

# CARTA DE CONTROLE EWMA COMO FERRAMENTA PARA MONITORAMENTO E MELHORIA DA QUALIDADE DE ESPESSURA DE PAREDE DE TUBOS<sup>1</sup>

Júlio Cesar Ferreira<sup>2</sup>

Eduardo E. V. Dupin<sup>2</sup>

João Carlos Cunha<sup>3</sup>

Marcelo Jardim de Souza<sup>4</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma melhoria no controle de espessura do laminador com mandris, utilizando a Carta de controle EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) como substituição à carta Shewhart para valores individuais. Os dados de espessura de parede dos tubos são coletados no medidor a quente de espessura, recentemente instalado após o laminador alisador (Reeler). Apesar dos dados de espessura serem coletados a jusante do processo de alongamento (após alisamento), o modelamento do nível do processo pode ser feito com maior precisão do que o método anterior, no qual se comparava a diferença entre a densidade linear (kg/m) real com a planejada para o produto. Essa nova carta é apresentada em tempo real na tela dos operadores bem como a correção de *Gap* (distância entre cilindros) sugerida para acompanhamento e ajuste. A carta EWMA tem uma sensibilidade maior que a Shewhart individual, com isso foi obtido um controle mais rápido e efetivo, proporcionando uma redução da variabilidade da espessura de parede dos tubos.

**Palavras-chave:** Tubo sem costura; Controle estatístico de processo; Qualidade.

## EWMA CONTROL CHART AS A TOOL FOR WALL THICKNESS MONITORING AND IMPROVEMENT IN SEAMLESS PIPES HOT ROLLING

### Abstract

This paper presents an improvement for the wall thickness control at V&M Brazil Plug Mill, using the EWMA control chart technique (Exponentially Weighted Moving Average) instead of Shewhart individuals chart. The thickness data are collected from the hot wall thickness gauge, recently installed after the Reeler mill. Despite the thickness data are taken downstream stretching process (after reeling), the process level modeling can be done with greater precision than the previous method, which compared the difference between the calculated actual linear density (kg/m) against the planned one for the product. This new chart is plotted in real time operation screen, as well as the new suggested correction for the work rolls gap monitoring and adjustment. The EWMA control chart has a greater sensitivity if compared the Individuals Shewhart Control Chart, so a faster and effective control was achieved, providing a higher quality in wall thickness.

**Key words:** Seamless pipes; Statistical process control; Quality.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE

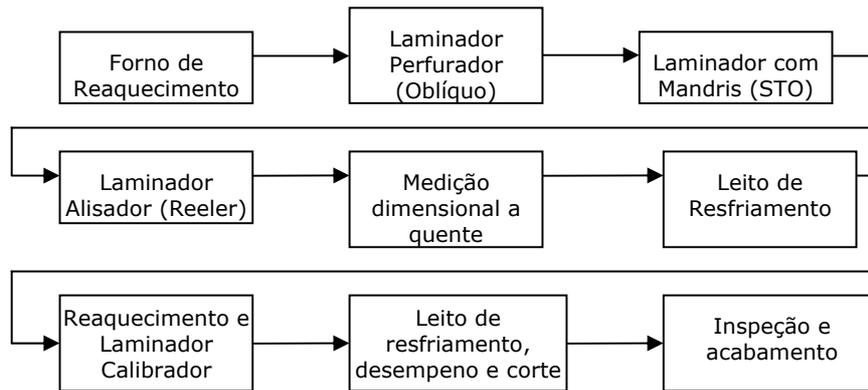
<sup>2</sup> Engenheiro de Processo (V&M do Brasil)

<sup>3</sup> Estudante de Engenharia de Controle e Automação (UFMG / V&M do Brasil).

<sup>4</sup> Engenheiro Eletricista e Analista de Automação (V&M do Brasil)

# 1 INTRODUÇÃO

O controle de espessura de parede feita no Laminador com mandris da laminação automática da V & M do Brasil era feito a partir de uma relação entre o peso do bloco e o comprimento do tubo medido. Após a aquisição do medidor de espessura a quente (*hot wall thickness measurement*), instalado em novembro de 2007, foi possível substituir este controle por outro baseado nas medições feitas diretamente no medidor de espessura. Abaixo é mostrado o fluxo de laminação do tubo no processo de laminação tipo *Plug Mill* da V&M do Brasil:



