

DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE DRESSAGEM UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS NO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS (CEP)

Alessandra Querino da SILVA¹
Marcelo Silva de OLIVEIRA²
Thelma SÁFADI²

- **RESUMO:** Visando uma melhoria no desempenho de processos industriais, empresas manufatureiras utilizam o Controle Estatístico de Processos (CEP) para controlar a variabilidade do processo. Assim, é possível intervir nas causas especiais que estão atuando, melhorando continuamente a qualidade do produto. Na fabricação de hastes de amortecedores, a rugosidade é uma característica importante da qualidade, a qual é determinada por especificações de engenharia. O equipamento utilizado para atender a estas especificações é denominado retífica “centreless”. No decorrer do processo, esta retífica sofre um desajuste, exigindo uma intervenção do operador denominada dressagem. Para proceder ao ajuste das retíficas, o operador deve determinar o período de tempo que deve comandar as intervenções, para que não haja nem mais intervenções do que o número necessário nem menos. Neste trabalho, foi analisado o comportamento de dados relativos ao sistema de produção da empresa TECNO, com o objetivo de determinar o tempo ótimo de dressagem de tais retíficas. Como os dados são correlacionados no tempo, utilizou-se a metodologia de séries temporais. O tempo ótimo de dressagem foi de aproximadamente 73 minutos. Isso gera uma significativa redução do desperdício de tempo, dos esforços do operador e solução de uma pendência nas auditorias de normas da gestão da qualidade.
- **PALAVRAS-CHAVE:** Controle estatístico de processo; gestão da qualidade; séries temporais.

1 Introdução

A agressiva competitividade presente na atual realidade de mercado faz com que as organizações despertem para a necessidade de um complexo e contínuo processo de transformação. Neste cenário, produtividade e qualidade são duas componentes essenciais do equacionamento competitivo atual. O conceito geral de qualidade seria “tudo aquilo que satisfaz o cliente”, incluindo demandas tais como desempenho de produto, confiabilidade, durabilidade, conformidade, flexibilidade, rapidez nas entregas, inovação tecnológica, entre outras construídas na indústria, mais aquelas que envolvem aspectos intangíveis, tais como reputação (marca), atendimento e estética.

¹ Instituto de Agricultura e Ambiente – IAA, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Rua 29 de agosto, 786 CEP: 69800-000, Humaitá, AM, Brasil. E-mail: alessandraquerino@yahoo.com.br

² Departamento de Ciências Exatas, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Caixa Postal 37, CEP: 37200-000, Lavras, MG, Brasil. E-mail: marcelo.oliveira@ufla.br / safadi@ufla.br

A qualidade está diretamente ligada à capacidade da organização em dominar a variabilidade (Montgomery, 1997). A produção de bens e serviços, suas melhorias e inovações são efeitos diretos da capacidade de fazer operar variações desejáveis e projetadas, e de impedir a operação de variações indesejáveis e prejudiciais. Esta posição central do controle da variabilidade na gestão de qualidade justifica a importância que esta tem em todo o pensamento e prática contemporânea visando qualidade. O controle da variabilidade, que é feito por conceitos, métodos e ferramentas estatísticas, induz a criação de dinâmicas de gestão, além de interrelacionar-se com outras ferramentas operacionais. Estas dinâmicas de gestão, por sua vez, induzem a criação de um sistema de gestão de qualidade, determinado também pelos princípios norteadores adotados, fechando, assim, o conjunto de itens presentes na gestão da qualidade. Esta cadeia de induções mostra claramente porque o atual estado de teoria e prática da gestão da qualidade depende e faz uso do CEP - Controle Estatístico de Processos, uma técnica estatística criada e inicialmente desenvolvida nas décadas de 1920 e 1930, nos EUA.

Gráficos de controle da qualidade, um dos elementos do CEP, são bastante comuns na indústria manufatureira, principalmente naquelas de produção em massa. Em Lavras/MG, a empresa TECNO, que fabrica quase dois mil tipos de amortecedores diferentes, distribuídos para montadoras nacionais e internacionais, utiliza o CEP em muitos de seus pontos do sistema produtivo, tornando esta metodologia estatística um dos principais itens do seu sistema de garantia da qualidade.

