

LUCAS AUGUSTO CAMPOS PEREIRA

**RECONCILIAÇÃO PROATIVA EM UMA MINA
DE ZINCO**

SÃO PAULO

2017

LUCAS AUGUSTO CAMPOS PEREIRA

**RECONCILIAÇÃO PROATIVA EM UMA MINA
DE ZINCO**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do diploma
de Engenheiro de Minas.

Orientadora: Prof.^a Dra. Ana Carolina
Chieregati.

São Paulo

2017

TF-2017

P414r

Sysno 2880770

FICHA CATALOGRÁFICA

H2017m

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010042

Catálogo-na-publicação

Pereira, Lucas Augusto Campos

Reconciliação proativa em uma mina de zinco / L. A. C. Pereira -- São Paulo, 2017.

53 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Reconciliação 2.Amostragem 3.Mine-to-plant 4.Prognosticação
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de formatura a todos aqueles dos quais eu descendo os genes e a história. A todos os homens e mulheres que dispensaram suor, sangue e lágrimas para que, um dia, um dos seus pudesse aspirar a um lugar de igualdade.

Dedico este trabalho aos meus antepassados – conhecidos e esquecidos – que calejaram as mãos na lavoura, nas minas, nas casas de família e em tantos espaços de desigualdade.

Se hoje posso aqui escrever este trabalho, só o posso por ser filho da luta de tantos.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível com a contribuição direta e indireta de muitas pessoas, por isso agradeço:

À equipe da unidade, representada pelos profissionais Basílio Botura Neto, Camila Silva Laudares, Camilo José de Freitas Neto, Bárbara Nassif Veiga, Warlei Gonçalves Xavier Rodrigues, Michel Henrique dos Reis, Rafael Campos Rosado e todos os membros das respectivas equipes de Geologia, Planejamento de Lavras, Topografia Beneficiamento, Processo e Laboratório: pela atenção, acolhida e oportunidade que me deram de acompanhar todo o trabalho referente ao teste de reconciliação.

À professora Ana Carolina Chierigati pela sugestão deste tema de trabalho, além da atenção e suporte em todos os momentos que foram necessários.

Aos meus colegas da Exploração Mineral do escritório corporativo da VM pelos dois anos de convivência, aprendizado constante do universo da mineração, e também pelo carinho e pela leveza da equipe que fizeram do meu estágio uma experiência extraordinária. Agradeço, em especial, ao meu gestor Paul Cezanne por acreditar no meu trabalho e proporcionar oportunidades especiais para potencializar todo o meu aprendizado acadêmico.

Aos meus colegas e amigos da POLI por fazerem da minha graduação uma fase de inúmeras alegrias, risadas, lembranças positivas e companheirismo nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos-irmãos do Ministério Eucarístico, que, ao longo desses anos de graduação, torceram, oraram, riram e choraram por mim e comigo. Em especial, minha gratidão a Enrico Tadeu, Ana Paula Salviano, Everaldo Salviano, Keythi Silva e Nathalia Sol.

À minha família maior (Campos e Pereiras), que, ao longo de todos esses anos, foram fonte de amor e exemplo para a construção de tudo aquilo que sou.

Ao meu pai, Edson Rodrigues Pereira, alvo da minha maior admiração desde a mais tenra idade – meu maior exemplo de dedicação, força nas dificuldades e gosto pela música, desafios, conhecimento e ensino.

À minha mãe, Maria Aparecida Carvalho Campos, por ser a fonte e objeto do maior amor que senti, até agora, nesta vida - meu exemplo de entrega, otimismo e professora das coisas mais simples e significativas da vida.

Ao meu irmão, Júlio Augusto Campos Pereira, com quem tive e tenho a oportunidade de dividir uma vida toda e com quem posso aprender, a cada dia, a levar a vida de maneira calma e leve.

E, por último – embora mais importante – agradeço a Deus pelo Amor Infinito que se manifesta em mim todos os dias (nas grandes e pequenas coisas) e pela Sua Divina Providência que me proporcionou tudo isto pelo que posso agradecer.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de reconciliação proativa para uma mina de zinco localizada na região noroeste do estado de Minas Gerais. O trabalho se baseia na análise das aderências entre as estimativas dos modelos, o planejamento de lavra e as operações de mina e de usina através da interpretação dos resultados da amostragem nas diversas etapas da cadeia mineira, buscando, assim, desenvolver um modelo de reconciliação visando ao controle dos processos desde a modelagem da jazida até o produto final. As práticas de reconciliação são relativamente recentes na história da mineração e consistem na comparação entre massas e teores estimados pelos modelos de jazidas (geralmente na forma de modelos de blocos) e massas e teores produzidos na lavra e beneficiamento. A reconciliação proativa propõe um prognóstico contínuo para identificação de desvios nos processos, a fim de que a aderência entre o planejado e produzido seja melhorada constantemente por meio de um processo iterativo. Tal método, proposto por Morley (2003), representou uma evolução à reconciliação reativa, em que as estimativas são ajustadas por um fator adimensional chamado *mine call fator* (MCF), descrito pela diferença entre a produção prevista pelos modelos e a produção efetiva da usina. Pelo método reativo, o MCF é utilizado para a correção de estimativas posteriores sem que se diagnostique as causas dos desvios observados no processo. Para a elaboração do modelo de reconciliação da mina especificada, este trabalho se iniciou com o planejamento, passando pelo acompanhamento de atividades e interpretação dos resultados, desde a coleta das amostras de mina e usina até as análises químicas no laboratório físico da empresa. Em seguida, a partir dos resultados das amostras coletadas, fez-se a análise das aderências através da interpretação dos indicadores de reconciliação e propôs-se um novo modelo de reconciliação proativa, além de sugerir intervenções nos processos de mina e usina.

Palavras-chave: Reconciliação; amostragem; prognosticação; mina-usina.

ABSTRACT

The present work aims to develop a proactive reconciliation model for a zinc mine, located at Minas Gerais' northwest region. This work analyses the adherences between the model estimates and the mine and plant operations, based on the interpretation of the sampling results of several stages in the mining chain, in order to develop a reconciliation model aiming at the control of the processes from the geological modeling to the final product. The reconciliation practices are relatively recent in the mining industry and consist in the comparison of tonnage and grades between resource models and distinct stages of mine and plant operations. The proactive reconciliation proposes a continuous prognosis to identify process deviations in order to constantly and iteratively improve the consistence between what is planned and what is produced. This method, proposed by Morley (2003), represented an evolution of the previous method: the reactive reconciliation, whereby the models estimation are adjusted by the "mine call factor" (MCF), described by the difference between the production predicted by the models and the actual production of the plant. The reactive method applies the MCF for the correction of estimates without diagnosing the causes of deviations observed in the process. To develop the reconciliation model, this work began with the planning and the monitoring of activities, from the sampling in all stages of mining chain to the sample preparation and chemical analysis in the company's laboratory. Finally, from the results of the collected samples and interpretation of reconciliation indicators, a new reconciliation model was proposed in addition to mine and plant processes interventions.

Keywords: Reconciliation, sampling, prognostication; mine-to-plant

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma em blocos do processo da unidade.	17
Figura 2- Representação esquemática do processo de reconciliação.	22
Figura 3- Variáveis que influenciam a reconciliação.	23
Figura 4- Modelo de reconciliação proativa proposto para a unidade.	28
Figura 5a/b - Pátio de estoque ROM.	30
Figuras 6a/b - Amostradores das britagens C (esquerda) e W (direita).	31
Figuras 7a/b – Pontos de amostragem na alimentação das Usinas C (esquerda) e W (direita).	32
Figura 8 - Modelo de reconciliação e indicadores calculados no teste de reconciliação	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cubagem dos realces planejados sobre os modelos de blocos LP (considerando diluição operacional).	33
Tabela 2 - Cubagem dos realces lavrados e galerias de desenvolvimento produtivo sobre os modelos de blocos CP.	34
Tabela 3 - Produção das minas (03/10/2017 a 16/10/2017).	35
Tabela 4 - Resultados e comparação da variação de estoque de ROM e alimentação das pilhas de homogeneização (04/10/2017 a 11/10/2017).....	35
Tabela 5 - Resultados para reconciliação de mina.....	36
Tabela 6 - Histórico de formação e retomada das pilhas de homogeneização.	36
Tabela 7 - Resultados de amostragem e balanço de massa na usina W.	37
Tabela 8 - Resultados de amostragem e balanço de massa/metalúrgico na usina C.	37
Tabela 9 - Resultados dos indicadores de reconciliação MM.	38
Tabela 10 - Indicadores de reconciliação de planta - Usina W.	40
Tabela 11 - Indicadores de reconciliação de planta - Usina C.	42
Tabela 12 - Resultados da Usina C a partir do balanço de massa feito com base na recuperação mássica.	43

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1- Cálculo do erro geral de amostragem.....	19
Equação 2- Cálculo do fator de composição mineralógica.	20
Equação 3- Cálculo do erro total de amostragem.	20
Equação 4- Cálculo do erro de amostragem propriamente dita.	20
Equação 5- Cálculo do erro de preparação.....	21
Equação 6 - Cálculo de F1 (método de Rossi e Camacho)	25
Equação 7- Cálculo de F2 (método de Rossi e Camacho)	25
Equação 8 - Cálculo de F3 (método de Rossi e Camacho)	25
Equação 9- Cálculo de F4 (método de Rossi e Camacho)	25
Equação 10 - Cálculo do fator final de reconciliação (método de Rossi e Camacho)	26
Equação 11- Cálculo de reconciliação de teores pelo método probabilístico	26
Equação 12- Cálculo Cs (método probabilístico de reconciliação)	26
Equação 13- Cálculo da incerteza de teor pelo método probabilístico.	27
Equação 14- Cálculo da Variação de Estoque do ROM.	30
Equação 15 - Cálculo do indicador MP (massa).	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CGS	Centímetro, grama, segundo
CP	Curto Prazo
LP	Longo Prazo
MCF	<i>Mine Call Factor</i>
MP	<i>Mine-to-plant</i>
QA/QC	<i>Quality Assurance/Quality Control</i>
ROM	<i>Run of Mine</i>
RM	Reconciliação de Mina
RMU	<i>Reconciliation Minimal Unit</i>
RP	Reconciliação de Planta
VRM	<i>Vertical Retreat Mining</i>

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1.1. Geologia regional	16
1.1.2. A mina em estudo.....	16
2. OBJETIVO.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Conceitos de amostragem.....	18
3.1.1. Amostragem	18
3.1.2. Plano de amostragem:	18
3.1.3. Teoria de Pierre Gy	19
3.2. Conceitos de erros de amostragem	20
3.2.1. Erro de amostragem propriamente dita (Eap)	20
3.2.2. Erro de preparação	21
3.3. Conceitos de reconciliação.....	21
3.3.1. Fatores.....	22
3.3.2. Técnicas de reconciliação.....	23
3.4. Cálculo dos indicadores de reconciliação proativa	24
3.4.1. Método de Rossi e Camacho (método tradicional)	24
3.4.2. Cálculo do fator de reconciliação por modelos probabilísticos.....	26
4. METODOLOGIA	27
4.1. Procedimento de amostragem	29
4.1.1. Modelos de longo prazo	29
4.1.2. Modelos de curto prazo	29
4.1.3. Produção.....	30
4.1.4. Britagem.....	31
4.1.5. Alimentação da usina	32
4.1.6. Concentrado/Rejeito.....	32
4.2. Cálculo dos indicadores de reconciliação	33
5. RESULTADOS.....	33
5.1. Cubagem dos modelos de longo e curto prazo.....	33
5.2. Produção da mina e variação de estoque.....	34
5.3. Resumo – Reconciliação de mina	35
5.4. Resultados das usinas	36
6. DISCUSSÃO.....	37
6.1. Reconciliação modelo a modelo	37
6.2. Reconciliação modelo CP a produção.....	38

6.3. Reconciliação na variação de estoque	39
6.4. Reconciliação de planta – Usina W.....	40
6.5. Reconciliação de planta – Usina C.....	42
6.6. Modelo de reconciliação proativa elaborado.....	43
7. CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICES.....	48
APÊNDICE A – Memorial de cálculo das usinas C e W.....	48
APÊNDICE B – Pontos de amostragem nas usinas C e W.....	52
ANEXOS.....	53
ANEXO A – Capacidades de processamentos das operações unitárias das usinas.....	53
ANEXO B – Resultados dos produtos finais (Usina C + Usina W).	53

1. INTRODUÇÃO

Um empreendimento mineiro é caracterizado por uma sequência de atividades e operações que visam obter, de um bem mineral de interesse, utilidade em algum tipo de atividade humana (podendo ser o uso industrial, agrícola, de construção, arte, etc.) a partir da descoberta, desenvolvimento, lavra, transporte, cominuição, concentração e repasse do bem mineral à próxima etapa de interesse (metalurgia ou venda direta). Para isto, muitas são as etapas necessárias que requerem uma integração de modo sistêmico.

Um dos fatores que tornam única a atividade mineradora é a incerteza geológica, isto é, a falta de conhecimento absoluto do depósito mineral (ou jazida) quanto a massas, teores, características estruturais, químicas e mineralógicas que estão em subsolo – fato que acarreta em discrepâncias nas operações mineiras entre o que foi planejado e o que foi, de fato, produzido. Nesse contexto é que são inseridas as práticas de reconciliação.

