



## TESTE DE HETEROGENEIDADE PARA OTIMIZAÇÃO DE PROTOCOLO DE AMOSTRAGEM DA BAUXITA DE BARRO ALTO

MOURA, C.B.<sup>1</sup>, CHIEREGATI, A.C.<sup>2, 3</sup>, DEURSEN, C.M.<sup>3</sup>,  
FELIPE, R.A.S.<sup>4</sup>, OLIVEIRA, R.D.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas, camilabotarro@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, ana.chieregati@usp.br

<sup>3</sup> CBA, Consultor de Processos, caio.deursen@cba.com.br

<sup>4</sup> Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo ext.rafael.felipe@cba.com.br

<sup>5</sup> CBA, Supervisor de Laboratório, rodrigo.domingos@cba.com.br

### RESUMO

Testes de heterogeneidade foram desenvolvidos para a caracterização da variabilidade intrínseca do minério, e seus resultados podem ser utilizados para a calibração das constantes de amostragem  $K$  e  $\alpha$ , para o cálculo do erro fundamental de amostragem em várias etapas do processo, e para a otimização de protocolos de amostragem e preparação de amostras. Este trabalho teve como objetivo avaliar a heterogeneidade da bauxita de Barro Alto-GO, utilizando o teste de heterogeneidade padrão desenvolvido por Pierre Gy e Francis Pitard (1993). Com a análise dos resultados para a alumina aproveitável e para a sílica reativa, indicou-se que o atual protocolo de amostragem e preparação de amostras para alumina aproveitável é adequado, entretanto, considerando os resultados para sílica reativa, com base nas diretrizes de Pitard (2013) para o desvio padrão máximo do erro fundamental de amostragem para controle de processos, recomenda-se a coleta de massas maiores nas etapas primárias de amostragem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Teste de heterogeneidade, Bauxita, Amostragem.

### ABSTRACT

Heterogeneity tests were developed for the characterization of ore intrinsic variability, and the results can be used for the calibration of the sampling constants  $K$  and  $\alpha$  for different types of ore. The sampling constants are used for the calculation of the fundamental sampling error in several stages of the process, and for the optimization of sampling and sample preparation protocols. This study aimed to evaluate the heterogeneity of the bauxite from Barro Alto-GO using the standard heterogeneity test developed by Pierre Gy and Francis Pitard (1993). The analysis of the results indicated that the current sampling and sample preparation protocol for available alumina is adequate, however, considering the results for reactive silica that were based on Pitard's guidelines (2013) for the maximum standard deviation of the fundamental sampling error for process control, it is recommended that a large amount of sample in the primary stages should be collected.

**KEYWORDS:** Heterogeneity test, Bauxite, Sampling.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Durante um processo de amostragem, mesmo com todas as medidas possíveis para minimizar os erros sendo tomadas, sempre irá existir heterogeneidade entre as amostras. O impacto de uma amostragem mal feita pode gerar perdas significativas a longo prazo, e o conhecimento da heterogeneidade do minério é fundamental para evitar desvios e consequente geração de maiores custos. Associado à heterogeneidade constitucional do minério, o erro fundamental de amostragem é o único erro que nunca se anula e que é parte de qualquer processo de estimação. Portanto, calcular e minimizar esse erro é de suma importância para qualquer trabalho de otimização dentro da indústria mineral.

O fator constante de heterogeneidade constitucional  $IH_L$  é calculado com base em diversos outros fatores, e sua maior dificuldade é estimar o fator de liberação  $l$ . O teste de heterogeneidade permite o cálculo da variância do erro fundamental de amostragem sem a necessidade de estimar o fator de liberação, calibrando os parâmetros de heterogeneidade  $K$  e  $\alpha$ , onde  $K = c f g l$  ( $c$  = fator de mineralogia,  $f$  = fator de forma,  $g$  = fator de granulometria e  $l$  = fator de liberação) e  $\alpha$  é a potência calibrada do diâmetro máximo dos fragmentos  $d$ , igual a 3 na fórmula de Gy (HDA, 2017).