**Figura 1:** Fluxo de produção da linha “Laminação Automática” da V&M do Brasil.

A correção de *gap* (distância entre cilindros) do laminador com mandris era sugerida através da comparação da espessura média calculada pelas dimensões “peso” e “comprimento” do tubo laminado. Para isto, existem uma balança - que mede o peso do bloco a ser laminado – e um medidor ótico de comprimento na saída do laminador com mandris. Assim, era comparada a diferença de espessura média calculada com base no desvio entre a espessura planejada para o produto e a espessura real calculada com base no peso e comprimento reais, assim:

$$\hat{w} = \frac{\phi_{tubo} - \sqrt{\phi_{tubo}^2 - 4 \times 41.9 \times \frac{L}{\hat{L}}}}{2} \quad \text{eq. (1)} \quad \text{é a parede real calculada para o tubo, com}$$

base na relação peso x comprimento;

$$W = \frac{\phi_{tubo} - \sqrt{\phi_{tubo}^2 - 4 \times 41.9 \times \frac{L_0}{\hat{L}}}}{2} \quad \text{eq. (2)} \quad \text{é a espessura planejada e corrigida para o}$$

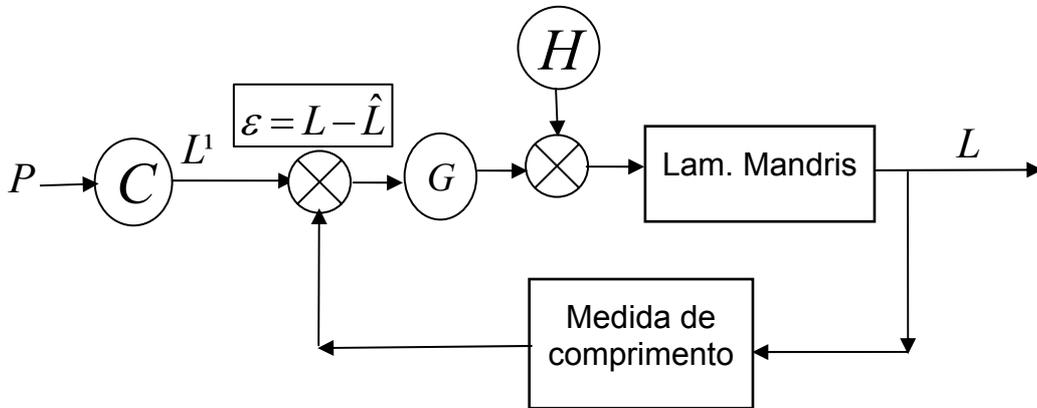
tubo, com base no comprimento de laminação corrigido.  $L_0$ ,  $\hat{L}$ , e  $L$  são respectivamente os comprimentos: calculado, o alvo do processo e a medida real do tubo.

A partir da comparação entre  $w$  e  $W$ , eram sugeridas correções no GAP do laminador. Este método de controle pode incluir certos erros não desejados, que podem ser classificados como variações inerentes ao processo, tais como:

1. Variação da medida na balança de blocos;
2. Perdas de massa no forno de aquecimento e na perfuração;
3. Variações na medição de comprimento (principalmente em espessuras nominais menores que 8 mm);

4. Variações de diâmetro devido ao desgaste do canal.

Estas componentes eram consideradas como perdas constantes, porém diante de situações atípicas, os níveis destas variáveis podiam variar aleatoriamente, causando variação na espessura final dos produtos. Abaixo é mostrado o esquema de controle baseado na relação peso x comprimento.



**Figura 2:** Diagrama de blocos do controle baseado na relação peso X comprimento

$P$  = peso do bloco

$L^1$  = comprimento de laminação

$Gap$  = Correção de GAP

$\hat{L}$  = comprimento-alvo

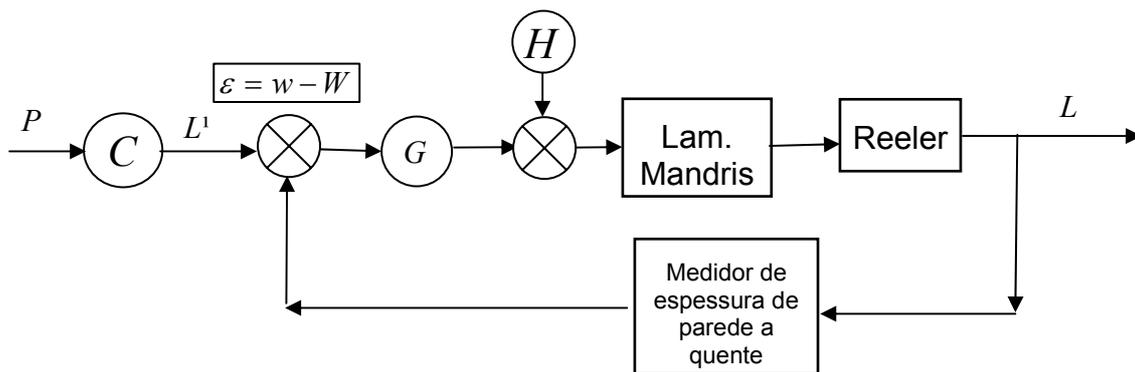
$L$  = comprimento real

$H$  = abertura dinâmica do cilindro

$C(P)$  = Operador de conversão peso-bloco/comprimento

$G(\varepsilon)$  = Controlador de Gap

Com a implantação do multi-medidor, tem-se a opção de medida da variação da espessura real dos tubos, o que sugere a implementação do modelo:



**Figura 3:** Diagrama de blocos do controle baseado na medição de espessura

Sendo  $\varepsilon$  o desvio da espessura desejada após alisamento,  $w$  a espessura real medida e  $W$  a espessura planejada para o produto e  $A$  o alongamento no laminador alisador reeler.

