

# LIVRO DE ANAIS



**XXVI ENTMME**

Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa

**VOLUME 1**



**Poços de Caldas-MG  
18 a 22 de outubro de 2015**

## **OS PROBLEMAS DA AMOSTRAGEM MANUAL NÃO PROBABILÍSTICA NA ESTIMATIVA DE TEORES**

**CHIEREGATI, A.C.<sup>1</sup>, EL HAJJ, T.M.<sup>2</sup>, IMOTO, C.F.<sup>3</sup>, PIGNATARI, L.E.C.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.  
e-mail: ana.chieregati@usp.br

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo,  
Laboratório de Simulação de Controle de Processos, e-mail: thammiris.poli@usp.br

<sup>3</sup>Multigeo Engenharia Mineral, e-mail: carla.imoto@gmail.com

<sup>4</sup>Yamana Gold Inc, e-mail: lpignatari@yamana.com

### **RESUMO**

No contexto da indústria mineral, a reconciliação pode ser definida como a prática de se compararem as massas e os teores médios do minério previstos pelos modelos geológicos com as massas e os teores produzidos pela usina de beneficiamento. Esta prática tem mostrado uma importância cada vez maior, uma vez que, quando executada corretamente, melhora a confiabilidade no planejamento de curto prazo e otimiza as operações mineiras. No entanto, a utilidade de reconciliação depende da qualidade e da confiabilidade nos dados de entrada. Uma reconciliação bem sucedida pode ser ilusória. Em muitos casos, os erros gerados em um ponto do processo são compensados pelos erros gerados em outros pontos, resultando em excelentes resultados de reconciliação. Entretanto, este fato pode esconder vieses no sistema que, mais cedo ou mais tarde, podem vir à tona. Quando os erros de amostragem são mascarados, a consequente análise incorreta do sistema de reconciliação pode gerar sérios problemas para a operação, especialmente quando a lavra atinge áreas do depósito mais heterogêneas ou mais pobres. Visto que uma boa estimativa só é possível com práticas corretas de amostragem, a confiabilidade nos resultados de reconciliação depende da representatividade das amostras que os geraram. Este trabalho analisa as práticas incorretas de amostragem manual realizadas em uma mina de cobre para fins de reconciliação e apresenta uma alternativa comprovadamente correta (perfuratriz de circulação reversa com sistema automático de amostragem) para a amostragem manual não probabilística. Os resultados mostram que o procedimento de amostragem manual gera amostras enviesadas, especialmente devido à seleção de amostras com proporção menor de finos. A campanha de amostragem realizada com a avaliação dos resultados de granulométrica mostra que o novo sistema de amostragem gera amostras corretas, sendo, portanto, validado para fins de reconciliação.

**PALAVRAS-CHAVE:** amostragem manual; reconciliação; estimativa de teores.

### **ABSTRACT**

In the mining industry context, reconciliation can be defined as the practice of comparing the masses and average grades provided by the geological models with the masses and the average grades produced by the processing plant. This practice has shown a growing importance, since, when correctly performed, improves reliability in the short-term planning and optimizes mining operations. However, the value of reconciliation depends on the quality and reliability of the input data. A



successful reconciliation can be illusory. In many cases, the errors generated in a point of the process are outweighed by the errors generated elsewhere, resulting in excellent reconciliation results. However, this fact can hide biases in the system which sooner or later may show up. When sampling errors are masked, the consequent incorrect analysis of the reconciliation system may cause serious problems for the operation, especially when production reaches most heterogeneous or poorer areas of the deposit. Since a good estimate is only possible with correct sampling practices, the reliability of the reconciliation results depends on the representativeness of the samples that generated them. This paper analyzes the incorrect manual sampling practices carried out in a copper mine for reconciliation purposes and presents a correct alternative (reverse circulation drill rig with automatic sampling system) for non-probabilistic manual sampling. Results show that the manual sampling procedure generates biased samples, especially due to the selection of samples with a lower proportion of fines. The sampling campaign with the evaluation of size and chemical distributions shows that the new sampling system generates correct samples, validating the new system for reconciliation purposes.

**KEYWORDS:** manual sampling; reconciliation; grade estimation.

## 1. INTRODUÇÃO

A amostragem é uma operação de suma importância em diversas etapas de um empreendimento mineiro, estando presente desde antes de sua implantação, durante a fase de pesquisa com a avaliação dos recursos e reservas, até a fase de operacionalização, no planejamento de curto prazo e reconciliação. Define-se amostragem como uma sequência de operações que tem por objetivo retirar uma parte significativa, ou amostra, de um dado universo (Chierigati e Pitard, 2011). A reconciliação, por sua vez, consiste resumidamente na comparação entre os teores estimados pelos modelos geológicos e os teores obtidos na usina de beneficiamento.

