



Gráficos de controle de Shewhart para o monitoramento de um processo de fixação de vidro automotivo

Roberto Campos Leoni
roberto.leoni@aedb.br
AEDB

Bianca Aparecida Reis Rios
biancaolivier.rios@gmail.com
AEDB

Pedro Augusto Polegário Alves da Silva
guto.manchester@hotmail.com
AEDB

Beatriz Pereira Neves Reis
pnr_bia@hotmail.com
AEDB

Gabriel da Silva Fernandes
Gabrielfernandes1999@outlook.com.br
AEDB

Resumo: O objetivo deste artigo é estimar os parâmetros dos gráficos de controle de Shewhart para monitorar a média e a variabilidade de um processo da indústria automotiva. O processo consiste em preparar e aplicar cola de poliuretano para fixação do vidro de um teto panorâmico em um veículo. A quantidade de cola aplicada deve seguir o padrão de altura e comprimento especificados pela Engenharia. São essas as duas características de qualidade consideradas críticas em relação a qualidade e segurança para o cliente. Os limites do gráfico de controle para monitorar a média e a amplitude amostral são estimados com 50 amostras de tamanho 6, seguindo o princípio de subgrupos racionais. Os gráficos construídos servem para monitorar as características de qualidade do processo, sendo possível avaliar se existem causas especiais que alteram a média e/ou a variabilidade do processo.

Palavras Chave: gráficos de controle - Shewhart - média - amplitude - qualidade



1. INTRODUÇÃO

No início da década de 30 o controle de qualidade despontou nos Estados Unidos em uma aplicação industrial do gráfico de controle elaborado por *Walter Andrew Shewhart*, funcionário da empresa *Bell Telephone Laboratories*. Shewhart (1925) propôs o uso do gráfico de controle dando ênfase ao estudo e prevenção dos problemas relacionados à qualidade.

Durante a segunda Guerra Mundial (1939-1945), graças ao controle de qualidade, um grande número de indústrias americanas consegue produzir artigos militares com boa qualidade e com baixos custos. Este sucesso está relacionado com a implantação de técnicas estatísticas associadas ao controle de qualidade. As normas *American War Standards Z1.1, Z1.2 e Z1.3* (conhecidas como *Z-pamphlets*), publicadas em 1941 e 1942, consolidam os procedimentos estatísticos utilizados durante a época da guerra, tendo tanta repercussão a ponto de serem traduzidas e utilizadas por várias indústrias de diversas nações do mundo (SHEWHART; DEMING, 1967).

Na década de 50 o Japão emprega amplamente o controle de qualidade através da adaptação das atividades baseadas nos sistemas americano e inglês, criando o Controle de Qualidade Total (TQC) no estilo japonês. O TQC é um modelo administrativo criado por um grupo de pesquisadores do controle de qualidade da *Union of Japanese Scientists and Engineers* (JUSE) e se baseia em muitos elementos, um deles é o controle estatístico de processo (CAMPOS, 2004).

A velocidade das informações e as novas tecnologias estabeleceram um ambiente globalizado de alta concorrência em que preço, prazo, qualidade e flexibilidade precisam ser atendidos. Controlar as variáveis envolvidas no processo de produção, de modo a torná-lo mais eficiente, é uma das crescentes preocupações dos empresários. Muitos sistemas utilizados nas empresas necessitam de processos de acompanhamento e controle de produção (JACOBI; SOUZA; PEREIRA, 2002).

Controlar processos é a essência do gerenciamento de uma empresa. Campos (2004, p.19) define processo como “um conjunto de causas que provocam um ou mais efeitos”. Estas causas são denominadas fatores de manufatura ou de serviço que podem ser: matérias-primas, máquinas, medidas, meio ambiente, mão de obra e método.

O emprego dos gráficos de controle, diferentemente da inspeção após a produção, possibilita o controle da qualidade durante a manufatura, ou seja, os gráficos de controle exibem um enfoque na detecção dos defeitos e ação corretiva imediata, caso alguma falha seja detectada. Desta forma, ao impedir a saída de produtos imperfeitos, pode ser considerado como um método de caráter preventivo (DEMING, 1990).

A indústria tem a necessidade de controlar diferentes parâmetros de processo e dados de produtos. Na indústria 4.0 esses dados e os obtidos através de novas tecnologias serão a base para todos os sistemas de análise e controle que irão apresentar informações que permitam a tomada de decisões. Tanto na indústria 4.0 quanto em nossa indústria atual, tomar decisões baseadas em dados com base em técnicas estatísticas agregam qualidade aos processos de fabricação. O emprego do Controle Estatístico do Processo de forma sistematizada e integrada é o primeiro passo para estar alinhado com a indústria 4.0 (REIS; GINS, 2017; NASIR et al., 2018).



Este artigo apresenta uma contribuição prática sobre a aplicação de gráficos de controle em processos. O objetivo desta pesquisa é apresentar os parâmetros dos gráficos de controle para monitorar a média e a variabilidade de um processo da indústria automotiva. O processo consiste em preparar e aplicar cola de poliuretano para fixar um vidro no teto panorâmico de um veículo. A cola aplicada deve seguir o padrão de altura e comprimento especificados pela Engenharia. São essas as variáveis críticas que devem ser monitoradas. Para a construção dos gráficos de controle, empregam-se os métodos propostos por Costa, Epprecht e Carpinetti (2005) e Sampaio, Leoni e Tavora (2014).

O vidro é fixado em tetos panorâmicos de veículos produzidos em uma empresa da região sul fluminense. O nome da empresa e o tipo de veículo são omitidos por questão de sigilo. Entretanto, essa omissão não compromete a qualidade e os resultados da pesquisa.

O artigo está estruturado em mais cinco seções. A seção 2 apresenta a revisão teórica sobre gráficos de controle para monitorar a média e a variabilidade de um processo. Uma breve descrição do processo de instalação do teto panorâmico é apresentada na seção 3. A seção 4 apresenta os resultados da pesquisa com a construção dos gráficos de controle e, na seção 5, apresentam-se as considerações finais e sugestões para futuras pesquisas.

2. GRÁFICOS DE CONTROLE PARA A MÉDIA E AMPLITUDE AMOSTRAL

Todo processo deve ser permanentemente monitorado para detectar a presença de causas especiais que aumenta a dispersão e/ou tiram a média do valor alvo. Uma vez detectada a presença de uma causa especial, uma investigação deve ser conduzida para eliminar a causa especial. Os gráficos de controle de \bar{X} e R são as principais ferramentas para monitorar processos e sinalizar a presença de causas especiais.

O gráfico de controle de \bar{X} para dados independentes é empregado para monitorar a média (μ) de um processo cuja característica de qualidade de interesse X é uma grandeza mensurável representada pelo modelo de Shewhart:

$$X_k = \mu + e_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

onde e_k é uma variável aleatória IID $\sim N(0, \sigma_e^2)$.

A cada intervalo de tempo h , retira-se do processo uma amostra de tamanho n e calcula-se a estatística \bar{X} . Os valores da estatística calculada são desenhados em um gráfico que possui dois limites: inferior (*LIC*) e superior (*LSC*) posicionados a L desvios-padrão da média. Geralmente L assume o valor igual a 3; em uma distribuição normal padrão este valor faz com que, em um processo isento de causas especiais, 99,73% das observações caiam dentro dos limites de controle.