A escolha da carta EWMA é uma alternativa à carta Shewhart quando se deseja detectar pequenas variações ( $\Delta < 1\sigma$ ), e no caso da espessura média, é importante evitar desvios (vícios) da espessura planejada, já que esta é característica crítica dimensional do produto, além de interferir em outras dimensões de qualidade requerida pelo cliente. A carta EWMA tem um desempenho equivalente à carta de controle da soma acumulada “CUSUM”, porém sua aplicação e entendimento são mais fáceis. Além de todos esses fatores, a carta EWMA é tipicamente usada para observações individuais.

A desvantagem das cartas de Shewhart é que estas usam apenas a informação sobre o processo contido na última observação coletada para a tomada de decisão, sendo que este ponto não incorpora informações sobre o passado do processo. Como o passado é ignorado, as cartas de Shewhart são poucos sensíveis para detectar pequenos deslocamentos na média do processo.

Montgomery<sup>(1)</sup> apresentou a carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada ou simplesmente EWMA, como uma alternativa para as cartas de controle usuais de Shewhart, quando há interesse em detectar pequenas mudanças no processo produtivo. O desempenho da carta de controle EWMA é aproximadamente equivalente ao da carta de controle de soma acumuladas (CUSUM). Notadamente que tanto a carta CUSUM quanto a carta EWMA são tipicamente utilizadas com observações individuais.

Hunter<sup>(2)</sup> argumenta que as diferenças entre as cartas de controle de Shewhart, CUSUM e EWMA dizem respeito ao conhecimento de como cada técnica usa dados gerados pelo processo de produção. No caso da carta de Shewhart vê-se uma forte relação de dependência exclusivamente do último ponto demarcado. A carta de controle de somas acumuladas (CUSUM) atribui peso igual para a toda seqüência dos dados, indo desde a mais antiga até a mais recente observação. Já a carta de controle EWMA concebe uma maior ponderação as informações mais recentes em detrimento de uma ponderação menor às observações mais antigas. O termo “exponencialmente ponderada” descreve que os pesos das observações decaem exponencialmente das mais recentes para as mais antigas.

A carta EWMA foi inicialmente proposta por Roberts<sup>(3)</sup> para aplicações em controle de qualidade com variáveis aleatórias, independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) e tem como objetivo suprir a deficiência apresentada pela carta de Shewhart; ou seja, incorporar diretamente o comportamento passado no ponto presente. O modelo que define a carta EWMA é dado da seguinte forma:

$$Z_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)Z_{t-1} ; \text{ com } 0 < \alpha \leq 1 \quad \text{eq.(3)}$$

Onde:

$Z_t$ : previsão para característica da qualidade no período t;

$X_t$ : característica da qualidade real para o período t;

$\alpha$ : constante de suavização ou de alisamento;

$Z_{t-1}$ : previsão para a característica da qualidade para o período t-1.

$Z_0$ : representa o valor de inicialização, geralmente representado pelo nível médio do processo.

Se as observações  $X_t$  são variáveis aleatórias independentes, com variância  $\sigma^2$ , então a variância de  $Z_t$  será:

$$\sigma_{Z_t}^2 = \sigma^2 \cdot \left( \frac{\alpha}{2 - \alpha} \right) \cdot [1 - (1 - \alpha)^{2t}] \quad \text{eq. (4)}$$

Por outro lado, os limites de controle da carta EWMA podem ser definidos como segue:

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\alpha}{2-\alpha} \cdot [1 - (1-\alpha)^{2t}]} \quad \text{eq. (5)}$$

$$LC = \mu_0 \quad \text{eq. (6)}$$

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\alpha}{2-\alpha} \cdot [1 - (1-\alpha)^{2t}]} \quad \text{eq. (7)}$$

Neto<sup>(4)</sup> enfatiza que a carta de controle *EWMA*, possui uma ampla variedade de aplicações. Dentre elas encontra-se a previsão de tendência não estacionária do nível do processo, permitindo deste modo, que a média do processo oscile livremente ao longo do tempo. Tal aspecto torna-se importante, pois as previsões através do *EWMA* podem ser utilizadas, visando determinar ajustes ou retro-alimentações necessárias para manutenção do nível do processo próximo do valor desejado.