Numa das etapas produtivas, a haste do amortecedor é retificada por uma máquina denominada retífica “centreless” (que é operada por um “colaborador”, terminologia adotada por esta empresa para “funcionário” e “operador”) para uniformizar sua rugosidade. A operação é realizada através de um desbaste ao longo da haste (que uniformiza a rugosidade). Este desbaste é feito por um rebolo interno à máquina, o qual é periodicamente retificado (pois ele também se desgasta) por uma peça denominada “diamante”. Esta operação de retífica denomina-se dressagem. Se tal retífica não for realizada, o rebolo desgastado irá produzir nas hastes uma operação irregular, causando defeitos, visíveis nas cartas de CEP, após um período de tempo suficientemente longo.

O problema da empresa neste ponto é a impossibilidade de determinar, de maneira objetiva e científica, o intervalo de tempo adequado para as intervenções que o colaborador deverá proceder. A supervisão deixa ao encargo do colaborador estas decisões do momento das intervenções, correndo-se, então, o risco de intervir antes, ou depois, do ideal. Esta subjetividade foi considerada uma pendência, na auditoria das normas de gestão da qualidade TS 16949, que necessita ser resolvida.

Este trabalho teve como enfoque estudar uma metodologia adequada para solucionar tal problema da empresa TECNO, que, pela exigência das normas de gestão da qualidade, necessita, através da utilização de métodos e técnicas adequadas, garantir a melhoria contínua de seus processos produtivos.

1.1 Controle estatístico de processo – CEP

O CEP preconiza que a qualidade deve ser conduzida simultaneamente com o processo produtivo dos bens e serviços (controle de processo), ao invés da inspeção após a produção, em que se separam os produtos bons daqueles que são defeituosos. Seu enfoque está na prevenção de defeitos ou erros. É muito mais fácil e econômico fazer certo da primeira vez, do que depender de seleção e retrabalho de itens que não sejam perfeitos,

além de sofrer prejuízos com o desperdício de itens que não possam ser retrabalhados. Em suma, a idéia do CEP focaliza a ação sobre o processo (causa) que gerou o defeito, e não sobre o produto (efeito) em si.

No Brasil, o CEP vem sendo implantado em um número cada vez maior de empresas, devido à eficácia na melhoria da produtividade das operações e também como exigência das normas de gestão da qualidade ISO 9000 e congêneres. Em última análise, quando o CEP é usado adequadamente, reduz custos, aumenta a produtividade e melhora a posição competitiva da empresa.

O desempenho do *processo* (conjunto de atividades planejadas e inter-relacionadas, realizadas com o objetivo de gerar produtos e/ou serviços que atendam às necessidades de clientes (Prazeres, 1996)) em termos de qualidade e produtividade depende de dois fatores: a forma pela qual ele é projetado e como é operado.

Qualquer processo apresenta variabilidade, a qual ocorre naturalmente e está presente em tudo. Ela é inerente aos processos e não pode ser totalmente eliminada, mas pode ser controlada dentro de limites aceitáveis. A variação das características da qualidade existe em função das diferenças entre operários, lotes de matéria-prima, equipamentos, instrumentos de medição, etc. Entretanto, as causas de variação podem ser divididas em dois grupos: causas comuns e causas especiais.

Uma causa comum é definida como uma fonte de variação que afeta o processo, resultante da variabilidade natural, é inerente ao processo considerado, e que estará presente mesmo que todas as operações sejam executadas empregando métodos padronizados (Werkema, 1995). Quando apenas as causas comuns estão atuando em um processo, a quantidade de variabilidade se mantém em uma faixa estável, conhecida como faixa característica do processo. Neste caso, dizemos que o processo está *sob controle estatístico*, apresentando um comportamento estável e previsível. Quando os dados do processo variam em torno de uma média fixa de maneira estável ou previsível, este é o tipo de comportamento que Shewhart dava a entender que fosse produzido por um processo sob controle (Montgomery, 1997).

Já as causas especiais de variação surgem esporadicamente, devido a uma situação particular que faz com que o processo se comporte de um modo completamente diferente do usual, o que pode resultar em um deslocamento do seu nível de qualidade. Quando um processo está operando sob a atuação de causas especiais de variação, dizemos que ele está *fora de controle estatístico* e, neste caso, sua variabilidade geralmente é bem maior do que a variabilidade natural. As causas especiais de variação devem ser, de modo geral, localizadas e eliminadas, e além disto devem ser adotadas medidas para evitar sua reincidência.

