

REPRESENTATIVIDADE ESTATÍSTICA DE UMA AMOSTRA DE MINÉRIO DE FERRO PARA ENSAIOS DE BANCADA

F. F. Fortes, D. R. Gonçalves, B. C. R. da Silva, C. A. Pereira

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Morro do Cruzeiro. Ouro Preto, MG, 35400-000. e-mail: ffonsecafortes@yahoo.com.br;
sid.vidi@hotmail.com; bcminas@yahoo.com.br; pereira@demin.ufop.br.

RESUMO

Esse trabalho apresentou uma metodologia para amostrar, verificar a representatividade e uniformidade de amostras de minério de ferro a serem utilizadas para uma seqüência de testes de bancada. As amostras para testes foram coletadas e preparadas a partir de uma amostra industrial, composta por incrementos coletados mecanicamente em uma usina de beneficiamento mineral atendendo aos requisitos de amostragem de minério de ferro. A amostra primária, coletada no período de 43 dias de operação contínua a partir do quarteamento da amostra industrial, totalizou 433 kg. Na fase de preparação, o material foi classificado a úmido abaixo de 0,15 mm, filtrado, secado, homogeneizado e quarteado até a obtenção de 50 amostras com massa superior à massa mínima indicada pela teoria de amostragem de Pierre Gy. Foram utilizadas as homogeneizações em pilha cônica seguida da formação de pilha alongada e quarteamento manual. Essas técnicas garantiram a redução dos erros de amostragem e preparação. Isso pode ser constatado pelo teste de hipótese estatística e a construção do gráfico de controle, uma vez verificada a normalidade da distribuição estatística das amostras para teste. Concluiu-se que as amostras para teste são representativas da amostra industrial, logo, são representativas do lote (produção nos 43 dias). Isso porque, a média da amostra industrial, nesse estudo, também definida como população, pertence ao intervalo de 95% de confiança das amostras para testes. Essa verificação aumenta a segurança na interpretação dos resultados dos futuros testes de bancada.

PALAVRAS-CHAVE: amostragem; estatística; minério de ferro.

1. INTRODUÇÃO

Muito do que se sabe em ciências físico-químicas é desenvolvido através de testes ou experiências. Na maioria das vezes, não é possível construir um modelo matemático a partir do conhecimento do mecanismo físico básico que relaciona as variáveis. É necessário então o conhecimento científico do fenômeno para elaboração de um modelo empírico. A experiência e a observação de dados resultantes podem constituir as únicas maneiras pelas quais um determinado questionamento pode ser respondido. Mesmo que haja um modelo mecanicista, é quase sempre necessário conduzir testes ou experimentos para confirmar a validade da teoria no contexto abordado. Julgamento estatístico e métodos estatísticos desempenham um papel importante no planejamento, condução e análise de dados.

Experimentos é uma parte natural dos processos de tomada de decisão. Cada experimento envolve uma seqüência lógica de proposição de uma hipótese que motiva o experimento, a realização dos testes, a análise estatística dos resultados e a conclusão. A seleção do método estatístico de análise dependerá do número de fatores a ser analisado. Pode-se optar pelos testes de hipóteses, no caso de um fator de interesse e somente dois níveis ou análise de variância, quando houver mais de dois níveis de um único fator. Resumidamente, em ambos os casos, a análise é feita por comparação entre as médias obtidas nos testes, levando em consideração o componente de variação. Se o objetivo é comparar resultados de testes, é importante garantir que as unidades experimentais (Montgomery e Runger, 2003) sejam tão uniformes quanto possível. Além disso, é necessário que as unidades experimentais sejam representativas da população da qual foi extraída, possibilitando a inferência estatística.

As unidades experimentais podem ser entendidas como amostras, subconjunto de uma população. Uma amostra é usada para fazer inferência à população da qual a amostra é selecionada. Se a amostra for selecionada e preparada adequadamente, os riscos de se cometer erros são minimizados. No caso específico do minério de ferro, os procedimentos de amostragem e preparação de amostras são regidos pela NBR ISO 3082 (2003). O requisito básico para um sistema de amostragem correto é que todas as partes do minério tenham a mesma probabilidade de serem selecionadas e tornar-se parte de uma amostra. A esse respeito, Grigorieff (2002) mostra a inviabilidade da amostragem manual, principalmente em pilha. Isso porque, com uma pá, somente é possível coletar partículas que se encontram posicionadas na superfície da pilha. A amostragem é não-probabilística, pois pressupõe que as partículas dispostas nas porções inferiores da pilha, inalcançáveis pela pá, apresentem exatamente as mesmas características das partículas posicionadas na superfície. Os tipos de amostragem considerados estatisticamente corretos seriam aqueles executados por trados e por amostradores automáticos instalados em transportadores de correia.