A Equação 1 mostra a fórmula usada para o cálculo do fator constante de heterogeneidade constitucional  $IH_L$ , onde  $g = 0,55$ , valor usado para minérios calibrados, resultado do peneiramento entre duas malhas.

$$IH_L = 0,55 \sum_q \frac{(a_q - a_Q)^2 M_q^2}{a_Q^2 M_Q} \quad (1)$$

Onde  $M_q$  é a massa de cada grupo  $Q$  de fragmentos,  $a_q$  é o teor do grupo,  $M_Q$  é o somatório das massas  $M_q$  e  $a_Q$  é o teor médio.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram analisados aproximadamente 500 kg de bauxita, provenientes de Barro Alto-GO. Esse material foi submetido a secagem, britagem abaixo de 38,1 mm e peneiramento nas malhas usadas para o teste: 25,4 mm; 12,7 mm; 6,35 mm e 4,00 mm.

Após essa fase, o material foi disposto em uma superfície limpa e lisa, dividida em células, para garantir a aleatoriedade da coleta dos fragmentos, tomados um a um, formando 50 grupos de pelo menos 50 fragmentos em cada uma das faixas granulométricas avaliadas no teste.



Figura 1. Matriz de 300 x 300 mm com os fragmentos dentro da faixa granulométrica -25,4 + 12,7 mm

No final desse processo, foram produzidos 50 grupos de amostras para cada faixa granulométrica, separados em sacos plásticos e devidamente identificados para posterior pesagem e análise de teor no laboratório. Na Tabela 1 temos todas as faixas granulométricas avaliadas e as respectivas matrizes usadas na coleta dos fragmentos.

Tabela 1. Relação das faixas granulométricas usadas no testes e suas respectivas matrizes

FAIXA GRANULOMÉTRICA	MATRIZ (mm)
-38,1 mm +25,4 mm	300 × 300
-25,4 mm +12,7 mm	300 × 300
-12,7 mm +6,35 mm	200 × 200
-6,35 mm +4,00 mm	80 × 80

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidos os teores de alumina aproveitável e de sílica reativa para as 50 amostras de cada uma das 4 faixas granulométricas, e esses valores foram analisados para calibrar as constantes de amostragem  $K$  e  $\alpha$  e, em seguida, otimizar os protocolos com base nas diretrizes de Pitard (2013) para o desvio padrão máximo do erro fundamental de amostragem para controle de processos.

Foi construído o gráfico da Figura 2, com a correlação entre a estimativa do fator constante de heterogeneidade constitucional  $IH_L$  e o diâmetro nominal dos fragmentos para a alumina aproveitável, e o gráfico da Figura 3, com a correlação entre a estimativa do fator

constante de heterogeneidade constitucional  $I_{HL}$  e o diâmetro nominal dos fragmentos para a sílica reativa.