Se os pontos da estatística calculada, depois de marcados no gráfico, distribuírem-se de modo aleatório em torno da linha média (*LM*), estimada a partir da média global de uma quantidade significativa de observações, e dentro dos limites de controle, não há necessidade de se intervir no processo. A linha média e os limites do gráfico são estabelecidos com o processo em controle:



$$LSC = \mu_0 + L \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$LM = \mu_0 \quad (3)$$

$$LIC = \mu_0 - L \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

onde μ_0 estimativa da média do processo em controle e σ_0 o desvio padrão do processo em controle, L é o fator de abertura dos limites de controle e n é o tamanho da amostra.

O gráfico de \bar{X} é ilustrado na Figura 1. Quando surge um ponto na região de ação do gráfico (acima do LSC ou abaixo de LIC), provavelmente há alguma causa especial interferindo na média do processo, devendo ser investigada e corrigida. Na Figura 1, os pontos amostrais se comportam de forma aleatória até a 14ª amostra. Na 15ª amostra, têm-se um valor de \bar{X} na região acima do LSC , região de ação, indicando processo fora de controle estatístico.

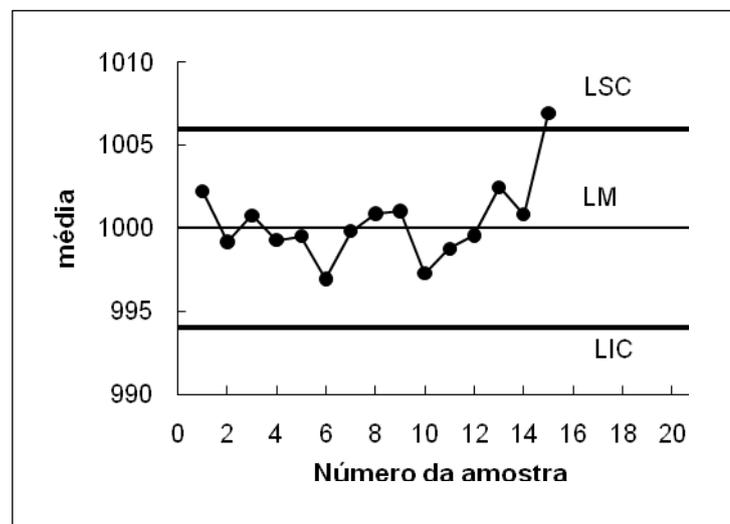


Figura 1: Gráfico de controle para média.

Fonte: Adaptado de Costa, Epprecht e Carpinetti (2005, p. 29)

O gráfico de controle é semelhante a um teste das seguintes hipóteses: H_0 = processo sob controle, H_1 = processo fora de controle. Se o gráfico é de \bar{X} , então: $H_0: \mu = \mu_0$ e $H_1: \mu \neq \mu_0$. Os erros estatísticos são: erro tipo I (erro α) que é a probabilidade de um ponto cair além dos limites de controle, sinalizando uma causa especial inexistente, e o erro tipo II (erro β) é a probabilidade de um ponto cair dentro dos limites de controle não sinalizando uma causa especial (LEONI; COSTA, 2012).

Com o processo isento de causas especiais, o ideal é que todos os pontos de \bar{X} se situem dentro dos limites de controle. Entretanto, existe o risco α de surgir um ponto na região de ação do gráfico, gerando um alarme; neste caso, um alarme falso. A ocorrência de um alarme falso é ilustrada na Figura 2.

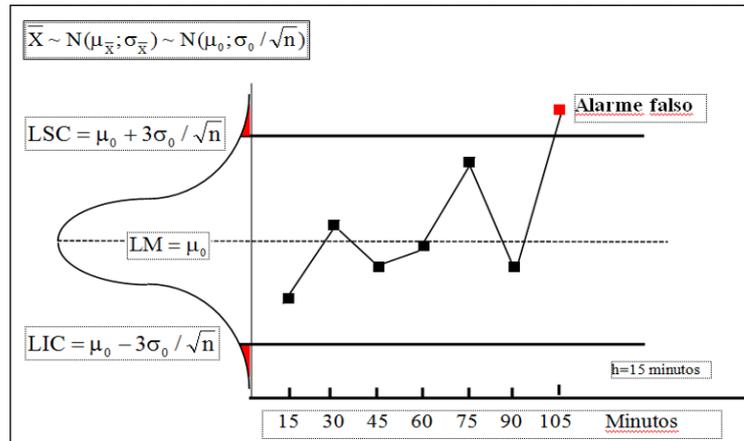


Figura 2: Gráfico de \bar{X} – ocorrência de um alarme falso.
Fonte: Adaptado de Costa, Epprecht e Carpinetti (2005, p. 29)

A Figura 3 ilustra a inércia do gráfico em sinalizar uma causa especial que altera a média do processo, ou seja, $\mu \neq \mu_0$. O sinal só ocorre quando o 5º ponto, correspondente a média \bar{X} da 5ª amostra, cai na região de ação do gráfico.

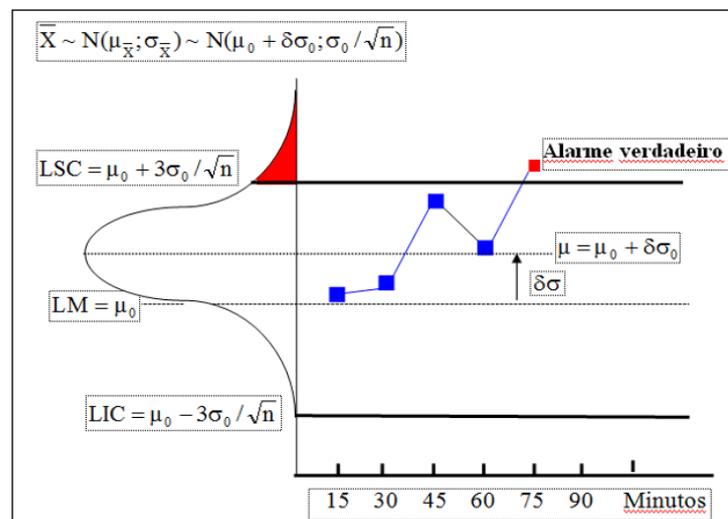


Figura 3. Gráfico de \bar{X} – ocorrência de um alarme verdadeiro
Fonte: Adaptado de Costa, Epprecht e Carpinetti (2005, p. 70)

O gráfico de controle da amplitude amostral é amplamente empregado para monitorar a variabilidade de um processo. Os limites de controle são ajustados em relação à linha média do gráfico, ou seja:

$$LSC_R = \mu_R + k\sigma_R \quad (5)$$

$$LM_R = \mu_R \quad (6)$$

$$LIC_R = \max\{0; \mu_R - k\sigma_R\} \quad (7)$$



sendo: k o fator de abertura dos limites de controle; $\mu_R = d_2\sigma_0$ e $\sigma_R = d_3\sigma_0$ a média e o desvio padrão da distribuição da amplitude amostral. Os valores de d_2 e d_3 são constantes dependem apenas do tamanho da amostra n e σ_0 é o desvio padrão do processo em controle. Tippett (1925), Mahoney (1998) e Kao e Ho (2007) apresentam como calcular as constantes $d_2(n)$ e $d_3(n)$ quando a característica de qualidade possui distribuição normal e não normal.

