



MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA AREIA DE MOLDAGEM EM UMA FUNDIÇÃO DE AUTOPEÇAS DE FERRO FUNDIDO¹

*Fernando Antonio Elias Claro²
Antonio Fernando Branco Costa³
Julio Henrique Pimentel Medrano⁴*

Resumo

O objetivo deste artigo é descrever a aplicação de um gráfico de controle com amostragem dupla para médias no monitoramento da compactabilidade da areia de moldagem em uma fundição de grande porte onde são produzidas autopeças de ferro. Medições realizadas em amostras coletadas ao final de ciclos consecutivos de mistura indicam que as observações desta variável são autocorrelacionadas. O gráfico de controle apresentado neste estudo leva em conta a dependência em série para o estabelecimento dos limites de controle e suas propriedades foram obtidas por expressões matemáticas fechadas. O projeto e o poder estatístico do gráfico tornam possível detectar rapidamente a presença de causas especiais no processo, sem que para isto seja necessário maior esforço de amostragem. Devido a estas características a compactabilidade da areia verde pode ser monitorada consistentemente, prevenindo a ocorrência de moldes e fundidos defeituosos.

Palavras-chave: Areia de moldagem; Autocorrelação; Gráfico de controle; Qualidade.

MOLDING SAND QUALITY MONITORING FOR AUTOPARTS PRODUCTION IN A CAST IRON FOUNDRY

Abstract

The purpose of this paper is to describe the application of a control chart for means with double sampling to monitor the green sand compactability in a major foundry where iron castings for the automotive segment are produced. Compactability measurements carried out at the end of consecutive sand mixing cycles have indicated that the variable observations fit to an autocorrelated process. To set the control limits of the control chart introduced in this study the serial dependence was taken into account and the chart properties were obtained from closed-form expressions. The control chart design and statistical power allow the quick detection of process disturbances without any extra sampling effort. Due to these features, the green sand compactability can be consistently monitored, preventing the occurrence of defective sand molds and castings.

Key words: Molding sand; Autocorrelation; Control chart; Quality.

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Professor Assistente, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNITAU*

³ *Professor Associado, Livre-docente, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP*

⁴ *Mestrando, Mestrado Profissionalizante em Engenharia de Produção Mecânica, UNITAU*



1 INTRODUÇÃO

Assim como a maioria das empresas de manufatura, as fundições vivem em um ambiente de forte concorrência e precisam melhorar continuamente a produtividade de seus processos e a qualidade de seus fundidos para sobreviver e prosperar no mercado. O presente artigo aborda a questão do monitoramento da compactabilidade da areia verde. O estudo foi conduzido em uma fundição onde são produzidas autopeças de ferro e seu objetivo foi testar a eficiência do gráfico de controle com amostragem dupla para médias na detecção de perturbações no processo.

1.1 A Moldagem em Areia a Verde

A areia verde é formada pela mistura de areia base (normalmente de sílica), bentonita (sódica ou cálcica), carvão cardiff, amido de milho e água (o termo “areia verde” decorre da umidade presente na areia). Como parte do programa de controle da consistência desta mistura, diversas propriedades são monitoradas rotineiramente, entre elas, a distribuição granulométrica, a permeabilidade, a umidade, a resistência à compressão a verde, a temperatura, a argila ativa, o teor de finos e a compactabilidade. Granlund⁽¹⁾ descreve os procedimentos para realização dos ensaios associados a estas propriedades e como os resultados devem ser interpretados. Segundo Brown⁽²⁾ a moldagem em areia verde é o processo mais comumente empregado em todo o mundo para a fabricação de fundidos em areia e entre as razões para esta popularidade pode-se citar o custo, razoavelmente baixo em comparação com outros processos, o bom desempenho e a possibilidade de reciclagem.

De acordo com Cobett⁽³⁾ a compactabilidade é a propriedade indicativa do comportamento da areia quando submetida às cargas de moldagem, sendo por esta razão a característica física mais importante de um bom sistema de areia. Ela é determinada por um ensaio de leitura direta e é influenciada pela umidade, pelo ciclo de mistura, pela natureza e quantidade de aditivos presentes.

Alagarsamy⁽⁴⁾ afirma que um ponto chave para a produção de fundidos de qualidade é garantir que a compactabilidade da areia de moldagem esteja na faixa apropriada. O autor aponta os fatores que concorrem para a variação desta propriedade e sugere alternativas para minimizar este problema.