Industrialmente, a coleta dos incrementos pode ser realizada por dois diferentes tipos de amostrador automático: Corta Fluxo e Cross-Belt. O amostrador primário tipo Corta Fluxo ou Cortador é instalado na extremidade de descarga de um transportador de correia (chute de transferência), projetado para coletar incrementos através do corte de uma seção transversal completa do fluxo de minério em queda, atravessando-o com velocidade constante. Existem vários tipos de amostradores mecânicos do tipo Corta Fluxo recomendados pela NBR ISO 3082 (2003), que podem variar no modo de operação e formato. Dentre eles, pode-se citar: cortador tipo chute desviador, cortador tipo caçamba e cortador tipo braço giratório. O amostrador tipo Cross Belt consiste basicamente de um cortador rotativo com movimento transversal à correia que coleta o material passante na correia. Utiliza sua própria inércia, induzida durante o corte, para retirar o incremento através de um chute de descarga lateral. Os amostradores automáticos rotativos tipo Cross-Belt são apropriado para coleta de sólidos granulados sobre a correia transportadora e são usados geralmente quando não há espaço disponível na descarga da correia (Engendrar, 2005).

O objeto desse trabalho é apresentar uma metodologia para amostrar e verificar a representatividade e uniformidade das amostras de minério de ferro a serem utilizadas para uma seqüência de testes de bancada previstos por planejamento estatístico de experimentos.

2. ERRO TOTAL DE AMOSTRAGEM – SEGUNDO PIERRE GY

A amostragem não se trata de uma simples técnica mecânica. É um processo aleatório, possível de introduzir erros. O lote a ser amostrado deve ser o mais homogêneo possível, tornando exequível a amostragem como um processo exato de seleção. Mas geralmente os lotes são heterogêneos. O erro total de amostragem é o somatório do erro de amostragem propriamente dita e do erro de preparação da amostra primária, para obtenção da amostra final.

O erro de amostragem é o somatório de sete erros independentes, resultantes do processo de seleção da amostra primária, e proveniente da variabilidade do material que está sendo amostrado, principalmente. Os fatores que contribuem para ocorrência de erros dessa natureza são a não uniformidade da densidade ou da vazão, heterogeneidade de distribuição das partículas, variações periódicas da característica de interesse, massa da amostra, heterogeneidade de distribuição localizada, configuração incorreta da delimitação da dimensão dos incrementos e erro na operação de tomada dos incrementos.

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. Influenciam nesse erro a perda de partículas pertencentes à amostra, contaminação da amostra por material estranho, alteração não intencional da característica de interesse a ser medida na amostra final, erros não intencionais do operador e alteração intencional da característica de interesse a ser medida na amostra final.

Todavia, é possível minimizá-los e, em alguns casos, eliminá-los, evitando os erros sistemáticos indesejáveis. Os procedimentos e orientações da NBR ISO 3082 (2003) visam minimizar os erros de delimitação de incrementos e extração, principalmente, para o minério de ferro. Os erros de preparação podem ser minorados seguindo alguns métodos.

3. PREPARAÇÃO DE AMOSTRA

A preparação de uma amostra primária envolve operações de cominuição, homogeneização e quarteamento, até a obtenção de amostra final, com massa e granulometria adequadas para realização de ensaios (Góes *et al.*, 2004).

A redução da granulometria da amostra permite o trabalho com uma amostra de menor massa. Essa redução pode ser obtida em britadores de mandíbula (até 50,8mm), britadores cônicos ou de rolos (de 50,8 mm até 1,2 mm) ou moinhos (abaixo de 1,2 mm). A cominuição minimiza a segregação granulométrica principalmente em pilhas, onde as partículas de maiores dimensões tendem a rolar sobre a superfície de deposição enquanto os finos tendem a se moverem apenas por escorregamento.

O erro ocasionado pela segregação pode ser minorado através da homogeneização, geralmente seguida da operação de quarteamento. A homogeneização implica na mistura de quantidades de materiais com a finalidade de tornar uniforme a composição da porção de tamanho Q (Schofield, 1980). O quarteamento é a operação de redução do tamanho da amostra até a obtenção da amostra final, com massa maior ou igual à massa mínima requerida para ser representativa. Para dimensionar a massa mínima, pode-se aplicar a equação geral de Pierre Gy (Luz *et al.*, 2004).