De acordo com Morrison (2008), reconciliação pode ser definida como “um balanço metalúrgico que relaciona a produção de materiais vendáveis e materiais estéreis ou resíduos de um processo de volta à sua fonte como minério ou outro material alimentado. Os resultados devem ser informados com os erros a eles associados, como para qualquer balanço metalúrgico”, ou seja, a prática da reconciliação consiste na comparação entre massas e teores estimados em modelos de jazida e massas e teores produzidos na usina de beneficiamento. Holtham *et al.* (2008) afirmam que “a reconciliação compara o que foi alcançado com o que se esperava alcançar de modo que, tanto o planejamento como os processos de produção, possam ser continuamente aperfeiçoados e melhorados”. A observância de grandes discrepâncias entre esses valores evidencia um problema que necessita a adoção de estratégias que o minimizem.

Historicamente, o princípio frequentemente utilizado na prática de reconciliação foi a chamada reconciliação reativa, em que se comparam os valores de produção com os valores estimados pelos modelos e se calculam fatores, tais como o *mine call factor* (MCF), que são, por sua vez, aplicados a estimativas futuras, na tentativa de melhorar a previsão de desempenho de uma operação a longo prazo. Os métodos reativos, porém, não podem ser considerados como as melhores práticas da indústria pelo fato de não evidenciarem as causas pelas quais tais discrepâncias foram originadas.

A essência da ‘reconciliação proativa’ é realizar esse processo de comparação de maneira iterativa e contínua, baseando-se na divisão da reconciliação em etapas, de modo que se possa analisar cada etapa individualmente e otimizar os procedimentos de amostragem e de estimativas de produção visando melhorar a previsibilidade dos modelos.

1.1.1. Geologia regional

A mina em estudo está localizada no distrito zincífero de Vazante, região com maior depósito de zinco conhecido no Brasil. A região está situada na Faixa de Dobramentos Brasília e apresenta uma sequência de depósitos de Zn e Pb ao longo de uma zona de cisalhamento de cerca de 150 km – conhecida como Faixa Vazante.

A associação de minerais de minério encontrada é constituída por willemita (Zn_2SiO_4), hemimorfita – também chamada de calamina – ($\text{Zn}_4\text{Si}_3\text{O}(\text{OH})_2$), hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2), siderita (FeCO_3), dolomita ($(\text{Ca},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$), clorita ($(\text{Mg},\text{Al},\text{Fe})_{12}(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$), franklinita ($(\text{Zn},\text{Mn},\text{Fe})_2\text{O}_4$) e zincita (ZnO), com esfarelita (ZnS) e galena (PbS) subordinadas (MONTEIRO 1997).

De acordo com Dardenne (2001), o grupo Vazante representa uma unidade metassedimentar constituída por uma sequência marinha pelítico-carbonática de idade neoproterozóica (1.000 a 540 milhões de anos).

1.1.2. A mina em estudo

A jazida situa-se a 7 quilômetros do município mais próximo e está hospedada em rochas carbonáticas. No princípio, continha dois minerais de minério constituintes: a calamina, que predominava nas porções mais superiores – lavradas a céu aberto – e, nos corpos mais inferiores, a willemita. Os minerais de ganga do depósito são o quartzo, dolomita, argilominerais, hematita e goethita (J. MENDO CONSULTORIA, 2010).

A mina iniciou suas atividades a céu aberto no ano de 1969, tendo iniciado o desenvolvimento e lavra subterrânea em 1982. Atualmente, possui vida útil prevista até 2028, considerando o aprofundamento da mina e o desenvolvimento de uma nova porção, que, neste trabalho, será denominada “EN”¹.

Por conta de os corpos de minério serem subverticais (mergulho médio de 70 graus), a jazida é lavrada pelo método VRM (*Vertical Retreat Mining*), que é uma variação do *Sublevel Stopping*,

¹ Informação contida no site da empresa (fonte confidencial).

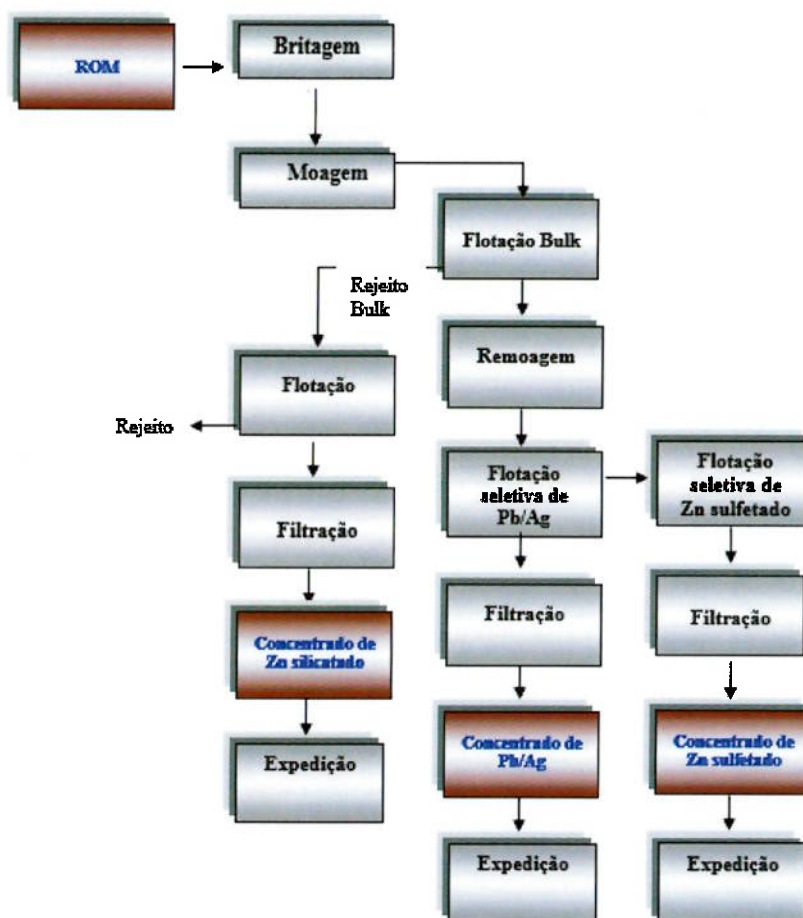
com realces planejados de cerca de 30 metros de altura, 60 metros de comprimento e 5 metros de largura (informação verbal)².

A mina conta com uma das estações de bombeamento mais potentes do mundo pelo fato de a taxa de percolação de água no depósito ser de cerca de 11 mil metros cúbicos por hora (informação verbal)¹.

Os produtos finais possíveis são concentrados de zinco (sulfetado e silicatado) e chumbo com prata associada. O processo de beneficiamento da unidade conta com as etapas de britagem, moagem, flotação, espessamento e filtração, conforme indica a Figura 1.

Por uma cláusula de confidencialidade da empresa, algumas das informações escritas neste trabalho não podem ser referenciadas, de modo que, quando houver algum caso deste, a informação trará consigo uma nota de rodapé identificando qual equipe da empresa a forneceu.

Figura 1- Fluxograma em blocos do processo da unidade.



Fonte: Tecnologia (2016)³, adaptado pelo autor (2017).

² Informação fornecida pela equipe de mina durante a visita do autor à unidade, em outubro/2017

³ Fluxograma enviado por e-mail pela equipe de Tecnologia da empresa em 19 de fevereiro de 2016.

2. OBJETIVO

Este trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Minas tem como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo de reconciliação proativa para uma mina de zinco visando ao controle de processos mineiros. O trabalho se baseia na análise das aderências entre as estimativas dos modelos e as operações de mina e de usina através da interpretação dos resultados da amostragem e medição (ou cálculo) das massas nas diversas etapas da cadeia mineira, buscando, assim, desenvolver um modelo de reconciliação visando ao controle dos processos desde a modelagem da jazida até o produto final.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo evidenciar alguns conceitos nas áreas de estatística, amostragem e reconciliação que foram utilizados como base para o desenvolvimento das atividades referentes ao presente trabalho.

3.1. Conceitos de amostragem

3.1.1. Amostragem

No campo da estatística, define-se amostragem como um conjunto de operações que visa retirar uma parte significativa (amostra) de um dado universo. O principal objetivo da amostragem é reduzir a massa de um lote sem inserir mudanças significativas em suas outras propriedades. No âmbito da indústria mineral, o CETEM (2004, p.20) descreve amostragem como “uma sequência de estágios de preparação [...] e de amostragem propriamente dita (redução de massa de material), ambos suscetíveis a alteração de teor da característica de interesse e, portanto, à geração de erros [...]”.

A amostragem é, para muitas áreas do conhecimento e ciências técnicas, uma área fundamental que pode alterar significativamente conclusões de estudos; “a amostragem é, sem dúvida, uma das operações mais complexas e passíveis de introduzir erros [...] uma amostragem malconduzida pode resultar prejuízos vultuosos ou em distorções de resultados com consequências técnicas imprevisíveis.” (GÓES, POSSA e LUZ 2004, p.20).

3.1.2. Plano de amostragem

O plano de amostragem é a diretriz que define o procedimento de amostragem a ser aplicado aos produtos, através da amostra recolhida. Segundo Ferreira (1989), um plano de amostragem

é aquele que concilia os custos de amostragem com a precisão requerida para os resultados, visto serem diretamente proporcionais; Chieregati (2007) reforça o fato de que o plano de amostragem deve ser imparcial – ou seja, não enviesado – de modo que cada constituinte do lote tenha chance idêntica de fazer parte da amostra.

3.1.3. Teoria de Pierre Gy

A estimativa do erro de amostragem com base na aplicação da fórmula de Pierre Gy supõe que todas as partículas individuais possam ser selecionadas com igual probabilidade, ou seja, que o plano de amostragem seja bem efetuado. Vale lembrar que toda a teoria de Pierre Gy foi desenvolvida para o sistema CGS, devido à origem da teoria na área química. A equação de estimativa do erro de amostragem a partir de dados controláveis, conhecida como “fórmula de Gy”, que é expressa no livro de CHAVES (2012) como:

Equação 1- Cálculo do erro geral de amostragem.

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

Fonte: Chieregati, Pitard (2012).

Onde:

- s_{FSE}^2 = variância relativa do possível resultado de teor da amostra;
- d = diâmetro máximo dos fragmentos (neste trabalho, este fator terá base no d_{95});
- M_S = massa mínima das amostras, em gramas;
- M_L = massa do material a amostrar, em gramas;
- l = fator de liberação (adimensional, entre 0 e 1) que está ligado ao fator de liberação do mineral de interesse (variando entre $l=0,05$ para materiais muito homogêneos e $l=0,8$ para materiais muito heterogêneos).
- f = fator de forma das partículas (adimensional – varia de 0 a 1) relacionado à esfericidade das partículas. Contudo, a aplicação do método de estimativa mostrou que, na prática, f pode ser considerado uma constante igual a 0,5 para a maioria dos minerais;
- g = fator de granulometria em relação à abertura da peneira padrão para o d_{95} estipulado para o teste (adimensional entre 0 e 1). Recomenda-se:

$g = 0,25$ para materiais não calibrados, tais como o produto de um britador (sem controle de malha);

$g = 0,55$ para materiais calibrados, tais como materiais resultantes do intervalo entre duas peneiras;

- c = fator de composição mineralógica, em g/cm^3 [Vide Equação 2].

Equação 2- Cálculo do fator de composição mineralógica.

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

Fonte: Chieregati, Pitard (2012).

Em que:

- a_L = teor do lote;
- λ_M = peso específico médio do mineral de interesse, em g/cm^3 .
- λ_g = peso específico médio do mineral de ganga, em g/cm^3 .

3.2. Conceitos de erros de amostragem

De acordo com a teoria geral da amostragem, proposta por Pierre Gy, o erro total de amostragem (E_t) representa o somatório do erro de amostragem propriamente dita e do erro de preparação da amostra primária, para obtenção da amostra final. Todas as equações expostas nesta seção foram retiradas do capítulo de amostragem do Livro de Tratamento de Minérios do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), elaborado em 2004.

Equação 3- Cálculo do erro total de amostragem.

$$E_t = E_{ap} + E_p$$

As seções 3.2.1 e 3.2.2 descrevem de forma mais detalhada a composição de cada tipo de erro de amostragem.

3.2.1. Erro de amostragem propriamente dita (E_{ap})

O erro de amostragem propriamente dita consiste do somatório de sete erros independentes, oriundos do processo de seleção da amostra primária, e, principalmente, da variabilidade do material que está sendo amostrado.

Equação 4- Cálculo do erro de amostragem propriamente dita.

$$E_{ap} = E_{a1} + E_{a2} + E_{a3} + E_{a4} + E_{a5} + E_{a6} + E_{a7}$$

- E_{a1} = erro de ponderação, produto da não uniformidade da densidade ou da vazão do material;
- E_{a2} = erro de integração, resultante da heterogeneidade de distribuição das partículas, a longo prazo, no material;

- E_{a3} = erro de periodicidade, resultante de eventuais variações periódicas da característica de interesse no material;
- E_{a4} = erro fundamental, resultante da heterogeneidade de constituição do material. Depende essencialmente da massa da amostra do material amostrado. É o erro característico quando a amostragem é realizada em condições ideais;
- E_{a5} = erro de segregação, resultante da heterogeneidade de distribuição do material;
- E_{a6} = erro de delimitação, resultante da eventual configuração incorreta da delimitação da dimensão dos incrementos; e
- E_{a7} = erro de extração, resultante da operação de tomada dos incrementos.