A importância de se distinguir entre causas comuns e especiais de variação reside no fato de que o tipo de *ação* a ser adotada está em diferentes esferas da empresa. A eliminação de causas especiais exige uma ação local, que pode ser tomada por pessoas próximas ao processo, como, por exemplo, os operários. Já as causas comuns exigem ações sobre o sistema de trabalho, que somente podem ser tomadas pela administração, visto que o processo é, em si, consistente, mas mesmo assim incapaz de atender às especificações.

2 Material e métodos

É razoável admitir que se dados são coletados no tempo, exista uma correlação entre a observação no instante t e a observação no instante $(t-h)$, em que h é o número de intervalos de tempo anterior ao instante t . Esta correlação no tempo dificulta a aplicação de métodos estatísticos convencionais, pois na utilização desses métodos, parte-se da pressuposição de que as observações sejam independentes e identicamente distribuídas. Uma abordagem a ser aplicada em tais casos são as técnicas de séries temporais, as quais levam em consideração a estrutura de dependência estocástica possivelmente existente entre as observações alinhadas no tempo.

Segundo Morettin & Tolo (2004), uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas no tempo. Considere uma variável Y que descreve alguma característica de interesse num determinado produto oriundo de um processo produtivo. Esta variável é avaliada seqüencialmente no tempo, isto é, ela é indexada pelo tempo de observação t : $Y(t)$ ou Y_t .

A suposição usualmente citada para justificar o uso das cartas de controle \bar{X} e R é a de que a característica da qualidade seja normalmente e independentemente distribuída, com média μ e desvio-padrão σ , conhecidos. Ambos, μ e σ , são considerados desconhecidos. Uma condição fora de controle é uma variação em μ ou em σ (ou em ambos) para algum valor diferente. Além disso, dizemos que quando o processo está sob controle, a característica de qualidade no tempo t , y_t , é representada pelo modelo

$$y_t = \mu + \varepsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots \quad (1)$$

em que ε_t é normalmente e independentemente distribuído, com média zero e desvio-padrão σ . Este modelo é chamado de modelo de Shewhart do processo. Quando estas suposições são satisfeitas, pode-se aplicar uma carta de controle e retirar conclusões sobre o estado de controle estatístico do processo.

A mais importante das pressuposições feitas em relação às cartas de controle é a independência das observações. As cartas de controle não funcionam bem se as características da qualidade exibirem algum nível de correlação, mesmo que baixo, transversalmente ou longitudinalmente no tempo. Especificamente e a princípio, estas cartas não devem ser utilizadas se os dados forem correlacionados.

Infelizmente, a suposição de observações independentes ou não correlacionadas não é satisfeita em muitos processos de manufatura. Para contornar este problema, pode-se utilizar a metodologia de séries temporais.

A autocorrelação em uma série de observações orientadas longitudinalmente no tempo (chamadas de séries temporais) é medida por uma função de autocorrelação

$$\rho_k = \frac{\text{cov}(y_t, y_{t-k})}{V(y_t)}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (2)$$

em que t é a posição da observação tomada no tempo, $\text{cov}(y_t, y_{t-k})$ é a covariância das observações y_t e y_{t-k} , e supõe-se que as observações têm variância constante dada por $V(y_t)$. Estimam-se os valores de ρ_k pela função de autocorrelação amostral.

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

Considerando a autocorrelação existente em e_t , serão utilizados modelos da classe ARIMA para o ajuste, maiores detalhes ver Morettin & Toloí (2004).

Conforme Morettin & Toloí (2004), Box & Pierce (1970) propuseram um teste para as autocorrelações dos resíduos estimados, o qual é um dos mais utilizados para verificar se o resíduo do modelo é um ruído branco. A estatística do teste de Box e Pierce é dada por

$$Q_c = n(n+2) \sum_{k=1}^K \frac{\hat{\rho}_k^2}{(n-k)} \quad (4)$$

em que n é o número de observações da série temporal e k representa o número de “defasagens”. Essa estatística apresenta uma distribuição aproximadamente qui-quadrado (χ_m^2) com $m=k-p-q$ graus de liberdade. A hipótese de ruído branco para os resíduos é rejeitada, ao nível de significância α , quando o valor da estatística $Q_c > \chi_m^2$. Portanto, se $Q_c < \chi_m^2$, conclui-se que o modelo está bem ajustado e seu resíduo não é correlacionado, ou seja, é independente e identicamente distribuído. No modelo SARIMA, o teste de Box e Pierce faz uso da distribuição Qui-quadrado descontando o número de coeficientes sazonais nos graus de liberdade. Tem-se, então, $m=K-(p+q+P+Q)$ graus de liberdade, em que K representa o número de “lags”.

