

Implementação de Controle Estatístico de Processos em uma etapa do processo de galvanização de arames: estudo de caso no processo de decapagem ácida

Autor: Eduardo Follmer (FENG/PUCRS) follmer.eduardo@gmail.com
Orientador: Hélio Radke Bittencourt (FAMAT/PUCRS) heliorb@puccrs.br

Resumo: Para manter qualidade e competitividade, empresas têm utilizado práticas de inspeções nos produtos e processos a fim de garantir que os mesmos cheguem aos clientes com as especificações desejadas. A implementação do Controle Estatístico do Processo (CEP) consiste de uma das práticas mais adotadas para acompanhamento de características críticas de qualidade ao longo da linha de produção. Com a finalidade de reduzir perdas durante o processo de decapagem ácida no processo de galvanização, este trabalho propõe uma utilização de ferramentas estatísticas de CEP sobre dados históricos, uma comparação do processo atual com dados históricos, uma análise do problema e uma proposta de melhoria. Os resultados encontrados permitiram identificar causas de variação indesejáveis e, como consequência, apresentar uma proposição de método para diminuição da variabilidade com redução nas perdas.

Palavras-chave: Controle Estatístico de Processo (CEP), Siderurgia, Decapagem Ácida, Regressão Linear Múltipla, Análise de Capacidade.

1. INTRODUÇÃO

A capacidade de produção de produtos galvanizados no Brasil tem experimentado um crescimento da ordem de 100 mil toneladas por ano a partir de 2011. De acordo com dados da ICZ (2012), de 2011 para 2012 registrou-se aumento na capacidade total instalada de 450 para 560 mil toneladas. A previsão para o ano corrente é de 675 mil toneladas, o que representa um crescimento de 50% em dois anos. Este aumento na capacidade deve-se principalmente a investimentos em novas plantas. Contudo, há possibilidade de otimizar a produtividade com a melhoria dos processos, de forma que as perdas sejam minimizadas e as especificações sejam atendidas.

Para manter a qualidade e a consequente competitividade, as empresas utilizam a prática de inspeções nos produtos e processos que garantem que os mesmos cheguem aos clientes com as especificações desejadas. Porém, além de gerar custos, Montgomery e Runger (2009) afirmam que inspecionar os produtos é uma ideia impraticável, o processo deve ser estável e capaz de garantir que o produto seja feito corretamente já na primeira vez, evidenciando assim a necessidade de ter-se o conhecimento da variabilidade do processo. No processo que foi foco deste estudo, uma das causas de variação nas especificações do produto, é a variação na concentração de ácido clorídrico na cuba de decapagem ácida, podendo esta estar abaixo do mínimo especificado e consequentemente não decapando corretamente, ou a cima, causando desperdício do ácido utilizado na decapagem. Considerando que este ácido é

um material de alto valor agregado e que pode causar impacto no meio ambiente, existe forte interesse na redução do volume utilizado por meio da redução de perdas durante o processo, além de garantir que o mesmo esteja sempre com a concentração em torno do valor alvo para reduzir as perdas metálicas por produção de material não conforme em função variação desta concentração, que quando baixa não decapa corretamente, e quando alta gera desperdício de ácido. Para tanto, o processo deve ser capaz de garantir baixos índices de desperdícios de insumos e consequente baixo custo de produção, através da baixa variabilidade e correto ajuste do processo.

Nesse sentido, o Controle Estatístico de Processo (CEP) é recomendado por ser um método simples que possibilita, em tempo real, verificar se o processo está operando sem a presença de causas especiais de variação. De acordo com Souza e Rigão (2005), o CEP atua de maneira preventiva sobre o processo utilizando a estatística como elemento base para avaliar suas alterações. Estas características possibilitam que o CEP auxilie no monitoramento do processo e permite que as ações sejam tomadas de maneira direcionada a resolução dos problemas, auxiliando na estabilização do processo e evitando a produção de itens não conformes (HORA; COSTA, 2009; MAYER, 2004).

