostra	Erro	Erro Relativo	Furo Profundidade	Furukawa	Amostra	Erro	Erro Relativo
F1 0-5	0,345	0,294	-0,051	-15%	F1 0-5	0,435	0,408	-0,027	-6%
F1 5-10	0,110	0,081	-0,029	-27%	F1 5-10	0,179	0,141	-0,038	-21%
F1 10-15	0,045	0,030	-0,015	-33%	F1 10-15	0,089	0,081	-0,008	-9%
F2 0-5	0,907	0,825	-0,082	-9%	F2 0-5	0,522	0,503	-0,019	-4%
F2 5-10	0,185	0,131	-0,054	-29%	F2 5-10	0,205	0,188	-0,017	-8%
F2 10-15	0,081	0,060	-0,021	-26%	F2 10-15	0,138	0,128	-0,010	-7%
F2 15-20	0,048	0,037	-0,011	-23%	F2 15-20	0,115	0,111	-0,004	-4%
F3 0-5	0,294	0,282	-0,012	-4%	F3 0-5	0,483	0,506	0,023	5%
F3 5-10	0,100	0,111	0,011	11%	F3 5-10	0,172	0,193	0,021	12%
F3 10-15	0,045	0,047	0,002	5%	F3 10-15	0,155	0,102	-0,053	-34%
F3 15-20	0,043	0,038	-0,005	-12%	F3 15-20	0,105	0,102	-0,003	-3%
Média			-0,021		Média			-0,011	
Variância			0,001		Variância			0,001	
Desvio Padrão			0,028		Desvio Padrão			0,023	
Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,001		Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,0007	

Figura 60 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para Amostra da Furukawa em Relação a Todo o Material Gerado pela Perfuratriz.

Figura 61 – Correlação entre o Material Recuperado pela Furukawa e sua Amostra para o Ouro.

Figura 62 – Correlação entre o Material Recuperado pela Furukawa e sua Amostra para o Cobre.

4.2.2.3 Representatividade da Amostra Manual x Amostra Ideal (L8/RC)

As Figuras 63 a 65 apresentam a comparação entre o teor da amostra gerada pelo sistema automático da L8/RC e o teor da amostra coletada a partir da pilha de grossos da Furukawa. É interessante notar que, diferentemente do resultado do item anterior, neste caso a amostra manual por pá superestima o teor do furo.

Isso pode ser explicado pelo fato de que a Furukawa tem uma tendência de superestimativa, como foi visto no item 4.2.1; e muito embora a amostra possua uma tendência de subestimativa, esta não é suficiente para compensar o erro induzido pelo equipamento de perfuração. Nota-se aqui que, uma vez que um erro compensa o outro, é possível obter boas reconciliações mesmo com qualidade muito baixa das amostras selecionadas. Portanto, o fato de os resultados de reconciliação serem ilusoriamente satisfatórios, não permitiu, durante anos, a detecção dos erros e a otimização dos procedimentos de amostragem de modo a garantir a representatividade das amostras.

Au					Cu				
Furo Profundidade	L8	Amostra FK	Erro	Erro Relativo	Furo Profundidade	L8	Amostra FK	Erro	Erro Relativo
F1 0-5	0,306	0,294	-0,012	-4%	F1 0-5	0,425	0,408	-0,017	-4%
F1 5-10	0,071	0,081	0,010	14%	F1 5-10	0,140	0,141	0,001	1%
F2 0-5	0,532	0,825	0,293	55%	F2 0-5	0,538	0,503	-0,035	-6%
F2 5-10	0,096	0,131	0,035	36%	F2 5-10	0,166	0,188	0,022	13%
F2 10-15	0,028	0,060	0,032	117%	F2 10-15	0,086	0,128	0,042	48%
F2 15-20	0,025	0,037	0,012	48%	F2 15-20	0,096	0,111	0,015	15%
F3 0-5	0,282	0,282	0,000	0%	F3 0-5	0,446	0,506	0,060	13%
F3 5-10	0,095	0,111	0,016	17%	F3 5-10	0,187	0,193	0,006	3%
F3 10-15	0,040	0,047	0,007	19%	F3 10-15	0,102	0,102	0,000	0%
F3 15-20	0,031	0,038	0,007	23%	F3 15-20	0,104	0,102	-0,002	-2%
Média			0,040		Média			0,009	
Variância			0,008		Variância			0,001	
Desvio Padrão			0,090		Desvio Padrão			0,027	
Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,010		Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,0008	

Figura 63 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para a Amostra da Furukawa em Relação à Amostra da L8.

Figura 64 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e a Amostra da Furukawa para o Ouro.

Figura 65 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e a Amostra da Furukawa para o Cobre.

4.2.3. Finos da Furukawa

Como explicado anteriormente, os finos da Furukawa são atualmente descartados no processo de amostragem para o planejamento de curto prazo, pois, segundo a equipe de amostragem, “a coleta dos finos prejudica a reconciliação”.

O descarte dos finos gera, contudo, o erro de ponderação do incremento (IWE) que precisa ser estudado. Para essa finalidade, foi feita uma comparação dos teores das pilhas de grossos e finos da Furukawa em relação à totalidade de material gerado pela perfuratriz L8/RC. A Figura 66 apresenta os resultados da pilha de médios e grossos da Furukawa comparativamente à totalidade de material gerado pela L8/RC, enquanto a Figura 67 apresenta os resultados dos finos da Furukawa comparativamente à totalidade de material gerado pela L8/RC.