Os dados utilizados para análise foram fornecidos por uma empresa de Lavras/MG. São observações coletadas por colaboradores numa das etapas do processo produtivo de hastes de amortecedores de automóveis. Tais dados são referentes à rugosidade e foram coletadas amostras de cinco elementos a cada quinze minutos, totalizando 25 amostras. A rugosidade é medida por um aparelho denominado Rugosímetro, em unidades Ra ou Rz, porém, a unidade mais importante é Rz.

3 Resultados e discussão

A Figura 1 ilustra a vista interna ao lado de entrada das hastes de amortecedores na máquina denominada retífica “CENTRELESS”, através da qual será trabalhada sua rugosidade. Pode-se observar que existem dois rebolos internos à máquina: um de arraste (arrasta a haste puxando-a para dentro da máquina) e outro de desbaste (desbasta a haste para controlar sua rugosidade).

Para analisar a série da rugosidade de hastes de amortecedores, aplicou-se a metodologia de séries temporais utilizando os modelos de Box e Jenkins (Morettin & Toloí, 2004). Estes métodos foram utilizados para a modelagem do desajuste do CEP no tempo, devido ao desgaste do rebolo.

A metodologia aplicada para ajustar o modelo adequado foi a seguinte:

- 1) Descrição do comportamento do conjunto de dados através da construção de gráficos e diagramas de dispersão, obtenção de estatísticas descritivas, verificação da existência de tendência ou sazonalidade;
- 2) Ajuste conveniente do modelo a partir das características da série, utilizando a metodologia de Box e Jenkins.

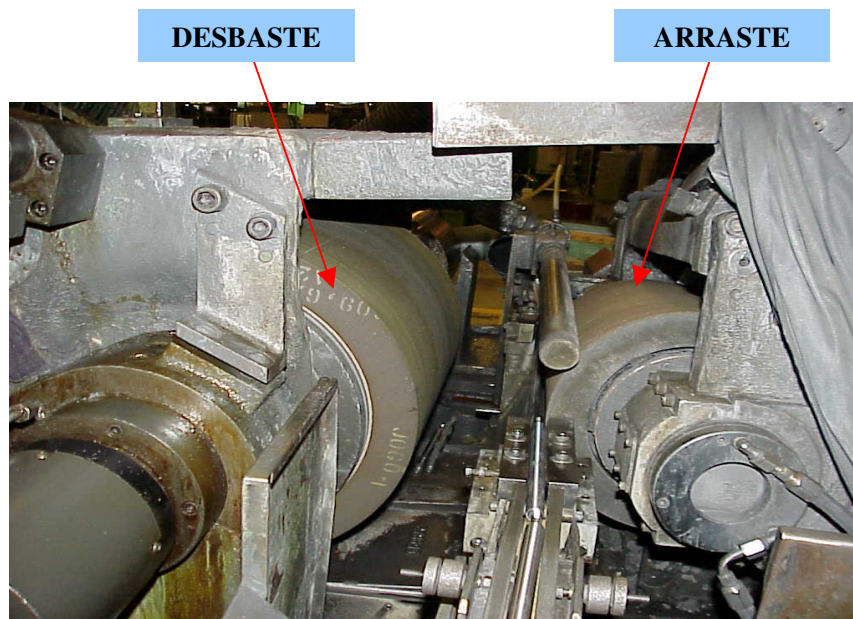


Figura 1 - Vista interna da retífica "CENTRELESS" pelo lado de entrada da haste.

Na Figura 2 a série refere-se a rugosidade (R_z) de hastes de amortecedores numa das etapas produtivas da empresa estudada, sendo que cada período de tempo é equivalente a 15 minutos. Pode-se observar, no gráfico da função de autocorrelação (FCA), que apenas os lags correspondentes a componentes sazonais são significativos, eliminando assim a necessidade de testes para verificar a existência de tendência e raiz unitária. A presença de uma sazonalidade (repetição de um padrão no tempo) na série será verificada através de uma análise espectral, determinando em que período ocorre.