Conforme foi observado durante a aplicação do CEP em um processo siderúrgico, Stefani e Nodari (2008) identificaram, através de cartas de controle, variações no processo no momento em que elas estavam ocorrendo, e assim foi possível tratar as causas destas variações, mostrando melhoria imediata na medição seguinte, evitando que produtos defeituosos fossem produzidos. Em outro estudo, Rodrigues et al. (2010) faz uso de gráficos de controle e análise de capacidade em uma empresa siderúrgica de Minas Gerais. As ferramentas do CEP possibilitaram identificar que o processo era estatisticamente estável, porém não era capaz de atender algumas especificações impostas, gerando muitos produtos defeituosos e evidenciando a necessidade de estudo das causas das variações para melhoria do processo.

Considerando que além dos insumos para a realização da decapagem ácida, o material que está sendo galvanizado também possui alto valor agregado, por já ter passado pela aciaria onde foi fabricado o aço em forma de tarugo, a laminação deste para formação do fio máquina, e a trefilação do fio máquina para a formação do arame a ser galvanizado, este trabalho tem por objetivo geral realizar um estudo prático do processo de decapagem ácida de uma empresa do ramo siderúrgico visando à redução de perdas durante o processo.

Considerando que o “CEP é uma poderosa coleção de ferramentas de resolução de problemas, útil na obtenção de estabilidade do processo, e na melhoria da capacidade através da redução de variabilidade” (MONTGOMERY, 2004, p. 95), este estudo se dá por meio da aplicação de algumas destas ferramentas para identificação e redução das principais causas de variação do processo de decapagem ácida de trefilados de aço. Os objetivos específicos do estudo são: (a) comparar dados históricos do processo com situação atual; (b) identificar causas especiais no processo; (c) propor melhorias no processo.

Considerando-se a grande abrangência do CEP, número de técnicas disponíveis e a complexidade das mesmas, o estudo teve foco na metodologia e análise de cartas de controle, elaboração de diagrama de causa-e-efeito, teste de hipóteses, análise de regressão e de capacidade do processo. As demais ferramentas do CEP não serão abordadas nesse trabalho. Também não serão abordados os tipos de teste de normalidade e como realiza-los. Todas as ferramentas utilizadas e resultados gerados serão de uma única linha de produção sem intenção de inferir os resultados para as demais linhas da empresa. Os custos de implementação do CEP também não serão considerados. Todos os dados apresentados neste trabalho foram multiplicados por uma constante, assim como apenas algumas causas do diagrama de causa e efeito estão descritas para não expor informações da empresa.

Este trabalho está estruturado em cinco seções. Primeiramente foi apresentada a Introdução, onde foram discutidos o tema da pesquisa, os objetivos e as delimitações do trabalho. A segunda seção trata do Referencial Teórico, onde é feita a revisão dos principais autores da área e novas pesquisas, com o intuito de identificar as melhores práticas a serem adotadas. Em seguida, é apresentada a seção de Metodologia de Pesquisa, onde são definidas as características e metodologia trabalho. A aplicação prática, contendo a análise dos resultados obtidos, compõe a quarta seção. Por fim, têm-se as conclusões na seção cinco.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CEP

O primeiro passo para o desenvolvimento do controle estatístico de processos foi dado por Walter A. Shewhart, que desenvolveu e implementou na Bell Telephone Laboratories os gráficos de controle em 1924 (COSTA et al. 2005), que segundo Montgomery e Runger (2009) é uma das ferramentas básicas do controle estatístico de processo. As cartas de controle recebem ainda maior importância no estudo de Mayer (2004), que as considera a

principal ferramenta do CEP. De uma maneira geral Montgomery (2004) e Correa (2007) afirmam que o CEP proporciona um ambiente onde todos na organização buscam a melhoria contínua da qualidade e produtividade, e que uma vez implantadas as ferramentas elas se tornam rotineiras, contribuindo para a organização direcionar-se rumo aos seus objetivos.