Este artigo emprega a abordagem apresentada por Sampaio, Leoni e Távora (2014) para construção do GC R . A técnica consiste em utilizar limites de controle considerando um valor predeterminado para o risco α (alarme falso). Os autores consideram para tal a distribuição amostral da amplitude relativa (w). Por exemplo, fixando o valor de $\alpha=0,01$, calculam-se as probabilidades $P[W < w_{\text{inf}}]=0,005$ e $P[W > w_{\text{sup}}]=0,005$. As equações (5) e (7), tornam-se:

$$LSC_R = w_{\text{sup}}\hat{\sigma}_0 \quad (8)$$

$$LIC_R = w_{\text{inf}}\hat{\sigma}_0 \quad (9)$$

Duas vantagens são verificadas com essa abordagem: o resultado de (9) não pode ser negativo, permitindo detectar melhoria no processo, ou seja, se há redução de variabilidade. A segunda vantagem se refere ao uso de $k=3$ -sigma. na equação (7), essa abordagem tradicional leva a valores menores que o LIC_R calculado em (9), ou seja, o risco α é maior na abordagem tradicional.

Consideram-se duas fases na construção de um gráfico de controle: uma fase de construção e ajuste dos dados (fase 1) e outra de monitoramento e controle do processo (fase 2). Na fase 1 os parâmetros dos gráficos de controle são estimados e na fase 2 ocorre o monitoramento propriamente dito, ou seja, amostras são controladas ao longo do tempo para identificar causas especiais atuantes no processo.

3. PROCESSO DE INSTALAÇÃO DO TETO PANORÂMICO

O processo de instalação do um teto panorâmico em veículos automotivos consiste na preparação de um vidro e aplicação de uma cola de poliuretano (PU). O vidro a ser fixado no teto do veículo automotivo (ver Figura 5) recebe uma cola de poliuretano aplicada por um robô pré-parametrizado com as especificações da quantidade de cola e, em seguida, o vidro é colado no teto do veículo.



Panoramic Roof

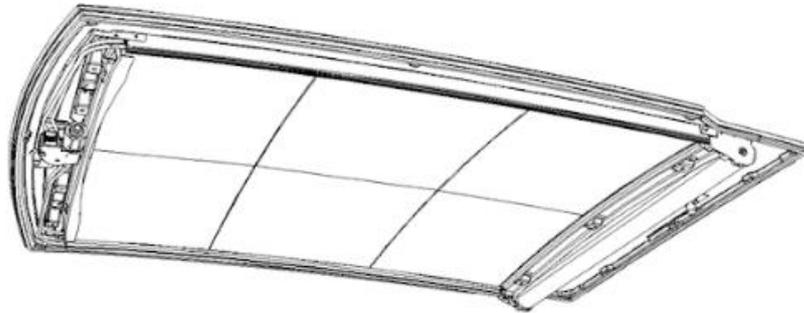


Figura 4: Imagem ilustrativa do teto panorâmico.
Fonte: Central de Engenharia da indústria automotiva.

O processo de instalação do teto panorâmico é apresentado na Figura 4. As etapas sequenciais são:

- i) Recebimento e verificação do pedido de montagem: o operador possui em sua estação de trabalho uma baia onde diariamente os vidros são trazidos do estoque e colocados de forma sequenciada por número de identificação na ordem de produção. Um leitor de código via *wireless* é usado para verificar o número de identificação do vidro do teto panorâmico que será montado na estação de trabalho.
- ii) Seleção do teto: o operador scaneia o código do teto. Se a luz que aparece no identificador de códigos for verde, significa que é o vidro correto para montagem no carro e ele pode prosseguir para o próximo passo, se for vermelha, ele procura pelo vidro correto.
- iii) Aplicação da Cola PU: o operador apanha o vidro com um manipulador a vácuo e o posiciona na mesa para o robô aplicar a cola de poliuretano.
- iv) Instalação do teto: o operador retira o vidro da mesa de aplicação com o manipulador e o posiciona no teto do veículo. Existem sensores que auxiliam no posicionamento correto do vidro. Se uma luz verde for acionada, a instalação pode ser concluída. Se a luz vermelha acende, o vidro deve ser reposicionado.

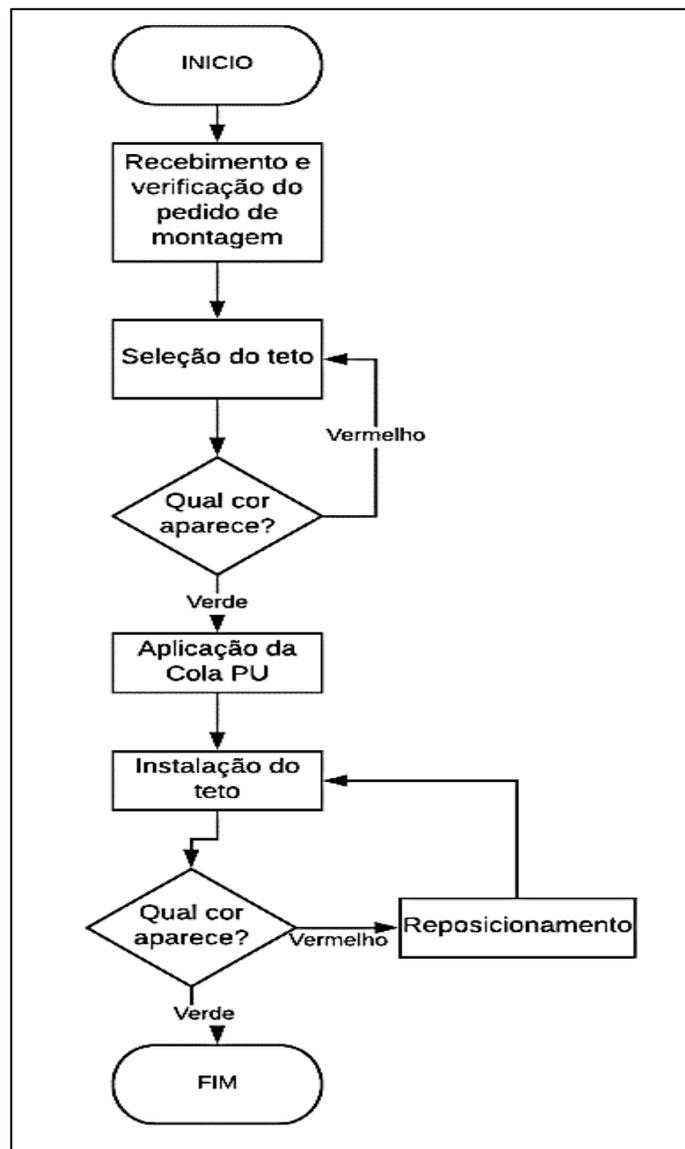


Figura 5: Fluxograma do processo.

Fonte: Adaptado da central de Engenharia da indústria automotiva.

Neste processo duas características de qualidade são consideradas críticas em relação a qualidade e segurança para o cliente: a altura e o comprimento da cola (Figuras 6 e 7). Este processo deve ser controlado pois se o excesso de cola ultrapassar as margens de aplicação se torna visível para o cliente. A quantidade de cola abaixo do especificado permite que entre água, vento ou poeira pelas frestas criadas nos pontos de deficiência do material, interferindo na segurança do cliente.

Os limites de especificação da altura da cola são: limite inferior de especificação = 10 mm e limite superior de especificação = 14 mm. Os limites de especificação do comprimento da cola são: limite inferior de especificação = 6 mm e limite superior de especificação = 10 mm. Esses limites podem ser empregados para calcular a capacidade do processo e assim avaliar o quanto o processo consegue atender as especificações.

