



## AMOSTRAGEM DE REJEITO DE GARIMPO DE OURO NO ESTADO DE MATO GROSSO PARA USO EM SOLO CIMENTO

GOMES, A. C. F.<sup>1</sup>, ROCHA, S.D.F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas (PPGEM) da UFMG.

E-mail: anaclaudiafranccagomes@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

### RESUMO

O reaproveitamento de resíduos, estéreis e rejeitos mineiros está em consonância com os preceitos da economia circular. A caracterização destes materiais é essencial para o desenvolvimento de soluções porque podem haver variações da composição mineralógica, da granulometria e da composição química. A amostragem surge então como operação de extrema importância que precede a caracterização de minérios por abranger uma sequência de operações que objetiva a obtenção de alíquotas, ou amostras que sejam representativas do todo tralhado. O presente artigo relata uma prática de amostragem realizada em rejeito de garimpo de ouro no estado de Mato Grosso na região de Alta Floresta. Dentre os vários possíveis erros associados à amostragem, o efeito pepita é comum em depósitos onde o mineral-minério encontra-se em ppm, como é o caso da amostragem de rejeitos de ouro. Dessa forma optou-se pela formação de pilha longa para obtenção de incrementos que representavam a massa mínima representativa. Ainda que a amostragem em função da granulometria tenha apresentado um valor mais baixo e de fácil operação que a massa em função do teor; este último foi escolhido a fim de evitar o efeito pepita. Após amostragem, o rejeito foi caracterizado segundo a sua granulometria e composição química. Os resultados mostraram a ausência de Au e que para que o material seja utilizado na composição de tijolo de solo cimento (NBR:10833) ele deve ter a sua granulometria corrigida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Amostragem de rejeitos, Rejeitos de ouro, Efeito pepita, Amostragem em função do teor.

### ABSTRACT

Nowadays, researches are aimed at reusing mining tailings due to the strong environmental impacts associated with them. For this, it is necessary to characterize these tailings because there may be variations of the mineralogical composition, granulometry and content of the element of interest. Sampling then appears as an operation of extreme importance for the characterization of ores because it covers a sequence of operations that aims to obtain aliquots, or samples that are representative of the whole processed. This article reports a sampling practice carried out on gold mining waste in Mato Grosso - Brazil. Among the several possible errors associated to sampling, the "gold nugget effect" is common in deposits where the ore is found in ppm, as is the case of gold tailing. Although the sampling according to the granulometry has presented a lower value and of easy operation than the mass as a function of the Au content; the latter was chosen in order to avoid the "the gold nugget effect".

**KEYWORDS:** Tailings sampling, Gold ore tailing, Nugget effect.

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta amostragem realizada em rejeito de garimpo de ouro no estado de Mato Grosso na região de Alta Floresta. O local é famoso pela sua alta incidência de áreas garimpáveis. Ainda que esta atividade seja de extrema importância para a economia do estado, o mesmo tem incentivado práticas para a redução de rejeitos gerados, e em consequência, o impacto ambiental associado. Tais práticas objetivam investigar formas de se reaproveitar estes materiais que já passaram por concentração gravimétrica e cianetação. Ainda que a recuperação de ouro deste rejeito não seja atualmente viável economicamente, a caracterização pode indicar outras formas para o seu reaproveitamento.

Dessa forma, conhecer as características dos rejeitos, assim como na tecnologia mineral, é necessário, uma vez que variações da composição química e mineralógica (distribuição não regular do mineral-minério), granulometria e outras propriedades são comuns (BERTOLINO *et al.*, 2018).

Assim como a identificação destas características específicas norteia os métodos de concentração mais indicados para o beneficiamento de minérios, já que investiga o grau de liberação e a propriedade diferenciadora entre o mineral de interesse e os de ganga, ela também permite avaliar possibilidades de utilização dos rejeitos (BERTOLINO *et al.*, 2018)

Quando a caracterização objetiva o desenvolvimento de uma rota de processamento mineral, a caracterização é dita tecnológica. Entretanto, nem sempre essa rota é alcançada ou viável, o que acontece, por exemplo, com rejeitos dispostos em algumas barragens e pilhas, devido, principalmente, ao baixo teor do mineral-minério contido.