Au					Cu				
Furo Profundidade	L8	Grossos FK	Erro Absoluto	Erro Relativo	Furo Profundidade	L8	Grossos FK	Erro Absoluto	Erro Relativo
F1 0-5	0,306	0,320	0,014	4%	F1 0-5	0,425	0,408	-0,017	-4%
F1 5-10	0,071	0,092	0,021	30%	F1 5-10	0,140	0,150	0,010	7%
F2 0-5	0,532	0,919	0,387	73%	F2 0-5	0,538	0,518	-0,020	-4%
F2 5-10	0,096	0,144	0,048	50%	F2 5-10	0,166	0,178	0,012	7%
F2 10-15	0,028	0,064	0,036	129%	F2 10-15	0,086	0,125	0,039	45%
F2 15-20	0,025	0,043	0,018	72%	F2 15-20	0,096	0,108	0,012	12%
F3 0-5	0,282	0,304	0,022	8%	F3 0-5	0,446	0,505	0,059	13%
F3 5-10	0,095	0,096	0,001	1%	F3 5-10	0,187	0,163	-0,024	-13%
F3 10-15	0,040	0,038	-0,002	-5%	F3 10-15	0,102	0,159	0,057	55%
F3 15-20	0,031	0,044	0,013	42%	F3 15-20	0,104	0,107	0,003	3%
Média			0,056		Média			0,013	
Variância			0,014		Variância			0,001	
Desvio Padrão			0,117		Desvio Padrão			0,030	
Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,017		Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,001	

Figura 66 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para os Grossos da Furukawa em Relação à perfuratriz L8.

Au					Cu				
Furo	L8	Finos	Erro Absoluto	Erro Relativo	Furo	L8	Finos	Erro Absoluto	Erro Relativo
Profundidade					Profundidade				
F1 5-10	0,306	0,515	0,209	68%	F1 5-10	0,425	0,623	0,198	47%
F1 10-15	0,071	0,154	0,083	117%	F1 10-15	0,140	0,248	0,108	77%
F2 0-5	0,532	0,795	0,263	50%	F2 0-5	0,538	0,559	0,021	4%
F2 5-10	0,096	0,402	0,306	317%	F2 5-10	0,166	0,348	0,182	110%
F2 10-15	0,028	0,140	0,112	406%	F2 10-15	0,086	0,184	0,098	113%
F2 15-20	0,025	0,069	0,044	175%	F2 15-20	0,096	0,143	0,047	48%
F3 0-5	0,282	0,250	-0,032	-11%	F3 0-5	0,446	0,394	-0,052	-12%
F3 5-10	0,095	0,131	0,036	38%	F3 5-10	0,187	0,236	0,049	26%
F3 10-15	0,040	0,082	0,042	107%	F3 10-15	0,102	0,135	0,033	32%
F3 15-20	0,031	0,040	0,009	30%	F3 15-20	0,104	0,095	-0,009	-9%
Média			0,107		Média			0,067	
Variância			0,013		Variância			0,006	
Desvio Padrão			0,114		Desvio Padrão			0,080	
Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,025		Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)			0,011	

Figura 67 – Erro Relativo do Cobre e do ouro para os finos da Furukawa em Relação à perfuratriz L8.

É possível notar que o erro absoluto e relativo para os finos é mais significativo do que para os grossos. De modo geral, a Furukawa apresenta uma tendência para a superestimação.

Caso a amostra fosse corretamente composta, essa superestimação seria também traduzida para a amostra, justificando os resultados encontrados na prática, pois a amostra atual subestima o teor real compensando a tendência oposta da perfuratriz.

É importante ressaltar que, embora os erros gerados sejam menores, essa é uma prática incorreta de amostragem, pois os erros de ponderação estão sendo propositalmente (ou por falta de treinamento da equipe) cometidos para amenizar e encobrir outros erros, gerando reconciliações excelentes, mas ilusórias.

4.2.4. Representatividade da Amostra – L8/RC

A Figura 68 apresenta uma análise dos resultados para a amostra da L8/RC, utilizando como referência todo o material gerado pela própria perfuratriz. Um aspecto importante é a ausência de um erro sistemático (enviesamento), não possuindo uma tendência de subestimação ou superestimação e garantindo uma correlação muito maior entre as amostras e todo o lote de material recuperado pela perfuratriz.

Au					Cu				
Furo Profundidade	L8	Amostra L8	Erro	Erro Relativo	Furo Profundidade	L8	Amostra L8	Erro	Erro Relativo
F1 0-5	0,306	0,282	-0,024	-8%	F1 0-5	0,425	0,320	-0,105	-25%
F1 5-10	0,071	0,069	-0,002	-3%	F1 5-10	0,140	0,140	0,000	0%
F2 0-5	0,532	0,578	0,046	9%	F2 0-5	0,538	0,551	0,013	2%
F2 5-10	0,096	0,121	0,025	26%	F2 5-10	0,166	0,166	0,000	0%
F2 10-15	0,028	0,025	-0,003	-10%	F2 10-15	0,086	0,081	-0,005	-6%
F2 15-20	0,025	0,037	0,012	48%	F2 15-20	0,096	0,093	-0,003	-4%
F3 0-5	0,282	0,277	-0,005	-2%	F3 0-5	0,446	0,422	-0,024	-5%
F3 5-10	0,095	0,082	-0,013	-14%	F3 5-10	0,187	0,168	-0,019	-10%
F3 10-15	0,040	0,044	0,004	11%	F3 10-15	0,102	0,097	-0,005	-5%
F3 15-20	0,031	0,036	0,005	17%	F3 15-20	0,104	0,105	0,001	1%
Média				0,005	Média				-0,015
Variância				0,000	Variância				0,001
Desvio Padrão				0,020	Desvio Padrão				0,033
Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)				0,0004	Representatividade ($r^2 = me^2 + se^2$)				0,001

Figura 68 – Erro Relativo do Cobre e do Ouro para a Amostra da L8 em Relação ao Próprio Equipamento.