3.2.2. Erro de preparação

O erro de preparação é o somatório de cinco erros independentes, provenientes das operações de redução de granulometria, homogeneização e quarteamento a que a amostra primária é submetida.

Equação 5- Cálculo do erro de preparação.

$$E_p = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3} + E_{p4} + E_{p5}$$

- E_{p1} = perda de partículas da amostra;
- E_{p2} = contaminação da amostra;
- E_{p3} = alteração não intencional da característica de interesse a ser medida na amostra final;
- E_{p4} = erros não intencionais do operador (como a mistura de subamostras provenientes de diferentes amostras);
- E_{p5} = alteração intencional da característica de interesse a ser medida na amostra final.

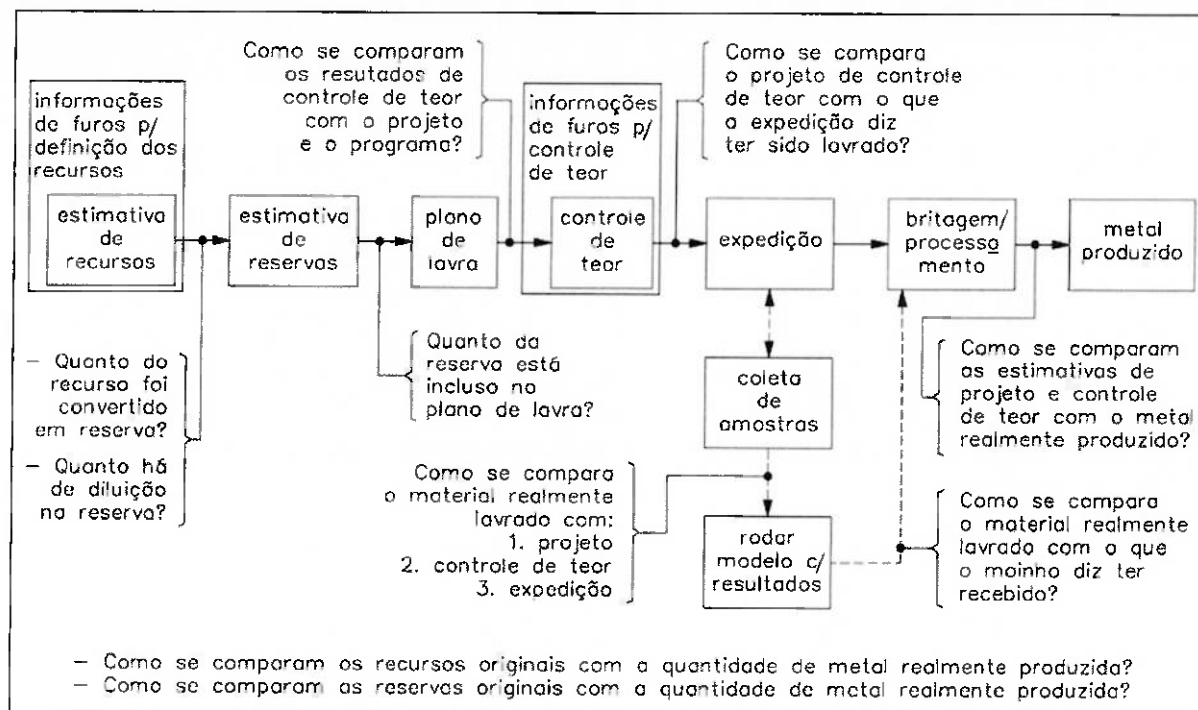
3.3. Conceitos de reconciliação

A reconciliação pode ser compreendida, de maneira simplificada, como a comparação entre uma estimativa – seja no modelo de recursos, reservas ou controle de teor – e uma medição (produção oficial da usina de beneficiamento). De acordo com Morley (2003), os principais objetivos da reconciliação são:

1. Medir o desempenho da operação tendo como base as metas iniciais;
2. Garantir uma avaliação acurada dos ativos minerais;
3. Validar a eficiência das estimativas (massa e teor);
4. Fornecer indicadores de desempenho.

A Figura 2 apresenta um processo típico de reconciliação, passando por toda cadeia mineira.

Figura 2- Representação esquemática do processo de reconciliação.



Fonte: Morley (2003) apud Chieregati (2007), adaptada.

As perguntas apresentadas no modelo orientam as conclusões a serem tomadas ao longo do processo e indicam, em caso de resposta negativa, a necessidade da realização de análises adicionais, a fim de identificar as causas das variâncias observadas e permitindo o planejamento de ações para mitigá-las.

O conceito de reconciliação pode, então, ser resumido em três palavras: “medir, controlar e melhorar” (NOPPÉ, 2004).

3.3.1. Fatores

As práticas de reconciliação comparam as estimativas dos modelos apresentados com o que foi produzido na usina por períodos determinados. Como os valores medidos dificilmente coincidem, os ajustes posteriores são realizados através da aplicação de um fator que multiplica o valor da produção estimada pelos modelos. Como descrito anteriormente, este fator é chamado de *mine call fator* (MCF) e expressa a diferença entre a produção prevista pelos modelos e a produção registrada na usina.

Em um cenário ideal, todos os fatores de reconciliação deveriam ser iguais a 1 – o que indica que as variáveis estimadas e executadas são idênticas. Contudo, o problema de reconciliação é

bem complexo por conta de diversos fatores que constituem as amostragens e estimativas. As causas que influenciam a reconciliação estão apresentadas na Figura 3.

Figura 3- Variáveis que influenciam a reconciliação.

CAUSAS	VARIÁVEIS
MODELO GEOLÓGICO	• efeito pepita <i>in situ</i> real
	• erros de amostragem e sub-amostragem
	• erros analíticos
	• erros de estimativa
	• rejeição excessiva de <i>outliers</i>
	• resultados da metodologia de estimativa
	• suposições da densidade do minério
	• definição dos limites do minério
MODELO DE CONTROLE DE TEOR	• efeito pepita <i>in situ</i>
	• erros de amostragem e sub-amostragem
	• erros analíticos
	• furos de desmonte paralelos à mineralização
	• resultados da metodologia de krigagem e cálculo da média
	• contorno do teor do minério
LAVRA	• métodos de amostragem não acurados
	• modelo de lavra paralelo para cruzar a mineralização
	• deslocamento dos limites da mineralização sobre desmonte
	• métodos de amostragem não acurados
	• métodos de transporte por caminhão não acurados
	• perda de finos
	• estimativa de massa
	• diluição
USINA	• retenção de metal dentro do moinho
	• métodos de análise não acurados
	• ciclos do processo desconhecidos ou mal interpretados
	• calibração dos medidores de massa e de fluxo
	• sub-amostragem de laboratório inadequada
	• reconciliação calculada para períodos muito curtos de tempo

Fonte: Pitard (2001) apud Chieregati (2007).

Portanto, a simples aplicação de fatores de ajuste às estimativas, segundo Morley (2003), mascararia as causas dos erros responsáveis pelas discrepâncias observadas, não sendo a melhor prática industrial de reconciliação, conforme afirma Chieregati (2007). As causas reais de qualquer variância só podem ser detectadas por meio da análise de cada variável separadamente, seguido por um processo iterativo de recalibração das metodologias, cálculos e processos – o que é chamado de reconciliação proativa.

3.3.2. Técnicas de reconciliação

Existem técnicas diferentes de se realizar testes reconciliação, a depender da metodologia pela qual se deseja trabalhar e dos resultados que se deseja obter. Riske *et al.* (2010) dividem a reconciliação em três categorias: temporal, espacial e física, definidas como:

- I. **Reconciliação espacial:** é a categoria de reconciliação que considera as variáveis espaciais dos modelos e das variáveis produtivas medidas; ou seja, se além de comparar as variáveis de unidades com a mesma localização. De acordo com os autores, os resultados de reconciliação podem ter desvios significativos se as informações espaciais não forem levadas em conta;
- II. **Reconciliação temporal:** é a prática mais comum na indústria, por meio da qual se compara os resultados das variáveis ao longo de um período (dias, semanas, meses ou anos). As características espaciais do depósito podem ser suavizadas caso este período de tempo seja suficientemente longo para representar as características do trecho lavrado do depósito.
- III. **Reconciliação física:** focada em atributos, tais como metal contido, volumes, diluição e características geotécnicas – é geralmente combinada com a reconciliação espacial para comparar tais grandezas dentro do maciço, por conta da variabilidade geológica.

3.4. Cálculo dos indicadores de reconciliação proativa

Embora a prática da reconciliação reativa tenha sido amplamente aplicada na indústria mineral, por meio do *Mine Call Factor*, que se atém em comparar e ajustar as “pontas” das fases de mina (modelos de longo prazo e produção) e usina (alimentação da britagem e produtos finais), desenvolveram-se, nas últimas duas décadas, métodos de reconciliação proativa – em que se comparam as “pontas” de diferentes etapas do processo - a fim de se detectarem os problemas existentes ao longo da cadeia e, então, melhorar a previsibilidade das variáveis do minério lavrado e beneficiado. São, nesta seção, expostos dois diferentes métodos desenvolvidos para o cálculo dos indicadores de reconciliação proativa: o método de Rossi e Camacho, e o modelo probabilístico de Parhizkar. Vale salientar que, apesar de diversos autores chamarem os números obtidos na reconciliação de ‘fatores’, neste trabalho serão chamados de ‘indicadores’, visto que não serão usados para corrigir estimativas.

3.4.1. Método de Rossi e Camacho (método tradicional)

Rossi e Camacho (2000) apresentaram um estudo no qual compararam os resultados mensais de amostragem (massa, teores e conteúdo metálico) por meio de razões entre diferentes fases da cadeia, conforme mostrados de maneira exemplificada:

- i. Fatores F1 são baseados na comparação dos modelos de curto prazo com os modelos de longo prazo, calculados, de maneira genérica:

Equação 6 - Cálculo de F1 (método de Rossi e Camacho)

$$F1 = \frac{\text{modelo de curto prazo}}{\text{modelo de longo prazo}}$$

- ii. Fatores F2 são baseados na comparação dos modelos de controle de teor com os modelos de curto prazo, calculados, de maneira genérica:

Equação 7- Cálculo de F2 (método de Rossi e Camacho)

$$F2 = \frac{\text{modelo de controle de teor}}{\text{modelo de curto prazo}}$$

- iii. Fatores F3 são baseados na comparação dos reportes mensais de toneladas, teores e conteúdos metálicos do que foi produzido pela mina juntamente com os modelos de controle de teor. De acordo com os autores, é possível que não haja amostragem na etapa de produção por gargalos tecnológicos ou de recursos humanos, sendo aplicável, então, os resultados da alimentação moinho (dispensando o F4, embora não seja ideal). Caso haja um processo de amostragem da produção, os fatores F3 são calculados, de forma genérica:

Equação 8 - Cálculo de F3 (método de Rossi e Camacho)

$$F3 = \frac{\text{produzido na mina}}{\text{modelo de controle de teor}}$$

- iv. Fatores F4 correspondem às aderências entre o que foi produzido na mina e a alimentação do moinho. O fator F4 é tido como o fator mais decisivo da análise, pelo fato de medir as perdas e diluição no carregamento, transporte e empilhamento. Calcula-se F4, de forma genérica:

Equação 9- Cálculo de F4 (método de Rossi e Camacho)

$$F4 = \frac{\text{alimentação do moinho}}{\text{produzido na mina}}$$

A partir desses quatro fatores, é possível quantificar a acurácia das amostragens de maneira inter-relacionada ao longo de toda a cadeia (modelos de longo prazo à alimentação do moinho). Calcula-se, então, o fator final de reconciliação (F_{LTM}). Idealmente, todos os fatores devem ser iguais a 1 – de modo que um resultado inferior a 1 evidencia uma superestimativa dos modelos, e um resultado maior que 1, subestimativa dos modelos.

Equação 10 - Cálculo do fator final de reconciliação (método de Rossi e Camacho)

$$FLTM = F1 \times F2 \times F3 \times F4 = \frac{\text{alimentação do moinho}}{\text{modelo de longo prazo}}$$

3.4.2. Cálculo do fator de reconciliação por modelos probabilísticos

A reconciliação foi, ao longo dos anos, extensivamente estudada para além do método tradicional de cálculo, de modo que a análise probabilística foi a que proporcionou resultados mais satisfatórios. Parhizkar *et al.* (2010) investigaram a relação entre os fatores de reconciliação e os teores estimados – os fatores de reconciliação são calculados a partir de fontes de incerteza ao longo da vida da mina, levando em conta aspectos como variabilidade do depósito, incerteza estatística e incerteza sistemática. O modelo, portanto, atribui um fator de correção para cada incerteza no processo de estimativa, expressa pela equação:

Equação 11- Cálculo de reconciliação de teores pelo método probabilístico

$$\bar{G}_a = \bar{C}_r \bar{C}_s \bar{G}_e$$

Em que:

- \bar{G}_a = teor médio real (*mean value of actual grade*);
- \bar{G}_e = teor médio estimado (*mean value of estimatated grade*);
- \bar{C}_r = fator de reconciliação relacionado à incerteza estatística;
- \bar{C}_s = fator de reconciliação relacionado a erros sistemáticos.