Finalmente, diversos estudos foram desenvolvidos para as propriedades da carta de controle de Exponencial de Média Móvel Ponderada (*EWMA*).

Destacam-se os trabalhos descritos por Robinson e Ho,<sup>(5)</sup> Lucas e Saccuci<sup>(6)</sup> e Crowder,<sup>(7)</sup> onde foram usados procedimentos numéricos para determinação do ARL a partir de diversas tabelas e equações integrais, que tinham por objetivo o rápido monitoramento da média e do desvio padrão de um processo produtivo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para estimar a variação de espessura média no laminador com mandris, considera-se que o desvio de espessura neste é correlacionado com o desvio verificado depois do *reeler*, modelando-se a função de correção de *gap* a partir deste desvio, com:

Se  $|z_i| > L\sigma$  faça

$$G_i = -[A^{-1} \times z_i]$$

Com  $z_i = \lambda \varepsilon_i + (1 - \lambda)z_{i-1}$  e  $z_0 = 0$

Ou seja, a função de ajuste do *gap* é determinada a partir da média móvel exponencialmente ponderada dos desvios observados após o *reeler*, sendo transformados para a dimensão da lupa no laminador com mandris através do inverso da função de alongamento na etapa intermediária à medição (*reeler*).

O valor inicial  $z_0 = 0$  significa que o nível inicial esperado do processo é sempre o alvo, e para a primeira peça  $z_1$  o valor de correção do *gap* é ajustado pelo método anterior, dado pelo desvio de comprimento-alvo.

Neste modelo, verifica-se que os parâmetros e variáveis de peso e comprimento planejado e corrigido servem como parâmetros de referência para o nível inicial do processo no início da marcha (peça de *setup*), não sendo mais tratadas como variáveis de decisão ao longo da produção.

A vantagem de se trabalhar com o desvio do alvo é que a carta não precisa ser reinicializada toda vez que se troca o produto (*setup*), e isto é de grande importância, visto que se tem lotes de produção de tamanho variado (1 a 2.000 peças).

Depois da análise de 27 lotes de produção que abrangem mais de 98% da faixa de produção - desde 200 mm a 350 mm de diâmetro externo, e espessura nominal de 6,40 mm a 30,0 mm. Os diagramas de dispersão mostram que o desvio-padrão total do processo variou com a espessura de parede nominal.