Diferente dos demais casos, a representatividade das amostras da L8/RC para o ouro é maior que para o cobre. Entretanto, a quantidade de amostras para esta análise estatística foi pequena e o resultado pode ter sido influenciado por uma única amostra (F1 0-5) com teores de cobre muito discrepantes. As Figuras 69 e 70 mostram que os valores possuem uma dispersão menor em relação à reta de regressão e, portanto, uma precisão maior.

Vale salientar que a reta de regressão nada diz sobre a acurácia do processo, mas somente sobre a precisão. A acurácia do processo é estimada pela média do erro de amostragem.

Figura 69 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e sua a Amostra para Ouro.

Figura 70 – Correlação entre o Material Recuperado pela L8 e sua a Amostra para Cobre.

As Figuras 71 a 74 apresentam uma comparação da distribuição granulométrica para a amostra da L8/RC e todo o material recuperado pela perfuratriz para os 10 primeiros metros do furo e para os 10 últimos.

Figura 71 – Distribuição Granulométrica de Ouro da Amostra e de Todo o Material da L8 para os Primeiros 10 metros.

Figura 72 – Distribuição Granulométrica de Ouro da Amostra e de Todo o Material da L8 para os Últimos 10 metros.

Figura 73 – Distribuição Granuloquímica de Cobre da Amostra e de Todo o Material da L8 para os primeiros 10 metros.

Figura 74 – Distribuição Granuloquímica de Cobre da Amostra e de Todo o Material da L8 para os Últimos 10 metros.

As distribuições são relativamente mais compatíveis que as observadas para a Furukawa, não havendo preferência de amostragem de uma fração granulométrica em detrimento das demais. Este fato mostra a ausência de enviesamento das amostras geradas pela L8/RC e, portanto, indica que as amostras são acuradas, considerando desprezíveis os erros de extração (IEE) e de delimitação (IDE) .

As variâncias observadas na Figura 68 são muito baixas, indicando que as amostras também são precisas. Com o aumento de precisão e acurácia das amostras, pode-se afirmar que as amostras geradas pela perfuratriz ROC L8 com circulação reversa são consideradas representativas do furo.

4.3. ELIPSE DE PRECISÃO

A elipse de precisão é uma forma de analisar se as estimativas de teores estão em limites aceitáveis, ou seja, se há reprodutibilidade do método. A classificação errônea de minério e estéril, devido à precisão da amostragem, é um problema comum. Assim, a otimização dos procedimentos de amostragem é imprescindível para garantir que as amostras sejam suficientemente precisas e acuradas e, portanto, garantir a confiabilidade nos resultados de reconciliação.

A Figura 75 ilustra a elipse de precisão para os teores apresentados nos Apêndices A a D. Os valores do eixo das abscissas (teor estimado) representam as amostras coletadas pelo procedimento padrão de amostragem manual por pá; os valores do eixo das ordenadas (teor real) representam todo o restante do material do furo correspondente e, portanto, podem ser considerados uma melhor estimativa para o teor real do furo.

Figura 75 – Elipse de Precisão.

A empresa classifica o material desmontado da frente de lavra de três formas: alto teor, baixo teor e estéril. O material considerado “alto teor” é enviado diretamente para a usina, enquanto o material considerado “baixo teor” é estocado em uma pilha que deve alimentar a usina nos últimos anos de operação da mina.

O teor de corte da operação é de 0,18 g/t de ouro para o material de alto teor. Este foi o valor utilizado na Figura 75 para demarcar as áreas da elipse indicadas pelos números 1 e 2. A primeira área representa PERDA, ou o alto teor classificado indevidamente como baixo teor e que vai para o estoque (subestimação), enquanto a segunda representa DILUIÇÃO, ou baixo teor classificado indevidamente como alto teor e que vai para a usina (superestimação).

A Figura 75 mostra apenas um ponto na área número 2 da elipse (material classificado erroneamente como alto teor), e seis pontos na área número 1 (material classificado erroneamente como baixo teor). Considerando também o teor de corte do material de baixo teor (0,10 g/t), cinco pontos apresentam material de baixo teor classificado indevidamente como estéril (ver Apêndice E). Portanto, o método de

amostragem manual classifica erroneamente 10,3% dos teores do depósito (12 de 117 amostras) e apresenta uma tendência de subestimativa de teores.

De uma forma geral, a elipse de precisão mostra os efeitos da amostragem manual por pá na classificação de minério e estéril. Os resultados apontam para um problema que pode trazer consequências sérias à empresa, pois diluição e perda geram prejuízos financeiros a qualquer operação mineira.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados deste trabalho permite afirmar que uma reconciliação bem-sucedida pode ser ilusória. No primeiro caso estudado, erros cometidos no processo de amostragem de pilhas de pó de perfuratriz foram compensados por erros provenientes do tipo de perfuratriz utilizada para amostragem, resultando em reconciliações aparentemente excelentes.

A amostra manual, composta por 13 incrementos, tende a subestimar o teor do furo, especialmente no caso do ouro. Excluindo-se o incremento da pilha de finos faz agravar o problema de subestimativa, apesar de este procedimento apresentar resultados de reconciliação supostamente positivos. Os resultados do estudo realizado com a sonda rotativa mostraram a tendência tanto da Furukawa quanto da ROC L8 de superestimar o teor do furo.

A amostragem manual e a utilização da Furukawa no processo de amostragem da Mineração Maracá se mostram, portanto, inadequadas para fins de reconciliação. A tendência de superestimativa da Furukawa é compensada pela tendência de subestimativa da amostra composta por 13 incrementos, o que leva a resultados satisfatórios, mas ilusórios, de reconciliação.

Segundo Schofield (2001), para muitos profissionais, a reconciliação é o teste final de qualidade das estimativas de massa e teor resultantes dos modelos de reservas e dos modelos de controle de teor. Entretanto, sem realizar um diagnóstico de todos os processos geradores de dados para os cálculos de reconciliação, esta afirmação não pode ser validada, pois diversos fatores, como as práticas inadequadas de amostragem, influenciam seus resultados.