A mina em estudo é uma mina de cobre e ouro no Brasil, a qual realiza sua amostragem com fins de reconciliação por meio de uma perfuratriz convencional *top hammer* (Furukawa) com sistema manual de coleta de amostra, a qual é gerada através da coleta de 12 incrementos da pilha formada pela perfuratriz, usando uma pá. Contudo, análises mostraram uma tendência de superestimativa de teores, relacionada principalmente ao tipo de perfuratriz - não adequado à amostragem - que recupera apenas 80% do material e gera contaminação entre furos. Perfuratrizes com circulação reversa e sistema automático de amostragem e quarteamento são recomendáveis nesse caso, uma vez que podem recuperar até 99% em massa do material do furo; além disso, a amostragem automática minimiza vários dos erros gerados pela amostragem manual, tais como o erro de delimitação e o erro de segregação e agrupamento.

Este trabalho apresenta os resultados de otimização da amostragem para fins de reconciliação na mina de cobre e ouro em estudo, baseados na validação do sistema automático de amostragem de uma perfuratriz com circulação reversa (Atlas Copco ROC L8 RC). Conclui-se que as vantagens de se trabalhar com esse tipo de perfuratriz podem compensar o custo de sua aquisição, principalmente em depósitos muito heterogêneos e geologicamente complexos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A mina em estudo é bastante complexa geologicamente. O ouro e o cobre não apresentam correlação entre si e não se encontram associados preferencialmente a nenhuma das estruturas, necessitando de um bom sistema de amostragem para determinar os limites entre minério e estéril. Além disso, os baixos teores e os diversos tipos litológicos, que conferem ao depósito grande heterogeneidade, tornam a amostragem ainda mais difícil.

O presente estudo teve como objetivo avaliar:

1. A acurácia da perfuratriz convencional utilizada para amostragem;
2. A qualidade das amostras geradas pela perfuratriz convencional e pela perfuratriz de circulação reversa.

A qualidade da amostra gerada pela perfuratriz convencional foi estimada de duas maneiras:

1. Comparando os teores da amostra manual com os teores de todo o material recuperado pela perfuratriz convencional;
2. Comparando os teores da amostra gerada pela perfuratriz convencional com os teores do material recuperado pela perfuratriz com circulação reversa (furo gêmeo).

Os métodos de análise química para quantificação de teores foram: *fire assay* para ouro e absorção atômica para cobre.

### **2.1. Método de amostragem anterior – perfuratriz convencional**

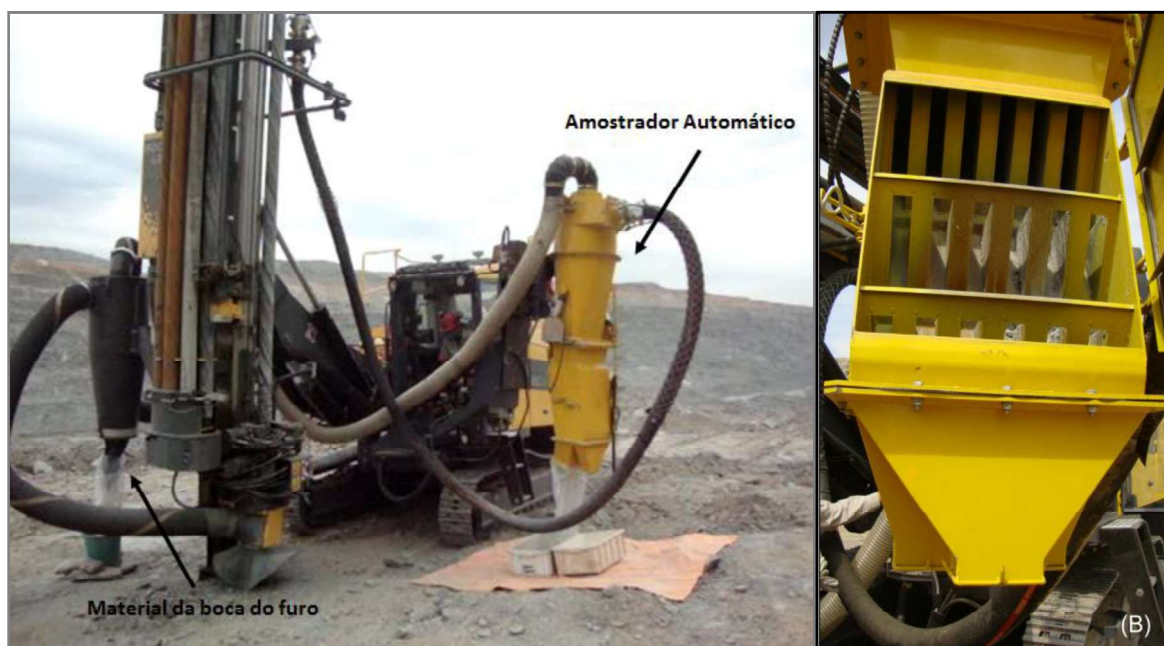
O método anterior de amostragem consistia no uso de uma perfuratriz da marca Furukawa para fins de amostragem. A Furukawa perfura com bit de 3,5” e possui duas saídas de material, uma frontal (descarga de material grosso e médio) e uma traseira (descarga de material fino). O equipamento possui 5 filtros, por onde o material fino passa antes ser descarregado, constituindo uma das prováveis fontes de contaminação entre furos, visto que parte do material fica retida e é eliminada posteriormente junto com o material do furo seguinte.