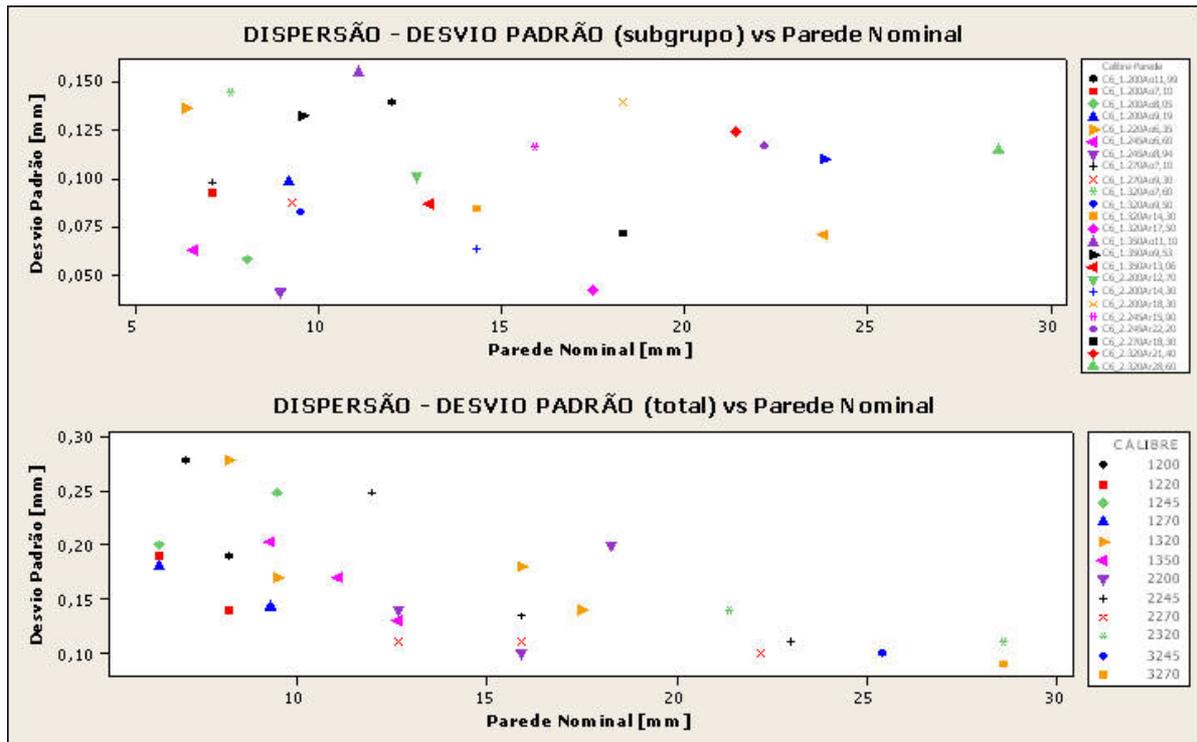
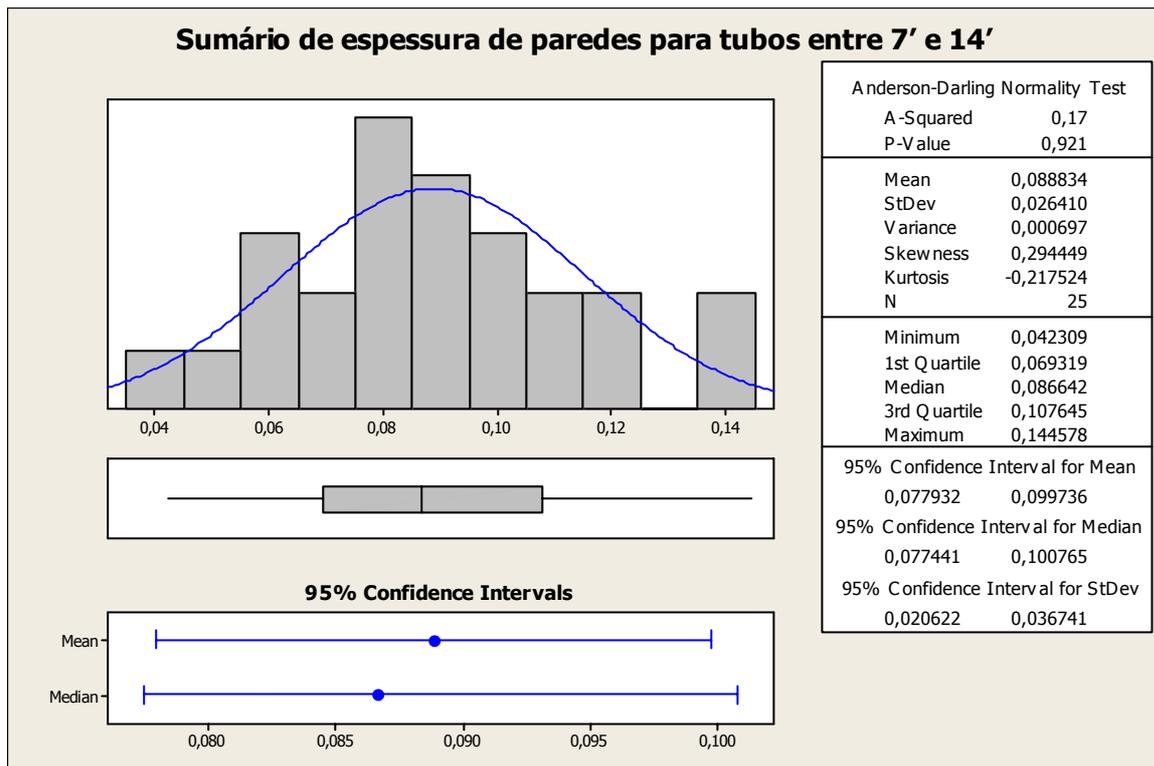


Figura 4: Dispersão do desvio-padrão com a parede nominal dos tubos.

A diferença entre os dois cálculos de variação do processo é que o primeiro contempla apenas a variação entre subgrupos (variação do curto prazo), já a segunda considera a variação total dos dados (inclusive oscilações da média). Esta correlação entre o valor do desvio-padrão total do processo e a espessura nominal mostra como as oscilações da média do processo são muito mais significativas nas paredes nominais mais finas, que têm maior alongamento e maior amplitude de temperatura de laminação, se considerado o tempo total de laminação *Perfurador-Reeler*.

Como as variações de curto prazo são aleatoriamente distribuídas pela faixa de produção, optou-se por tomar a estimativa do desvio-padrão (médio) na parametrização da carta de controle. O gráfico da Figura 5 mostra a estatística descritiva do mesmo.