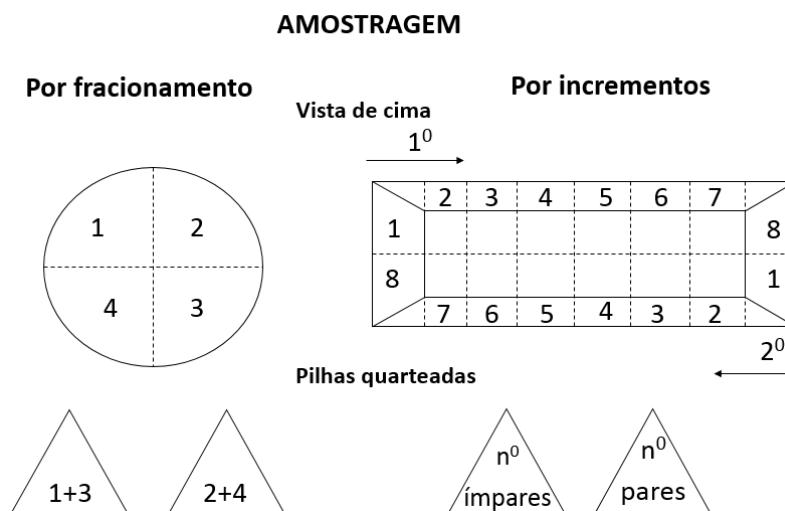
Não encontrar uma rota de beneficiamento mineral, não significa, necessariamente, que este material não possa ser aproveitado pelo mercado consumidor. Como exemplos, Costa, Gumiere e Brandão (2014) caracterizaram um rejeito da mineração de ferro e constataram que o material era satisfatório para produção de concreto voltado para a fabricação de pré-moldados. A empresa Minerita, após caracterização da sua barragem de ferro, passou a recuperar e a vender esse rejeito como areia industrial devido à sua granulometria grossa e elevada quantidade de sílica (FEAM, 2013). Em ambos os casos o material estudado não foi reaproveitado pela concentração do mineral-minério da concentração de origem, mas sim pela indústria civil.

Entretanto, ainda que a caracterização de rejeitos mineiros seja fortemente indicada para nortear o seu aproveitamento, a minimização da geração de resíduos gerados deve nortear a atividade, incrementando o seu grau de sustentabilidade. Caracterizar uma barragem ou pilha de rejeitos não é tarefa tão simples. Em muitos empreendimentos estas estruturas armazenam material ao longo do tempo, de distintas frentes de lavra, heterogêneo, com o material já segregado devido ao tamanho e massa específica de cada grão.

A amostragem surge então como operação de extrema importância também no contexto da caracterização de rejeitos por abranger uma sequência de operações que objetiva a obtenção de alíquotas, ou amostras que sejam representativas do conjunto, a partir do qual decisões serão tomadas e apontarão a viabilidade técnica e econômica do processo.

Para Chaves e Ferreira (2012), quando a massa a ser amostrada é grande (toneladas), ela deve ser feita por incrementos através da formação de pilhas longas onde uma amostra incremental deve ser retirada em intervalos de tempos ou percursos iguais e juntada aos demais incrementos. O montante deve ser então homogeneizado e reduzido.

Outro método possível é por fracionamento, onde, a partir de uma pilha cônica, se divide a amostra total em duas amostras reduzidas, e cada uma destas partes podem ser divididas em outras duas, e assim sucessivamente. A figura 1 ilustra estas duas formas de amostragem.