A Figura 3 apresenta o periodograma, que indica haver uma possível periodicidade no período de tempo aproximadamente igual a cinco, que corresponde a 75 minutos.

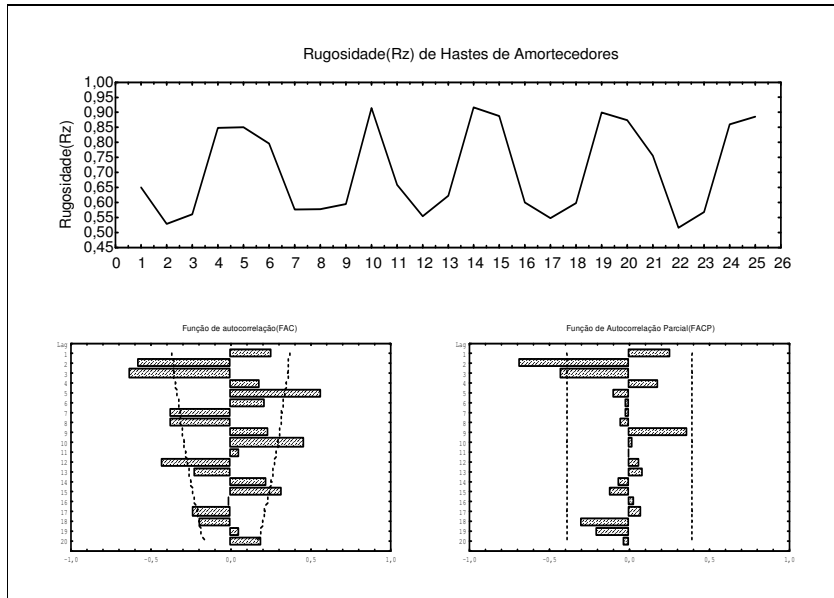


Figura 2 - Série original e as FAC e FACP, da rugosidade (Rz) de hastes de amortecedores.

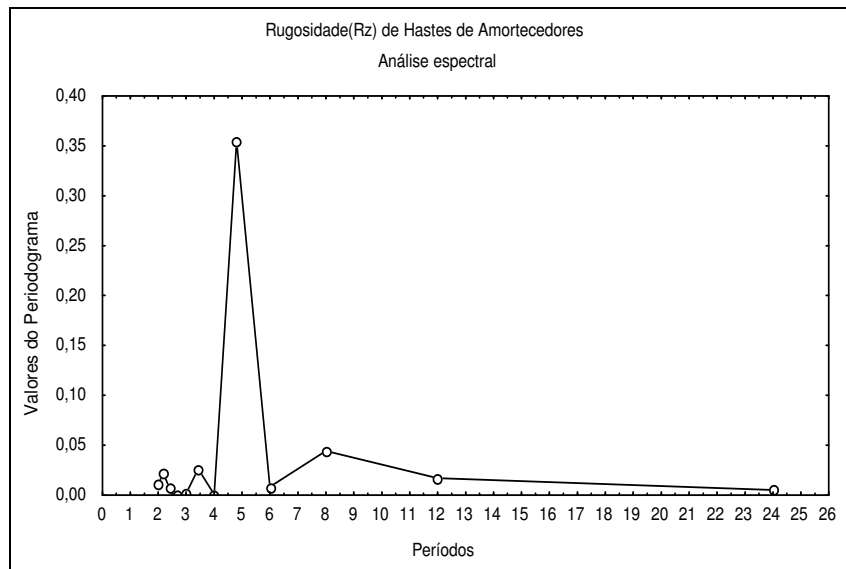


Figura 3 - Análise Espectral para a série da rugosidade (Rz) de hastes de amortecedores.

Dado o pequeno número de observações na série estudada, optou-se por não retirar a sazonalidade, e sim considerar o componente sazonal significativo nos “lags” múltiplos de cinco. O modelo proposto foi SARIMA(0,0,0)x(2,0,0)₅, ou seja,

$$y_t = \phi_1 y_{t-5} + \phi_2 y_{t-10} + a_t$$

em que a_t é considerado um ruído branco, isto é, é independente e identicamente distribuído, com média zero e variância constante.

As estimativas dos parâmetros do modelo foram obtidas através do método de mínimos quadrados e são apresentadas na Tabela 1. Tais estimativas são estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância.