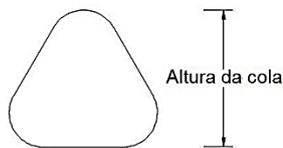


Figura 6: Vista frontal em corte.
Fonte: Os próprios autores.



Figura 7: Vista de cima.
Fonte: Os próprios autores.

O processo de aplicação de cola realizado pelo robô deve, em teoria, se repetir igualmente em todas as aplicações. Porém, por infinitos fatores externos, manutenção do equipamento, temperatura e umidade, dilatação do produto, troca de fornecedor de PU, podem atuar no processo, fazendo com que os valores de comprimento e altura da cola sejam modificados.

Existe um teto panorâmico para teste disponível para avaliar o desempenho do robô em relação a aplicação da cola. Diariamente um operador treinado coleta uma amostra da altura e comprimento da cola em 6 pontos (F1 a F6) do teto panorâmico (Figura 8). O teto é preparado com uma fita adesiva nas margens do vidro e a cola é colocada por cima da fita. Após o tempo de secagem da cola, o operador mensura a altura e o comprimento da cola com um paquímetro. O mesmo teto é utilizado para teste na próxima coleta diária.

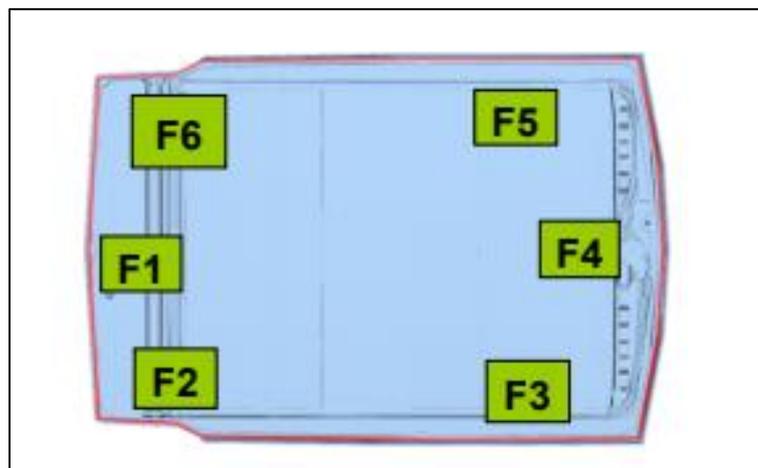


Figura 8: Pontos de medição (F1 a F6).
Fonte: Central de Engenharia da indústria automotiva.

4. MONITORAMENTO DO PROCESSO

A principal contribuição deste artigo é estimar os limites de controle para o gráfico de controle de \bar{X} e R. Durante o período de coleta de amostras destinadas à construção dos gráficos de controle processo está sujeito a reincidência de causas especiais; portanto é razoável iniciar a construção dos gráficos de controle pelo gráfico da amplitude. A estatística \bar{R} usada para estimar σ_0 é insensível a causas especiais que alteram apenas a média do processo.

Para estimar os limites de controle, seguiu-se o conceito de subgrupos racionais que preconiza a retirada de pequenas amostras a intervalos de tempo regulares (MONTGOMERY,



2009; LEONI; COSTA; MACHADO, 2015). São selecionadas 50 amostras de tamanho $n=6$ para a construção do GC R (ver Apêndice A). Com o processo isento de causas especiais, os limites para o GC R foram estimados utilizando a abordagem tratada em Sampaio, Leoni e Távora (2014). O desvio padrão do processo foi estimado pela equação: $\hat{\sigma}_0 = \bar{R} / d_2$. O desvio padrão estimado da variável altura foi $\hat{\sigma}_{0,altura} = 0,3892 / 2,534 = 0,153591$. O desvio padrão estimado do variável comprimento foi $\hat{\sigma}_{0,comprimento} = 0,6956 / 2,534 = 0,274507$.

Tradicionalmente, o uso de $k=3$ é usado para controle em que o número médio de amostras para ocorrer um alarme falso - $NMA_0=370,4$, ou seja, o risco $\alpha = 0,0027$. Porém, esse resultado não é válido para o GC R , pois a distribuição amostral da amplitude não é normal. Aplicando a função apresentada no apêndice de Sampaio, Leoni e Távora (2014), obtêm-se os resultados da Figura 9.

| GCR(6, 370.4) | | | | | | | | |
|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| [1] "winf" | | | | | | | | |
| [1] 0.57 | | | | | | | | |
| [1] "wsup" | | | | | | | | |
| [1] 5.52 | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| lambda | 1.5000 | 2.0000 | 2.5000 | 3.0000 | 3.5000 | 4.0000 | 4.5000 | 5.0000 |
| Poder | 0.0967 | 0.3706 | 0.6242 | 0.7846 | 0.8753 | 0.9257 | 0.9542 | 0.9709 |
| NMA | 10.3460 | 2.6984 | 1.6020 | 1.2745 | 1.1425 | 1.0802 | 1.0480 | 1.0300 |

Figura 9: Resultado da aplicação da função GCR (n, NMA_0) apresentada no apêndice.
Fonte: os próprios autores.

A Figura 9 fornece os limites: $w_{inf} = 0,57$ e $w_{sup} = 5,52$. De acordo com o exemplo, teríamos $LIC_R = 0,57\hat{\sigma}_0$ e $LSC_R = 5,52\hat{\sigma}_0$. Os limites estimados para o GC são:

$$LIC_{R,altura} = 0,0875; LSC_{R,altura} = 0,8478; LIC_{R,comprimento} = 0,1565; LSC_{R,comprimento} = 1,5153$$

Observa-se, também na Figura 9, que para desvios da ordem de $\sigma_1 = \lambda\sigma_0$, o poder e o NMA do GC R são apresentados. Por exemplo: se $\lambda = 2$, o gráfico demora em média 2,6984 amostras para sinalizar uma causa especial que provoca mudança ($\sigma_1 = 2\sigma_0$) no desvio padrão do processo.

Seguindo o método proposto por Costa, Epprecht e Carpinetti (2005), ao utilizar a amplitude média para estimar a variabilidade do processo, estamos supondo que o processo esteve em controle durante a retirada das amostras; essa hipótese precisa ser confirmada. Se a amplitude de alguma amostra está na região de ação do gráfico de controle, um trabalho de investigação deve ser realizado para diagnosticar a causa especial que aumentou a variabilidade. Esse processo decisório é ilustrado no Apêndice B.

Os gráficos para amplitude são ilustrados nas Figuras 10 e 11. No processo não foi identificado pontos na região de ação dos gráficos de controle, apenas a amostra 39 da variável altura (Figura 10) apresentou valor ligeiramente inferior ao LIC . Como esse valor não indica



aumento da variabilidade do processo, decidiu-se por manter os limites calculados para monitorar o processo de aplicação de cola PU em veículos automotivos.