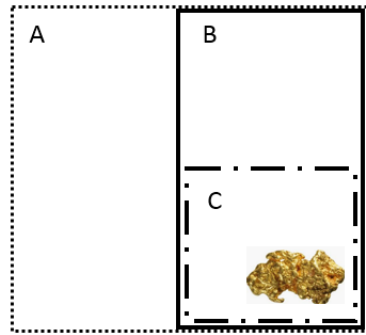
**Figura 1: Formas de amostragem. Adaptado de Chaves e Ferreira (2012).**

Ainda que feita criteriosamente, a representatividade de uma população pode ser prejudicada por vários erros de operação, operador, e heterogeneidade das partículas do sistema, dentre os quais para o presente trabalho se destacam dois, o erro fundamental de amostragem e o efeito pepita (BERTOLINO *et al.*, 2018; CHAVES e FERREIRA, 2012).

O primeiro só pode ser eliminado se a amostra for todo o universo amostrado; caso contrário sempre haverá diferenças entre parâmetros da amostra tomada e os mesmos parâmetros do total estudado. Dessa forma, mesmo que exista uma massa mínima, com um erro máximo admissível, que seja capaz de representar todo o universo estatisticamente, se ela não for igual ao total, haverá o erro fundamental de amostragem (CHIERAGATI e PITARD, 2018).

O efeito pepita é um termo geoestatístico que descreve a proporção de variabilidade aleatória presente na amostragem de materiais heterogêneos. Depósitos de metais preciosos, como o ouro, por exemplo, onde a concentração do mineral-minério está na faixa de ppm, apresentam um efeito pepita elevado, uma vez que a reprodutibilidade das amostras é muito baixa.

A figura 2 ilustra o efeito pepita. Nela, um bloco inicial, A, de 1m<sup>3</sup> de minério é composto majoritariamente por areia (ganga) e por uma pepita de ouro no canto inferior direito de 10g. O teor do bloco A é, portanto, de 10g Au/m<sup>3</sup>. Entretanto, se a amostragem feita englobar o bloco B (metade do volume de A), a caracterização apontará um teor de 20g Au/m<sup>3</sup>. De modo análogo, se o bloco amostrado for o C (metade do volume de B), o teor determinado do minério será de 40g Au/m<sup>3</sup>.



**Figura 2: Efeito pepita**

Portanto, a amostragem nestes depósitos exige alta acurácia, sendo um grande desafio para a indústria mineral. Somado a tal dificuldade, o ouro, devido à sua alta densidade, sofre uma forte segregação quando liberado. Assim, quanto menor o teor do metal de interesse na amostra mãe, maior a dificuldade de se obter amostras representativas (CHIERAGATI e PITARD, 2018).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente artigo discorre sobre a amostragem conduzida em rejeito de garimpo de ouro no estado de Mato Grosso, visando seu reaproveitamento e destinação sustentável. O empreendimento gera uma pilha por ano de rejeito cianetado (cerca de mil toneladas cada) que é disposta em pátio de estocagem sem destinação final, exposta a intempéries, constituindo um passivo ambiental. A figura 3 ilustra a localização aproximada da área de estudo e o pátio onde o rejeito é estocado.



**Figura 3: A esquerda: Localização aproximada do garimpo estudado. A direita: pátio de estocagem de rejeitos**

Para a amostragem do material, a partir de uma destas pilhas formaram-se duas pilhas longas (a amostragem por incrementos é indicada para grandes quantidades de material) com cerca de 1,5m de altura com o auxílio de uma retroescavadeira da onde foram retirados

incrementos que formaram a amostra representativa, destinada à futura caracterização. Devido ao efeito pepita presente em minérios de ouro, os cálculos de amostra mínima representativa em função do teor ( $MS_t$ ) e da distribuição granulométrica ( $MS_g$ ) foram os sugeridos por Chierigati e Pitard (2018) expostos nas equações 1 e 2, correlacionados as equações 3 e 4:

$$MS_t = \frac{IHL}{S^2_{FSE}} \quad (1)$$

$$MS_g = 18. f. p. \left( \frac{d^{3.95}}{S^2_{FSE}} \right) \quad (2)$$

Onde:

$$IHL = c. f. g. l. (d)^3 \quad (3)$$

•

$$c = \frac{pm}{al} \quad \text{para } al < 10\% \quad (4)$$

Onde:

$MS_t$  é a massa mínima de amostra representativa em função do teor do mineral-minério,  $IHL$  a fórmula de Gy (cálculo de erros associados à amostragem),  $S^2_{FSE}$  é o máximo desvio padrão relativo do erro fundamental de amostragem,  $c$  é o fator de constituição mineralógica,  $f = 0,2$  (fator de forma adotado para ouro),  $g=0,25$  (fator de granulometria adotado para materiais não calibrados),  $l=0,8$  (fator liberação adotado para materiais muito heterogêneos),  $d =1,2$  (diâmetro no qual 5% das partículas ficam retidas – obtido por análise granulométrica),  $pm =16$  (densidade do ouro nativo),  $al= 0,001$  (teor adotado do mineral de interesse) e  $MS_g$  é a massa mínima de amostra representativa em função da distribuição granulométrica.

A massa total obtida na amostragem passou novamente por divisões (primeiramente por pilhas longas e depois por divisores de Rifles da Dalmatica), por análise de distribuição granulométrica (por peneiras da série Tyler e Cyclosizer Warman M4), e todas as faixas de tamanho passaram por análise qualitativa de fluorescência de raios-X, FRX (da Rigaku, modelo 3550).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostragem das pilhas de rejeito foi tomada com bastante atenção no presente trabalho, uma vez que o rejeito da mineração do ouro será avaliado para o seu uso na composição de agregado da construção civil.

Cada incremento retirado das pilhas longas constituía uma massa mínima representativa de amostragem segundo a metodologia proposta por Chierigati e Pitard (2018). As fórmulas e parâmetros sugeridos pelos autores estão na tabela 1 onde observa-se

que a massa mínima representativa pode estar expressa em função da distribuição granulométrica  $MS_g$  ou em função do teor do mineral-minério  $MS_t$ .

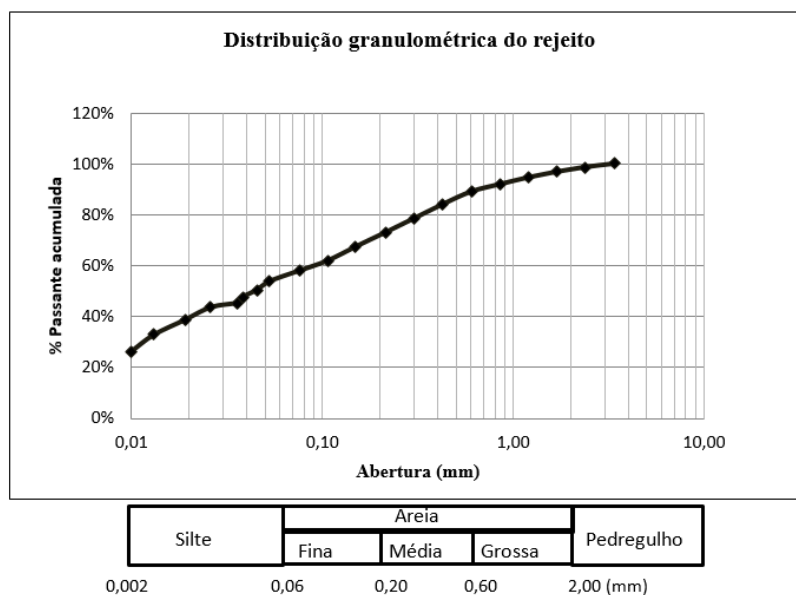
Sobre o parâmetro  $al$  (teor de Au) 0,001g Au/t adotado, buscou-se evitar o efeito pepita, uma vez que o garimpo concentra o metal em rochas com o teor desse metal em ppm. Acredita-se que a quantidade de ouro nesse rejeito seja baixa. Uma vez que o teor de Au é o denominador da equação 4 de fator de constituição mineralógica ( $c$ ), quanto menor o teor do mineral-minério, maior deverá ser a massa amostrada. Se, por exemplo o  $al$  adotado fosse de 0,01,  $MS_t$  seria de aproximados 5,0Kg, como  $MS_g$ . Se  $al=0,1$ ,  $MS_t=0,5Kg$ ; e se  $al=0,0001$ ,  $MS_t=500,0Kg$ , o que tornaria a prática de amostragem inviável.