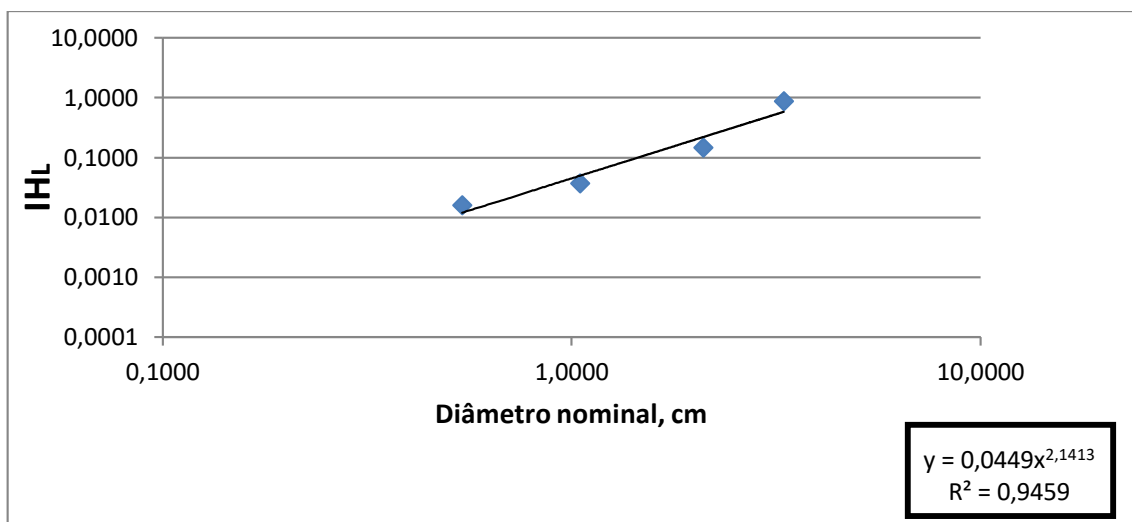


Figura 2. Gráfico de correlação do fator constante de heterogeneidade obtido para a alumina aproveitável com seus respectivos diâmetros nominais

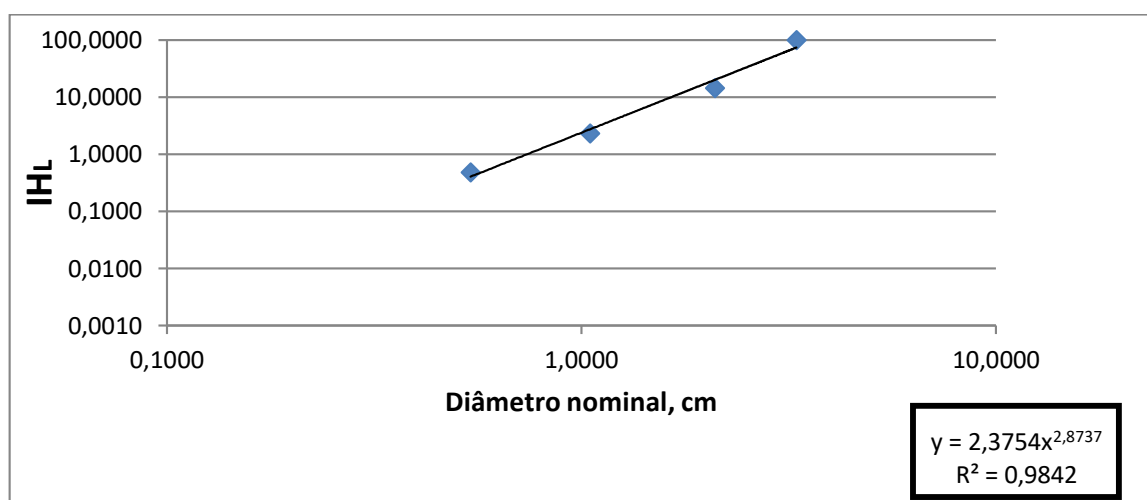


Figura 3. Gráfico de correlação do fator constante de heterogeneidade obtido para a sílica reativa com seus respectivos diâmetros nominais

A análise dos gráficos apresentados anteriormente resulta nos seguintes valores dos parâmetros de heterogeneidade  $K$  e  $\alpha$  para a alumina aproveitável e sílica reativa:

- Alumina aproveitável:  $K = 0,0449$  e  $\alpha = 2,1413$
- Sílica reativa:  $K = 2,3754$  e  $\alpha = 2,8737$

Para o gráfico da alumina aproveitável, temos um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 94%, e para o de sílica reativa, um valor de 98%. Esses valores indicam que os resultados encontrados foram consistentes.

O protocolo atual de preparação de amostras avaliado é apresentado na Tabela 2 e na Tabela 3, para alumina aproveitável e sílica reativa, respectivamente, juntamente com os

cálculos das variâncias relativas do erro fundamental de amostragem e os desvios relativos, com base nos parâmetros de heterogeneidade já calibrados.