Tabela 1 - Estimativas dos Parâmetros do Modelo SARIMA(0,0,0)x(2,0,0)₅

Parâmetro	Estimativa	Erro-Padrão	Teste t	p-value
ϕ_1	0,512471	0,188866	2,713416	0,0177
ϕ_2	0,501484	0,190518	2,632212	0,0207

A Figura 4 apresenta a função de autocorrelação residual do modelo escolhido.

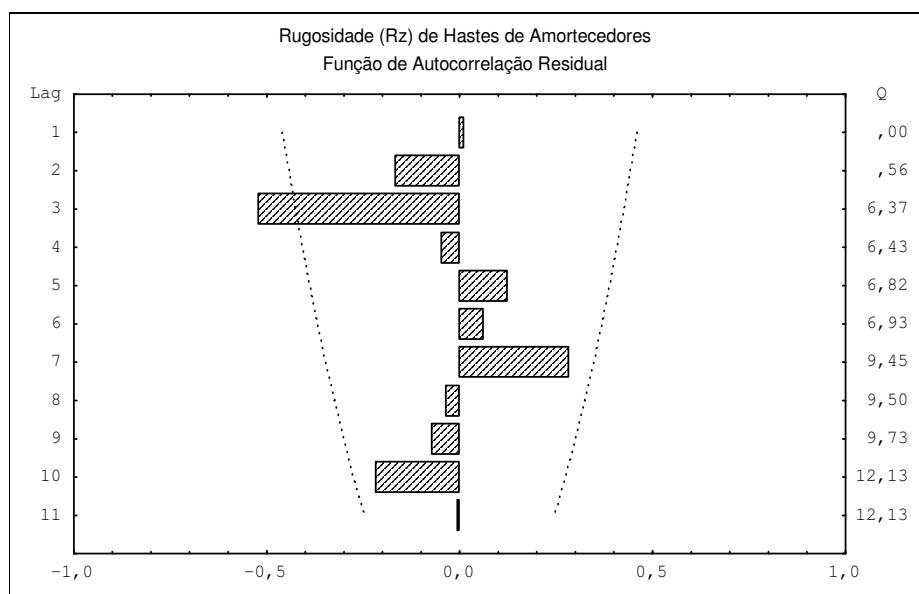


Figura 4 - Função de Autocorrelação Residual da série da rugosidade (Rz) de hastes de amortecedores.

Através da análise gráfica da Figura 4, pode-se observar que, na FAC residual do modelo proposto, apenas um “lag” é significativo, podendo ser um ruído branco. Para verificar se é um ruído branco, aplicou-se o teste de Box e Pierce. O valor da estatística de Box e Pierce é dado através do “lag” 11 da Figura 4, cuja estimativa foi $Q_c = 12,13$. Esta estatística é comparada com o valor crítico encontrado da distribuição Qui-quadrado, ao nível de significância de 5%, com 9 graus de liberdade, $\chi_9^2 = 16,919$. Como $Q_c < \chi_9^2$, o resíduo do modelo ajustado é um ruído branco, ou seja, é independente e identicamente distribuído (i.i.d), com média zero e variância constante. Então, pode-se concluir que o modelo está bem ajustado.

A Tabela 2 apresenta os valores observados e ajustados. Os valores observados são as médias de cada amostra e, efetuando-se uma previsão para “dentro” da série com o modelo ajustado, obtêm-se os valores ajustados.

Tabela 2 - Valores observados e ajustados utilizando o modelo SARIMA(0,0,0)x(2,0,0)₅

Tempo	Observ.	Ajust.	Tempo	Observ.	Ajust.	Tempo	Observ.	Ajust.
1	0,650	0,650	10	0,914	0,914	19	0,900	0,672
2	0,528	0,528	11	0,658	0,734	20	0,874	0,917
3	0,560	0,560	12	0,554	0,560	21	0,756	0,765
4	0,848	0,848	13	0,622	0,577	22	0,516	0,576
5	0,850	0,850	14	0,916	0,730	23	0,568	0,589
6	0,796	0,796	15	0,888	0,895	24	0,860	0,710
7	0,576	0,576	16	0,600	0,775	25	0,886	0,919
8	0,578	0,578	17	0,548	0,576			
9	0,594	0,594	18	0,598	0,586			