O método consistia na coleta de 12 incrementos retirados manualmente da pilha de médios e grossos usando uma pá. Os finos gerados pela perfuratriz eram descartados, pois, de acordo com os responsáveis pela amostragem, "o material fino 'salga' a amostra e não gera reconciliação na usina"!

Provou-se que esta perfuratriz não era capaz de recuperar todo o material do furo, especialmente o material grosso e de menor teor, gerando na superfície uma pilha de material de maior teor. Observou-se que em furos de 20 m, aproximadamente 2 m de material ficavam retidos dentro do furo, pois a pressão de ar não era capaz de carregá-los até a superfície. A amostragem manual incorreta da pilha de grossos compensava o erro gerado pela baixa recuperação, gerando uma reconciliação excelente, mas ilusória. Essa perfuratriz foi então substituída por uma perfuratriz de circulação reversa e sistema automático de amostragem.

### **2.2. Novo método de amostragem – perfuratriz com circulação reversa**

A nova perfuratriz adquirida para amostragem foi uma Atlas Copco ROC L8 com circulação reversa (RC) e bit de 5,25”, que recupera 98% do material do furo. A perfuratriz de circulação reversa possui uma haste que reveste o furo, minimizando a perda de material pelas fraturas e evitando a contaminação do material do furo, que é enviado diretamente ao sistema automático de amostragem. A perfuratriz também possui uma coifa que retira o material acumulado na boca do furo e o envia para uma saída lateral. A Figura 1 mostra o equipamento e suas duas saídas de material.



**Figura 1. Perfuratriz com sistema automático de amostragem e detalhe do quarteador.**

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. Ao atingir a profundidade desejada, a perfuração é interrompida e há a descarga do material que passa então pelo sistema automático de quarteamento.

Para a validação da nova perfuratriz com sistema automático e comparação com a antiga perfuratriz, foram executados três furos gêmeos com coleta da amostra e de todo o restante do material recuperado – i.e. o rejeito do quarteamento mais o material depositado na boca do furo – a cada 5 metros, resultando em um total de 10 amostras de 5 m cada: duas para o furo 1, quatro para o furo 2 e quatro para o furo 3.

As etapas de coleta de amostras dos furos gêmeos foram as seguintes:

1. Perfuração com a Furukawa, parando a cada 5 metros para coleta de amostras;
2. Retirada da amostra pelo antigo procedimento manual com a pá (12 incrementos);
3. Coleta de todo o restante do material recuperado;
4. Perfuração com a ROC L8 RC, parando a cada 5 metros;
5. Coleta da amostra gerada pelo sistema automático e do restante do material recuperado durante a perfuração.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Acurácia da Perfuratriz Furukawa

El Hajj *et al.* (2013) comprovaram que a Furukawa tende a superestimar o teor real do furo, apresentando um erro relativo médio de +58% para ouro e +18% para cobre. Esses erros foram calculados relativamente aos teores correspondentes do material recuperado dos furos gêmeos pela ROC L8. Os resultados apresentaram um erro sistemático claro: 100% das amostras superestimaram o teor de ouro e 80% das amostras superestimaram o teor de cobre.

#### 3.2. Qualidade da Amostra – Furukawa

A Figura 2 mostra que tanto o ouro quanto o cobre estão associados às frações mais finas. Assim, a amostra manual, por não incluir os finos, apresenta a tendência de superestimativa de teor.