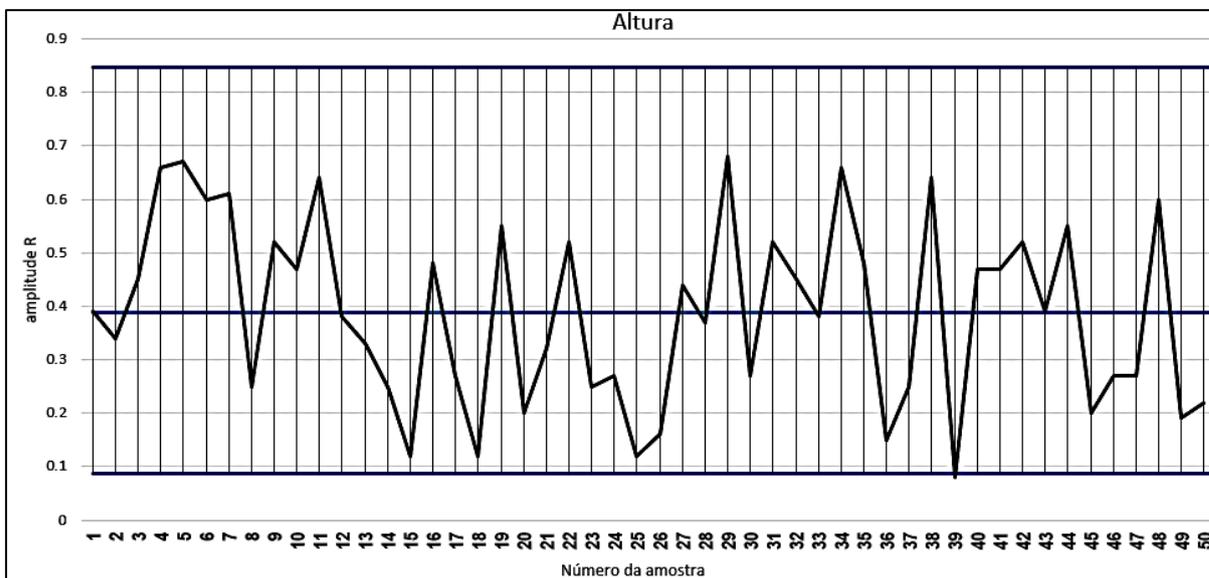


Figura 10: Gráfico da amplitude R - altura.

Fonte: os próprios autores.

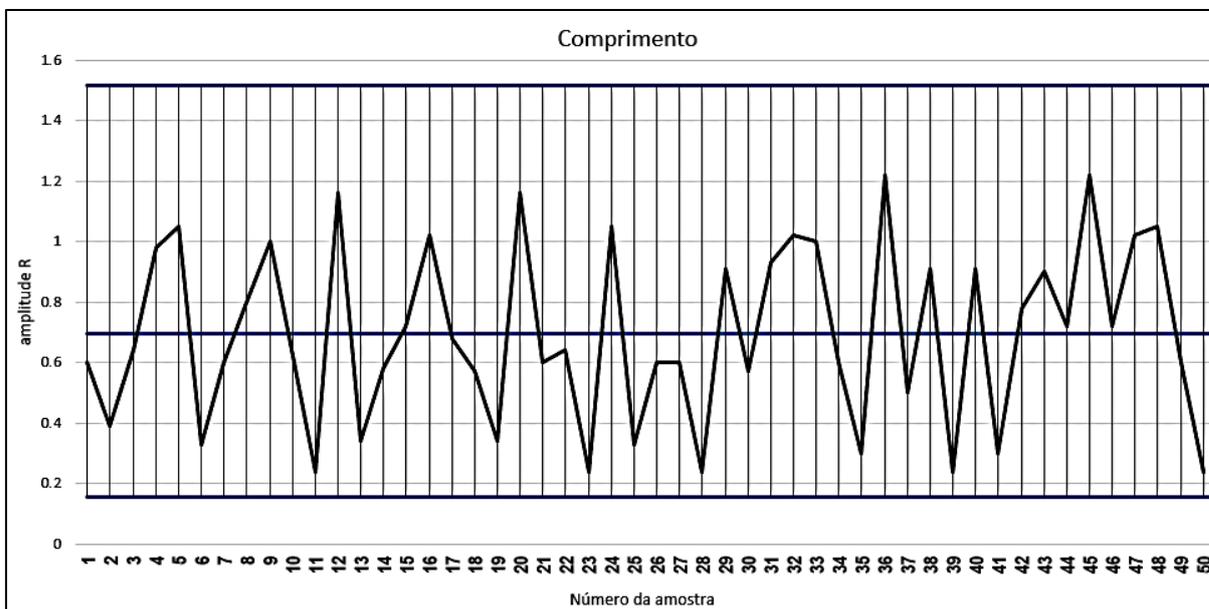


Figura 11: Gráfico da amplitude R - comprimento.

Fonte: os próprios autores.

Depois de estimar os limites de controle dos gráficos para monitorar a amplitude R, deve-se estimar os limites de controle dos gráficos para monitorar a média:

$$LIC_{\bar{X}, altura} = 10,6354 - 3 \frac{0,15360}{\sqrt{6}} = 10,4473; \quad LSC_{\bar{X}, altura} = 10,6354 + 3 \frac{0,15360}{\sqrt{6}} = 10,8235$$



$$LIC_{\bar{X}, \text{comprimento}} = 8,5011 - 3 \frac{0,2745}{\sqrt{6}} = 8,1649 ; LSC_{\bar{X}, \text{comprimento}} = 8,5011 + 3 \frac{0,2745}{\sqrt{6}} = 8,8373$$

Os gráficos para monitorar a média são ilustrados nas Figuras 12 e 13. No processo não foi identificado pontos na região de ação dos gráficos de controle, ou seja, acredita-se que o processo esteja isento de causas especiais que tiram a média do valor alvo. Os limites estimados são indicados para monitorar o processo de aplicação de cola PU em veículos automotivos.

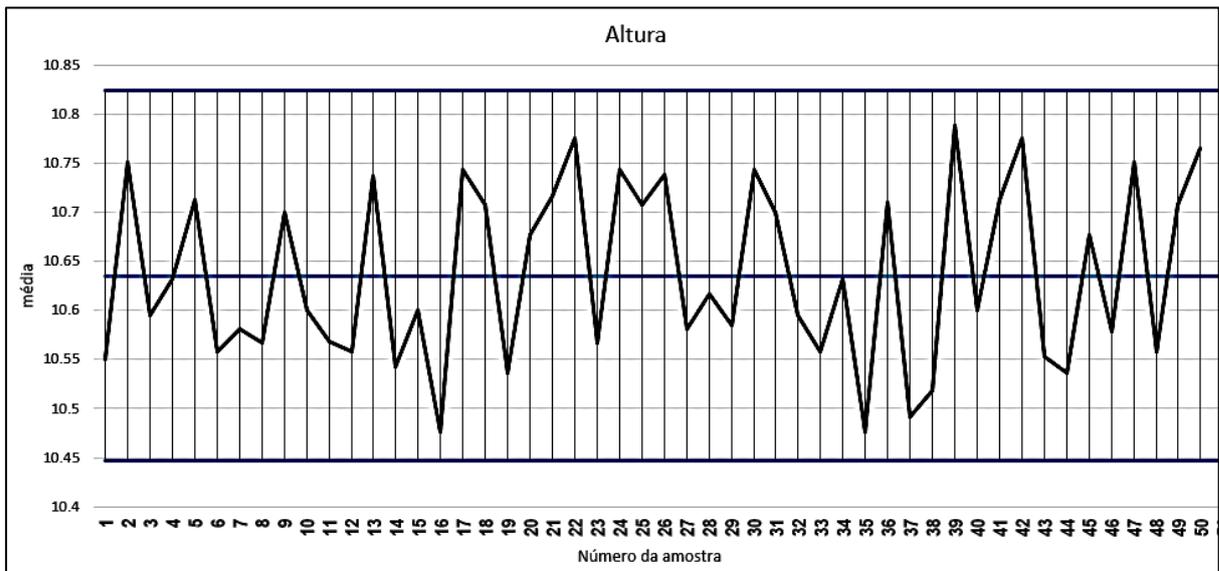


Figura 12: Gráfico da média \bar{X} – altura.