Baker⁽⁵⁾ aponta valores indicativos de reposição de bentonita em função da degradação térmica, indica a resistência a quente obtida com diferentes proporções de bentonita sódica e cálcica, sugere a quantidade de areia base a ser adicionada no sistema em função da tonelagem vazada, mostra como a razão areia:metal afeta a temperatura da areia e esclarece os efeitos da areia quente sobre as propriedades físicas da mistura. Abordando os fundamentos e conceitos envolvidos na preparação da mistura de areia verde ele enfatiza a importância do monitoramento da compactabilidade, que justifica não só pela direta correlação entre esta propriedade e o teor de umidade presente na areia verde, mas também pela influência que o teor de bentonita e o ciclo de preparação da mistura têm sobre ela. O autor indica que em misturas bem preparadas para moldagem de alta densidade a razão compactabilidade:umidade deve ser da ordem de 10,5:1 até 12:1.

Strobl e Silsby⁽⁶⁾ ponderam sobre os efeitos da areia quente na qualidade da mistura de moldagem. Eles indicam que quando a temperatura ultrapassa 70°C há

inconsistência nas propriedades da mistura, maior tendência à produção de fundidos defeituosos e aumento no consumo de bentonita.

Aycardi et al.⁽⁷⁾ ponderam que como freqüentemente a origem dos defeitos em fundidos em areia está relacionada a fatores determinados pela moldagem é imperativo que o fundidor entenda os conceitos envolvidos na formulação da mistura de areia e monitore a qualidade do processo, nele interferindo, quando houver mudanças indesejáveis, para reduzir a chance de ocorrência de moldes ou fundidos defeituosos. Os autores reportam os problemas de qualidade encontrados nos fundidos da Fundição Landers após a substituição de dezesseis máquinas manuais de moldagem por uma única máquina automática do tipo *matchplate*, realizada na expectativa de aumento de capacidade e eficiência. A partir de ensaios realizados no laboratório da própria empresa, estabeleceram a associação entre cada tipo de defeito com determinadas características da mistura de areia verde, identificaram as causas fundamentais dos problemas e tomaram ações corretivas com as quais obtiveram significativa redução no refugo.

Krishnamoorthi⁽⁸⁾ apresenta um estudo de caso, realizado em uma fundição com sistema de areia operando em circuito fechado, onde havia influência da temperatura da areia sobre a compactabilidade. O autor reporta que a compactabilidade é afetada ademais pela umidade, granulometria e proporção de bentonita na areia. Como baixos valores de compactabilidade estão associados a moldes friáveis e valores altos tendem a provocar defeitos de gás (*blowholes*) nos fundidos, justifica-se que uma faixa de trabalho apropriada a esta propriedade seja estabelecida e usada para monitorar o processo. Com esta finalidade ele empregou um gráfico de controle de médias móveis e amplitudes móveis, com amostras formadas por duas medidas feitas em intervalos de 15 minutos na saída do misturador.

1.2 Gráficos de Controle e Autocorrelação

Segundo Alwan⁽⁹⁾ o gráfico de controle é um dispositivo estatístico aplicado aos dados de um processo para determinar se a característica de qualidade deslocou-se de seu valor-alvo. Esta forma de monitoramento é muito utilizada para distinguir causas comuns de causas especiais de variação (freqüentemente responsáveis por desajustes na média do processo), identificar quando ocorreu a mudança no processo de modo a guiar a pesquisa na eliminação da causa-raiz e finalmente melhorar o processo pela prevenção de novas ocorrências. Segundo Vijayaram et al.⁽¹⁰⁾ no setor de fundição, os gráficos de controle são particularmente aplicáveis no monitoramento da composição química do metal, das características da areia de moldagem e de dimensões importantes dos fundidos. A hipótese fundamental nos gráficos de controle é que as observações da variável de interesse ajustem-se a uma distribuição normal e sejam independentes e identicamente distribuídas. Nos últimos anos, entretanto, a crescente automatização no segmento de manufatura revolucionou muitos processos, acentuando coincidentemente a dependência em série entre observações. A autocorrelação observada em processos industriais é tipicamente devida a elementos inerciais que limitam a variabilidade entre observações próximas na escala do tempo. Quando a autocorrelação não é levada em conta no projeto do gráfico, os limites de controle tornam-se muito “estritos” ocasionando um número excessivo de alarmes falsos. Ademais, gráficos empregados no monitoramento de processos com autocorrelação positiva (caso da grande maioria dos processos industriais) caracterizam-se por significativa redução