O impacto econômico gerado por esse método incorreto de amostragem não deve ser subestimado, pois os erros intrínsecos ao processo são, neste caso, mascarados, e podem futuramente resultar em análises errôneas dos resultados de

reconciliação da operação, especialmente quando a lavra atingir regiões mais pobres ou mais heterogêneas do depósito. Demonstra-se, assim, a importância da amostragem na confiabilidade dos resultados de reconciliação da Mineração Maracá.

Observa-se também que os erros de estimativa devidos à composição da amostra de 13 incrementos não são tão significativos quanto os erros devidos ao tipo de perfuratriz, portanto, propôs-se a aquisição de uma nova perfuratriz para fins de amostragem de curto prazo. Assim, a segunda parte do trabalho foi realizada para validar a perfuratriz com circulação reversa, que confirmou a tendência de superestimativa da Furukawa.

As amostras geradas pela ROC L8/RC são mais acuradas, uma vez que não são observados erros sistemáticos, e também são mais precisas, o que pode ser confirmado pela menor dispersão dos pontos em torno da reta de regressão (menor variância). Sendo a representatividade a união de precisão e de acurácia, podemos dizer que a amostra gerada pela perfuratriz ROC L8/RC é mais representativa que a amostra gerada pela Furukawa ou pela ROC L8 sem circulação reversa.

Os resultados mostraram que o uso da Furukawa para fins de amostragem deve ser evitado. Em 2012, a empresa optou pela aquisição da perfuratriz Atlas Copco ROC L8/RC com sistema automático de amostragem e quarteamento para melhorar a qualidade da amostra primária. Os resultados foram excelentes, traduzidos pela maior precisão e acurácia dos resultados da amostragem e, portanto, maior representatividade das amostras. Sabendo que a confiabilidade nos resultados de reconciliação depende da qualidade dos dados de entrada, conclui-se que o método de amostragem por perfuratriz ROC L8/RC está validado para fins de reconciliação.

REFERÊNCIAS

BANKES, P. et al. 2003. **Estimation of mineral resources and mineral reserves: best practice guideline**. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, CIM, Canada. Disponível em:
<<http://www.cim.org/committees/estimation2003.pdf>>.

CHIEREGATI, A.C; PITARD; F.F.. **Fundamentos teóricos da amostragem**. In: Teoria e prática do tratamento de minérios: manuseio de sólidos granulados, CHAVES, A. P., vol. 5, págs. 299-338, Signus Editora, São Paulo, 2011.

CHIEREGATI, A. C. **Reconciliação pró-ativa em empreendimentos mineiros**. Tese de doutorado. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, 2007. p. 201.

CHIEREGATI, A. C. et al. **The point selection error introduced by sampling one-dimensional lots**. In: World Conference on Sampling and Blending, 3rd. WCSB3: proceedings. UFRGS/Fundação Luiz Englert. Porto Alegre, Brasil. 2007. p. 405-414.

CHIEREGATI, A. C.; PIGNATARI, L. E. C.; DELBONI JR. H. **Novo modelo de reconciliação para a indústria do ouro**. REM: Revista Escola de Minas, vol. 64, n° 2. 2011. págs. 239-240, abr/jun. Escola de Minas, Ouro Preto.

CHIEREGATI, A. C. **Teoria e Prática de Amostragem e Reconciliação**. São Paulo: Epusp, 2012a. 62 p. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, PMI-5030 – Amostragem na Indústria Mineral.

CHIEREGATI, A. C. **Amostragem na Indústria Mineral**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 26, 27 e 28 nov. 2012b. Anotações de Aula da disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, PMI-5030 – Amostragem na Indústria Mineral.

CRAWFORD, G. D. **Reconciliation of reserves: part 2**. Pincock Perspectives, nº50, jan/04. 2004. págs. 1-4, Pincock, Allen & Holt, Colorado. Disponível em: <<http://www.pincock.com/perspectives/Issue50-Reconciliation-2.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2011.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística: para Engenharia e Ciências**. Tradução de Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006. 608 p.

ELLIOTT, S. M.; SNOWDEN, D.V.; BYWATER, A.; STANDING, C.A; RYBA, A. **Reconciliation of the McKinnons gold deposit, Cobar, New South Wales**. In: Mineral Resource and Ore Reserve Estimation: The AusIMM Guide to Good Practice, págs. 257-268, Ed. A.C. Edwards, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Australia, 2001.

FERREIRA, F. M. **Amostragem**. Apostila de curso. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1989.

FRANÇOIS-BONGARÇON, D.; GY, P. **Critical aspects in mill and plants: a guide to understanding sampling audits.** *Journal of the South African IMM*, v. 102, n.8, 2002.

GRIGORIEFF, A.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. **O problema de amostragem manual na indústria mineral.** REM: Revista Escola de Minas, vol. 55, n° 3. 2002. págs. 229-233, jul/set. Escola de Minas, Ouro Preto.

GY, P. **Sampling for analytical purposes.** 1st ed., translated by A.G. Royle, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 1998.

IMRIE, G. O. C. 2001. **Ore flow optimization: mine to mill integration - the next step improvement.** Hatch Beddows Strategy Consulting, Australia. Disponível em: <http://www.hatch.ca/Operations_Support/articles.htm>.

JURAS, S. J. 2002. **Idaho-Maryland mine: technical report.** Emgold Mining Corporation, caps. 12, 13 e 17, AMEC E&C Services, Vancouver, Canada. Disponível em: <<http://www.emgold.com/s/TechnicalReport.asp?ReportID=49039>>.

MORLEY, C. 2003. **Beyond reconciliation: a proactive approach to using mining data.** In: Large Open Pit Mining Conference, 5th, págs. 185-192, Kalgoorlie, Australia.