**Figura 5:** Sumário de espessura de paredes para tubos entre 7' e 14'

Assim, foram adotados os parâmetros para a carta de controle final:

$$\mu_o = 0 \text{ (parede alvo – parede real)}$$

$$L = 2,703 \text{ (3 sigma da carta de Shewhart)}$$

$$\lambda = 0,46 \text{ (recomendado).}$$

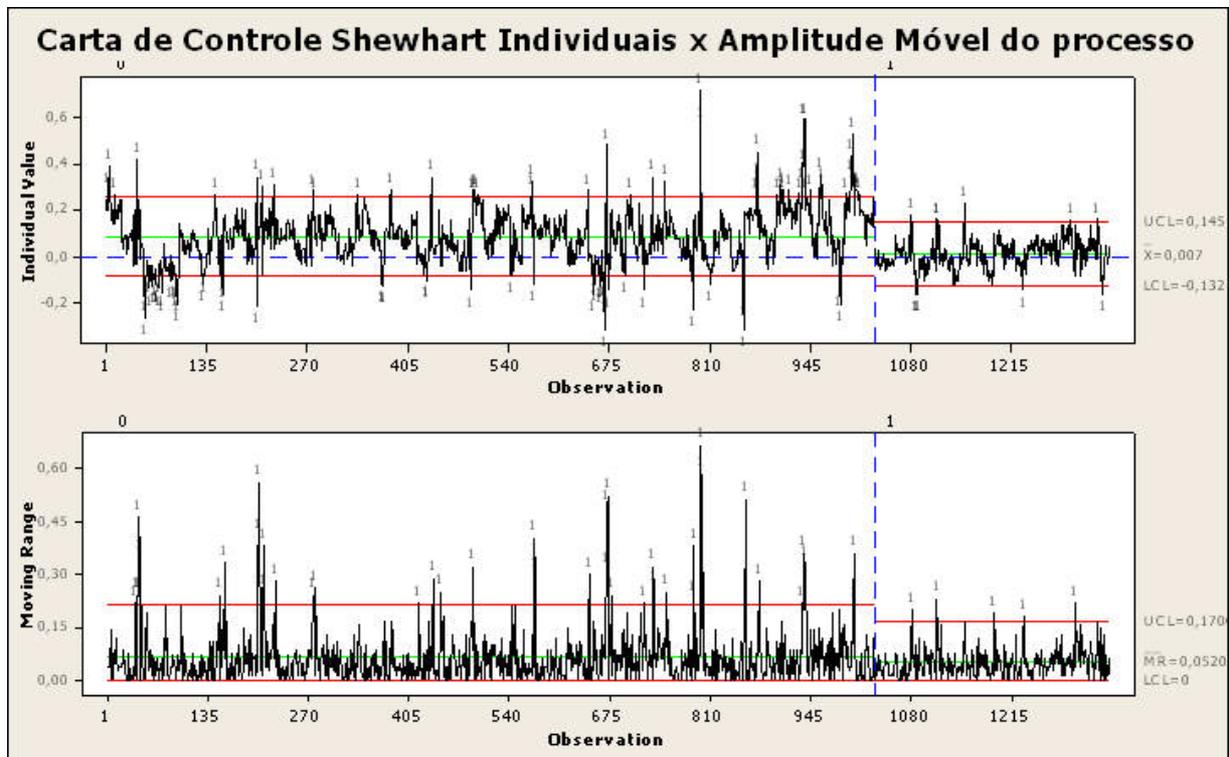
### 3 RESULTADOS

A carta de controle foi desenvolvida na estação de trabalho do operador do laminador, através da ferramenta GCEP, que é uma ferramenta desenvolvida pela equipe da VMB para a implantação rápida de cartas de controle nos sinóticos do sistema de rastreamento da produção.

Na escolha de parâmetros, foram aplicados inicialmente valores para  $\lambda = 0,12$  e  $\lambda = 0,46$  - indicados por Montgomery<sup>(1)</sup>, e também com a estimativa calculada pelo método dos mínimos quadrados ( $\lambda = 0,20$ ), com base no histórico do processo. Este valor dá à série a propriedade de “memória longa”, em termos estatísticos, um alto *lag*. Apesar de o processo mostrar esta estabilidade sob controle, as variações na laminação são do tipo brusca e intermitente (não previsível e que desloca a média fortemente), não mostrando tendência. Logo, foi selecionado o valor para  $\lambda = 0,46$ , que mostra autocorrelação significativa apenas para as 4 últimas observações.