**Tabela 2. Protocolo atual com cálculo das variâncias relativas do erro fundamental e desvios relativos (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

Estágio	Massa inicial [g]	Massa final [g]	d <sub>N</sub> [cm]	IHL [g]	Var Rel [S <sup>2</sup> <sub>FSE</sub> ]	Desv Rel [S <sub>FSE</sub> rel]
1. Amostragem primária	200000000	17000	5	1,40913	0,0000829	0,91%
2. Britagem	17000	17000	1,27	0,07491	0,0000000	0,00%
3. Quarteamento primário (Jones)	17000	1500	1,27	0,07491	0,0000455	0,67%
4. Quarteamento secundário (Jones)	1500	250	1,27	0,07491	0,0002497	1,58%
5. Pulverização	250	250	0,0149	0,00001	0,0000000	0,00%
6. Seleção de amostra analítica	250	1,3	0,0149	0,00001	0,0000042	0,21%
TOTAL					0,0003823	1,96%

**Tabela 3. Protocolo atual com cálculo das variâncias relativas do erro fundamental e desvios relativos (SiO<sub>2</sub>)**

Estágio	Massa Inicial [g]	Massa Final [g]	d <sub>N</sub> [cm]	IHL [g]	Var Rel [S <sup>2</sup> <sub>FSE</sub> ]	Desv Rel [S <sub>FSE</sub> rel]
1. Amostragem primária	200000000	17000	5	242,307	0,0142522	11,94%
2. Britagem	17000	17000	1,27	4,721	0,0000000	0,00%
3. Quarteamento primário (Jones)	17000	1500	1,27	4,721	0,0028697	5,36%
4. Quarteamento secundário (Jones)	1500	250	1,27	4,721	0,0157368	12,54%
5. Pulverização	250	250	0,0149	0,000	0,0000000	0,00%
6. Seleção de amostra analítica	250	1,3	0,0149	0,000	0,0000102	0,32%
TOTAL					0,0328688	18,13%

Avaliando os resultados apresentados, tendo como base as recomendações de Pitard (2013), considerando o limite de 10% recomendado para o valor do erro fundamental no caso de controle de processos, o protocolo de amostragem para a alumina aproveitável não necessita de modificações, mas para a sílica reativa é necessário modificar duas etapas do protocolo.

A mudança sugerida é apresentada na Tabela 4, de modo que nenhuma etapa ultrapasse o desvio máximo relativo de 10%.

**Tabela 4. Sugestão de protocolo com cálculo das variâncias relativas do erro fundamental e desvios relativos (SiO<sub>2</sub>)**

Estágio	Massa inicial [g]	Massa final [g]	d <sub>N</sub> [cm]	IHL [g]	Var Rel [S <sup>2</sup> <sub>FSE</sub> ]	Desv Rel [S <sub>FSE</sub> rel]
1. Amostragem primária	200000000	25000	5	242,307	0,0096911	9,84%
2. Britagem	25000	25000	1,27	4,721	0,0000000	0,00%
3. Quarteamento primário (Jones)	25000	1500	1,27	4,721	0,0029585	5,44%
4. Quarteamento secundário (Jones)	1500	400	1,27	4,721	0,0086552	9,30%
5. Pulverização	400	400	0,0149	0,000	0,0000000	0,00%
6. Seleção de amostra analítica	400	1,3	0,0149	0,000	0,0000102	0,32%
TOTAL					0,0213151	14,60%

#### 4. CONCLUSÕES

O teste de heterogeneidade possibilita estimar a variância do erro fundamental (s<sup>2</sup><sub>FSE</sub>) e trabalhar na otimização de protocolos de amostragem através de sua minimização. A realização do teste de heterogeneidade para a bauxita de Barro Alto-GO e sua aplicação no

protocolo de amostragem permitiu reduzir o erro total de preparação da amostra para avaliação da sílica reativa de 18,13% para 14,60%, apenas aumentando a massa na etapa inicial de amostragem e pulverizando uma massa maior, sem a necessidade de maiores investimentos ou novas etapas dentro do protocolo, que ainda poderiam gerar mais erros. Com isso, a confiabilidade nos resultados dos teores das amostras enviadas ao laboratório aumentou de forma significativa, visto que nenhuma etapa do protocolo superou o erro máximo admitido pela Teoria de Amostragem de Pierre Gy.

## **6. REFERÊNCIAS**

HDA. Avaliação da heterogeneidade do minério e otimização de protocolos de amostragem. Relatório interno. REP HDA CBA 1217 – Rev 1 (2017).

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

PITARD, F.F. Guidelines for acceptable allotted sampling uncertainty. In: World Conference on Sampling and Blending, 6th. WCSB6: proceedings, p. 89-98, Gecamin, Lima (2013).