NOPPÉ, M. 2004. **Reconciliation: importance of good sampling and data QA-QC.** In: Mining and Resource Geology Symposium, Queensland, Australia. Disponível em: <<http://www.snowdengroup.com/Files/GradeControl-1.pdf>>.

PITARD, F. F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control.** Florida, CRC Press, 1993. 2nd ed., p. 488.

PITARD, F. F. 2001. **A strategy to minimize ore grade reconciliation problems between the mine and the mill.** In: Mineral Resource and Ore Reserve Estimation: the AusIMM Guide to Good Practice, págs. 557-566, Ed. A.C. Edwards, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Australia.

PITARD, F. F. 2008. **Blasthole Sampling for Grade Control – The Many Problems and Solutions.** In: Sampling. Conference, Perth, Australia, 2008.

SCHOFIELD, N. A. **The myth of mine reconciliation.** *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation: the AusIMM Guide to Good Practice.* Melbourne, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2001. p. 601-610.

THOMAS, N.; SNOWDEN, V. 1990. **Improving reconciliation and grade control by statistical and geostatistical analysis.** In: Strategies for Grade Control, págs. 49-59, AIG Bulletin 10, Australia. Disponível em: <<http://www.snowdengroup.com/Files/>>.

YAMAMOTO, J. K. **Geoestatística aplicada,** São Paulo, IG/USP, Apostila do curso, 1992.

YAMANA GOLD INC. - Mineração Maracá Indústria e Comércio S.A., **Strategic Life of Mine,** 2010.

APÊNDICE A

GNS

Teores de ouro, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco GNS.

blasthole	Sample A Au grade (g/t)	Sample B Au grade (g/t)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,38	0,37	1	0,01	2,96%
2	0,41	0,43	2	-0,02	-5,08%
3	0,93	0,37	3	0,57	155,19%
4	0,40	0,51	4	-0,11	-21,88%
5	0,59	0,69	5	-0,10	-13,91%
6	0,97	0,84	6	0,14	16,17%
7	0,51	0,61	7	-0,11	-17,43%
8	0,74	0,69	8	0,05	7,59%
9	0,20	0,29	9	-0,09	-31,71%
10	0,32	0,36	10	-0,04	-10,67%
11	0,17	0,41	11	-0,24	-58,19%
12	0,28	0,30	12	-0,02	-7,28%
13	0,20	0,24	13	-0,05	-19,26%
14	0,17	0,25	14	-0,08	-32,93%
15	0,24	0,26	15	-0,01	-4,71%
16	0,15	0,22	16	-0,07	-33,04%
17	0,60	0,63	17	-0,03	-4,90%
18	0,57	0,52	18	0,05	10,66%
19	0,54	0,76	19	-0,21	-28,08%
20-1	0,50	0,54	20	-0,04	-7,76%
20-2	0,21	0,29	21	-0,07	-24,91%
21	0,53	0,67	22	-0,14	-20,84%
22	0,44	0,45	23	-0,01	-2,00%
23	0,62	0,47	24	0,15	32,33%
24	0,68	0,49	25	0,19	37,73%
25	0,79	0,79	26	0,00	0,13%
26	0,56	0,71	27	-0,15	-21,36%
27	1,38	0,60	28	0,77	127,98%
28	0,19	0,21	29	-0,02	-10,90%
29	0,19	0,24	30	-0,06	-22,54%
m = mean	0,482	0,473		0,009	-0,29%
s = std deviation	0,286	0,190		0,205	43,36%
m/3s					-0,22%

Teores de cobre, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco ANX.

blasthole	Sample A Cu grade (%)	Sample B Cu grade (%)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,406	0,389	1	0,02	4,37%
2	0,337	0,336	2	0,00	0,30%
3	0,384	0,368	3	0,02	4,35%
4	0,301	0,286	4	0,02	5,24%
5	0,431	0,404	5	0,03	6,68%
6	0,261	0,253	6	0,01	3,16%
7	0,463	0,434	7	0,03	6,68%
8	1,010	0,947	8	0,06	6,65%
9	0,543	0,577	9	-0,03	-5,89%
10	0,589	0,542	10	0,05	8,67%
11	0,306	0,349	11	-0,04	-12,32%
12	0,339	0,339	12	0,00	0,00%
13	0,717	0,681	13	0,04	5,29%
14	0,606	0,649	14	-0,04	-6,63%
15	0,992	0,920	15	0,07	7,83%
16	0,702	0,597	16	0,11	17,59%
17	0,672	0,613	17	0,06	9,62%
18	0,789	0,744	18	0,05	6,05%
19	0,687	0,633	19	0,05	8,53%
21	0,740	0,634	20	0,11	16,72%
22	0,092	0,087	21	0,01	5,75%
23	0,140	0,143	22	0,00	-2,10%
24	0,405	0,403	23	0,00	0,50%
25	0,357	0,287	24	0,07	24,39%
26	0,287	0,374	25	-0,09	-23,26%
27	0,446	0,439	26	0,01	1,59%
28	0,490	0,467	27	0,02	4,93%
29	0,651	0,660	28	-0,01	-1,36%
m = mean	0,505	0,484		0,021	3,69%
s = std deviation	0,230	0,209		0,044	9,06%
m/3s					13,58%

APÊNDICE B

BTO

Teores de ouro, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco BTO.

