

TESTE DE HETEROGENEIDADE PARA O MINÉRIO DE ALUMÍNIO DA MINA DA ALCOA EM JURUTI, REGIÃO OESTE DO PARÁ

BORTOLETO, D.A.¹, CHIEREGATI, A.C.², PEREIRA, A.H.³, MACIEL, R.L.⁴

¹ Alcoa World Alumina, daniel.bortoleto@alcoa.com.br

² Universidade de São Paulo, ana.chieregati@usp.br

³ Alcoa World Alumina, antonio.h.pereira@alcoa.com.br

⁴ Alcoa World Alumina, railson.maciel@alcoa.com.br

RESUMO

A amostragem pode ser definida como o conjunto de operações destinadas à obtenção de uma amostra representativa de uma dada população ou lote de material, onde a redução da massa deve ser feita de forma criteriosa a fim de assegurar a confiabilidade dos processos envolvidos, não alterando as propriedades físico-químicas, tais como teor e constituintes mineralógicos, do lote inicial. Mesmo que todos os procedimentos de amostragem sejam corretamente realizados, ainda existirá um erro associado à heterogeneidade do depósito que nunca pode ser eliminado, o erro fundamental de amostragem. Como consequência, cada etapa de amostragem gerará um erro, o qual deve ser conhecido para que os resultados de controle de qualidade sejam confiáveis. Os testes de heterogeneidade foram desenvolvidos com o objetivo de estimar o erro fundamental de amostragem. O presente trabalho estuda o desvio padrão gerado pela heterogeneidade constitucional do minério de alumínio da Mina de Juruti, localizada no oeste do Pará, a partir dos resultados do teste de heterogeneidade, visando otimizar o protocolo de amostragem do laboratório físico deste empreendimento mineiro.

PALAVRAS-CHAVE: amostragem; minério de alumínio; heterogeneidade.

ABSTRACT

Sampling can be defined as a series of operations aimed at obtaining a representative sample of a given population or bulk material, where mass reduction must be done carefully to ensure reliability of the processes involved, making sure not to change the physicochemical properties of the initial lot, such as grade and mineralogical constituents. Even if all sampling procedures are properly carried out, there is still an error associated with the heterogeneity of the deposit that can never be eliminated, the fundamental sampling error. Consequently each sampling stage will generate an error, which must be known for the quality control results to be reliable. Heterogeneity tests were developed with the objective of estimating the fundamental sampling error. This paper studies the standard deviation generated by the constitutional heterogeneity of the aluminum ore in Juruti Mine, located in western Pará, aiming to optimize the sampling protocol for the physical laboratory of this mining operation.

KEYWORDS: fundamental sampling error; optimal sampling protocol; heterogeneity.

1. INTRODUÇÃO

Para determinar o desempenho operacional de um processo de tratamento de minérios é essencial o conhecimento das características físico-químicas do produto. Esta determinação para uma dada propriedade ou característica do material só pode ser realizada em uma pequena fração do mesmo, denominada amostra, que represente a realidade do lote inicial da melhor forma possível. As características de um dado material são estimadas por análises realizadas em amostras pequenas, com massas da ordem de gramas. Deste modo, a metodologia de obtenção dessas amostras é de fundamental importância a fim de minimizar os erros associadas a essas análises, para que, com base nelas, sejam realizadas as estimativas para avaliação de depósitos minerais, controle de processos em laboratórios, unidades piloto, indústrias, comercialização de produtos, entre outros (Oliveira, 2007).

De acordo com Gy (1998), a média e a variância do erro de amostragem nunca são estruturalmente nulas. A representatividade de uma amostra ocorre quando a soma da variância com a média ao quadrado do erro de amostragem possui um valor menor que o máximo estabelecido entre as partes interessadas, usualmente o produtor e o consumidor. De acordo com a Teoria de Amostragem de Pierre Gy, existe um erro de amostragem que não pode ser eliminado, chamado “erro fundamental de amostragem”, causado pela heterogeneidade constitucional do material. Este erro pode ser calculado pela “Equação de Gy”, aplicável a todos os tipos de minério, mas que deve ser calibrada para cada um deles individualmente. Os testes de heterogeneidade foram desenvolvidos com o objetivo de estimar o erro fundamental de amostragem para cada tipo de minério, permitindo calcular a massa mínima da amostra representativa em cada etapa do processo, bem como definir o protocolo ótimo de amostragem e tratamento das amostras (CHIEREGATI, 2007).