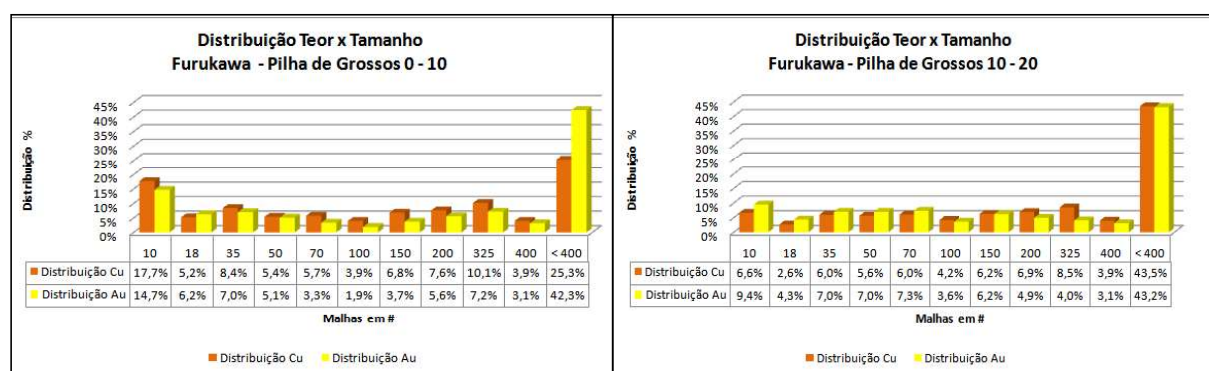


Figura 2. Análise granulométrica média do material recuperado pela Furukawa (grossos e finos).

A Tabela 1 apresenta os cálculos do erro da amostra manual em relação a todo material recuperado pela Furukawa, evidenciando a tendência de subestimativa de teores.

Tabela 1. Erros para cobre e ouro relativos a todo material recuperado pela Furukawa.

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	

A Tabela 2 apresenta a comparação entre os teores estimados pela ROC L8 e a amostra gerada pela Furukawa.

**Tabela 2. Erros da amostra da Furukawa para cobre e ouro relativos a todo material recuperado pela L8.**

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	

É interessante notar que, diferentemente do resultado anterior, neste caso a amostra superestima o teor do furo. Isso pode ser explicado pelo fato de que a Furukawa possui uma tendência de superestimativa, como foi visto anteriormente, e muito embora a amostra possua uma tendência de subestimativa, esta não é suficiente para compensar o erro induzido pela perfuratriz, que não tem a capacidade de recuperar o material mais grosso e, portanto, de menor teor. Se fossem coletados incrementos da pilha de finos, a superestimativa das amostras manuais seria ainda maior.

Nota-se aqui que, uma vez que um erro compensa o outro, é possível obter reconciliações excelentes 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.

### 3.3. Qualidade da Amostra – ROC L8

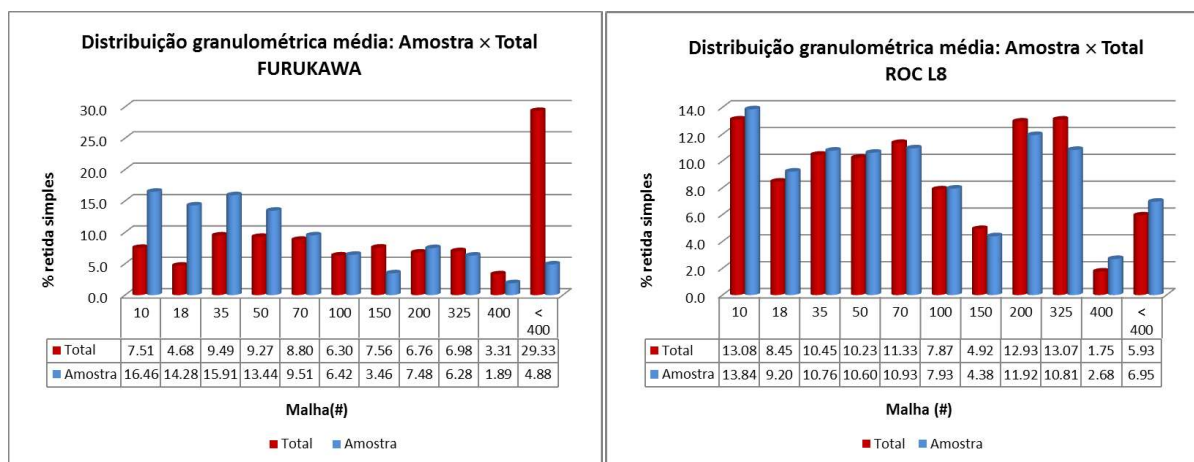
A Tabela 3 apresenta uma análise dos erros dos teores das amostras geradas pelo sistema automático de amostragem da ROC L8, relativamente a todo o material recuperado pela perfuratriz. Um aspecto importante é a ausência de um erro sistemático, ou viés, não possuindo uma tendência de subestimativa ou superestimativa.