Fonte: os próprios autores.

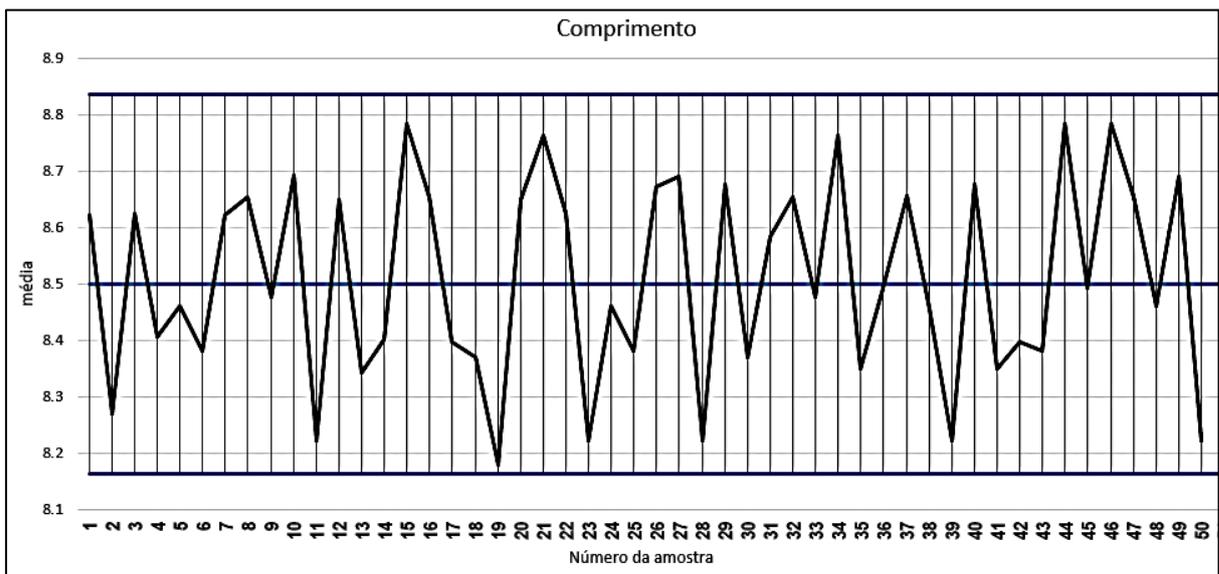


Figura 13: Gráfico da média \bar{X} – comprimento.

Fonte: os próprios autores.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como principal objetivo estimar os limites dos gráficos de controle para monitorar a média e a variabilidade de um processo de fixação de vidro em um veículo automotivo. Empregou-se metodologia diferenciada para a construção do gráfico de controle para amplitude amostral. A estimativa de um limite inferior de controle possibilita avaliar se há melhoria no processo, ou seja, se há redução de variabilidade. Além disso, estabeleceu-se um controle adequado para o erro tipo I no desenho do gráfico de controle, ou seja, o número médio de alarmes falsos é calculado com precisão.

Os gráficos para monitorar o valor médio e a amplitude das características de qualidade: altura e comprimento da quantidade de cola são as principais contribuições presentes na pesquisa. Esses gráficos podem auxiliar gestores de qualidade no monitoramento e acompanhamento desse processo tanto na indústria 4.0 quanto em nossa indústria atual.

O monitoramento simultâneo de duas ou mais variáveis vem sendo pesquisado por diversos autores (LEONI; MACHADO; COSTA, 2015; SIMÕES et al., 2016; LEONI; COSTA, 2017). Esta parece ser uma proposta interessante para pesquisa futura. Outras propostas são: avaliar a capacidade do processo produtivo e a adequação do sistema de medição.

6. REFERÊNCIAS

CAMPOS, V. F. **Controle de qualidade total no estilo japonês**. 8. ed. Nova Lima - MG: INDG tecnologia e serviços Ltda, 2004.

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

DEMING, W. E. **Qualidade: a revolução da administração**. Rio de Janeiro - RJ: Marques Saraiva, 1990.

JACOBI, L. F.; SOUZA, A. M.; PEREIRA, J. E. da S. Gráfico de controle de regressão aplicado na monitoração de processos. **Production**, v. 12, n. 1, p. 46–59, 2002. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132002000100005&lng=pt&tlng=pt>.

KAO, S. C.; HO, C. Robustness of R-chart to non normality. **Communications in Statistics: Simulation and Computation**, v. 36, n. 5, p. 1089–1098, 2007.

LEONI, R. C.; COSTA, A. F. B. O AMBIENTE R COMO PROPOSTA DE APOIO AO ENSINO NO MONITORAMENTO DE PROCESSOS. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 83–96, 2012. Disponível em:
<<http://www.podesenvolvimento.org.br/inicio/index.php?journal=podesenvolvimento&page=article&op=view&path%5B%5D=122>>.

LEONI, R. C.; COSTA, A. F. B. Monitoring bivariate and trivariate mean vectors with a Shewhart chart. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, n. 8, p. 2035–2042, 26 dez. 2017. Disponível em:
<<http://doi.wiley.com/10.1002/qre.2165>>.

LEONI, R. C.; COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. The effect of the autocorrelation on the performance of the T2 chart. **European Journal of Operational Research**, v. 247, n. 1, p. 155–165, nov. 2015. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221715004890>>.

LEONI, R. C.; MACHADO, M. A. G.; COSTA, A. F. B. Simultaneous Univariate \bar{X} Charts to Control Bivariate Processes with Autocorrelated Data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 31, n. 8, p. 1641–1648, dez. 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qre.1697>>.



- MAHONEY, J. F. The influence of parent population distribution on d2. **IIE Transactions**, v. 30, n. 6, p. 563–569, 1998.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6. ed. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc., 2009.
- NASIR, N.; HASHIM, A. Y. B.; FAUADI, M. H. F. M.; ITO, T. Statistical process control as a traceability tools for industry 4.0. In: Mechanical Engineering Research Day, **Anais...**2018.
- REIS, M.; GINS, G. Industrial Process Monitoring in the Big Data/Industry 4.0 Era: from Detection, to Diagnosis, to Prognosis. **Processes**, v. 5, n. 4, p. 35, 30 jun. 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2227-9717/5/3/35>>.
- SAMPAIO, N. A. D. S.; LEONI, R. C.; TAVORA, R. C. M. UMA FUNÇÃO ESCRITA NA LINGUAGEM R PARA OBTER OS PARÂMETROS DO GRÁFICO DE CONTROLE DA AMPLITUDE AMOSTRAL. **Cadernos do IME - Série Estatística**, v. 36, n. 9, p. 1689–1699, 6 out. 2014. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/cadest/article/view/15757>>. Acesso em: 27 nov. 2014.
- SHEWHART, W. A. The application of statistics as an aid in maintaining quality of a manufactured product. **Journal of the American Statistical Association**, v. 20, n. 152, p. 546–548, 1925.
- SHEWHART, W. A.; DEMING, W. E. In Memoriam: Walter A. Shewhart, 1891–1967. **The American Statistician**, v. 21, n. 2, p. 39–40, abr. 1967. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00031305.1967.10481808>>.
- SIMÕES, F. D.; LEONI, R. C.; MACHADO, M. A. G.; COSTA, A. F. B. Synthetic charts to control bivariate processes with autocorrelated data. **Computers & Industrial Engineering**, v. 97, p. 15–25, jul. 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835216301085>>.
- TIPPETT, L. H. C. On the extreme individuals and the range of samples taken from a normal population. **Biometrika**, v. 17, p. 364–386, 1925.