do poder de detecção das perturbações. O número médio de amostras até o sinal (NMA) é a métrica comumente empregada para medir a eficiência das cartas de controle. Quando há uma mudança no processo, é desejável que o NMA seja pequeno de sorte que a detecção seja rápida; por outro lado, quando o processo está em controle, é desejável que o NMA seja alto de modo a reduzir o número de alarmes falsos. Para processos independentes, os limites de controle são determinados a partir de dados históricos com o processo em controle. Nesta fase quaisquer pontos que não pertençam ao intervalo definido pelos limites tentativos são excluídos do conjunto de dados, antes que os limites definitivos sejam obtidos. O mesmo procedimento não se aplica aos processos autocorrelacionados, pois dados faltantes na série podem alterar a especificação do modelo. Quando existe dependência serial os limites de controle são estabelecidos após modelar a série de valores usando-se o método da análise de intervenção. West, Dellana e Jarrett⁽¹¹⁾ apresentam um estudo de caso relacionado ao monitoramento da demanda bioquímica de oxigênio, em um processo de tratamento de efluentes descrito por um modelo de transferência apropriado. Utilizando-se das funções autocorrelação e autocorrelação parcial, os autores identificaram que as observações da variável se ajustavam a um modelo MA(1). Graças à inclusão do termo de intervenção no modelo, diversas observações discrepantes foram identificadas e apropriadamente modeladas permitindo que os limites do gráfico fossem determinados de modo mais preciso.

1.3 Gráficos de Controle com Amostragem Dupla para Monitoramento da Média do Processo

O gráfico clássico de médias tem baixo poder estatístico para detectar perturbações de pequena magnitude. Uma alternativa para melhorar a eficiência deste gráfico em processos independentes consiste em utilizar a metodologia da amostragem dupla proposta por Daudin⁽¹²⁾ e posteriormente adaptada por Claro⁽¹³⁾ para aplicação em processos autocorrelacionados. Quando a amostragem dupla está em uso, retira-se do fluxo de produção uma amostra que se divide em $n=n_1+n_2$ unidades ($n_1 < n_2$). Como estas unidades são coletadas praticamente de forma simultânea e consecutiva, considera-se que pertençam a uma mesma distribuição de probabilidade. No primeiro estágio da amostragem dupla a média, calculada a partir das n_1 observações, é comparada aos limites inferior e superior de advertência, cujos coeficientes são L_1 e L respectivamente. O resultado desta etapa indicará uma das três seguintes possibilidades: (i) a média do processo está em controle e não há necessidade de qualquer intervenção no processo, (ii) a média do processo deslocou-se do valor-alvo tornando-se recomendável iniciar uma investigação para detectar possíveis causas especiais e (iii) a decisão sobre o estado do processo deve ser tomada no segundo estágio com a informação existente em toda amostra de tamanho n . No segundo estágio, a média resultante das n observações é comparada a limites de controle com coeficiente L_2 , havendo então apenas duas possibilidades: (i) concluir que o processo está em controle e (ii) concluir que o processo deslocou-se do valor-alvo. A metodologia usada para cálculo dos limites de controle e a determinação das propriedades deste dispositivo estatístico é apresentada com maiores detalhes em Claro.⁽¹³⁾



1.4 Os modelos ARIMA

A classificação denominada ARIMA foi proposta por Box e Jenkins em 1970 e, segundo Castillo,⁽¹⁴⁾ aplica-se a modelos estocásticos que descrevem um grande número de processos práticos. O acrônimo resulta da junção de autoregressivo (AR), integrado (I) e média móvel (MA, abreviatura de *moving average*), e normalmente o modelo é referenciado como ARIMA(p,d,q) onde “p” é a ordem do componente autoregressivo, “d” é o grau de diferenciação necessário para tornar o processo estacionário e “q” é a ordem do componente de média móvel. Se um dos componentes não está presente, seu termo e ordem são suprimidos do nome; por exemplo, o modelo ARIMA(0,0,1) é chamado MA(1). Quando as observações X_t de um processo se ajustam a este modelo elas são expressas por:

$$X_t = \mu + e_t - \theta e_{t-1} \text{ onde } t=1, 2, 3, \dots, T \quad (1)$$

onde e_t representa o erro aleatório ou ruído branco, normalmente considerado uma seqüência de variáveis aleatórias independentes que se ajustam a uma distribuição normal com variância σ_e^2 e média zero; μ é a média do processo e θ é o coeficiente de médias móveis. O desvio padrão, a autocovariância e a autocorrelação deste modelo, que é estacionário para qualquer valor do coeficiente, são expressas respectivamente por:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_e^2(1+\theta^2)} \quad (2)$$

$$\gamma_1 = -\theta \sigma_e^2 \quad (3)$$

$$\rho_1 = \frac{-\theta}{1+\theta^2} \quad (4)$$

sendo que:

$$\gamma_k = \rho_k = 0 \quad \forall k \geq 2.$$

Conforme Cryer⁽¹⁵⁾ o desvio padrão da média dos subgrupos tomados de processos estacionários é expresso por:

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right) \gamma_k} \quad (5)$$

2 APLICAÇÃO DO GRÁFICO DE CONTROLE NO MONITORAMENTO DO PROCESSO

2.1 O Sistema de Moldagem

O sistema de moldagem onde o presente estudo foi realizado é utilizado para produzir autopeças de ferro fundido com diferentes geometrias, pesos e configurações que se subdividem em duas “famílias”: (A) fundidos de maior peso e complexidade geométrica, por exemplo, bloco e cabeçote do motor; (B) fundidos de menor peso e complexidade dimensional, por exemplo, volante da embreagem, capa dos mancais e polia do virabrequim. Para atender ao programa de produção, a linha de moldagem alterna corridas de peças da família “A” e “B” pelo menos uma vez ao dia. A moldagem é feita sob alta pressão e a linha opera em circuito fechado reciclando quase toda a areia de moldagem. Após vazamento do metal as caixas moldadas passam por um túnel de resfriamento, ao final do qual são abertas para

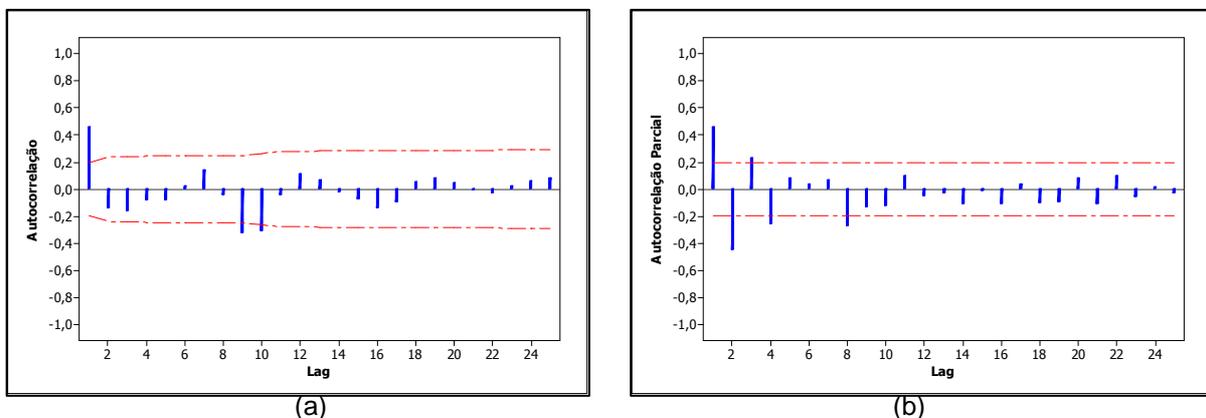


extração dos fundidos. A etapa seguinte é realizada em um leito de *shakeout* onde a areia remanescente é removida e direcionada para dois misturadores de mesmo modelo e características onde são adicionados os aditivos (bentonita sódica, amido de milho e carvão cardiff), a água e a areia base necessária para repor a areia verde descartada a cada ciclo de vazamento e manter as propriedades desejáveis na mistura. Cada um destes misturadores tem tempo de ciclo de 90 segundos e capacidade de carga de 1100 kg o que confere ao sistema de areia uma capacidade de 88 toneladas por hora de areia processada para alimentar a linha de moldagem, que produz a uma velocidade nominal de 70 moldes por hora.

2.2 Uso do Gráfico de Controle

Os ensaios de compactabilidade foram realizados segundo procedimento descrito em Granlund⁽¹⁾ e utilizando-se o equipamento de teste da linha Dietert formado pelos modelos 315, 315-C1 e 315-F (para maiores detalhes ver: <<http://www.dietertlab.com/index.html>>). A aplicação do gráfico de controle da compactabilidade foi realizada em apenas um dos dois misturadores, pois em estudo exploratório, se percebeu que a variabilidade de ambos era similar. O estudo se desenvolveu em duas fases:

Fase 1: realizada preliminarmente com o propósito de verificar a normalidade e a independência dos dados. Para esta investigação foram usadas 100 observações coletadas sucessivamente ao final do ciclo de mistura. Os valores medidos apontaram a normalidade do processo (teste de Kolmogorov-Smirnov, $p\text{-value} > 0,150$) e indicaram a presença de dependência em série segundo um modelo MA(1) com $\theta = -0,76$, portanto com $\rho_1 = 0,48$ (Figuras 1a e 1b).