Para fim de simplificação na aplicação, os autores consideraram $\bar{C}_r = 1$ para todas as amostras por só considerarem o erro estatístico aleatório (originário da heterogeneidade do maciço). Já \bar{C}_s é calculado como o produto de todos os i-ésimos erros sistemáticos associados:

Equação 12- Cálculo C_s (método probabilístico de reconciliação)

$$\bar{C}_s = \prod_{i=1}^m \bar{C}_i$$

Segundo o estudo, dois erros sistemáticos são mais impactantes no erro das estimativas: o erro associado ao efeito de escala e o erro associado à anisotropia. Contudo, outros erros sistemáticos podem existir, a depender do depósito e operação.

Parhizkar *et al.* (2010) também associaram ao seu método de reconciliação um cálculo de incerteza associada ao teor real, que pode ser descrita por meio do coeficiente CV_{Ga} .

Equação 13- Cálculo da incerteza de teor pelo método probabilístico.

$$CV_{Ga} \cong \sqrt{\frac{S_{Ge}^2}{G_e^2} + \frac{CV_{Ge}^2}{n} + CV_{C1}^2 + CV_{C2}^2}$$

Em que:

- CV_{Ga} = incerteza geral sobre o teor (coeficiente de variação do teor real);
- $\frac{S_{Ge}^2}{G_e^2}$ representa a variabilidade inerente, calculada a partir da razão entre a variância de teor e o teor médio estimado no depósito;
- $\frac{CV_{Ge}^2}{n}$ representa a conjuntura dos erros aleatórios com incertezas estatísticas, de modo que CV_{Ge} é o coeficiente de variação da estimativa do teor dividido pelo número de análises independentes;
- $CV_{C1}^2 + CV_{C2}^2$ representam a incerteza sistemática por conta da anisotropia do depósito e efeitos de escala.

O método probabilístico se baseia em dados extraídos a partir de uma amostragem ampla ao longo de todo o depósito que seja capaz de fornecer grandezas estatísticas, como média e variância. O método tradicional, por sua vez, baseia-se em amostras não que apresentam variabilidade locacional capaz de construir um modelo geoestatístico associado. Contudo, o método probabilístico só é aplicado para reconciliação de lavra, não tendo utilidade direta em usinas, tal como o método tradicional.

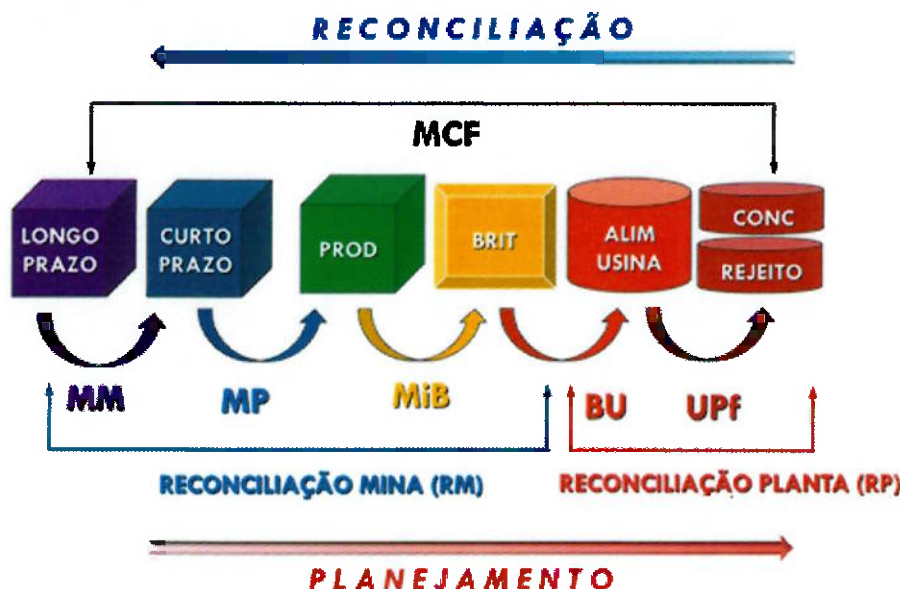
4. METODOLOGIA

A maneira mais eficiente de rastrear os produtos até sua origem e melhorar os processos de produção é dividir a reconciliação em etapas, definindo indicadores capazes de detectar as operações críticas na cadeia mineira. Morley (2003) foi o idealizador do termo ‘reconciliação proativa’ ou ‘prognosticação’, um processo iterativo baseado na divisão da reconciliação em etapas e que permite a melhoria dos procedimentos de amostragem e de estimativa de produção visando melhorar a previsibilidade dos modelos.

A Figura 4 mostra o modelo de reconciliação proposto para a unidade. No sistema de reconciliação apresentado, o sentido para a direita representa ‘planejamento’ ou ‘previsão’, enquanto o sentido contrário representa ‘reconciliação’.

Cada indicador é calculado dividindo-se o valor da variável em estudo (massa, conteúdo metálico ou teor) da operação subsequente pela operação anterior.

Figura 4- Modelo de reconciliação proativa proposto para a unidade.



Fonte: Chieregati et al. (2016), adaptada pelo autor (2017).

Na figura, os indicadores representam:

- **MCF:** previsibilidade do modelo de longo prazo (*Mine Call Factor*);
- **MM:** reconciliação dos modelos de longo e curto prazo (MM= modelo de longo a modelo de curto);
- **MP:** aderência do modelo de curto prazo ao executado (ROM) (MP=modelo de curto a produção);
- **MiB:** variação de estoque– aderência entre o ROM e a alimentação da britagem (MiB= mina a britagem);
- **BU:** aderência entre a alimentação da britagem e o produto da moagem (BU= britagem a usina);
- **UPf:** aderência entre a alimentação da flotação e a produção da planta (Upf=usina a produtos finais);
- **RM:** reconciliação de mina;
- **RP:** reconciliação de planta.

Para o teste de reconciliação, os pontos foram amostrados durante um período de 14 dias, entre os dias 03 e 16 de outubro de 2017, pelas equipes da unidade que já são designadas habitualmente para amostragem – desde a geologia de mina até as equipes da planta. Todas as amostras do teste de reconciliação são preparadas no laboratório físico da unidade e seguem o mesmo protocolo de preparação e análise química da empresa.

Por uma questão de sigilo ao nome da empresa e da unidade, os nomes verdadeiros das minas e usinas serão substituídos por siglas ao longo deste trabalho.

4.1. Procedimento de amostragem

A unidade industrial possui duas usinas distintas: a Usina C, que processa cerca de 20% da produção, e a Usina W – 80%, com vazão mássica de, aproximadamente, 180 t/h na britagem, conforme apresentado no balanço de massa disponível no ANEXO A. Todo o processo de amostragem foi feito nas duas usinas.

O método de amostragem e quantificação de cada etapa obedece um procedimento próprio, conforme a disponibilidade dos dados. O método para avaliação de cada etapa é descrito a seguir, de modo que a representação gráfica dos pontos de amostragem nas usinas está disponibilizada no APÊNDICE B.

4.1.1. Modelos de longo prazo

As estimativas dos modelos de Longo Prazo (LP) são realizadas por meio dos resultados da pesquisa mineral direta, que envolve furos em uma malha de 25mx15, além de um mapeamento geológico prévio. A geoestatística é realizada por meio de *krigagem* ordinária a partir de variogramas distintos para cada elemento. Os dados de análise química do furo e mapeamento servem como *input* para o modelamento em *software*. Os cálculos das massas, teores médios e conteúdo metálico planejados são feitos por meio da cubagem dos modelos de blocos LP com as *wireframes* dos realces e galerias de desenvolvimento produtivo planejados para o período; de modo que, para o cálculo da massa total reconciliável, usa-se um fator de diluição operacional de 23% sobre a massa cubada computacionalmente⁴.

4.1.2. Modelos de curto prazo

As estimativas dos modelos de Curto Prazo (CP) são feitas a partir do adensamento amostral do modelo LP, por meio de amostras de canal paralelas ao piso da galeria em um suporte amostral entre 0,5 e 1,5 m. O mapeamento geológico também é atualizado na face exposta do realce, definindo, assim, os contatos minério-estéril. A estimativa das massas, teores médios e conteúdo metálico é feita a partir da cubagem dos modelos de curto prazo sobre as *wireframes*

⁴ Informação verbal obtida através de conversa por telefone com a equipe de planejamento de lavras da unidade, em novembro/2017.

dos realces e galerias de desenvolvimento produtivo executadas, que são modelados a partir do escaneamento das vias abertas no período do teste.

4.1.3. Produção

Atualmente, não existe nessa etapa da cadeia um método de amostragem de teores razoavelmente confiável (a estimativa dos teores dos caminhões é feita por apontamento visual em que se separa o material de cada caminhão em pilhas a depender do teor estimado). Logo, foram medidas somente as massas de minério que são trazidos da mina por meio do uso de balanças rodoviárias, descontando-se o peso do caminhão vazio.

Na mina de EN, porém, não existe balança rodoviária. Deste modo, a unidade considera que todos os caminhões sobem com 28 toneladas de material desmontado.

As minas VZT e EN possuem, na saída das respectivas rampas, pátios de estoque de ROM (Figuras 5a/b), além de estoques nas britagens, com capacidade total acumulada de até 40.000 toneladas⁵, de modo que os materiais que foram produzidos no período anterior ao teste têm baixa rastreabilidade e, mesmo assim, continuaram a alimentar a britagem ao longo dos dias do teste. Isto posto, para o balanço de massa, será estimada a variação de estoque com base nas cubagens de rotina realizadas nas pilhas antes e depois do período total do período de análise, conforme Equação 14:

Figura 5a/b - Pátio de estoque ROM.



Fonte: autoria própria.

Equação 14- Cálculo da Variação de Estoque do ROM.

$$\text{Variação de estoque ROM} = M_{\text{pilhas}}(\text{início}) + M_{\text{prod}} - M_{\text{pilhas}}(\text{final})$$

Em que:

⁵ - Informação cedida pela equipe de Topografia, durante visita à Unidade, em outubro/2017.

- $M_{pilhas(início)}$ = massa apontada pela cubagem realizada na data mais próxima do início do período de análise;
- M_{prod} = somatória das massas de minério aferidas em balança (ou por contagem de caminhões) durante o período de análise;
- $M_{pilhas(final)}$ = massa apontada pela cubagem realizada na data mais próxima ao final do período de análise.

4.1.4. Britagem

As amostras são originárias do fluxo proveniente do circuito de britagem, (que, no circuito W vai até a britagem quaternária e, no circuito C; terciária). Não existe amostragem nas etapas intermediárias. Na linha W, a amostragem precede a formação da pilha de homogeneização, enquanto que na Linha C, a pilha de estocagem que alimenta o moinho.

As amostras de rotina de ambas usinas são obtidas por meio dos amostradores tipo *cross belt*. Na alimentação da Usina C, as amostras são colhidas na descarga do transportador de correias TC7; enquanto que na Usina W, no chute de transferência entre a correia proveniente da britagem terciária/quaternária e a correia que alimenta a pilha de homogeneização – conforme indicam as figuras 6a/b. Os fluxos são amostrados por cortes longitudinais (de uma extremidade a outra), sendo armazenados por bombonas na descarga dos chutes. As amostras são retiradas a cada duas horas em cada uma das usinas, com incrementos colhidos a cada 10 minutos. As correias anteriores aos moinhos são providas de balanças.

Figuras 6a/b - Amostradores das britagens C (esquerda) e W (direita).



Fonte: autoria própria.

Esta é a principal etapa do sistema de reconciliação da usina pelo fato de ser o elo entre a reconciliação de mina e usina, e, portanto, devem ser tomadas as devidas providências para que a amostragem seja feita de forma correta, evitando erros sistemáticos.

4.1.5. Alimentação da usina

A alimentação da usina será entendida neste trabalho como o produto final das moagens. Esta etapa é um pouco diferente em cada uma das linhas: na linha C, a alimentação da usina provém do *overflow* do ciclone, de modo que as amostras manuais são colhidas semanalmente, conforme o destaque da Figura 7a. Na linha W, porém, as amostras são retiradas automaticamente a cada duas horas (com incrementos a cada 10 minutos), por um amostrador do tipo *Vezin* (Figura 7b) na alimentação da flotação *Bulk*, que separa os minerais sulfetados (Pb/Ag) dos silicatados. Existem medidores de vazão nas alimentações, contudo, não existe densímetro e nem a medição de porcentagem de sólidos nesta etapa; de modo que não é possível calcular a massa de polpa transportada, e, conseqüentemente, calcular, de maneira confiável, os indicadores de reconciliação de massa.

Figuras 7a/b – Pontos de amostragem na alimentação das Usinas C (esquerda) e W (direita).