blasthole	Sample A Au grade (g/t)	Sample B Au grade (g/t)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,27	0,27	1	0,00	0,00%
2	0,25	0,28	2	-0,03	-11,83%
3	0,19	0,24	3	-0,05	-20,85%
4	0,24	0,29	4	-0,05	-16,67%
5	0,39	0,37	5	0,01	3,75%
6	0,75	0,56	6	0,19	33,75%
7	0,72	0,69	7	0,03	3,90%
8	0,52	0,41	8	0,10	24,70%
9	0,36	0,33	9	0,02	6,59%
10	0,20	0,19	10	0,01	4,17%
11	0,24	0,29	11	-0,05	-17,77%
12	0,08	0,08	12	0,00	-1,32%
13	0,28	0,29	13	-0,01	-2,11%
14	0,07	0,10	14	-0,03	-27,08%
15	0,07	0,10	15	-0,03	-28,43%
16	0,05	0,07	16	-0,02	-23,88%
17	0,08	0,10	17	-0,02	-18,37%
18	0,14	0,13	18	0,01	3,79%
19	0,18	0,26	19	-0,09	-33,21%
21	0,54	0,52	20	0,01	2,10%
22	0,23	0,68	21	-0,45	-66,42%
23	0,23	0,24	22	-0,01	-3,70%
24	0,21	0,17	23	0,04	26,19%
25	0,38	0,42	24	-0,04	-9,38%
26	0,56	0,59	25	-0,03	-5,72%
27	0,22	0,20	26	0,02	11,28%
28	0,10	0,11	27	0,00	-1,89%
29	0,08	0,09	28	-0,01	-15,38%
20-F1	0,58	0,55	29	0,03	4,72%
20-F2	0,34	0,45	30	-0,11	-24,22%
20-F3	0,41	0,35	31	0,06	17,39%
20-F4	0,66	0,51	32	0,15	29,45%
20-F5	0,19	0,18	33	0,00	1,09%
m = mean	0,295	0,306		-0,010	-4,71%
s = std deviation	0,197	0,182		0,098	20,33%
m/3s					-7,72%

Teores de cobre, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco BTO.

blasthole	Sample A Cu grade (%)	Sample B Cu grade (%)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,34	0,34	1	0,00	0,59%
2	0,33	0,39	2	-0,06	-15,27%
3	0,25	0,30	3	-0,05	-16,95%
4	0,33	0,39	4	-0,07	-17,05%
5	0,82	0,77	5	0,04	5,56%
6	1,27	1,08	6	0,20	18,22%
7	1,29	1,07	7	0,22	20,75%
8	0,65	0,63	8	0,02	2,52%
9	0,71	0,65	9	0,06	9,71%
10	0,42	0,41	10	0,02	4,19%
11	0,31	0,34	11	-0,03	-8,61%
12	0,22	0,23	12	-0,01	-3,08%
13	0,28	0,33	13	-0,04	-13,50%
14	0,18	0,20	14	-0,02	-9,50%
15	0,18	0,21	15	-0,03	-12,38%
16	0,12	0,12	16	0,00	-0,83%
17	0,16	0,15	17	0,01	4,00%
18	0,22	0,23	18	-0,01	-5,29%
19	0,35	0,36	19	-0,01	-3,36%
21	0,96	0,83	20	0,14	16,59%
22	0,34	0,74	21	-0,40	-53,92%
23	0,39	0,38	22	0,01	2,34%
24	0,29	0,29	23	0,00	0,35%
25	0,53	0,47	24	0,05	10,76%
26	0,94	0,92	25	0,02	1,84%
27	0,35	0,34	26	0,01	3,57%
28	0,26	0,25	27	0,01	1,97%
29	0,14	0,15	28	-0,02	-11,04%
20-F1	0,86	0,90	29	-0,05	-5,42%
20-F2	0,56	0,67	30	-0,10	-15,34%
20-F3	0,50	0,54	31	-0,04	-7,99%
20-F4	0,58	0,63	32	-0,05	-8,43%
20-F5	0,28	0,26	33	0,02	8,91%
m = mean	0,466	0,471		-0,005	-2,91%
s = std deviation	0,312	0,273		0,098	13,62%
m/3s					-7,13%

APÊNDICE C

QSRT/GNS

Teores de ouro, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco QSRT/GNS.

blasthole	Sample A Au grade (g/t)	Sample B Au grade (g/t)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,23	0,24	1	-0,01	-5,44%
2	0,22	0,25	2	-0,02	-9,31%
3	0,20	0,21	3	0,00	-2,43%
4	0,13	0,10	4	0,03	27,72%
5	0,25	0,27	5	-0,01	-5,22%
6	0,24	0,21	6	0,03	12,62%
7	0,28	0,26	7	0,01	4,17%
9	0,28	0,28	8	0,00	-1,07%
10	0,23	0,25	9	-0,02	-8,37%
11	0,20	0,18	10	0,02	11,17%
12	0,08	0,11	11	-0,03	-28,83%
13	0,14	0,16	12	-0,02	-14,63%
14	0,22	0,24	13	-0,02	-6,78%
15	0,09	0,12	14	-0,02	-20,00%
16	0,22	0,31	15	-0,08	-27,21%
17	0,26	0,25	16	0,01	3,56%
18	0,35	0,32	17	0,03	9,63%
19	0,53	0,39	18	0,15	38,34%
21	0,16	0,20	19	-0,03	-16,84%
22	0,20	0,30	20	-0,09	-31,08%
23	0,24	0,26	21	-0,01	-4,71%
24	0,21	0,23	22	-0,03	-12,02%
25	0,23	0,20	23	0,03	16,16%
27	0,13	0,19	24	-0,06	-31,55%
28	0,26	0,30	25	-0,04	-12,00%
29	0,23	0,27	26	-0,04	-14,44%
20-F1	0,27	0,30	27	-0,04	-11,92%
20-F2	0,13	0,10	28	0,04	40,00%
m = mean	0,222	0,231		-0,009	-3,59%
s = std deviation	0,087	0,071		0,045	18,76%
m/3s					-6,38%

Teores de cobre, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco QSRT/GNS.