Figuras 1a e 1b. Função autocorrelação (1a) e autocorrelação parcial (1b) do modelo MA(1).

Após ter sido constatada a independência dos resíduos deste modelo ($\rho_1 = 0,04$), eles foram usados para construir um gráfico de valores individuais com limites 3-sigma, através do qual se verificou que o processo estava em controle quando os dados foram obtidos (Figura 2). Nesta circunstância, a variabilidade e a linha de centro determinadas puderam ser prospectivamente usadas para o monitoramento do processo. Curiosamente, quando estas mesmas leituras foram usadas para construir um gráfico de valores individuais, com limites de controle estabelecidos sem levar em conta a autocorrelação, três medidas (observações 2, 8 e 98) estavam abaixo do Limite Inferior de Controle, confirmando-se a expectativa que nestas condições o número de alarmes falsos seria maior do que o projetado (Figura 3).

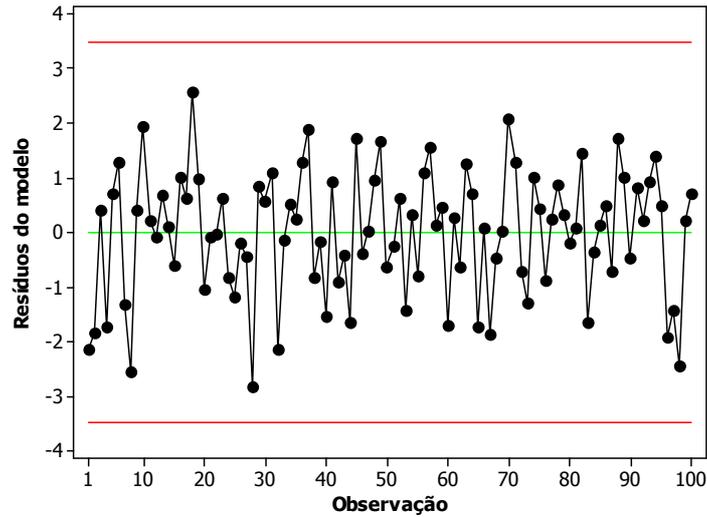


Figura 2. Gráfico de controle de observações individuais dos resíduos do modelo.

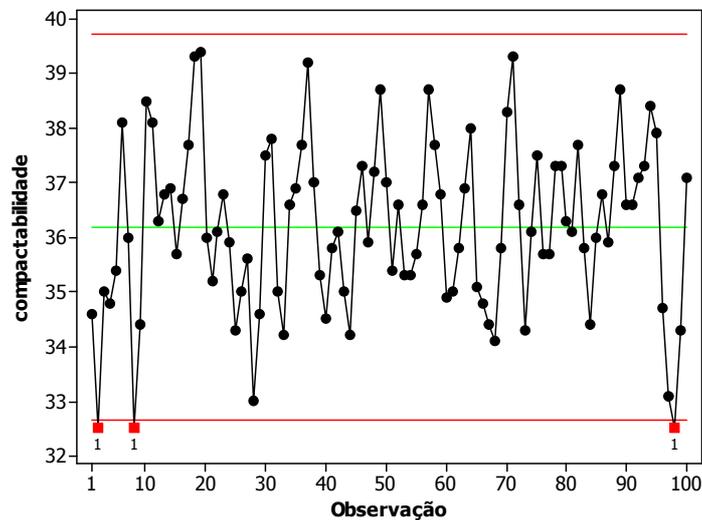


Figura 3. Gráfico de controle de valores individuais da compactabilidade.

Fase 2: Quando peças da família “B” estão sendo produzidas e sabe-se de antemão que na corrida subsequente será produzida alguma peça da família “A”, é praxe, na troca de modelos, aumentar a adição de água na mistura como forma de minimizar o efeito de aumento de temperatura da areia em decorrência de menor razão areia:metal no molde. Como o efeito colateral desta medida é um aumento em compactabilidade, este fato foi aproveitado neste estudo para medir a rapidez de detecção do gráfico de controle. O gráfico clássico de médias (com $n = 2$) e o gráfico de médias com amostragem dupla (com $n_1 = 1; n_2 = 3; n = 4; \bar{n} = 2$) foram comparados em condição de igualdade. Quatro medidas consecutivas de compactabilidade na saída do misturador foram realizadas a cada 30 minutos até que houvesse disponibilidade de 25 amostras (ou 100 observações) para a construção do gráfico com amostragem dupla (como se verá a seguir, somente em poucas ocasiões foi necessário empregar mais do que a primeira medida para inferir sobre o estado do processo). As duas primeiras medidas de cada amostra foram usadas para construir o gráfico de médias.