O valor encontrado de  $MS_t$  (aproximados 50Kgs – para  $al=0,001g$  Au/t) é 10 vezes maior que o estimado para  $MS_g$  (cerca de 5,0Kgs), e quanto menor for o teor do ouro adotado, maior será o valor de  $MS_t$ . Ainda que a massa mínima representativa em função do teor seja mais trabalhosa e demorada, visto a elevada quantidade de material necessário, em minérios onde o efeito pepita é um risco real, o  $MS_t$  deve ser priorizado em relação ao  $MS_g$ . A tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para a amostragem do rejeito.

**Tabela 1: Parâmetros utilizados para a amostragem do rejeito de garimpo de ouro**

<b>Determinação da massa mínima representativa de amostragem</b>		
<b>Parâmetros para a determinação de <math>MS_t</math> e <math>MS_g</math></b>	<b>Valor adotado</b>	<b>Fonte: pág:</b>
<b>Fonte: Chierigati e Pitard (2018)</b>		
<b><math>c</math> (Fator de constituição mineralógica) = <math>pm/al</math></b>		
pm (Densidade do minério)	16	60
al (Teor adotado do mineral de interesse)	0,001	autor
<b><math>c</math></b>	<b>16000</b>	
<b>IHL (Fórmula de Gy) = <math>c.f.g.l. d^3</math></b>		
f (Fator de forma)	0,20	60
g (Fator de granulometria)	0,25	60
l (Fator de liberação)	0,80	40
$d(d_{95})$	1,20	autor
<b>IHL (Kg)</b>	<b>1,10592</b>	
<b><math>MS_t</math> (Massa mínima em função do teor) = <math>IHL/S^2_{FSE}</math></b>		
$S_{FSE}$ (máximo desvio padrão do erro fundamental de amostragem)	0,15	60
<b><math>MS_t</math> (Kg)</b>	<b>49,15</b>	
<b><math>MS_g</math> (Massa mínima em função do tamanho) = <math>18.f. pm.(d^3/S^2_{FSE})</math></b>		
<b><math>MS_g</math> (Kg)</b>	<b>4,42</b>	

A massa total obtida na amostragem passou novamente por divisões sucessivas de forma a compor alíquotas representativas para a análise de distribuição granulométrica cujos resultados estão representados na figura 4 onde observa-se que o rejeito contém valores aproximados de 5% de pedregulho, 11, 16 e 19% de areia grossa, média e fina, nessa ordem, 27% de silte e 21% de argila; sendo então considerado rejeito fino de carácter siltoso.



**Figura 4: Análise de distribuição granulométrica do rejeito de ouro**

Todas as frações granulométricas, bem como uma alíquota *in natura*, passaram por análise de FRX, onde os mesmos elementos químicos e as suas respectivas intensidades se repetiram. A tabela 2 resume a análise química feita onde destaca-se a ausência do Au (o que inviabiliza rotas para a concentração do ouro), e altos teores de Si, Al, O e Fe.