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como principal objetivo aumentar a confiabilidade nos resultados de amostragem para a estimativa do teor de pilhas de minério e do teor da jazida de bauxita da Alcoa em Juruti, através da calibração da Equação de Gy usando os resultados do teste de heterogeneidade.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Teste de Heterogeneidade

O erro fundamental de amostragem pode ser determinado através da Equação 1 denominada “Fórmula de Gy”, onde RV é a variância relativa, d é o tamanho máximo dos fragmentos ou d_{95} , M_s é a massa da amostra e M_l é a massa do lote inicial. Os fatores c (fator constituição granulométrica), f (fator forma), g (fator granulometria) e l (fator liberação) são tabelados (Pitard, 1993) para cada tipo de minério e tamanho de fragmento:

$$RV = c * f * g * l * d^3 * \left(\frac{1}{M_s} - \frac{l}{M_l} \right) \quad (1)$$

O erro fundamental é estimado com base no tamanho máximo de fragmento, sendo necessária a realização de um procedimento experimental para determinar os fatores específicos para o minério em estudo. O trabalho de Pitard (1993) propõe um experimento que permite determinar o desvio padrão gerado pela heterogeneidade constitucional do mineral de minério, chamado Teste de Heterogeneidade, que correlaciona o diâmetro nominal (Equação 2) de cada fração granulométrica estudada com os respectivos fatores de heterogeneidade EST IHL calculados pela Equação 3, onde M_q e a_q são respectivamente a massa e o teor de cada uma das 50 amostras obtidas para cada faixa granulométrica do teste, M_Q é a somatória de M_q e a_Q , dado pela equação 4.

$$d = \sqrt[3]{(d_1^3 + d_2^3)/2} \quad (2)$$

$$EST\ IH_L = g \sum \frac{(a_q - a_0)^2}{a_0^2} * \frac{M_q^2}{M_0} \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{1}{M_0} \sum a_q * M_q \quad (4)$$

Segundo Pitard (1993), o resultado do teste de heterogeneidade permite correlacionar o diâmetro nominal de cada fração granulométrica com o fator constante de heterogeneidade constitucional EST IH_L em um gráfico di-log, obtendo-se as constantes de amostragem *k* e *α* que representam, respectivamente, os fatores e o expoente cúbico da “Fórmula de Gy” (Equação 1), como mostra a Equação 5.

$$RV = k * d^\alpha * \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) \quad (5)$$

3.2 Materiais

3.2.1. Preparação das amostras

Os equipamentos de preparação de amostras utilizados foram: amostrador corta-fluxo de trajetória retilínea da Engendar, britador de mandíbulas de 25,4 mm da Engendar, moinho de rolos 1,7 mm da Engendar, quarteador tipo Jones de 6,35 mm da Solotest, moinho pulverizador de 0,106 mm da ESSA, agitador de peneiras da Solotest e peneiras Tyler 38,1 mm; 25,4 mm; 12,7 mm, 6,3 mm e 1,2 mm da Solotest. Como materiais de consumo, foram utilizados: sacolas plásticas, panelas de pulverização, pincel e quartzo para descontaminação.

3.2.2. Determinação de Alumina Disponível

Os equipamentos utilizados para análise de amostras foram: estufa de barras rotativas Fann 705 ES, titulador automático Brand Classe A, agitador de barras magnéticas Brand. Como materiais de consumo, foram utilizados: álcool etílico, ácido nítrico, ácido clorídrico, alaranjado de xilenol, CDTA, hexametilenotetramina, hidróxido de sódio, zinco metálico granulado e ácido sulfúrico.

3.3. Procedimento Experimental

A amostra de bauxita selecionada para o teste de heterogeneidade foi coletada na torre de amostragem da usina após o processo de beneficiamento, com massa total de 500 kg e fração granulométrica “-76,2 mm+1,18 mm”. Uma vez transportada para o laboratório físico da mina, a primeira etapa do processo consistiu na lavagem em peneiras vibratórias a fim de facilitar a separação granulométrica nas frações estudadas, quais sejam: “-38,1 mm +25,4 mm”; “-25,4 mm +12,7 mm”; “-12,7 mm +6,3 mm”; “-6,3 mm +1,2 mm”. Após o peneiramento, cada amostra foi seca em estufa de circulação forçada na temperatura de 110° C durante 6 horas, garantindo assim a

umidade com as seguintes massas: 100 kg (“-38,1 mm +25,4 mm”); 70 kg (“-25,4 mm +12,7 mm”); 60 kg (“-12,7 mm +6,3 mm”); 10 kg (“-6,3 mm +1,2 mm”).