Fonte: autoria própria.

4.1.6. Concentrado/Rejeito

São utilizadas todas as amostras de rotina de concentrados e rejeitos (Linhas W e C). As amostras do concentrado final (C+W) são retiradas por meio do amostrador automático localizado no TQ-36 (tanque localizado após a etapa de filtragem). Para o rejeito, porém, as medições de vazão de polpa, porcentagem de sólidos e densidade de polpa são tomadas na alimentação do espessador de rejeito; tais medidas são associadas aos resultados de teor das amostras de laboratório dos produtos finais da flotação nas respectivas linhas.

A partir de todas essas informações, é possível calcular uma “amostra total de produtos” por meio da ponderação pelas vazões estacionárias de cada usina (apresentadas no balanço de massa do Anexo A). Todas as amostras mencionadas são retiradas a cada duas horas, com incrementos a cada 10 minutos, de modo que os resultados aqui apresentados são médias

diárias; com exceção das medições de densidade de polpa, que são tomadas sem uma rotina específica. Para os cálculos do balanço de massa, a densidade de polpa do período do teste foi estimada a partir da média aritmética das amostras pontuais (conforme Tabela A.1 do APÊNDICE A).

4.2. Cálculo dos indicadores de reconciliação

Ao final do teste de reconciliação, são tomados todos os resultados das análises químicas dos teores de zinco e massas em todas as etapas – desde a estimativa a LP até a média ponderada dos concentrados e rejeitos.

Os indicadores de reconciliação de teores, massas e conteúdo metálico (zinco contido) são calculados pelo método tradicional (Rossi e Camacho), conforme descrito no item 3.4.1.

5. RESULTADOS

5.1. Cubagem dos modelos de longo e curto prazo.

A partir dos escaneamentos dos realces planejados e produzidos no período do teste de reconciliação, foi possível realizar, respectivamente, a cubagem sobre os modelos de blocos de longo prazo (LP) e de curto prazo (CP), previamente modelados pela equipe de recursos minerais da unidade. Os resultados de massa, teor de zinco e conteúdo metálico são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Cubagem dos realces planejados sobre os modelos de blocos LP (considerando diluição operacional).

PLANEJAMENTO DE STOPES (LP)			
Mina VZT	Massa (t)	% Zn	Conteúdo metálico (t)
Total planejado	36.066	13,63%	4.916
Total (+diluição)	44.361	11,08%	4.916
Mina EN	Massa (t)	% Zn	Conteúdo metálico (t)
Total planejado	20.880	4,89%	1.021
Total (+diluição)	25.682	3,98%	1.021
TOTAL	70.043	8,48%	5.937

Fonte: Geologia (2017)⁶, adaptado pelo autor.

⁶ Informação contida em: **Relatório das cubagens dos modelos de longo prazo para teste de reconciliação (html)**. E-mail enviado pela equipe de geologia em 16 de novembro de 2017.

Tabela 2- *Cubagem dos realces lavrados e galerias de desenvolvimento produtivo sobre os modelos de blocos CP.*

STOPES E GALERIAS LAVRADOS (CP)			
STOPE	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)
522_16825sou	5,53%	10.636	588
522_17675_pilar_ous	5,81%	2.656	154
326_9425asou	12,01%	7.932	953
326_9245bsou	12,34%	3.894	481
326_9425descsou	13,62%	6.892	939
370_9880sou	14,15%	11.756	1.663
DESENVOLVIMENTO PRODUTIVO	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)
Mina VZT	11,18%	20.754	2.320
Mina EN	19,51%	2.037	397
TOTAL	11,26%	66.557	7.496

Fonte: Geologia (2017)⁷, adaptado pelo autor.

5.2. Produção da mina e variação de estoque

A partir da compilação dos dados fornecidos pelas equipes de operação de mina e de topografia (que realiza as cubagens dos pátios de estoque de ROM e estoque das britagens), é possível analisar os resultados de produção em tonelagem e teores de cada uma das minas (VZT e EN). A fim de simplificar a análise, esta seção se atém em expressar apenas os resultados de massa das duas minas juntas em função do tempo de formação das pilhas números 4506 a 4510 (Usina W), 1014 e 1015 (Usina C), caracterizando, assim, reconciliação temporal de 10 pilhas no total, conforme definição de Riske *et al.* (2010) descrita na seção 3.3.2.

⁷ Informação contida em: **Relatório das cubagens dos modelos de curto prazo para teste de reconciliação (html)**. E-mail enviado pela equipe de geologia em 17 de novembro de 2017.

Tabela 3- Produção das minas (03/10/2017 a 16/10/2017).

<i>Dia</i>	Produção VZT (rampas VII e X) (t)	Produção EN (t)
03/10/2017	3369,62	476,00
04/10/2017	2929,14	1260,00
05/10/2017	2697,71	504,00
06/10/2017	2101,8	1792,00
07/10/2017	4056,09	28,00
08/10/2017	3040,16	812,00
09/10/2017	2530,74	1652,00
10/10/2017	2812,26	756,00
11/10/2017	3458,67	1372,00
12/10/2017	3002,15	756,00
13/10/2017	2693,14	1288,00
14/10/2017	3931,83	0,00
15/10/2017	3309,65	420,00
16/10/2017	2106,05	1904,00
TOTAL	42039,01	13020

Fonte: autoria própria.

Tabela 4- Resultados e comparação da variação de estoque de ROM e alimentação das pilhas de homogeneização (04/10/2017 a 11/10/2017).

	CUBAGEM 04/10/2017 (~8:00) (t)	CUBAGEM 11/10/2017 (~9:00) (t)	PRODUÇÃO 04/10 A 11/10 (dias completos) (t)	Variação de Estoque (t)	Tonagem de alimentação das pilhas (8:00 dia 4/10 às 9:00 dia 11/10)*
Estoque ROM - Rampa 7	13.872	10.850	31.803	42.567	45.024
Estoque ROM - Rampa 10	17.982	11.316			
Estoque ROM - EN	3.590	2.216			
Estoque britagens (C+W)	1.014	1.311			
* Cálculo de massa feito a partir de proporção simples em relação ao tempo de alimentação das pilhas.				MiB 1,06	

Fonte: autoria própria.

5.3. Resumo – Reconciliação de mina

Para a melhor análise na discussão, todos os resultados apresentados aqui nesta seção, juntamente com os resultados de britagem (que, juntos, compõem o cálculo de reconciliação de mina) estão compilados na Tabela 5.

Tabela 5- Resultados para reconciliação de mina

RESULTADOS - RECONCILIAÇÃO DE MINA										
	LONGO PRAZO			CURTO PRAZO			PRODUÇÃO	BRITAGEM (C + W)		
	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)	Massa (t)	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)
Mina (VZT + EN)	8,48%	70.043	5.937	11,26%	66.557	7.496	55.059	11,49%	48.592	5.582

Fonte: autoria própria.

5.4. Resultados das usinas

É importante salientar que o teste de reconciliação deve ser feito pilha a pilha, visto que, nesta operação, a unidade mínima reconciliável (RMU)⁸, é a pilha de homogeneização. Com isso, todos os resultados de amostragem são considerados em função dos dias e horários de formação e retomada de cada pilha, levando em consideração o tempo de residência na usina, que é de aproximadamente 4 horas na Usina W e 100 minutos na Usina C (informação verbal)⁹. O histórico das pilhas é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6- Histórico de formação e retomada das pilhas de homogeneização.

BRITAGEM W						
DADOS DA PILHA		FORMAÇÃO DA PILHA			RETOMADA DA PILHA	
Mês	Nº da Pilha	Início	Fim	Estoque utilizado	Início	Fim
Outubro	4.506	03/10/2017 06:30	04/10/2017 16:00	1000 t a 17,31% Zn	04/10/2017 17:21	06/10/2017 04:10
Outubro	4.507	04/10/2017 19:30	06/10/2017 04:00	0 t	06/10/2017 04:10	07/10/2017 20:00
Outubro	4.508	06/10/2017 04:20	07/10/2017 17:00	0 t	07/10/2017 20:00	09/10/2017 16:00
Outubro	4.509	07/10/2017 17:00	09/10/2017 12:00	0 t	09/10/2017 16:00	11/10/2017 13:00
Outubro	4.510	09/10/2017 16:00	11/10/2017 13:00	280t a 10,05% Zn	11/10/2017 13:10	13/10/2017 09:20
Outubro	4.511	11/10/2017 13:20	12/10/2017 17:30	0t	13/10/2017 09:20	14/10/2017 22:50
Outubro	4.512	13/11/2017 09:45	14/10/2017 22:50	50t a 11,65%	14/10/2017 22:50	16/01/2017 18:25
BRITAGEM C						
Setembro	1.013	28/09/2017 22:00	02/10/2017 23:00	200t a 9,1% Zn	03/10/2017 04:18	07/10/2017 09:00
Outubro	1.014	03/09/2017 10:00	07/10/2017 09:00	SEM INFO	07/10/2017 13:10	11/10/2017 09:00
Outubro	1.015	07/10/2017 09:00	11/10/2017 09:00	SEM INFO	11/10/2017 09:00	15/10/2017 23:00

Fonte: Beneficiamento (2017)¹⁰, adaptada pelo autor (2017).

⁸ Conceito criado por Chieragati e Pignatari (2017) que define a unidade de controle em que se pode rastrear para frente e para trás na cadeia mineira – comunicação pessoal.

⁹ Informação fornecida pela equipe de processo durante visita do autor à unidade, em outubro/2017.

¹⁰ Informação contida em: **Relatório das pilhas de homogeneização da primeira quinzena de outubro (Excel)**. E-mail pela equipe de beneficiamento em 31 de outubro de 2017.

Tabela 7- Resultados de amostragem e balanço de massa na usina W.

Reconciliação de planta - Usicon W							
PILHA	BRITAGEM			ALIMENTAÇÃO USINA	PRODUTOS FINAIS		
	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)	% Zn	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)
4.506	12,44%	4.548	565,8	12,49%	11,34%	5893,9	543,3
4.507	12,00%	5.344	641,3	13,07%	11,57%	6513,2	640,5
4.508	12,06%	6.362	767,3	12,49%	11,10%	7301,7	715,9
4.509	12,25%	6.395	783,4	12,30%	10,94%	7377,0	714,7
4.510	11,65%	6.424	748,4	11,73%	10,76%	7306,3	720,2
4.511	11,43%	5.013	573,0	11,87%	11,45%	6050,0	591,9
4.512	11,53%	5.824	671,5	11,42%	11,33%	6995,0	685,6

Fonte: autoria própria.

Tabela 8- Resultados de amostragem e balanço de massa/metalúrgico na usina C.

Reconciliação de planta - Usicon C						
PILHA	BRITAGEM			PRODUTOS FINAIS		
	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)
1.013	9,51%	3003,0	285,6	9,20%	4872,4	448,0
1.014	9,40%	2550,0	239,7	9,76%	4351,8	424,9
1.015	9,78%	3129,0	306,0	9,80%	5151,0	504,5

Fonte: autoria própria.

6. DISCUSSÃO

Esta seção se atém à discussão dos resultados compilados período do teste de reconciliação. Como o objetivo deste trabalho é analisar toda a cadeia produtiva, incluindo a modelagem geológica, esta seção trará as discussões separadas por interface e por usina de beneficiamento, visando tratar de desvios e proposições de melhoria em cada etapa individual.

6.1. Reconciliação modelo a modelo

A tabela 9 apresenta os indicadores de reconciliação MM (modelo-a-modelo) para massa, teores de zinco e conteúdo metálico. Primeiramente, é importante destacar a ótima aderência entre as massas planejada e executada (diferença relativa de 5%), evidenciando, assim, que a estimativa de diluição operacional prevista é bastante acurada (pelo menos para este estudo caso).

Tabela 9 - Resultados dos indicadores de reconciliação MM.

	Cubagem LP	Cubagem CP	Indicador MM
Massa (t)	70.043	66.557	0,95
% Zn	8,48%	11,26%	1,33
Conteúdo Metálico (t)	5.937	7.496	1,26

Fonte: autoria própria.

Os teores cubados, por sua vez, não apresentam uma boa aderência, visto que o modelo de longo prazo (LP) mostrou uma tendência de subestimativa de teores em comparação com o modelo de curto prazo (CP). Essa diferença se deve ao incremento de informações por conta das amostragens de canal e mapeamento geológico. É previsível que haja tal diferença entre os dois modelos por se tratar de uma estimativa geoestatística, que se modifica à medida que se obtêm mais amostras e se podem delimitar melhor os contatos minério-estéril para a aplicação dos variogramas. Isto posto, é plausível concluir que, apesar de os teores indicarem uma diferença relativa de 33% para os blocos avaliados neste trabalho, os procedimentos podem estar validados ao se considerarem os erros de amostragem e preparação de amostras, a heterogeneidade do minério e a complexidade que envolve a estimativa de teores.