blasthole	Sample A Cu grade (%)	Sample B Cu grade (%)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,47	0,49	1	-0,03	-5,08%
2	0,47	0,45	2	0,01	2,87%
3	0,47	0,39	3	0,09	22,34%
4	0,34	0,28	4	0,06	22,74%
5	0,52	0,52	5	0,00	0,39%
6	0,50	0,52	6	-0,02	-4,07%
7	0,47	0,49	7	-0,02	-3,67%
9	0,48	0,48	8	0,01	1,68%
10	0,46	0,52	9	-0,06	-11,65%
11	0,39	0,43	10	-0,04	-10,19%
12	0,34	0,36	11	-0,02	-5,04%
13	0,36	0,37	12	-0,01	-3,22%
14	0,56	0,55	13	0,01	1,81%
15	0,35	0,36	14	-0,01	-2,24%
16	0,43	0,55	15	-0,12	-22,40%
17	0,46	0,46	16	0,00	-0,65%
18	0,51	0,52	17	0,00	-0,78%
19	0,59	0,54	18	0,04	8,12%
21	0,36	0,40	19	-0,04	-9,55%
22	0,46	0,51	20	-0,05	-9,68%
23	0,46	0,50	21	-0,04	-7,94%
24	0,44	0,48	22	-0,04	-8,11%
25	0,44	0,43	23	0,02	3,98%
27	0,28	0,36	24	-0,08	-22,50%
28	0,44	0,48	25	-0,04	-8,58%
29	0,44	0,48	26	-0,05	-9,38%
20-F1	0,57	0,64	27	-0,07	-11,08%
20-F2	0,30	0,30	28	0,00	0,66%
m = mean	0,441	0,459		-0,018	-3,26%
s = std deviation	0,078	0,083		0,043	10,11%
m/3s					-10,74%

APÊNDICE D

ANX

Teores de ouro, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco ANX.

blasthole	Sample A Au grade (g/t)	Sample B Au grade (g/t)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,40	0,36	1	0,04	10,64%
2	0,19	0,20	2	-0,01	-6,06%
3	0,26	0,24	3	0,02	8,86%
4	0,15	0,17	4	-0,02	-11,24%
5	0,46	0,44	5	0,03	6,44%
6	0,17	0,18	6	-0,01	-4,57%
7	0,40	0,50	7	-0,11	-21,63%
8	1,27	1,58	8	-0,31	-19,77%
9	0,52	0,60	9	-0,08	-13,29%
10	0,40	0,43	10	-0,03	-7,37%
11	0,22	0,27	11	-0,05	-18,28%
12	0,21	0,23	12	-0,02	-10,30%
13	0,48	0,55	13	-0,07	-13,00%
14	0,44	0,50	14	-0,06	-12,72%
15	0,58	0,69	15	-0,11	-15,92%
16	0,43	0,41	16	0,03	6,17%
17	0,83	0,87	17	-0,04	-4,70%
18	0,75	0,94	18	-0,18	-19,57%
19	0,61	0,65	19	-0,04	-6,63%
21	0,75	0,70	20	0,05	7,56%
22	0,08	0,09	21	-0,01	-11,11%
23	0,17	0,16	22	0,01	3,07%
24	0,39	0,40	23	0,00	-1,01%
25	0,23	0,23	24	0,00	0,86%
26	0,21	0,27	25	-0,06	-21,89%
27	0,30	0,40	26	-0,10	-23,99%
28	0,34	0,37	27	-0,03	-8,38%
29	0,50	0,54	28	-0,04	-7,41%
m = mean	0,419	0,463		-0,044	-7,69%
s = std deviation	0,256	0,307		0,074	10,07%
m/3s					-25,46%

Teores de cobre, erro absoluto e erro relativo das Amostras A e B para o bloco ANX.

blasthole	Sample A Cu grade (%)	Sample B Cu grade (%)	pair index	absolute error	relative error (%)
1	0,406	0,389	1	0,02	4,37%
2	0,337	0,336	2	0,00	0,30%
3	0,384	0,368	3	0,02	4,35%
4	0,301	0,286	4	0,02	5,24%
5	0,431	0,404	5	0,03	6,68%
6	0,261	0,253	6	0,01	3,16%
7	0,463	0,434	7	0,03	6,68%
8	1,010	0,947	8	0,06	6,65%
9	0,543	0,577	9	-0,03	-5,89%
10	0,589	0,542	10	0,05	8,67%
11	0,306	0,349	11	-0,04	-12,32%
12	0,339	0,339	12	0,00	0,00%
13	0,717	0,681	13	0,04	5,29%
14	0,606	0,649	14	-0,04	-6,63%
15	0,992	0,920	15	0,07	7,83%
16	0,702	0,597	16	0,11	17,59%
17	0,672	0,613	17	0,06	9,62%
18	0,789	0,744	18	0,05	6,05%
19	0,687	0,633	19	0,05	8,53%
21	0,740	0,634	20	0,11	16,72%
22	0,092	0,087	21	0,01	5,75%
23	0,140	0,143	22	0,00	-2,10%
24	0,405	0,403	23	0,00	0,50%
25	0,357	0,287	24	0,07	24,39%
26	0,287	0,374	25	-0,09	-23,26%
27	0,446	0,439	26	0,01	1,59%
28	0,490	0,467	27	0,02	4,93%
29	0,651	0,660	28	-0,01	-1,36%
m = mean	0,505	0,484		0,021	3,69%
s = std deviation	0,230	0,209		0,044	9,06%
m/3s					13,58%