Os métodos de quarteamento em cone e pilha alongada apresentam como vantagem utilização de equipamentos de custo baixo e em caso de pequenos lotes de material de alto teor não há perigo de perdas significativas. Como desvantagem desses métodos pode-se citar o número considerável de trabalhadores necessário, demasiadas manipulações durante a operação, dificuldade na obtenção de um cone vertical e

quando o cone é achatado pode ocorrer que o material fino do ápice do vértice espalhe-se de maneira irregular (Sampaio *et al.*, 2007).

4. AMOSTRA DE MINÉRIO DE FERRO

A amostra em estudo visou representar o lote de minério de ferro lavrado e britado industrialmente abaixo de 35 mm no período de 173 turnos de 6 horas. Essa amostra subsidiará uma seqüência de testes em escala de bancada. Além de representativas do lote, as amostras devem ser aproximadamente iguais, de tal forma que possibilite a comparação entre os resultados dos testes.

As amostras industriais do minério britado são compostas por incrementos coletados por amostradores primários do tipo Cross Belt. Nos pontos de amostragem, o intervalo de coleta de amostra é base massa conforme referenciado na NBR ISO 3082 (2003), sendo que o fechamento da amostra global se dá a cada turno. O intervalo de coleta de incrementos que compõe as amostras é em função da variabilidade da qualidade do minério. O intervalo de amostragem é relativamente curto. Quanto maior a variação da qualidade esperada para o minério, maior o número de incrementos e menor o intervalo de coleta dos incrementos necessários a fim de tornar a amostra representativa. As amostras primárias constituídas rotineiramente são homogeneizadas e quarteadas no laboratório utilizando o quarteador Jones. Uma das porções da amostra resultante do quarteamento é reservada por algumas horas antes de ser descartada. A amostra para os testes de bancada foi composta por essa alíquota que seria descartada no período de 43 dias.

A amostra para os testes totalizou 433 kg de minério de ferro com granulometria abaixo de 35 mm. Para realizar os testes de bancada, será necessária apenas a fração abaixo de 0,150 mm. Embora essa fração pudesse ser obtida por britagem em laboratório, não seria recomendado. A intenção dos testes é simular o processo industrial em busca de melhorias. A britagem do minério poderia comprometer os resultados, uma vez que esse material, a partir do ponto de amostragem, passa apenas por processos de classificação, sendo o retido em 0,15mm produto final e o passante, concentrado. A preparação da amostra para os testes incluiu a classificação por peneiramento a úmido em 0,15 mm, filtragem, secagem em estufa, homogeneização em pilha cônica seguida da formação de pilha alongada, a partir da qual a amostra foi quarteada manualmente.

5. CÁLCULO DA MASSA MÍNIMA

A metodologia para determinação da massa mínima pressupõe o conhecimento prévio de características do material a ser amostrado. “Em geral, as teorias mais simples fazem uma estimativa pessimista e implicam em amostras desnecessariamente grandes” (Luz *et al.*, 2004). A teoria desenvolvida por Pierre Gy abrange várias características complexas de uma situação prática de amostragem e aproximações empíricas permitem que ela seja usada com relativa facilidade. Essa metodologia se aplica somente a distribuições de Gauss (Normal) e considera que a massa do material a ser amostrado (W) é muito grande, e a razão ($1/W$) tende a zero. A massa mínima da amostra (w), em gramas, pode ser calculada pela equação 1:

$$w = (1/ S_a^2) d^3 \cdot Q \cdot l \cdot f \cdot h \quad (\text{Equação 1})$$

O material a ser amostrado é a amostra primária, coletada para os testes. Neste caso, a estimativa do erro total de amostragem expresso como desvio-padrão (S_a) da amostra primária foi 4,38 (referente a 173 alíquotas), o diâmetro máximo das partículas no material a ser amostrado igual a 0,15 mm, o fator de composição mineralógica (Q) para a hematita igual a 10.129,3 g/ cm³, o fator de liberação (l) do mineral igual a 0,82, o fator forma das partículas (f) igual a 0,5 e o fator de distribuição de tamanho das partículas igual a 0,25, considerando que não foram removidos os finos. A massa mínima recomendada, nessas condições é de 0,182 gramas. No entanto, são necessários 2000 g de material para realização de cada batelada de testes.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a obtenção das amostras para os testes de bancada, tornar-se necessário avaliar a representatividade e uniformidade dessas amostras comparando-as à amostra industrial, da qual foi gerada. Essa avaliação consiste em verificar se uma série de resultados pertence ou não a uma determinada população ou mesmo localizar um elemento estranho. Espera-se que a estimativa \bar{X} da amostra para os testes seja estatisticamente igual à média verdadeira μ do parâmetro de interesse no material amostrado, dado um nível de confiança. Se o quarteamento não está afetado por erros grosseiros nem sistemáticos, restam apenas erros aleatórios. Então, um gráfico de controle pode auxiliar na identificação de causas especiais, que levariam as amostra para testes a não serem uniformes.