Comparando, porém, os teores estimados nos modelos e os teores amostrados nas britagens (Tabela 5), vê-se que há uma boa aderência entre os modelos CP e o materiais britados, de modo que é possível concluir que a maior origem de diferenças relativas está justamente nas estimativas à longo prazo. Contudo, é necessário observar que esta comparação (modelos-britagem) não pode ser considerada absolutamente confiável, pelo fato de haver as variações de estoques, em que os materiais transportados durante o período do teste são blendados com materiais lá dispostos anteriormente e com baixa rastreabilidade; não havendo, assim, a garantia de reconciliação temporal e nem espacial (o resultado das britagens foi usado somente para investigar, de maneira geral, a maior fonte de desvios de estimativas).

6.2. Reconciliação modelo CP a produção

Por não haver um método de amostragem de teores confiável na etapa de produção (já justificado na seção 4.1.3), só é possível avaliar a aderência de massas nesta interface. A massa total transportada pelos caminhões no período (03/10/2017 a 16/10/2017) foi de 55.059 toneladas (Tabelas 3 e 5), enquanto que a cubagem dos *stopes* e galerias produzidos indicou, para o mesmo intervalo de tempo, uma massa igual a 66.557 toneladas (Tabela 2 e 5). O

indicador de reconciliação MP (modelo-produção) é igual a 0,83, conforme evidenciado na equação 15:

Equação 15 - Cálculo do indicador MP (massa).

$$MP_{massa} = \frac{Massa_{prod}}{Massa_{modeloCP}} = \frac{55.059}{66.557} = 0,83$$

O fato de o indicador de reconciliação ser inferior a 1 indica que a massa produzida (considerada como a massa de minério transportada pelos caminhões) foi superestimada pela cubagem dos realces e galerias lavrados no modelo CP. Visto que os dois dados são provenientes de informações que podem ser consideradas confiáveis (uma vez que o peso aferido pelas balanças e o volume escaneado dos *stopes* e galerias são medidas diretas), pode-se entender que essa diferença relativa de 17% representa somente o fato de que nem todo o material desmontado em subsolo foi transportado para o estoque de ROM no período de análise, de modo que o carregamento e transporte do mesmo possivelmente foi finalizado alguns dias depois do término do período em questão, o que condiz perfeitamente com a realidade de uma lavra subterrânea, pelo fato de o intervalo entre desmontes consecutivos costumar ser elevado devido ao tempo de carregamento e transporte que os separa.

6.3. Reconciliação na variação de estoque

O indicador de reconciliação Mina-Britagem (MiB) para o período de 04/10/2017 a 11/10/2017 (período escolhido em função da coincidência do fim de formação das pilhas de homogeneização nas usinas C e W) é igual a 1,06; conforme apresentado anteriormente na Tabela 4. Apesar de o valor expressar uma boa aderência, vale, nesta seção, sugerir melhorias e/ou revisões na obtenção dos dados:

- Não existe balança rodoviária na rampa da mina EN, de modo que o valor da produção é calculado a partir da consideração de que todos os caminhões carregam exatamente 28 toneladas, fato que diminui a confiabilidade nos resultados de produção da mina por conta de esse carregamento não ser fixo. Isto posto, sugere-se instalar uma balança rodoviária (assim como nas rampas VII e X) para medição mais acurada da produção diária;
- Os valores de massa nas cubagens são calculados a partir de uma densidade aparente de material desmontado fixa estimada em um estudo pontual realizado em

dezembro de 2014 (informação pessoal)¹¹. Com o avanço da lavra, é necessário que este valor seja constantemente atualizado e bem estimado, preferencialmente com base em medições feitas a partir de instrumentação (vale pesquisar quais tecnologias estão disponíveis no mercado atualmente).

6.4. Reconciliação de planta – Usina W

A Tabela 11 evidencia todos os indicadores de reconciliação por pilha da Usina W (calculados pelo método tradicional). O memorial de cálculo do balanço de massa está expresso na tabela A.1 do APÊNDICE A.

Tabela 10 - Indicadores de reconciliação de planta - Usina W.

Indicadores de reconciliação - Usicon W					
PILHA	BU	Upf	RP		
	Teor	Teor	Teor	Ton	Conteúdo Metálico
4.506	1,004	0,91	0,91	1,30	0,96
4.507	1,09	0,89	0,96	1,22	0,999
4.508	1,04	0,89	0,92	1,15	0,93
4.509	1,004	0,89	0,89	1,15	0,91
4.510	1,01	0,92	0,92	1,14	0,96
4.511	1,04	0,96	1,002	1,21	1,03
4.512	0,99	0,992	0,98	1,20	1,02
MÉDIA	1,02	0,92	0,94	1,19	0,97
Desvio Padrão	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04



Fonte: autoria própria.

A partir dos indicadores calculados, vê-se que existe uma boa aderência em relação aos teores entre as amostragens da britagem e da alimentação da flotação *Bulk* (fator de reconciliação BU médio de 1,02 – o que indica uma diferença relativa média de 2%). Este valor é menor que o desvio máximo do erro fundamental de amostragem (2,5%) estabelecido por Chierigati et al. (2016) para o minério de Vazante e, também, menor que o desvio máximo do erro fundamental de amostragem (5%) para metais base estabelecido por Pitard (1993). Portanto, conclui-se que não há problemas de amostragem na usina, e que os resultados de reconciliação da planta podem ser usados com confiança no modelo de Vazante. Vale, contudo, ressaltar que o indicador de reconciliação BU na pilha número 4507 (igual a 1,09) destoa significativamente dos indicadores das outras pilhas; o que pode ser consequência de uma variação do processo não reportada que afetou os teores das amostras; contudo, vê-se que esta variação não se repete nas outras pilhas, reforçando a hipótese de que houve apenas uma variação pontual e não

¹¹ Informação contida em: **Cubagem dos pátios de estoque (Excel)**. E-mail enviado pela equipe de Topografia em 31 de outubro de 2017.

sistemática. O excelente resultado de reconciliação da planta é, também, devido ao extenso trabalho de otimização de procedimentos e equipamentos de amostragem realizados nas usinas e no laboratório da Unidade nos últimos anos.

Em relação aos indicadores de reconciliação de massa, percebe-se que há um erro associado bastante significativo entre as massas dos produtos finais e das britagens. Com base nos dados fornecidos, é possível concluir que os valores mais confiáveis são os dos produtos finais, pelo fato de a massa do concentrado final ser uma das medições mais importantes para todo o processo (pois é sobre ela que se valoriza a expedição do concentrado produzido) e, por sua vez, a massa do rejeito ser calculada a partir de dados medidos constantemente: vazão de polpa e porcentagem de sólidos na polpa. Apesar de os pesos específicos de polpa não serem frequentemente medidos, os mesmos variaram, no período de análise, entre 3,02 e 3,18 t/m³ (ANEXO B), o que significa uma variação de 5,3% (muito menor que a variação percebida entre as massas aqui discutidas).

A partir destas análises, formulou-se a hipótese de que as balanças no transportador de correia da britagem não estavam bem calibradas durante o teste, fato comum em usinas de beneficiamento de minérios. Sugere-se, portanto, que, além da calibração adequada e frequente, seja feita a instalação de um densímetro e instrumento de medição de porcentagem de sólidos na alimentação da flotação *Bulk*. Desta maneira, será possível elaborar modelos de reconciliação proativa mais detalhados, pelo fato de se obterem, através da medição destes instrumentos, dois indicadores adicionais de reconciliação de massa (BUton e UPfton) e, por conseguinte, mais dois indicadores adicionais de reconciliação de conteúdo metálico. Deste modo, todos os modelos posteriores se tornariam mais detalhados e vantajosos.

Apesar de os indicadores de reconciliação de conteúdos metálicos aparentemente mostrarem uma aderência ótima, vale formular a hipótese de que tais valores são resultados da convergência de desvios em relação à medição de massas, pelo fato de os valores de conteúdo metálico serem calculados a partir do produto entre o teor e tonelagem medidos, e os teores médios da “amostra total de produtos” serem calculados a partir da recuperação mássica do processo, que, por sua vez, depende da massa de alimentação da britagem (APÊNDICE A).

Por fim, ressalta-se que, apesar da boa aderência, é preciso realizar verificações e melhorias constantes no processo visando obter uma maior confiabilidade nos resultados de reconciliação e evitar reconciliações ilusórias, onde erros cometidos em um ponto do processo são

compensados por erros cometidos em outro ponto, resultando em excelentes, mas incorretos, resultados de reconciliação.

6.5. Reconciliação de planta – Usina C

Pelo fato de a Usina C ter o número de pilhas analisadas inferior ao da Usina W e de não ser possível calcular os indicadores de reconciliação UPf (usina a produtos finais), a análise se torna muito mais simples e, ao mesmo tempo, menos propícia para a elaboração de um modelo de reconciliação proativa. De imediato, já é possível perceber um interesse menor, por parte das equipes da Unidade, em medir e controlar as variáveis do processo nesta usina, possivelmente motivado pelo fato de esta linha ter uma produção média (45 t/h) 4 vezes menor que a linha W (180 t/h).

Tabela 11- Indicadores de reconciliação de planta - Usina C.

Indicadores de reconciliação - Usicon C			
PILHA	RP		
	Teor	Ton	Conteúdo Metálico
1.013	0,97	1,62	1,57
1.014	1,04	1,71	1,77
1.015	1,002	1,65	1,65
MÉDIA	1,002	1,66	1,66
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,10



Fonte: autoria própria.

As discussões e conclusões tomadas a partir da análise da tabela são praticamente idênticas às expressas na seção anterior: os indicadores de reconciliação de teor são extremamente aderentes nas pontas do processo se forem calculados pela razão entre os conteúdos metálicos e as massas de produtos finais da usina no período de retomada das pilhas (resultados de teores expressos na Tabela 7, seção 5.3), e resultados de indicadores de reconciliação (mostrados na Tabela 11); contudo, são insatisfatórios se os teores ponderados dos produtos finais forem calculados a partir da recuperação mássica da usina, que depende dos valores de massa na britagem (alimentação da usina) – conforme Tabela 13. O memorial de cálculo dos dois métodos estão expressos no APÊNDICE A.

Tabela 12 - Resultados da Usina C a partir do balanço de massa feito com base na recuperação mássica.

Reconciliação de planta - Usicon C						
PILHA	BRITAGEM			PRODUTOS FINAIS		
	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)	% Zn	Massa (t)	Conteúdo Metálico (t)
1.013	9,51%	3003,0	285,6	13,28%	4872,4	448,0
1.014	9,40%	2550,0	239,7	14,86%	4351,8	424,9
1.015	9,78%	3129,0	306,0	14,45%	5151,0	504,5

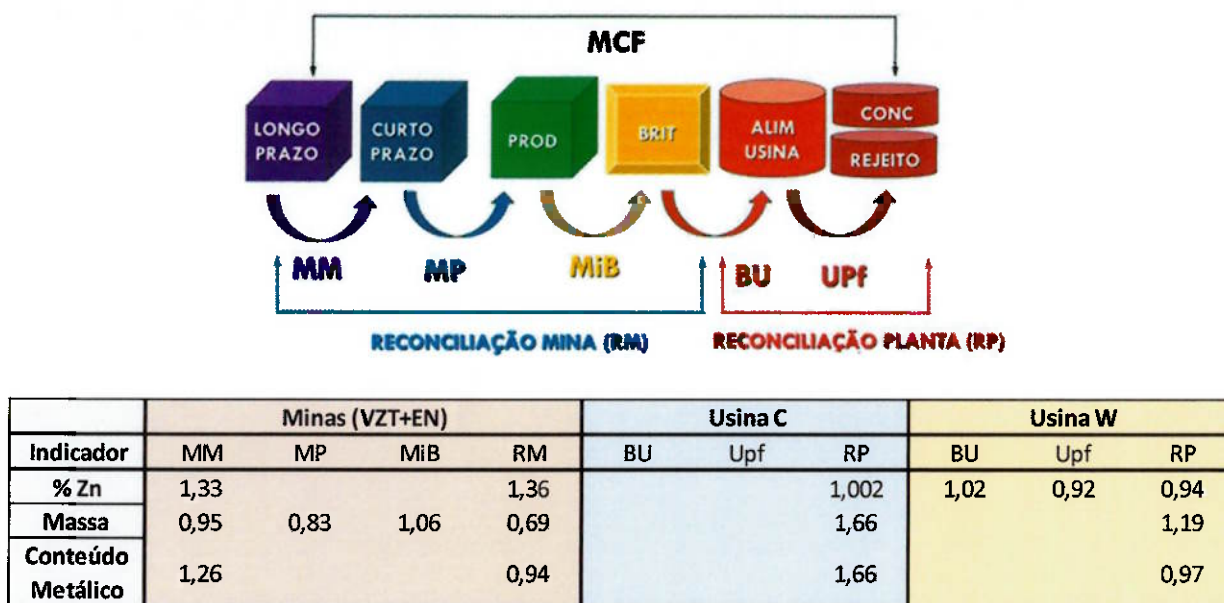
Fonte: autoria própria.

Tais resultados reforçam a hipótese de que também as balanças do transportador de correias da Usina C não estão calibradas, pautada pelo fato de os indicadores de massa serem extremamente insatisfatórios (diferença relativa média de 66%) e somado à constatação da diferença de resultados no cálculo dos teores descritos anteriormente (dependentes ou não da massa da britagem).