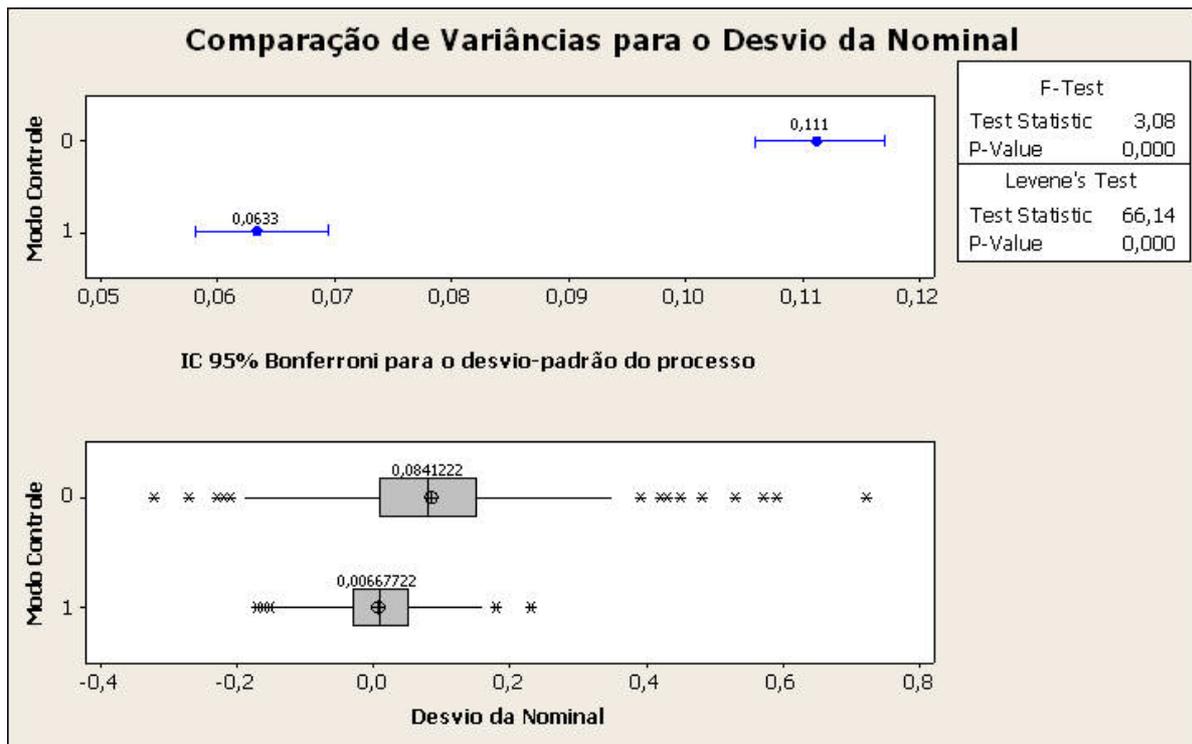
A seguir é apresentado o resultado dos testes-pilotos com a carta, para o produto crítico AISI 41B30 dimensões de diâmetro externo e espessura de parede respectivamente 355,6 mm e 9,53 mm, considerado produto de alta criticidade de variação de espessura, com nível de tolerância de espessura estreito. (-12,5% +15,0%).

Na carta de controle são apresentados os dados de espessura, para os lotes laminados antes e depois da implantação do novo controle de processo para  $\lambda=0,46$ . A faixa azul pontilhada vertical delimita o último lote com o controle anterior para o início do novo controle. Já a linha pontilhada horizontal mostra o alvo (desvio “zero”).



**Figura 6:** Carta de Controle Individuais do processo com os dois modelos de CEP.

Como o foco é reduzir a variação entre lotes e conseguir menor desvio médio do alvo de espessura, testou-se as variâncias dos dois modos de controle, através do teste F para variâncias. Como se verifica no gráfico, a diferença mostrou-se significativa. O gráfico de caixas (*boxplot*) dos dados brutos também é apresentado.



**Figura 7:** Comparação das variâncias e *boxplot* dos dados brutos.

Com base nos resultados, verificou-se duas reduções na variação do processo:

- O desvio-padrão total estimado reduziu de 0,111 mm para 0,0633mm (- 43%);
- O desvio médio do alvo foi reduzido de 0,084 mm para 0,0067 mm (- 92%).

Isto significa que o novo controle praticamente eliminou a variação entre lotes, pois o desvio-padrão do processo encontra-se agora nos mesmos níveis da variação natural do processo para este produto.

Outra consideração a ser observada na carta de controle é a distância entre os pontos fora de controle pela regra 3 Sigma (marcados com o algarismo “1”). Após a implantação do controle, verificou-se uma distância bem menor destes pontos ao alvo. Isto se deve ao fato de o processo detectar mais rapidamente um “*off target*”, possibilitando o operador executar a sua correção em tempo hábil e com mais precisão.

#### 4 DISCUSSÃO

Os resultados mostram que após o gráfico de controle EWMA ser implantado, as variações na espessura puderam ser detectadas mais rapidamente, ou seja, aumentou a sensibilidade do processo. Com isso obtivemos um melhor controle dimensional e ajustes do laminador com mandris mais rápido e efetivo, proporcionando uma maior qualidade na espessura (menor variabilidade). Esta nova abordagem reduziu a probabilidade de se ter lotes fora do alvo de espessura de parede planejada, melhorando a precisão dos processos consecutivos e a geração de não-conformidades.