O tempo da Tabela 2 refere-se ao tempo i em que foi retirada a amostra i , sendo que cada intervalo de tempo é equivalente a 15 minutos. Admitindo-se uma variação linear (a variação aumenta com o tempo) entre os períodos de tempo, pode-se estimar os valores fracionários para o período em que a rugosidade atinge o valor máximo de 0,9Rz (especificação de engenharia). Lembrando que há uma repetição no comportamento dos dados, de período igual a cinco, foi zerado o intervalo de tempo a cada múltiplo de cinco. Observou-se entre quais períodos a rugosidade atingia aproximadamente 0,9 Rz, e foi efetuada uma interpolação entre tais valores, determinando em minutos o intervalo de tempo correspondente. Procedendo-se os cálculos, utilizando uma interpolação linear, obtêm-se os valores apresentados na Tabela 3.

Observe que para o intervalo de tempo entre 14 e 15 não foi necessária uma interpolação linear, isto porque a rugosidade não atingiu o valor de 0,9Rz.

O tempo ótimo estimado de dressagem foi o mínimo dos quatro tempos interpolados (em destaque na Tabela 3) para evitar que a rugosidade ultrapasse o limite superior de especificação de 0,9Rz, trabalhando em direção à segurança. Assim, o tempo ótimo estimado de dressagem será de aproximadamente 73 minutos.

Tabela 3 - Tempos estimados para rugosidade ser menor ou igual a 0,9Rz

Tempo			Tempo		
Decorrido	intervalo	minutos	Decorrido	intervalo	minutos
9,00	4,00	60,0	19,93	4,93	74,0
9,96	4,96	74,3	20,00	5,00	75,0
10,00	5,00	75,0	24,00	4,00	60,0
15,00	5,00	75,0	24,91	4,91	73,6
19,00	4,00	60,0	25,00	5,00	75,0

Conclusões

As dressagens poderiam ser realizadas com intervalos de tempo de 73 minutos, ao invés de 45 minutos (atualmente utilizado na empresa), sendo efetuadas doze intervenções a menos por dia. Em consequência, no final de um mês serão realizadas 360 dressagens a menos, gerando economia de recursos do processo de produção pelo impedimento de desbastes excessivos no rebolo. Este número menor de intervenções também levaria a uma prática operacional adequada, amenizando o esforço do colaborador, evitando estresse e outras doenças ocupacionais.

SILVA, A. Q.; OLIVEIRA, M. S.; SÁFADI, T. Determination of optimum time of dressing process using times series to the statistical process control (SPC). *Rev. Bras. Biom.*, São Paulo, v.25, n.4, p.65-75, 2007.

- *ABSTRACT: Aiming an improvement of the performance in industrial processes, the manufacturing companies employ Statistical Process Control (SPC) to control the variability of the process. Thus, it is possible to intervene in the special causes that are acting in the process, improving continuously the product quality. In the manufacturer rods of shock absorbers, the rugosity is an important characteristic of the quality, which is determined by engineering specifications. The used equipment to take care of these specifications is called dressing machines "centreless". The operation of the process, break off this machines demanding, therefore, an intervention of the operator called dressing process. To proceed the adjustment from the grinding machines, the operator must determine the period of time that must command the interventions, so that they do not have nor more interventions of that the necessary number, nor less. In this work, the behavior of data from the operations system of the company TECNO was analyzed with the objective to determine was the optimum time of dressing process of such machines. As the data are auto correlated in the time, was used the methodology of times series. The optimum time of dressing process was approximately 73 minutes. This fact generates a significant reduction of the time wastefulness, efforts of the operator and the solution of pendency in the audits of norms of the quality management.*
- *KEYWORDS: Statistical process control; quality management; time series*

Referências

BOX, G. E. P.; PIERCE, D. A. Distribution of residual auto-correlations in autorregressive-integrated moving average time series models. *J. Am. Stat. Assoc.*, Alexandria, v.65, n.332, p.1509-1529, 1970.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to statistical quality control*. 3rd. ed. New York: John Wiley, 1997. 677p.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Análise de séries temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 535p.

PRAZERES, P. M. *Dicionário de termos da qualidade*. São Paulo: Atlas, 1996. 421p.

WERKEMA, M. C. C. *Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. 404p.

Recebido em 04.12.2006.

Aprovado após revisão em 22.02.2008.