APÊNDICE E
ELIPSE DE PRECISÃO

Teores de Ouro – Elipse de Precisão

Teor de Ouro (g/t)											
#	Real	Estimado	#	Real	Estimado	#	Real	Estimado	#	Real	Estimado
1	0,370	0,380	31	0,280	0,250	61	0,510	0,660	91	0,360	0,400
2	0,430	0,410	32	0,240	0,190	62	0,180	0,190	92	0,200	0,190
3	0,370	0,930	33	0,290	0,240	63	0,240	0,230	93	0,240	0,260
4	0,510	0,400	34	0,370	0,390	64	0,250	0,220	94	0,170	0,150
5	0,690	0,590	35	0,560	0,750	65	0,210	0,200	95	0,440	0,460
6	0,840	0,970	36	0,690	0,720	66	0,100	0,130	96	0,180	0,170
7	0,610	0,510	37	0,410	0,520	67	0,270	0,250	97	0,500	0,400
8	0,690	0,740	38	0,330	0,360	68	0,210	0,240	98	0,600	0,520
9	0,290	0,200	39	0,190	0,200	69	0,260	0,280	99	0,430	0,400
10	0,360	0,320	40	0,290	0,240	70	0,280	0,280	100	0,270	0,220
11	0,410	0,170	41	0,080	0,080	71	0,250	0,230	101	0,230	0,210
12	0,300	0,280	42	0,290	0,280	72	0,180	0,200	102	0,550	0,480
13	0,240	0,200	43	0,100	0,070	73	0,110	0,080	103	0,500	0,440
14	0,250	0,170	44	0,100	0,070	74	0,160	0,140	104	0,690	0,580
15	0,260	0,240	45	0,070	0,050	75	0,240	0,220	105	0,410	0,430
16	0,220	0,150	46	0,100	0,080	76	0,120	0,090	106	0,870	0,830
17	0,630	0,600	47	0,130	0,140	77	0,310	0,220	107	0,940	0,750
18	0,520	0,570	48	0,260	0,180	78	0,250	0,260	108	0,650	0,610
19	0,760	0,540	49	0,520	0,540	79	0,320	0,350	109	0,700	0,750
20	0,540	0,500	50	0,680	0,230	80	0,390	0,530	110	0,090	0,080
21	0,290	0,210	51	0,240	0,230	81	0,200	0,160	111	0,160	0,170
22	0,670	0,530	52	0,170	0,210	82	0,300	0,200	112	0,400	0,390
23	0,450	0,440	53	0,420	0,380	83	0,260	0,240	113	0,230	0,230
24	0,470	0,620	54	0,590	0,560	84	0,230	0,210	114	0,270	0,210
25	0,490	0,680	55	0,200	0,220	85	0,200	0,230	115	0,400	0,300
26	0,790	0,790	56	0,110	0,100	86	0,190	0,130	116	0,370	0,340
27	0,710	0,560	57	0,090	0,080	87	0,300	0,260	117	0,540	0,500
28	0,210	0,190	58	0,550	0,580	88	0,270	0,230			
29	0,240	0,190	59	0,450	0,340	89	0,300	0,270			
30	0,270	0,270	60	0,350	0,410	90	0,100	0,130			

Legenda:

	alto teor classificado como baixo teor
	baixo teor classificado como estéril
	baixo teor classificado com alto teor

ANEXO A

FÓRMULA DE GY

Fórmula de Gy

$$s_{FSE}^2 = c f g l d^3 \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

Onde:

s_{FSE}^2 é a variância relativa do possível resultado de teor da amostra;

d é o tamanho máximo dos fragmentos;

c , f , g e l são fatores que podem ser calculados ou obtidos experimentalmente.

Fator forma (f): fator de cubicidade:

$f = 0,1$ para minerais laminares (mica, biotita, sheelita etc.);

$f = 0,2$ para materiais moles e submetidos a tensões mecânicas, como pepitas de ouro;

$f \approx 0,5$ para a maioria dos minerais: carvão = 0,446; minério de ferro = 0,495 a 0,514; pirita = 0,470 e cassiterita = 0,530 (Gy, 1967);

$f = 0,523$ para fragmentos esféricos;

$1 < f < 10$ para minerais aciculares (turmalina, asbestos, serpentina etc.).

Fator granulometria (g): leva em consideração a variação dos tamanhos dos fragmentos no interior de um lote:

$g = 0,25$ para materiais não calibrados (produto de um britador);

$g = 0,55$ para materiais calibrados (resultado do peneiramento entre duas malhas);

$g = 0,75$ para materiais naturalmente calibrados (cereais e grãos como feijão, arroz, aveia etc.).

Fator liberação (l):

$$l = \frac{a_{\max} - a_L}{1 - a_L}$$

$$l = \left(\frac{d_l}{d} \right)^x \quad \text{sed} < d_l, l = 1$$

Onde:

$a_{\max}$ é o teor máximo dos fragmentos maiores;

a_L é o teor médio do lote (admite-se que a_L não varia entre as frações granulométricas);

d é o diâmetro máximo dos fragmentos,

d_i é o diâmetro de liberação

x é um fator que pode ser estimado pelo mineralogista, analisando-se várias seções polidas do material. Não havendo estimativa de x , uma regra de dedão é usar $x = 0,5$.

$l = 0,05$ para materiais muito homogêneos;

$l = 0,1$ para materiais homogêneos;

$l = 0,2$ para materiais medianos;

$l = 0,4$ para materiais heterogêneos;

$l = 0,8$ para materiais muito heterogêneos;

Fator constituição mineralógica (c):

$$c = \lambda_M \frac{(1 - a_L)^2}{a_L} + \lambda_g (1 - a_L)$$

No entanto, na maioria dos casos práticos, o cálculo de c pode ser simplificado:

$$c = \frac{\lambda_M}{a_L} \quad \text{se } a_L < 0,10 \text{ ou } 10\%$$

$$c = \lambda_g (1 - a_L) \quad \text{se } a_L > 0,90 \text{ ou } 90\%$$

Onde

λ_M é a densidade do mineral de interesse;

λ_g é a densidade do mineral de ganga;

a_L é o teor do lote.

ANEXO B

ANÁLISE QUÍMICA

ANEXO C

ANÁLISE GRANULOQUÍMICA