Alves<sup>(8)</sup> em sua dissertação de Mestrado faz uma análise entre o Gráfico de Controle CUSUM e o Shewhart Individuais. No caso de produção de anéis para vedação de tubulações (modelo: AGS-BR) ele monitorou a característica “diâmetro externo”. Durante 6 semanas ele monitorou o processo, verificando na terceira semana que o processo saiu do controle estatístico. Ele utilizou dois métodos para implementar a

carta CUSUM: CUSUM FIR (Fast Initial Response) e CUSUM V Mask (Máscara V). Enquanto a carta Shewhart individuais levou 25 amostras para detectar um desvio no valor médio deste processo, a carta CUSUM FIR detectou na 19ª amostra e a CUSUM V MASK na 18ª amostra, comprovando maior sensibilidade.

Apesar de a carta EWMA ter uma performance equivalente à carta CUSUM, como já foi dito anteriormente, sua aplicação e entendimento são mais fáceis, visto que esta será usada pelos operadores que necessitam apenas de uma abordagem qualitativa da estatística envolvida para sua interpretação.

## 5 CONCLUSÃO

Por ser a espessura de parede uma característica crítica de qualidade dimensional dos tubos sem costura, este novo método praticamente retira um fator de variabilidade de espessura no produto acabado: a variação entre lotes de produção. Com a maior precisão de acerto da espessura planejada para os tubos, o impacto nos clientes interno e externo é imediato, visto que, além de crítica, esta característica dimensional afeta diretamente uma outra característica no caso dos produtos API 5CT e aços proprietários V&M, com tolerância de diâmetro interno (*drift* comum e especial). Além disto, espessura média também é parâmetro importante para determinação da pressão mínima dos testes de colapso, para produtos da linha HC (*High Collapse*), realizados depois do tratamento térmico de têmpera e revenimento. É importante também ressaltar a melhoria no processo de calibração a frio das extremidades, a partir da redução de mudança nos diâmetros de ferramentas internas para tal processo.

Como trabalho futuro, pretende-se aprimorar o ajuste de *Gap* para as peças de *setup* (primeiras peças), a partir de modelamento estatístico do processo em ajuste, no qual se desenvolve geralmente uma técnica de análise de variância, segregando-se a variabilidade inerente ao processo da variabilidade do ajuste da máquina.

## Agradecimentos

A toda equipe da Laminação Automática da V&M do Brasil, que com “*conversa de amigo*” gera um ambiente favorável à geração e implantação de novas idéias.

## REFERÊNCIAS

- 1 MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to Statistical Quality Control, 3<sup>rd</sup> ed. Wiley, N.Y., 1997.
- 2 HUNTER, J. S. The Exponentially Weighted Moving Average. Journal of Quality Technology, v. 18, n. 4, 1986.
- 3 ROBERTS, S. W. Control chart tests based on geometric moving averages. Technometrics, 1, 239-251, 1959
- 4 LAGO NETO, João Caldas do. O Efeito da Autocorrelação em Gráficos de Controle para Variável de Controle Contínua: Um Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado pela EPS/UFSC. Florianópolis, 1999.
- 5 ROBINSON, P. B.; HO, T. Y. Average Run Lengths of Geometric Moving Average Charts by Numerical Methods, **Technometrics**, v. 20, n. 1, 1978
- 6 LUCAS, J. M.; SACCUCCI, M. S. Exponentially Weighted Moving Average Controle Schemes: Give Your CUSUM a Head Start. **Technometrics**, v. 24, n. 3, 1990.

- 7 CROWDER, S. V. A Simple Method for Studying Run-Length Distributions of Exponentially Weighted Moving Average Charts. **Technometrics**, v. 29, n. 4, 1987.
- 8 ALVES, CUSTODIO DA CUNHA, Gráficos de Controle CUSUM: um enfoque dinâmico para a análise estatística de processos – Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2003

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1 AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG) – Análise dos Sistemas de Medição – Manual da Norma QS 9000. Instituto da Qualidade Automotiva, São Paulo, 1997.
- 2 AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG) – Controle Estatístico do Processo – Manual da Norma QS 9000. Instituto da Qualidade Automotiva, São Paulo, 1997.
- 3 LILL, M.H.; CHU, YEN; CHUNG, KEN, Statistical Setup Adjustment for Low Volume Manufacturing – chapter 3 – Editado por MONTGOMERY, D.C.; KEATS, J.B. Nova Iorque, 1991.
- 4 MONTGOMERY, DOUGLAS C.;RUNGER, GEORGE C.,Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros , Arizon State University, LTC, 2006.
- 5 SILVA, WESLEY VIEIRA DA; SOUZA, ALCEU; DUCLÓS, LUIZ CARLOS, Quality Assurance in a Milk Pasteurization Process Using the Exponentially Moving Average Chart, Ribeirão Preto, Brazil, School of Business and Economics of Ribeirão Preto - University of São Paulo, July, 27–29th, 2005 . Disponível em:<[http://www.pensaconference.org/arquivos\\_2005/todos/060.doc](http://www.pensaconference.org/arquivos_2005/todos/060.doc)> Acesso em: 25 mar. 2008