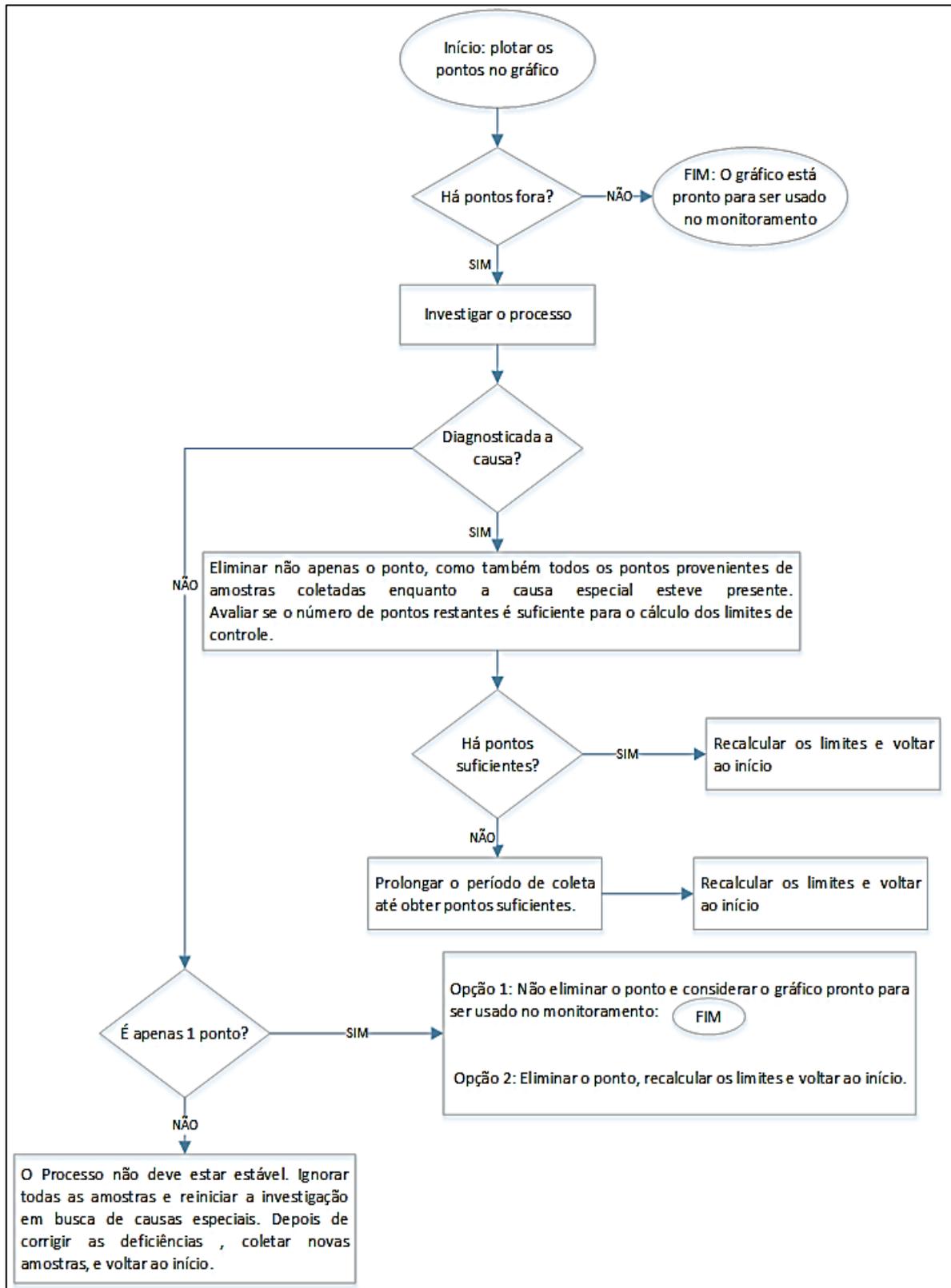


APÊNDICE A– Amostras da altura e comprimento do processo de cola PU no teto panorâmico.