3 RESULTADOS

Os limites de controle para o gráfico de médias (UCL e LCL) foram calculados por $\mu_0 \pm 3\sigma_{\bar{x}}$ onde μ_0 é o valor alvo e $\sigma_{\bar{x}}$ foi obtido pela expressão (5). No primeiro estágio do gráfico com amostragem dupla o par de limites inferior de advertência (L1L e L1U) foi calculado por $\mu_0 \pm L_1\sigma_x$ e o par de limites superior de advertência (LL e LU) foi calculado por $\mu_0 \pm L_2\sigma_x$. Neste caso utilizou-se $L_1=0,967$; $L_2=2,837$ e obteve-se o desvio padrão através da expressão (2). No segundo estágio, os limites de ação (LSC e LIC) foram calculados por $\mu_0 \pm L_2\sigma_{\bar{x}}$ utilizando-se $L_2=2,837$. A adição de água ao misturador foi aumentada em 8 litros a partir da amostra número 5. O gráfico de médias é apresentado na Figura 4 e o gráfico com amostragem dupla nas Figuras 5 e 6 (primeiro e segundo estágio respectivamente).

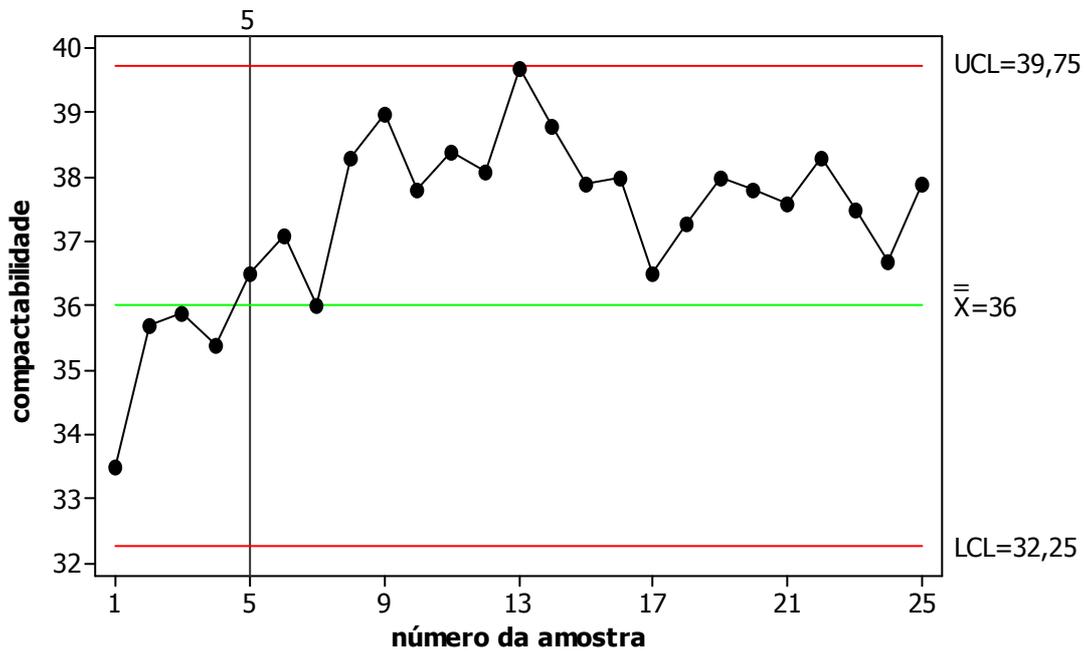


Figura 4. Gráfico de controle de médias da compactabilidade (n=2).

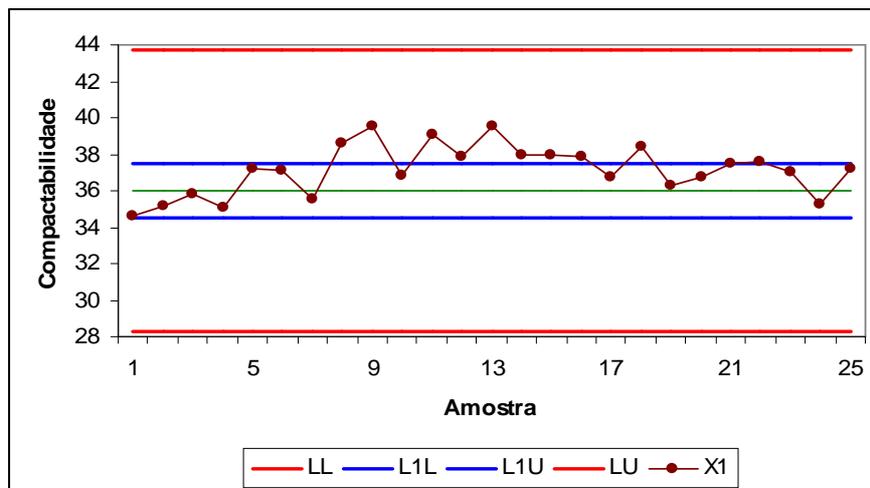


Figura 5. Gráfico de controle com amostragem dupla no primeiro estágio.