**Tabela 2: Análise química FRX do rejeito de ouro**

Intensidade	Elemento químico
Alto	Si, Al, O
Médio	Fe
Baixo	Cu, P, Ca, K, Ti, S, P, Mg
Traço	Zr, Sr, Rb, Zn, Ni, Cr, Mn, Cl, Na

A revisão bibliográfica apresentada mostrou que Costa, Gumiere e Brandão (2014) e FEAM (2013) comprovaram, através de caracterização, que os rejeitos estudados não puderam ser reaproveitados pela concentração do mineral-minério de origem, mas sim pela indústria civil. De modo análogo, o rejeito será caracterizado pela NBR 10833 para sua avaliação como material para construção de tijolo de solo-cimento.

Os tijolos de solo-cimento são blocos produzidos com solo natural (sem o processo de cozimento) com estabilização química através da adição de cimento ou cal (com porcentagens que variam entre 3 e 9%) em uma forma com posterior prensagem em máquina que pode ser manual ou hidráulica.

A NBR 10833 considera, para produção de solo-cimento, materiais com 100% dos grãos passando na peneira de 4,8mm e de 10% a 50% passando na malha de 0,075mm, recomendáveis. Dessa forma, o rejeito de ouro aqui apresentado, ainda que seja 100% passante em 4,8mm, possui cerca de 58% do material passante em 0,075mm (figura 4) o que pode indicar a necessidade de corte nessa faixa granulométrica, de mistura com outro material mais grosseiro, ou ainda maior adição do agente estabilizante, cimento.

#### 4. CONCLUSÕES

A metodologia de amostragem usualmente empregada para caracterização química e mineralógica pode ser utilizada para rejeitos. Para rejeitos de ouro, aonde pode ocorrer o efeito pepita devido à baixa concentração do mineral minério, o  $MS_t$  deve ser priorizado em relação ao  $MS_g$ .

A amostragem realizada obteve alíquotas representativas do todo trabalhado que alimentaram a análise de distribuição granulométrica do rejeito que o classificou como fino de carácter siltoso.

As faixas granulométricas, bem como o rejeito in natura, foram analisadas por FRX onde o elemento Au não foi encontrado, e Si, Al, O e Fe foram os encontrados com maior intensidade. A caracterização mostrou ser inviável a concentração de ouro no rejeito, entretanto, a revisão bibliográfica mostrou casos exitosos onde o rejeito foi reaproveitado pela indústria civil.

Dessa forma, para que o rejeito de ouro se enquadre nas condições sugeridas pela NBR 10833 para a fabricação de tijolo de solo-cimento, ele precisa ter a sua granulometria corrigida, por ser um pouco mais fino que o exigido.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Mato Grosso, Faeng da UFMT, ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Demin da UFMG, ao Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas da UFMG, PPGEM, e as instituições CAPES e CNPQ que permitiram o desenvolvimento da presente pesquisa.

#### 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2012). NBR 10833: Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica. Rio de Janeiro.

BERTOLINO, L.C.; SANTOS, W.H.; SANTOS, A.C. **Caracterização mineralógica de minérios**. In: LUZ, A.D.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2018. p.27-64.

CHIEREGATI, A.C.; PITARD, F.F. **Amostragem**. In: LUZ, A.D.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2018. p.27-64.

CHAVES, A.P.; FERREIRA, F.M. **Estocagem em pilhas**. In: CHAVES, A.P. Manuseio de sólidos granulados. São Paulo: Oficina de textos, 2012. p. 18-93.

COSTA, A.V.; GUMIERI, A.G.; BRANDÃO, P. R. G, (2014). **Piso intertravado produzido com rejeito sinter feed**. IBRACON: Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Volume 7, Number 2, 228-259 p.

FEAM -Fundação Estadual do Meio Ambiente, (2013). **Reaproveitamento de Rejeitos na Mineração – Projeto Areia Industrial**. Disponível em: < <https://docplayer.com.br/2056549-Banco-de-boas-praticas-ambientais-estudo-de-caso-reaproveitamento-de-rejeitos-na-mineracao-projeto-areia-industrial.html>>. Acesso em abril de 2019.