Prepararam-se duas malhas em plataformas para a distribuição dos fragmentos sendo uma de 50 quadrados, cada um com 300 mm lado, e outra de 100 quadrados cada um com 100 mm de lado. Os fragmentos foram distribuídos de forma homogênea nas malhas, sem superposição, de modo a garantir a equiprobabilidade de seleção. O procedimento de coleta para a faixa granulométrica mais fina (“-6,3 mm +1,2 mm”) foi realizado na malha de 100 quadrados com ajuda de uma pinça, sempre com um executante e um observador, de forma alternada, da forma mais aleatória possível. Os fragmentos foram coletados um a um, aleatoriamente, de cada quadrado, de modo a gerar 50 amostras compostas por 100 fragmentos cada. Para as outras três frações não se fez necessário o uso da pinça e o procedimento foi realizado na malha de 50 quadrados obedecendo aos mesmos critérios para a fração mais fina. Para estas três frações, os fragmentos foram manualmente coletados um a um, aleatoriamente, de cada quadrado, de modo a gerar 50 amostras compostas por 50 fragmentos cada.

Desta forma, foram produzidas 200 amostras, sendo 50 para cada fração granulométrica que, ainda no laboratório físico, foram tratadas para posteriores análises químicas. A fração mais grossa (“-38,1 mm +25,4 mm”) foi cominuída até um *top size* de 25,4 mm em um britador de mandíbulas, em seguida até 1,7 mm em um moinho de rolos, homogeneizadas e quarteadas em quarteador tipo Jones até uma massa de 40 gramas e pulverizadas em 0,106 mm em um moinho pulverizador. As demais frações seguiram os fluxos necessários até atingir a mesma massa e granulometria. Por fim, todas as amostras foram enviadas para o laboratório químico, onde foram determinados os teores de alumina disponível por titulação complexométrica.

4. RESULTADOS

Uma vez obtidos os resultados de pesagem e teores de alumina disponível para cada um dos quatro grupos de 50 amostras, foi calculado o valor de EST IH_L conforme a Equação 3, bem como os diâmetros nominais conforme a Equação 2. Conforme teoria da amostragem (GY, 1998), o fator granulométrico g referente a material peneirado entre duas malhas vale 0,55. Os resultados são apresentados na Tabela I.

Tabela I. Resultados de EST IH_L calculados para os respectivos diâmetros nominais.

Diâmetro Nominal (cm)	3,32	2,09	1,05	0,5
EST IH_L	0,823	0,337	0,149	0,008

Correlacionando os resultados em um gráfico di-log (Figura 1) determinamos as variáveis k e α da Equação 5.

$$RV = 0,063 * d^{2,35} * \left(\frac{1}{Ms} - \frac{l}{Ml} \right) \quad (06)$$

Através da Equação 6, quantificamos a variância e desvio padrão relativo para cada uma das etapas dos protocolos de amostragem devido ao erro fundamental, como o exemplo da Tabela II, onde está descrito o protocolo de preparação de uma amostra tomada na frente de lavra na fração “-50 mm”, passando por todas as etapas do laboratório físico.