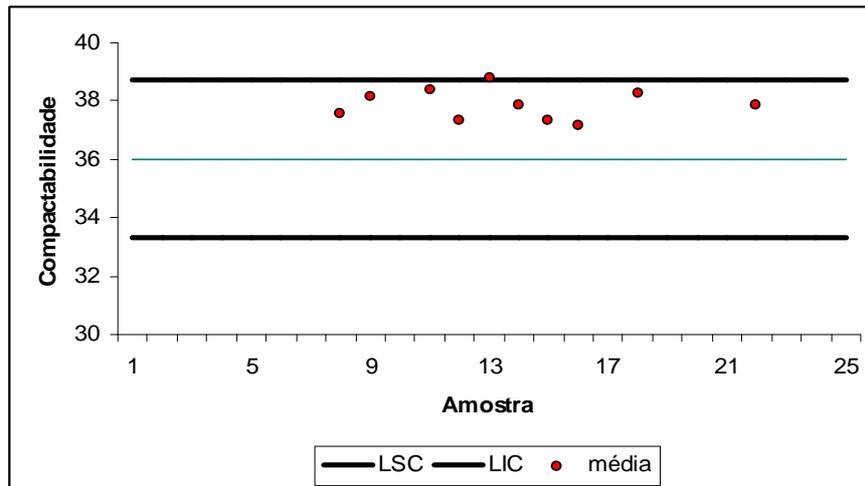


Figura 6. Gráfico de controle com amostragem dupla no segundo estágio.

O controle do processo com o procedimento de amostragem dupla pode opcionalmente ser feito em um único gráfico com dois eixos verticais, um deles usado para plotar os valores do primeiro estágio e os limites de advertência e o outro para os limites de controle e os valores do segundo estágio.

4 DISCUSSÃO

Até a amostra número 4 a média e desvio padrão do processo da variável % compactabilidade eram de 36,1 e 1,5 respectivamente e, após este instante, a média subiu para 37,7 (acréscimo equivalente a uma perturbação de aproximadamente um desvio padrão do processo). A modificação em variabilidade, após a alteração no processo, foi insignificante. A Tabela 1, construída a partir das expressões apresentadas em Claro,⁽¹³⁾ apresenta o número médio de amostras até o sinal (NMA) para o gráfico de médias com $n=2$, usado para monitorar um processo MA(1) com coeficiente $\theta=-0,76$, sujeito a perturbações de diferentes magnitudes (expressas em $\delta\sigma_x$) na média. Teoricamente determinou-se que seriam necessárias 26 amostras para este gráfico sinalizar uma perturbação de magnitude um desvio padrão no processo (valor em negrito na Tabela 1). Nesta aplicação, o gráfico não sinalizou a mudança da média, confirmando a expectativa baseada nos valores teóricos. A Tabela 2, elaborada a partir da mesma referência e considerando o mesmo processo autocorrelacionado, apresenta o NMA do gráfico com amostragem dupla ($n_1 = 1; n_2 = 3; n = 4; \bar{n} = 2$) bem como a probabilidade da amostragem prosseguir ao segundo estágio (P2S). Em nossa aplicação, enquanto o processo esteve centrado, a decisão sobre o estado do processo foi sempre tomada no primeiro estágio da amostragem, ou seja, com apenas uma medida. A alteração na média, realizada a partir da amostra 5, foi sinalizada na amostra 13, intervalo bastante similar ao teórico (identificado em negrito na Tabela 2, ou seja, NMA=10,2). Entre a mudança do processo e a 25ª amostra, a amostragem prosseguiu ao segundo estágio em 50% das amostras e entre o desajuste e o sinal foi necessário usar toda a amostra de tamanho n em apenas quatro ocasiões (amostras 8, 9, 11 e 13).