| AMOSTRA | ALTURA | | | | | | COMPRIMENTO | | | | | |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|------|------|------|------|------|
| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 |
| 1 | 10,71 | 10,58 | 10,50 | 10,36 | 10,40 | 10,75 | 8,40 | 8,52 | 8,61 | 8,60 | 9,00 | 8,60 |
| 2 | 10,80 | 10,50 | 10,81 | 10,79 | 10,84 | 10,77 | 8,25 | 8,34 | 8,19 | 8,10 | 8,25 | 8,49 |
| 3 | 10,63 | 10,58 | 10,53 | 10,85 | 10,58 | 10,40 | 8,36 | 8,47 | 8,38 | 9,00 | 8,54 | 9,00 |
| 4 | 10,47 | 10,61 | 10,69 | 11,10 | 10,48 | 10,44 | 8,98 | 8,37 | 8,40 | 8,46 | 8,23 | 8,00 |
| 5 | 10,56 | 10,57 | 11,23 | 10,61 | 10,64 | 10,67 | 7,95 | 8,26 | 8,24 | 9,00 | 8,32 | 9,00 |
| 6 | 10,60 | 10,40 | 11,00 | 10,45 | 10,50 | 10,40 | 8,34 | 8,23 | 8,56 | 8,42 | 8,32 | 8,42 |
| 7 | 10,63 | 10,39 | 11,00 | 10,48 | 10,58 | 10,41 | 8,40 | 8,52 | 8,61 | 8,60 | 9,00 | 8,60 |
| 8 | 10,59 | 10,48 | 10,63 | 10,47 | 10,51 | 10,72 | 9,00 | 8,20 | 8,79 | 8,75 | 8,44 | 8,75 |
| 9 | 10,75 | 10,77 | 10,75 | 10,81 | 10,82 | 10,30 | 8,56 | 8,47 | 8,47 | 8,36 | 9,00 | 8,00 |
| 10 | 10,64 | 10,56 | 10,53 | 10,88 | 10,58 | 10,41 | 8,59 | 8,40 | 8,42 | 8,88 | 9,02 | 8,85 |
| 11 | 10,45 | 10,63 | 10,64 | 10,25 | 10,89 | 10,55 | 8,25 | 8,34 | 8,19 | 8,10 | 8,25 | 8,20 |
| 12 | 10,41 | 10,66 | 10,79 | 10,54 | 10,48 | 10,47 | 7,78 | 8,90 | 8,85 | 8,88 | 8,94 | 8,55 |
| 13 | 10,75 | 10,77 | 10,75 | 10,50 | 10,82 | 10,83 | 8,50 | 8,21 | 8,33 | 8,51 | 8,17 | 8,34 |
| 14 | 10,47 | 10,61 | 10,69 | 10,57 | 10,48 | 10,44 | 8,32 | 8,70 | 8,70 | 8,33 | 8,25 | 8,12 |
| 15 | 10,56 | 10,57 | 10,55 | 10,61 | 10,64 | 10,67 | 8,40 | 8,78 | 8,70 | 9,00 | 8,70 | 9,12 |
| 16 | 10,23 | 10,50 | 10,71 | 10,30 | 10,60 | 10,52 | 7,92 | 8,90 | 8,85 | 8,88 | 8,94 | 8,44 |
| 17 | 10,81 | 10,75 | 10,88 | 10,61 | 10,69 | 10,72 | 8,78 | 8,50 | 8,70 | 8,10 | 8,21 | 8,10 |
| 18 | 10,71 | 10,74 | 10,69 | 10,78 | 10,66 | 10,67 | 8,21 | 8,32 | 8,41 | 8,25 | 8,78 | 8,25 |
| 19 | 10,34 | 10,46 | 10,56 | 10,89 | 10,35 | 10,62 | 8,00 | 8,34 | 8,19 | 8,10 | 8,25 | 8,20 |
| 20 | 10,78 | 10,76 | 10,67 | 10,62 | 10,65 | 10,58 | 7,78 | 8,90 | 8,85 | 8,88 | 8,94 | 8,55 |
| 21 | 10,91 | 10,89 | 10,68 | 10,60 | 10,63 | 10,59 | 8,40 | 8,78 | 8,70 | 9,00 | 8,70 | 9,00 |
| 22 | 10,67 | 10,87 | 10,76 | 11,02 | 10,50 | 10,83 | 8,36 | 8,47 | 8,38 | 9,00 | 8,54 | 9,00 |
| 23 | 10,59 | 10,48 | 10,63 | 10,47 | 10,51 | 10,72 | 8,25 | 8,34 | 8,19 | 8,10 | 8,25 | 8,20 |
| 24 | 10,81 | 10,75 | 10,88 | 10,61 | 10,69 | 10,72 | 7,95 | 8,26 | 8,24 | 9,00 | 8,32 | 9,00 |
| 25 | 10,71 | 10,74 | 10,69 | 10,78 | 10,66 | 10,67 | 8,34 | 8,23 | 8,56 | 8,42 | 8,32 | 8,42 |
| 26 | 10,79 | 10,74 | 10,75 | 10,81 | 10,65 | 10,69 | 8,81 | 8,85 | 8,25 | 8,70 | 8,72 | 8,70 |
| 27 | 10,67 | 10,64 | 10,33 | 10,51 | 10,77 | 10,57 | 8,73 | 8,84 | 8,24 | 8,81 | 8,72 | 8,81 |
| 28 | 10,82 | 10,45 | 10,48 | 10,75 | 10,65 | 10,55 | 8,25 | 8,34 | 8,19 | 8,10 | 8,25 | 8,20 |
| 29 | 10,57 | 10,65 | 10,55 | 10,21 | 10,64 | 10,89 | 9,00 | 9,05 | 8,87 | 8,75 | 8,14 | 8,25 |
| 30 | 10,81 | 10,75 | 10,88 | 10,61 | 10,69 | 10,72 | 8,21 | 8,32 | 8,41 | 8,25 | 8,78 | 8,25 |
| 31 | 10,75 | 10,77 | 10,75 | 10,81 | 10,82 | 10,30 | 7,97 | 8,90 | 8,71 | 8,88 | 8,74 | 8,31 |
| 32 | 10,63 | 10,58 | 10,53 | 10,85 | 10,58 | 10,40 | 7,92 | 8,90 | 8,85 | 8,88 | 8,94 | 8,44 |
| 33 | 10,41 | 10,66 | 10,79 | 10,54 | 10,48 | 10,47 | 8,56 | 8,47 | 8,47 | 8,36 | 9,00 | 8,00 |
| 34 | 10,47 | 10,61 | 10,69 | 11,10 | 10,48 | 10,44 | 8,40 | 8,78 | 8,70 | 9,00 | 8,70 | 9,00 |
| 35 | 10,23 | 10,50 | 10,71 | 10,30 | 10,60 | 10,52 | 8,18 | 8,37 | 8,48 | 8,41 | 8,25 | 8,41 |
| 36 | 10,78 | 10,78 | 10,72 | 10,72 | 10,63 | 10,63 | 8,00 | 8,23 | 8,11 | 8,41 | 9,22 | 8,99 |
| 37 | 10,40 | 10,50 | 10,40 | 10,50 | 10,50 | 10,65 | 8,57 | 8,56 | 8,45 | 8,95 | 8,75 | 8,66 |
| 38 | 10,56 | 10,66 | 10,32 | 10,47 | 10,23 | 10,87 | 8,11 | 8,22 | 8,09 | 8,44 | 9,00 | 8,88 |
| 39 | 10,75 | 10,77 | 10,75 | 10,81 | 10,82 | 10,83 | 8,25 | 8,34 | 8,19 | 8,10 | 8,25 | 8,20 |
| 40 | 10,64 | 10,56 | 10,53 | 10,88 | 10,58 | 10,41 | 9,00 | 9,05 | 8,87 | 8,75 | 8,14 | 8,25 |
| 41 | 10,52 | 10,58 | 10,59 | 10,78 | 10,82 | 10,99 | 8,18 | 8,37 | 8,48 | 8,41 | 8,25 | 8,41 |
| 42 | 10,67 | 10,87 | 10,76 | 11,02 | 10,50 | 10,83 | 8,65 | 7,87 | 8,32 | 8,54 | 8,47 | 8,54 |
| 43 | 10,39 | 10,41 | 10,46 | 10,78 | 10,65 | 10,63 | 8,25 | 8,39 | 8,45 | 8,10 | 9,00 | 8,10 |
| 44 | 10,34 | 10,46 | 10,56 | 10,89 | 10,35 | 10,62 | 8,40 | 8,78 | 8,70 | 9,00 | 8,70 | 9,12 |
| 45 | 10,78 | 10,76 | 10,67 | 10,62 | 10,65 | 10,58 | 8,00 | 8,23 | 8,11 | 8,41 | 9,22 | 8,99 |
| 46 | 10,60 | 10,48 | 10,67 | 10,47 | 10,51 | 10,74 | 8,40 | 8,78 | 8,70 | 9,00 | 8,70 | 9,12 |
| 47 | 10,87 | 10,75 | 10,88 | 10,61 | 10,69 | 10,71 | 7,92 | 8,90 | 8,85 | 8,88 | 8,94 | 8,44 |
| 48 | 10,60 | 10,40 | 11,00 | 10,45 | 10,50 | 10,40 | 7,95 | 8,26 | 8,24 | 9,00 | 8,32 | 9,00 |
| 49 | 10,80 | 10,68 | 10,82 | 10,65 | 10,63 | 10,67 | 8,73 | 8,84 | 8,24 | 8,81 | 8,72 | 8,81 |
| 50 | 10,70 | 10,80 | 10,74 | 10,92 | 10,73 | 10,70 | 8,25 | 8,34 | 8,19 | 8,10 | 8,25 | 8,20 |



APÊNDICE B - Estabelecimento dos limites para o gráfico de controle.



Fonte: Adaptado de Costa, Epprecht e Carpinetti (2005, p. 70).