As amostras para teste seguem uma distribuição normal, conforme mostrado na figura 1, o que possibilita as conclusões a seguir.

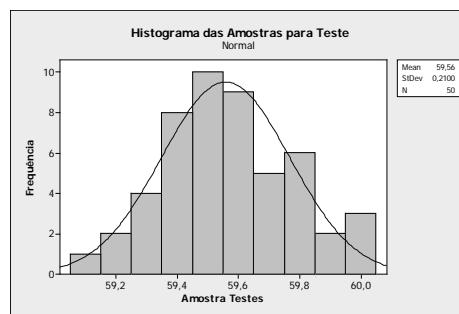


Figura 1: Histograma das amostras para teste

A média das 50 amostras para testes foi $\bar{X} = 59,56\%$ Fe e desvio-padrão $s = 0,21\%$ Fe, deve ser um ponto da distribuição de Student para a média dos 50 elementos. Para concluir que a amostra é representativa, é preciso decidir se a evidência fornecida pelos 50 resultados é incompatível com a hipótese de que eles tenham vindo de uma população (amostra industrial) com média $m = 59,43\%$ Fe. Os valores das amostras são apresentados nas tabelas I e II.

Tabela I: Amostras para Testes

59,96	59,88	59,79	59,95	59,55	59,67	59,45	59,96	59,53	59,45	59,49	59,82	59,39	59,39	59,55	59,74	59,48	59,07	59,65	59,68	59,34	59,42	59,45	59,70	59,76
59,31	59,83	59,82	59,79	59,89	59,61	59,62	59,26	59,59	59,55	59,54	59,45	59,53	59,59	59,61	59,62	59,41	59,39	59,44	59,33	59,45	59,24	59,37	59,19	59,37

Tabela II Amostra Industrial (“População”)

59,85	61,02	58,95	60,98	61,93	60,79	53,56	60,07	60,34	62,84	60,79	59,74	59,50	60,16	59,88	53,21	54,45	58,43	59,35	60,46	56,44	63,57	61,79	61,65	60,67
65,45	61,18	52,33	57,79	60,98	59,88	55,75	59,19	59,38	55,57	59,21	56,20	57,88	57,93	57,39	55,44	56,99	56,42	57,17	53,20	59,28	58,13	56,23	54,41	56,92
59,25	58,54	49,40	50,29	55,20	62,51	55,89	59,03	58,50	63,36	60,64	61,60	59,34	62,58	58,02	64,25	57,20	56,05	63,32	48,76	56,77	57,95	60,31	64,93	64,21
62,32	59,87	60,87	60,59	56,53	53,04	56,31	60,65	61,06	61,80	63,38	57,80	59,39	59,75	61,70	58,65	53,33	62,43	58,06	56,73	52,45	56,67	43,43	46,82	57,29
58,50	59,00	61,41	61,04	60,68	60,55	60,32	60,99	62,31	66,06	65,54	61,76	59,25	60,93	58,27	56,40	55,52	59,88	58,06	59,78	59,23	56,82	58,85	64,76	60,33
63,61	66,24	60,98	60,59	55,95	57,07	60,90	54,96	56,50	56,82	57,70	56,79	59,26	59,24	61,47	61,59	55,43	59,77	57,61	64,52	60,98	60,17	56,19	59,21	59,02
63,34	62,66	61,16	60,40	62,01	62,31	61,04	61,10	62,27	59,19	60,65	62,36	64,22	59,97	61,37	54,64	64,18	61,44	65,79	62,13	62,31	63,91	64,66		

Usando a equação 2 para definição do o intervalo de confiança,

$$\bar{X} - z \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) < \mu < \bar{X} + z \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

pode-se escrever, para $t_2 = 2,011$ (da tabela de probabilidade da distribuição t com 49 graus de liberdade e 95% de confiança):

$$59,56\% - 2,011 \left(\frac{0,21}{\sqrt{50}} \right) < \mu < 59,56\% + 2,011 \left(\frac{0,21}{\sqrt{50}} \right) \\ 59,32\% < \mu < 59,80\%$$

Como o intervalo de confiança contém o valor da média da população (amostra industrial), 59,43% Fe, não se pode afirmar que esse não seja o valor verdadeiro da média das amostras para testes. Em outras palavras, a amostra para testes é representativa da amostra industrial.