Krishnamoorthi⁽⁸⁾ monitorou a compactabilidade através de um gráfico de controle de médias móveis e amplitudes móveis usando amostras formadas por duas observações, feitas em intervalos de 15 minutos na saída do misturador. O autor não investigou o poder estatístico do gráfico e o esquema de amostragem adotado, conforme postulado em Wheeler e Chambers,⁽¹⁶⁾ contraria dois dos mais

importantes princípios de formação de subgrupos racionais, isto é, (i) Minimizar a variação *dentro* de cada subgrupo para aumentar a sensibilidade do gráfico de controle às variações existentes entre os subgrupos, isto é, as observações que irão constituir a amostra devem ser coletadas no menor intervalo possível de tempo entre elas; (ii) Maximizar a oportunidade para variação *entre* os subgrupos, mantendo intervalos longos entre as amostras para permitir que todos os fatores de variação existentes no ambiente do processo encontrem oportunidade para se manifestar.

Tabela 1. NMA para o gráfico de médias

		$\delta\sigma_x$								
		0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
		370,4	248,9	115,0	52,8	26,0	13,9	8,1	5,0	3,4

Tabela 2. NMA e P2S para o gráfico com amostragem dupla para médias

		$\delta\sigma_x$								
		0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
NMA		370,4	186,7	62,4	23,4	10,2	5,2	3,1	2,1	1,6
P2S		0,33	0,35	0,39	0,46	0,54	0,62	0,71	0,79	0,85

5 CONCLUSÃO

Nesta aplicação o gráfico clássico de médias e o gráfico de controle com amostragem dupla para médias foram comparados quanto a eficiência no monitoramento da característica compactabilidade da mistura de areia verde. Dado que as observações do processo se ajustaram a um modelo MA(1) positivamente autocorrelacionado, os limites de controle em ambos os dispositivos foram estabelecidos para uma mesma taxa de alarmes falsos de 0,0027 (1/370,4). O gráfico com amostragem dupla sinalizou a perturbação no processo muito mais rápido do que o gráfico convencional de médias, sem que para isto fosse necessário maior esforço de amostragem, demonstrando portanto sua adequação a este tipo de controle.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido da gerência da empresa onde o presente estudo foi realizado.

REFERÊNCIAS

- 1 GRANLUND, M. J. Understanding the Basics of Green Sand Testing, Modern Casting v.89, n. 3, p. 38-40, mar.99
- 2 BROWN, J.R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- 3 COBETT, T. The ABCs of green sand, Foundry Management & Technology, v. 130, n. 4, p. 24-39, abr. 2002.
- 4 ALAGARSAMY, A. Controlling green sand compactability. Modern Casting, v. 92, n. 9, p. 37-39, set. 2002.
- 5 BAKER, S. G. Building the foundation for green sand, Modern Casting, v. 95, n. 8, p. 26-29, ago. 2005.
- 6 STROBL, S.M.; SILSBY, D.V.; Controlling hot sand to ensure mold, casting quality, Modern Casting, v. 91, n.2, p. 42-44, fev. 2001



- 7 AYCARDI, M.; KRYSIAK, M.B.; MARTIN, D.; FRIGO, C. Sand lab to the rescue, *Modern Casting*, v. 99, n. 7, p.37-40, jul.2009.
- 8 KRISHNAMOORTHY, K.S. On assignable causes that cannot be eliminated-an example from a foundry, *Quality Engineering*, v.3, n.1, p. 41-47, 1990-91.
- 9 ALWAN, L.C. *Statistical Process Analysis*. Irwin/McGraw-Hill, 1st. ed.; 2000.
- 10 VIJAYARAM, T.R.; SULAIMAN, S.; HAMOUDA, A.M.S.; AHMAD, M.H.M. Foundry quality control aspects and prospects to reduce scrap rework and rejection in metal casting manufacturing industries, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 178, p. 39-43, 2006.
- 11 WEST, D.; DELLANA, S.; JARRETT, J. Transfer function modeling of processes with dynamic inputs. *Journal of Quality Technology*, v. 34, n. 3, p. 315-326, 2002.
- 12 DAUDIN, J. J. Double sampling \bar{X} charts. *Journal of Quality Technology*, v. 24, n. 2, p. 78-87, 1992.
- 13 CLARO, F.A.E. Gráficos de controle de médias para o monitoramento de processos autocorrelacionados, tese (doutorado), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 159 p., 2008. Disponível em: <<http://www.athena.biblioteca.unesp.br>>. Acesso em: 04 jan.2010.
- 14 CASTILLO, E.D. *Statistical Process Adjustment for Quality Control*. 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- 15 CRYER, J.D. *Time Series Analysis*. 2nd ed., Boston-Duxbury, 1986.
- 16 WHEELER, D. J.; CHAMBERS, D. S. *Understanding Statistical Process Control*. 2nd ed., Ed. SPC Press, 406 p., 1992.