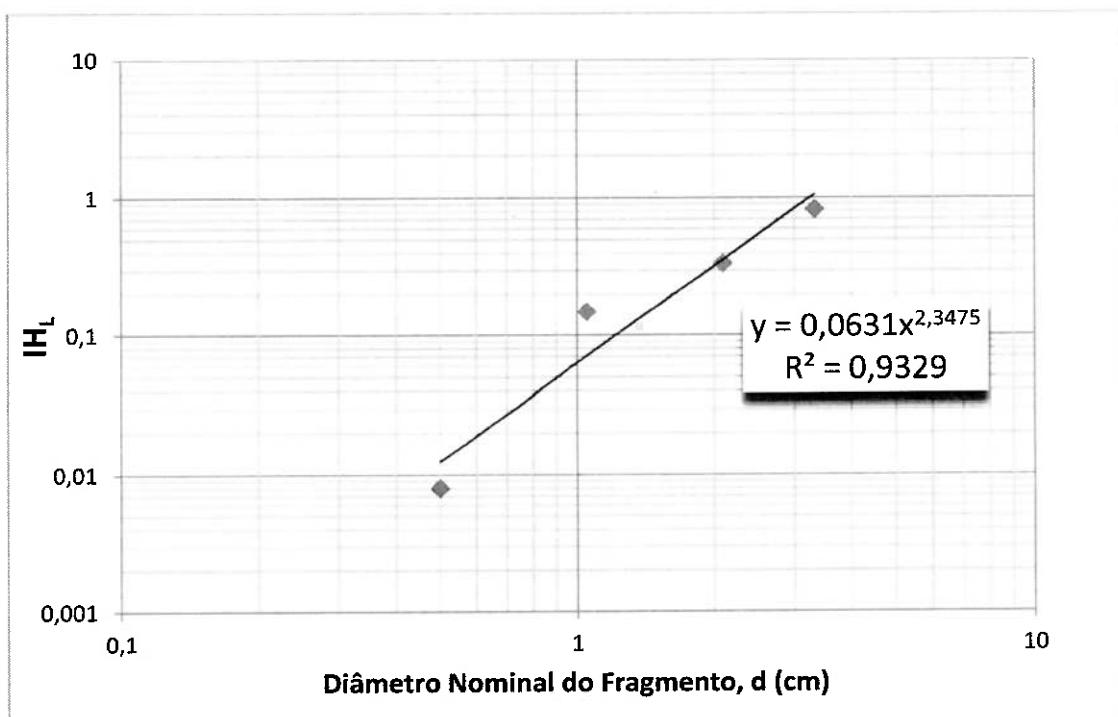


Figura 1. Gráfico correlacionando IHL com os respectivos diâmetros nominais.

Uma vez conhecidas as variâncias e respectivos erros relativos em cada etapa, foi proposto um novo protocolo, otimizando as etapas críticas (Tabela III).

Tabela II. Protocolo de amostragem para amostra em 50 mm (Al_2O_3).

Etapa	M_L (g)	M_s (g)	D_N (cm)	IH_L	$s^2(\text{FSE})$	$S(\text{FSE}) \%$	$S(\text{FSE}) \text{ Gy} \%$
Amostragem Primária	15000000000	15000	5	2,717886958	0,00018119	1,35	0,4
Britagem	15000	15000	2,54	0,557502235	0	0	0
Quarteamento Primário	15000	3500	2,54	0,557502235	1,22E-04	1,11	0,51
Lavagem	1650	1650	2,54	0,557502235	0,0000	0,00	0
Moagem	1750	1750	0,2	0,001460326	0	0	0
Quarteamento Secundário	1750	40	0,2	0,001460326	3,57E-05	0,60	0,19
Pulverização	40	40	0,015	3,41364E-06	0	0	0
Seleção da amostra analítica	40	5	0,015	3,41364E-06	5,97E-07	0,08	0,02
TOTAL					0,0003	1,84	0,68

Tabela III. Protocolo de amostragem para amostra em 50 mm otimizado (Al_2O_3).

Etapa	M_L (g)	M_s (g)	D_N (cm)	IH_L	$s^2(\text{FSE})$	$S(\text{FSE}) \%$	$S(\text{FSE}) \text{ Gy} \%$
Amostragem Primária	15000000000	15000	5	2,717886958	0,00018119	1,35	0,4
Britagem	15000	15000	0,64	0,022181735	0	0	0
Quarteamento Primário	15000	3500	0,64	0,022181735	4,86E-06	0,22	0,51
Lavagem	1650	1650	0,64	0,022181735	0,0000	0,00	0
Moagem	1750	1750	0,2	0,001460326	0	0	0
Quarteamento Secundário	1750	200	0,2	0,001460326	6,47E-06	0,25	0,19
Pulverização	200	200	0,015	3,41364E-06	0	0	0
Seleção da amostra analítica	40	5	0,015	3,41364E-06	5,97E-07	0,08	0,02
TOTAL					0,0002	1,39	0,68

5. CONCLUSÕES

A determinação experimental das variáveis k e α permite a elaboração de protocolos de amostragem otimizados para o minério de alumínio, possibilitando calcular o erro em cada etapa do procedimento adotado, desde a amostragem nas torres até a preparação das amostras no laboratório físico. Quando utilizamos a Equação 1 e os fatores de Gy (generalizados para cada tipo de minério) sem realizar a calibração de k e α , podemos subestimar ou superestimar o erro em alguma etapa do processo. A partir dos resultados obtidos no protocolo apresentado anteriormente, observamos que a equação não calibrada de Gy estimou uma variância devido ao erro fundamental quase três vezes menor que a realidade, mostrando a importância do teste de heterogeneidade para a bauxita e o impacto que a ausência do mesmo pode causar na confiabilidade dos resultados. Podemos concluir também que, com os resultados do teste e a equação calibrada, verificou-se uma oportunidade de melhoria com a aquisição de um britador para uma cominuição inicial a 6,4 mm e de uma panela com capacidade de 200 g para o pulverizador, resultando, assim, na redução em 24% do erro relativo total do protocolo.

6. REFERÊNCIAS

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

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

OLIVEIRA, Maria Lúcia M. de & AQUINO, José Aury de. Amostragem. In: SAMPAIO, João Alves *et al* (ed.). Tratamento de minério: Práticas laboratoriais. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2007, 557p.

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