6.6. Modelo de reconciliação proativa elaborado

A Figura 8 mostra o modelo de reconciliação desenvolvido para a unidade e os resultados dos indicadores estimados a partir do teste de reconciliação realizado neste trabalho. Vale salientar que os indicadores RM (reconciliação de mina) são obtidos através da razão entre as médias ponderadas variáveis medidas (ou calculadas) nas britagens C e W com as variáveis estimadas pela cubagem dos modelos de longo prazo; e os indicadores RP, através da razão entre as variáveis medidas na ponderação dos produtos finais e nas britagens.

Figura 8 - Modelo de reconciliação e indicadores calculados no teste de reconciliação



Fonte: autoria própria.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve-se em analisar as aderências entre as etapas da cadeia mineral a partir de um modelo de reconciliação proativa proposto pelas equipes da unidade industrial. A partir da análise das aderências em teores, massas e conteúdos metálicos, foi possível identificar desvios e propor hipóteses e recomendações para solucionar os problemas.

Analisando o processo como um todo, é possível dividir esta conclusão em duas partes: a reconciliação de mina e a reconciliação de planta. Em relação à reconciliação de mina, concluiu-se que há uma boa correlação entre os modelos de longo e curto prazo em relação às massas de minério produzido, mas não em relação aos teores ou conteúdo metálico. Os desvios percebidos entre o modelo de curto prazo e o que foi produzido podem ser associados ao próprio ritmo de carregamento e transporte da mina.

Em relação à reconciliação de planta, houve, por parte do autor, duas surpresas: a boa aderência nas amostragens e análises químicas de teores em todas as operações unitárias, demonstrando que a metodologia de amostragem é acurada, não gerando erros sistemáticos, e precisa, gerando desvios inferiores ao erro fundamental de amostragem. Por outro lado, observou-se que a medição de massas nas britagens das duas usinas não é confiável pela péssima calibração das balanças dos transportadores de correias, problema comum em usinas de beneficiamento de minérios. Esta questão é especialmente grave pelo fato de as britagens serem o elo entre os

estoques de ROM e as operações de usina, fato que aumenta a incerteza dos reais indicadores de reconciliação de massa e, por consequência, de conteúdo metálico ao longo de toda cadeia. Tal problema é ainda pior na Usina C, que, evidentemente, detém controles menos eficazes que os da Usina W.

Por fim, o trabalho realizado permitiu uma análise mais detalhada de cada etapa do processo individualmente, a partir da qual problemas foram detectados e melhorias puderam ser sugeridas. É evidente que muitos dos erros expostos dificilmente serão eliminados (seja pela realidade operacional da unidade ou pelos investimentos necessários), contudo, a análise dos resultados de reconciliação proativa serviu como ferramenta para o entendimento do processo como um todo, podendo ser usada como rotina de controle e melhoria de processos da empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHIEREGATI, A.C. **Reconciliação pró-ativa em empreendimentos mineiros**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 201 p. 2007.
- CHIEREGATI, A.C; PITARD, F. Fundamentos Teóricos da Amostragem. In: CHAVES, A.P. **Teoria e prática do Tratamento de Minérios – Manuseio de sólidos granulados**. São Paulo. Oficina de Textos, 2012. Pags 323 -363.
- CHIEREGATI, A.C. The many facets of mine reconciliation. In: **World Conference on Sampling and Blending, 6th**. WCSB6: proceedings, Gecamin, Lima, p. 133-150.2013.
- CHIEREGATI, A.C; BOTURA NETO, B.; ROSADO, R.C. Descrição do teste de Reconciliação. In: **Relatório parcial: Garantia de Qualidade das Amostras e Implantação de Sistema de Reconciliação**. Vazante.2016
- DARDENNE, M.A. et al. The Brasília Fold Belt. Tectonic Evolution of South America. **Edição Especial 31st International Geological Congress**. SBG/Rio de Janeiro.
- FERREIRA, F.M. **Amostragem**. Apostila de curso. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1989.
- GOES, M. A. C; POSSA, M. V; LUZ, A. B. **Tratamento de Minérios. Cap. 4: Amostragem**. CETEM. Rio de Janeiro. 2004.pg 19-51.
- HOLTHAM, P., SCOTT, A. & SANDERS, D. 2008. Measurement and reconciliation of the coal production chain. In: **An introduction to metal balance and reconciliation**, JKMRC, Queensland, Australia, p. 517-568.
- J. MENDO CONSULTORIA. **Perfil do Minério de Zinco**. Belo Horizonte: MME (Ministério de Minas e Energia). 2010. Disponível em: <
http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P16_RT25_Perfil_do_Minrio_de_Zinco.pdf/c62970b3-3a98-480e-939f-ced2dc99b888>, acessado em 04 jun 2017.
- MONTEIRO, L.V.S. **Contribuição da gênese das mineralizações de zinco na Mina de Vazante, MG**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.1997.
- MORLEY, C. 2003. Beyond reconciliation: a proactive approach to using mining data. In: **Large Open Pit Mining Conference, 5th**. AusIMM, Kalgoorlie, Australia, 3-5 November, p. 185-192.
- MORRISON, R. Data analysis for reconciliation. In: **An introduction to metal balance and reconciliation**, JKMRC, Queensland, Australia, 2008. p. 273-306.
- NOPPÉ, M. 2004. Reconciliation: importance of good sampling and data QA-QC. In: **Mining and Resource Geology Symposium**, Queensland, Australia.

PARHIZKAR, A. et al. **A New Model to Improve Ore Grade Reconciliation between the Exploration Model and Mine.** In: Proceedings of Mine Planning and Equipment Selection (MPES) Conference, Fremantle, Western Australia, pp. 89-94. 2010.

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

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

RISKE, R; MARK, P. D.; HELM, S. **Mine Reconciliation – for better or worse!** Snowden Mining, Canada, 8pp. 2010.

ROSSI, M.E; CAMACHO, J.V .Using meaningful Reconciliation Information to Evaluate Predictive Models. **Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME) Transactions.** Volume 308. p. 78-82. 2000

APÊNDICES

APÊNDICE A – Memorial de cálculo das usinas C e W.

Este apêndice tem por objetivo evidenciar o processo de cálculo das variáveis apresentadas nos resultados. Os dados recebidos da usina foram: massa de concentrado, teores, vazão de rejeito por dia, porcentagem de sólidos média (dia) e peso específico. Os valores de produção média de cada usina estão evidenciados no ANEXO A e os valores de produção de concentrado (Tabela A.1) e teores de concentrado e rejeito foram recebidos das equipes da Unidade.

▪ Usinas C/W:

Partição produtos da Flotação W (P_{flotW}):

$$P_{flotW} = \frac{\text{Taxa de produção UsiconW}}{\text{Taxa de produção total}} = \frac{\text{ProdW}}{(\text{Prod C} + \text{ProdW})} = \frac{132 \text{ t/h}}{(132+38) \text{ t/h}} \times 100 = 77,65\%$$

Partição produtos da Flotação C (P_{flotC}):

$$P_{flotC} = 100 - P_{flotW} = 22,35\%$$

Massa de Rejeito:

$$\text{Massa}_{\text{rejeito}}(\text{dia}) = \text{Vazão volum}_{\text{rejeito}} * \% \text{sólidos} * \text{peso específico de polpa} * 24$$

Massa de produtos:

$$\text{Massa}_{\text{produtos}} = \text{massa}_{\text{conc}} + \text{massa}_{\text{rej}}$$

Recuperação Mássica:

$$\text{Rec}_{\text{mássica}} = \frac{\text{Massa equivalente}_{\text{conc}}}{\text{Massa}_{\text{britagem}}}$$

Teor médio de zinco no rejeito final (C+W):

$$\%Zn_{\text{rej}} = P_{flotW} * \%Zn_{\text{rejW}} + P_{flotC} * \%Zn_{\text{rejC}}$$

Teor médio de zinco nos produtos finais (usando a rec. Mássica)

$$Zn_{\text{médio}} = \text{Rec}_{\text{mássica}} * \%Zn_{\text{conc}} + (1 - \text{Rec}_{\text{mássica}}) * \%Zn_{\text{rej}}$$

Conteúdo metálico:

$$\text{Conteúdo metálico} = \text{massa}_{\text{conc}} * \%Zn_{\text{conc}} + \text{massa}_{\text{rejeito}} * \%Zn_{\text{rej}}$$

Teor médio de zinco nos produtos finais (usando apenas produtos finais)

$$Zn_{\text{médio}} = \text{conteúdo metálico} / \text{massa}_{\text{produtos}}$$

Cálculo das massas, teores e recuperação mássica por pilha:

PILHA 4506 (de 04/10/2017, às 17:21 a 06/10/2017, às 04:10)

Amostras da flotação consideradas: de 04/10/2017, às 21:30 a 06/10/2017, às 08:00.

$$\%Zn_{\text{conc}} = \text{média (04/10, 20:00 a 06/10, 06:00)} = 38,99\%$$

$$\%Zn_{\text{rej}} = \text{média (04/10, 20:00 a 06/10, 06:00)} = 2,21\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$Massa\ equivalente_{flotaçãoW} = \left[\left(\frac{2,5}{24} \right) * dia\ 4 + dia\ 5 + \left(\frac{8}{24} \right) * dia\ 6 \right] * P_{flot_w}$$

PILHA 4507 (de 06/10/2017, às 04:10 a 07/10/2017, às 20:00)

Amostras da flotação consideradas: de 06/10/2017, às 8:00 a 08/10/2017, às 00:00.

$$\%Zn_{conc} = média\ (06/10, 08:00\ a\ 07/10, 08:00) = 39,14\%$$

$$\%Zn_{rej} = média\ (06/10, 08:00\ a\ 07/10, 08:00) = 2,52\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$Massa\ equivalente_{flotaçãoW} = \left[\left(\frac{16}{24} \right) * dia\ 6 + dia\ 7 \right] * P_{flot_w}$$

PILHA 4508 (de 07/10/2017, às 20:00 a 09/10/2017, às 16:00)

Amostras da flotação consideradas: de 08/10/2017, às 00:00 a 09/10/2017, às 20:00.

$$\%Zn_{conc} = média\ (08/10, 00:00\ a\ 09/10, 20:00) = 39,79\%$$

$$\%Zn_{rej} = média\ (08/10, 00:00\ a\ 09/10, 20:00) = 2,65\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$Massa\ equivalente_{flotaçãoW} = \left[dia\ 8 + \left(\frac{20}{24} \right) * dia\ 9 \right] * P_{flot_w}$$

PILHA 4509 (de 09/10/2017, às 16:00 a 11/10/2017, às 13:00)

Amostras da flotação consideradas: de 09/10/2017, às 20:00 a 11/10/2017, às 18:00.

$$\%Zn_{conc} = média\ (09/10, 20:00\ a\ 11/10, 17:00) = 39,01\%$$

$$\%Zn_{rej} = média\ (09/10, 20:00\ a\ 11/10, 17:00) = 2,73\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$Massa\ equivalente_{flotaçãoW} = \left[\left(\frac{4}{24} \right) * dia\ 9 + dia\ 10 + \left(\frac{17}{24} \right) * dia\ 11 \right] * P_{flot_w}$$

PILHA 4510 (de 11/10/2017, às 13:10 a 13/10/2017, às 09:20)

Amostras da flotação consideradas: de 11/10/2017, às 18:00 a 13/10/2017, às 10:00.

$$\%Zn_{conc} = média\ (11/10, 17:10\ a\ 13/10, 13:30) = 38,37\%$$

$$\%Zn_{rej} = média\ (11/10, 17:10\ a\ 13/10, 13:30) = 2,83\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$Massa\ equivalente_{flotaçãoW} = \left[\left(\frac{7}{24} \right) * dia\ 11 + dia\ 12 + \left(\frac{13,5}{24} \right) * dia\ 11 \right] * P_{flot_w}$$

PILHA 4511 (de 13/10/2017, às 09:20 a 14/10/2017, às 22:50)

Amostras da flotação consideradas: de 13/10/2017, às 14:00 a 15/10/2017, às 03:00.

$$\%Zn_{conc} = média\ (13/10, 14:00\ a\ 15/10, 02:00) = 39,41\%$$

$$\%Zn_{rej} = \text{média} (13/10, 14:00 \text{ a } 15/10, 02:00) = 2,59\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$\text{Massa equivalente}_{flotaçãoW} = \left[\left(\frac{10}{24} \right) * \text{dia } 13 + \text{dia } 14 + \left(\frac{3}{24} \right) * \text{dia } 15 \right] * P_{flotW}$$

PILHA 4512 (de 14/10/2017, às 22:50 a 16/10/2017, às 18:25)

Amostras da flotação consideradas: de 15/10/2017, às 03:00 a 16/10/2017, às 22:30.

$$\%Zn_{conc} = \text{média} (15/10, 3:00 \text{ a } 16/10, 22:00) = 39,39\%$$

$$\%Zn_{rej} = \text{média} (15/10, 3:00 \text{ a } 16/10, 22:00) = 2,68\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$\text{Massa equivalente}_{flotaçãoW} = \left[\left(\frac{10}{24} \right) * \text{dia } 13 + \text{dia } 14 + \left(\frac{3}{24} \right) * \text{dia } 15 \right] * P_{flotW}$$