A partir da análise do gráfico de controle mostrado na figura 2, conclui-se que não existem causas especiais no processo de preparação das amostras para teste, isto é, o método de preparação propiciou a minimização dos erros de amostragem. O gráfico de controle construído os limites de 3 sigmas implica que a probabilidade do ponto cair fora dos limites de controle quando o processo estiver sob controle é 0,0027. Assim, pode-se assumir que as amostras têm teores de ferro uniformes. A variabilidade existente é a natural do processo de preparação.

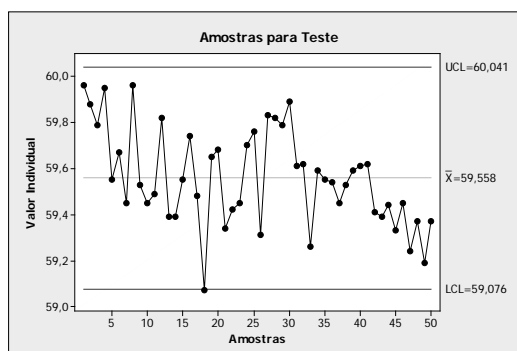


Figura 2: Gráfico de controle das amostras para teste

7. CONCLUSÃO

Muitas vezes, a elaboração de um modelo empírico constitui a única maneira pela qual se pode responder um determinado questionamento científico. Torna-se necessário conduzir testes ou experimentos para confirmar a validade de uma teoria no contexto abordado. Métodos estatísticos desempenham um papel importante no planejamento, condução e, principalmente, análise dos resultados de experimentos. Os resultados, por sua vez, poderão embasar a tomada de decisões economicamente importantes.

Esse trabalho apresentou uma metodologia para amostrar, verificar a representatividade e uniformidade de amostras de minério de ferro a serem utilizadas para uma seqüência de testes em escala de bancada prevista por planejamento estatístico de experimentos. As amostras para testes foram coletadas e preparadas a partir de uma amostra industrial, composta por incrementos coletados mecanicamente em uma usina de beneficiamento mineral atendendo aos requisitos de amostragem de minério de ferro (NBR ISO 3082). A amostra primária, coletada no período de 43 dias de operação contínua a partir do quarteamento da amostra industrial, totalizou 433 kg. Na fase de preparação, o material foi classificado a úmido abaixo de 0,15 mm, filtrado, secado, homogeneizado e quarteado até a obtenção de 50 amostras com massa superior à massa mínima indicada pela teoria de amostragem de Pierre Gy.

Foram utilizadas as homogeneizações em pilha cônica seguida da formação de pilha alongada e quarteamento manual. Essas técnicas garantiram a redução dos erros de amostragem e preparação. Isso pode ser constatado pelo teste de hipótese estatística e a construção do gráfico de controle, uma vez verificada a normalidade da distribuição estatística das amostras para teste. Concluiu-se que as amostras para teste são representativas da amostra industrial, logo, são representativas do lote (produção nos 43 dias). Isso porque, a média da amostra industrial, nesse estudo, também definida como população, pertence ao intervalo de 95% de confiança das amostras para testes. Essa verificação aumenta a segurança na interpretação dos resultados dos futuros testes de bancada.

8. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3082. Minérios de ferro. Procedimentos de amostragem e preparação de amostra. Rio de Janeiro, p.57, 2003.

Chaves, Arthur Pinto; Ferreira, Flávio Moreira. Apostila Estocagem, Homogeneização. [S.l.]: [S.n], 1996. (mimeo).

Engendrar, Engenheiros Associados. Produtos e Catálogos. Amostrador tipo Cross-Belt. Disponível em <http://www.engendrar.com.br/produtos.asp?local=0amostragem&url=produtos>. Acessado em 09/11/2005.

Góes, M. A. C., Luz, A. B. e Possa, M. V. Amostragem. In: Tratamento de Minérios. Luz, A. B, Sampaio, J. A., Almeida, S. L. M. CETEM-MCT, Rio de Janeiro, p. 19-51, 2004.

Grigorieff, A., Costa, J. F. C. L., Koppe, J. O problema de amostragem manual na indústria mineral. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 55(3): 229-233, jul. set. 2002.

Montgomery, D. C. e Runger, G. C. Estatística Aplicada e probabilidade para engenheiros. 2. ed. Tradução de Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

Sampaio, A. J, França, A. C. S, Braga, A. F. P. Tratamento de Minérios Práticas Laboratoriais. 1ª Edição. CETEM. Rio de Janeiro, 2007.

Schofield, C. G. Homogenisation/Blending Systems Design and Control for Minerals Processing. Clausthal: Trans Tech, 1980.