**Tabela 3. Erros para cobre e ouro relativos a todo material recuperado pela L8.**

Au					Cu				
Furo	Profundidade	L8	Amostra L8	Erro Relativo	Furo	Profundidade	L8	Amostra L8	Erro Relativo
F1 0-5		0,306	0,282	-8%	F1 0-5		0,425	0,320	-25%
F1 5-10		0,071	0,069	-3%	F1 5-10		0,140	0,140	0%
F2 0-5		0,532	0,578	9%	F2 0-5		0,538	0,551	2%
F2 5-10		0,096	0,121	26%	F2 5-10		0,166	0,166	0%
F2 10-15		0,028	0,025	-10%	F2 10-15		0,086	0,081	-6%
F2 15-20		0,025	0,037	48%	F2 15-20		0,096	0,093	-4%
F3 0-5		0,282	0,277	-2%	F3 0-5		0,446	0,422	-5%
F3 5-10		0,095	0,082	-14%	F3 5-10		0,187	0,168	-10%
F3 10-15		0,040	0,044	11%	F3 10-15		0,102	0,097	-5%
F3 15-20		0,031	0,036	17%	F3 15-20		0,104	0,105	1%
Média				0,005	Média				-0,015
Variação				0,000	Variação				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

A Figura 3 apresenta uma comparação das distribuições granulométricas da amostra e de todo o material recuperado pelas perfuratrizes, considerando os valores médios para os 10 primeiros e para os 10 últimos metros do furo.

**Figura 3. Distribuições granulométricas da amostra e de todo o material da Furukawa e da L8.**

Os gráficos mostram com nitidez que as distribuições da ROC L8 são bem compatíveis, não havendo preferência de amostragem de uma determinada fração granulométrica em detrimento das demais, enquanto as distribuições da Furukawa são incompatíveis, mostrando uma seleção preferencial de partículas grossas pelo método de amostragem praticado. Sabendo que a representação da distribuição granulométrica garante a representação dos teores, pode-se afirmar que o sistema automático de amostragem da ROC L8 RC gera amostras representativas do lote de material recuperado do furo.

#### 4. CONCLUSÕES

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

1. A Furukawa superestima o teor dos furos, principalmente no caso do ouro, devido à perda comprovada de material dentro do furo;
2. O procedimento de coleta manual de amostra tende a selecionar apenas as partículas mais grossas, gerando uma subestimativa de teores de ouro e de cobre, entretanto, essa tendência é mascarada pela tendência de superestimativa da própria perfuratriz;

3. O descarte de finos no procedimento manual de amostragem é uma prática incorreta que, no entanto, apresentou resultados positivos no que diz respeito à reconciliação, devido à compensação dos erros que levava a uma reconciliação ilusoriamente excelente;
4. As amostras geradas pelo sistema automático da perfuratriz ROC L8 RC não apresentam erros sistemáticos em se comparando com os teores de todo material recuperado do furo;
5. As amostras geradas pela ROC L8 RC representam a distribuição granulométrica do lote e também os teores de ouro e cobre por fração granulométrica;
6. 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.

Sabe-se que os erros são amplificados quanto mais baixos os teores e maior complexidade do depósito (Pitard, 2008) e, portanto, o uso do novo sistema automático de amostragem é imprescindível para o controle das operações mineiras. A nova perfuratriz com circulação reversa apresentou resultados positivos, traduzidos pela maior representatividade das amostras e maior confiabilidade nos resultados de reconciliação.

## **5. REFERÊNCIAS**

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. (Org.), vol. 5, p. 299-338, Signus Editora, São Paulo, 2011.

EL HAJJ, T.M.; CHIEREGATI, A.C. & PIGNATARI, L.E.C. Illusory reconciliation: compensation of errors by manual sampling. In: 6<sup>th</sup> World Conference on Sampling and Blending, p. 227-237, Gecamin, Lima, 2013.

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