PILHA 1013 (Usicon C) (de 03/10/2017, às 04:18 a 07/10/2017, às 09:00)

Amostras da flotação consideradas: de 03/10/2017, às 06:00 a 07/10/2017, às 10:40.

$$\%Zn_{conc} = \text{média} (03/10, 06:00 \text{ a } 07/10, 12:00) = 37,76\%$$

$$\%Zn_{rej} = \text{média} (03/10, 06:00 \text{ a } 07/10, 12:00) = 2,44\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$\text{Massa equivalente}_{flotaçãoC} = \left[\left(\frac{17}{24} \right) * \text{dia } 3 + \text{dia } 4 + \text{dia } 5 + \text{dia } 6 + \left(\frac{10}{24} \right) * \text{dia } 7 \right] * P_{flotC}$$

PILHA 1014 (Usicon C) (de 07/10/2017, às 13:10 a 11/10/2017, às 09:00)

Amostras da flotação consideradas: de 07/10/2017, às 15:00 a 11/10/2017, às 10:40.

$$\%Zn_{conc} = \text{média} (07/10, 14:00 \text{ a } 11/10, 12:00) = 38,62\%$$

$$\%Zn_{rej} = \text{média} (07/10, 14:00 \text{ a } 11/10, 12:00) = 2,74\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$\text{Massa equivalente}_{flotaçãoC} = \left[\left(\frac{10}{24} \right) * \text{dia } 7 + \text{dia } 8 + \text{dia } 9 + \text{dia } 10 + \left(\frac{11}{24} \right) * \text{dia } 11 \right] * P_{flotC}$$

PILHA 1015 (Usicon C) (de 11/10/2017, às 09:00 a 15/10/2017, às 23:00)

Amostras da flotação consideradas: de 11/10/2017, às 10:40 a 16/10/2017, às 01:00.

$$\%Zn_{conc} = \text{média} (11/10, 10:00 \text{ a } 16/10, 00:00) = 38,58\%$$

$$\%Zn_{rej} = \text{média} (11/10, 10:00 \text{ a } 16/10, 00:00) = 2,81\%$$

Cálculo das massas equivalentes (concentrados, rejeitos e massas total)

$$\text{Massa equivalente}_{flotaçãoC} = \left[\left(\frac{13}{24} \right) * \text{dia } 11 + \text{dia } 12 + \text{dia } 13 + \text{dia } 14 + \text{dia } 15 + \left(\frac{1}{24} \right) * \text{dia } 16 \right] * P_{flotC}$$

Tabela A.1 – Balanço de massa dos produtos finais por dia.

PRODUÇÃO CONCENTRADO				PRODUÇÃO REJEITO				PONDERAÇÃO PRODUTOS		
Data	Massa de concentrado produzida (t)	% Zn	Produção de ZnC (t)	Variação média do rejeito no espessador (m³/h)	% de sólidos	Densidade relativa de polpa	Massa de Rejeito (t/24h)	% Zn	Produção de ZnR (t)	Massa total de produtos
03/10/2017	959,00	39,16%	375,54	128,73	48,02%	3,03	4495,33	2,13%	95,72	471,26
04/10/2017	987,00	39,35%	388,38	125,70	48,07%	3,03	4394,36	2,17%	95,21	483,59
05/10/2017	1.015,00	38,25%	388,24	124,07	47,37%	3,03	4274,09	2,21%	94,66	482,90
06/10/2017	1.016,00	38,77%	393,90	119,29	48,49%	3,03	4206,05	2,51%	105,38	499,28
07/10/2017	1.023,00	38,57%	394,57	104,79	50,96%	3,03	3883,55	2,51%	97,48	492,05
08/10/2017	1.017,00	38,82%	394,80	115,59	49,65%	3,02	4159,87	2,55%	106,08	500,88
09/10/2017	1.017,00	38,88%	395,41	109,40	50,97%	3,03	4054,78	2,71%	109,88	505,29
10/10/2017	963,00	38,20%	367,87	111,12	50,81%	3,03	4305,69	2,74%	112,50	480,36
11/10/2017	1.027,00	37,80%	388,21	107,88	51,45%	3,03	4035,99	2,83%	114,22	502,42
12/10/2017	982,00	39,08%	383,77	106,48	52,93%	3,03	4098,85	2,96%	121,33	505,09
13/10/2017	1.007,00	37,88%	381,45	106,87	52,28%	3,03	4062,67	2,68%	108,88	490,33
14/10/2017	976,00	39,37%	384,25	106,51	51,30%	3,03	3973,18	2,60%	103,30	487,55
15/10/2017	999,00	38,45%	381,81	107,56	51,15%	3,03	4001,05	2,49%	99,63	481,43
16/10/2017	962,00	39,39%	378,93	107,44	51,01%	3,03	3985,76	2,85%	113,59	492,53

Tabela A.2 – Balanço de massa dos produtos finais por pilha retomada em cada usina.

Usina W									
Pilha	Massa pilha	%Zn (pilha)	Zn_contido	% Zn bulk	Prod_Conc	Zn_total	Prod_Usina	Rec Massica	%Zn_conc
4506	4.548	12,44%	565,77	12,49%	1.131,0	543,3	5.899,9	24,9%	38,88%
4507	5.344	12,00%	641,28	13,07%	1.320,3	640,5	6.513,2	24,7%	39,14%
4508	6.362	12,06%	767,26	12,49%	1.447,8	715,9	7.301,7	22,8%	39,79%
4509	6.395	12,25%	783,39	12,30%	1.444,3	714,7	7.377,0	22,6%	39,15%
4510	6.424	11,65%	748,40	11,73%	1.493,0	720,2	7.306,3	22,3%	38,35%
4511	5.013	11,43%	572,99	11,87%	1.196,3	591,9	6.050,0	23,9%	39,61%
4512	5.824	11,53%	671,51	11,42%	1.375,0	685,6	6.995,0	23,6%	39,33%
Usina C									
Pilha	Massa Pilha	% Zn (pilha)	Zn_contido	Prod_Conc	Produtos	Rec Massica	%Zn_Conc	%Zn_Rej	%Zn_Produtos
1013	3.003	9,51%	285,59	921,6	448,0	30,69%	37,76%	2,44%	13,28%
1014	2.550	9,40%	239,70	860,7	424,9	33,75%	38,62%	2,75%	14,86%
1015	3.129	9,78%	306,02	1018,5	504,5	32,55%	38,58%	2,81%	14,45%

APÊNDICE B – Pontos de amostragem nas usinas C e W.

Figura A.1 – Fluxograma simplificado da Usina W com pontos de amostragem.

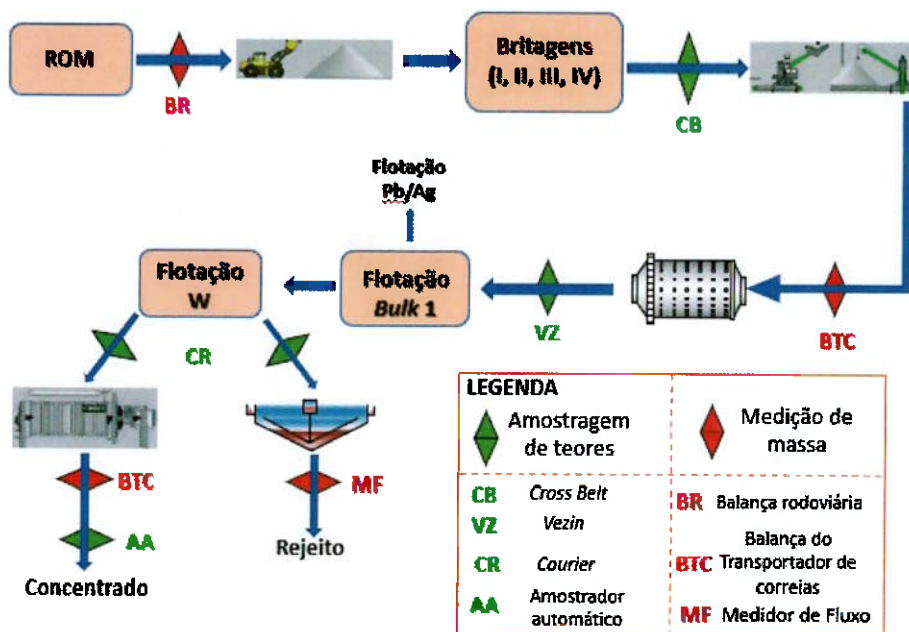
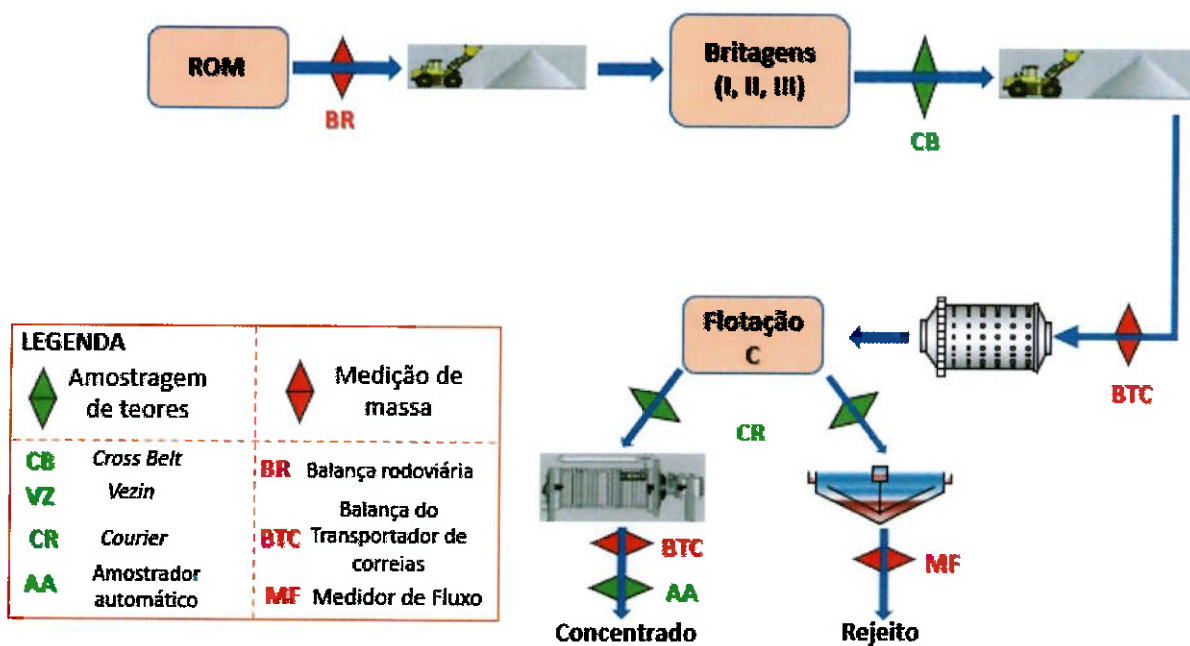


Figura A.2 – Fluxograma simplificado da Usina C com pontos de amostragem.



ANEXOS

ANEXO A – Capacidades de processamentos das operações unitárias das usinas.

OPERAÇÕES UNITÁRIAS	CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO
BRITAGEM W	180 t/h
MOAGEM W	140 t/h (para granulometria de 17% retido acumulado em 100#)
FLOTAÇÃO PB/AG	170 t/h
FLOTAÇÃO W	132 t/h
BRITAGEM C	45 t/h
MOAGEM C	35 t/h (para granulometria de 17% retido acumulado em 100#)
FLOTAÇÃO C	38 t/h
FILTRAÇÃO ZN	45 t/h
FILTRAÇÃO PB/AG	0,5 t/h
CARREGAMENTO	60 t/h
ESPESSADOR REJEITOS	130 t/h
BARRAGEM	14.00.0 m ³

ANEXO B – Resultados dos produtos finais (Usina C + Usina W).

PRODUÇÃO CONCENTRADO				PRODUÇÃO REJEITO		
Data	Massa de concentrado produzida (t)	% Zn	Produção de ZnC (t)	Vazão média do rejeito no espessador (m ³ /h)	% de sólidos	Densidade relativa de polpa
03/10/2017	959,00	39,16	375	128,73	48,02	
04/10/2017	987,00	39,35	388	125,70	48,07	
05/10/2017	1.015,00	38,25	388	124,07	47,37	
06/10/2017	1.016,00	38,77	394	119,29	48,49	
07/10/2017	1.023,00	38,57	395	104,79	50,96	
08/10/2017	1.017,00	38,82	395	115,59	49,65	3,02
09/10/2017	1.017,00	38,88	395	109,40	50,97	
10/10/2017	963,00	38,20	368	111,12	50,81	
11/10/2017	1.027,00	37,80	378	107,88	51,45	
12/10/2017	982,00	39,08	358	106,48	52,93	
13/10/2017	1.007,00	37,88	368	106,87	52,28	
14/10/2017	976,00	39,37	370	106,51	51,30	3,18
15/10/2017	993,00	38,45	359	107,56	51,15	
16/10/2017	962,00	39,39	340	107,44	51,01	
17/10/2017	980,00	39,11	329	108,49	50,67	
18/10/2017	1.002,00	37,82	355	107,24	50,13	3,05