Segundo Montgomery e Runger (2009) o CEP está fundamentado em sete ferramentas: (i) Apresentação em histogramas ou ramo-e-folhas, (ii) Folha de Controle, (iii) Gráfico de Pareto, (iv) Diagrama de causa-e-efeito, (v) diagrama de concentração de defeito, (vi) Diagrama de dispersão, e (vii) Gráfico de controle.

Neste estudo serão empregadas as ferramentas iv e vii juntamente com a análise de capacidade de processo e regressão linear múltipla. Para o correto andamento deste estudo, nos tópicos seguintes será feita a revisão teórica de cada uma destas ferramentas.

2.2 CARTAS DE CONTROLE (GRÁFICO DE CONTROLE)

A característica típica de uma carta de controle (CC) é de fazer uma representação gráfica de uma característica de qualidade, contendo uma linha central (LC) que consiste do valor médio das amostras, uma linha superior e inferior, denominados de limite superior de controle (LSC ou UCL) e limite inferior de controle (LIC ou LCL) (MONTGOMERY, 2004). Esses limites são utilizados como base para definir se o processo está ou não sob controle estatístico. Segundo Costa et al. (2005) e Henning et al. (2011), os limites de controle podem ser descritos pela média das amostras, que é a LC mais e menos três desvios-padrão dessa média para o LSC e LIC respectivamente.

Para que o processo seja considerado sob controle estatístico, Corrêa (2007) afirma que os pontos amostrais de uma variável qualquer devem estar situados dentro dos limites superior e inferior de controle conforme a carta A da Figura 1, além de estarem variando aleatoriamente em torno da linha central, ou seja, não podem existir pontos seguidos que representem alguma tendência nos dados. Esse tipo de comportamento caracteriza que apenas causas comuns, ou seja, variações inerentes ao processo estão agindo sobre o mesmo, e segundo Machado (2010) e Costa (2005), estas variações são inevitáveis e é preciso aprender a conviver com elas.

Além das causas comuns, Pedrini (2009) afirma que o processo também está sujeito a outro tipo de causas de variabilidade que aumentam de maneira significativa à variabilidade

do processo. São essas as chamadas causas especiais, que fazem com que uma amostra esteja fora dos limites de controle ou comportando-se de maneira não aleatória. Na carta B da Figura 1 pode-se observar exemplos de prováveis causas especiais nos pontos sinalizados com o número 1 que caracterizam o processo como fora de controle estatístico.

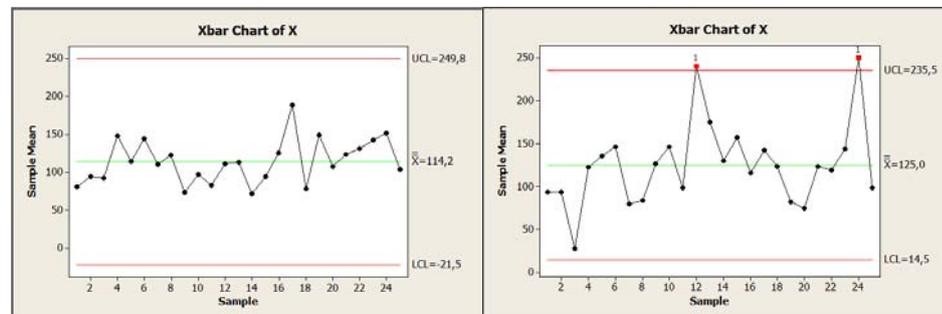


Figura A – sob controle estatístico

Figura B – fora de controle estatístico

Figura 1 – Cartas de Controle

Fonte: elaborado pelo autor (2013)

Um ponto além dos limites não é a única forma de detectar se um processo está fora de controle; existem ao menos outras dez regras de sensibilização para os gráficos de controle de Shewhart. Algumas destas regras foram propostas pela Western Electric (1956), estando entre elas à regra mais utilizada que é a de um ponto fora dos limites de controle, e as demais que podem ser englobadas dentro do quesito não aleatoriedade, como a regra de dois ou três pontos consecutivos fora dos limites de dois sigma ou uma sequência de oito pontos consecutivos em um mesmo lado da linha central (MONTGOMERY, 2004). Estas regras, porém, devem ser analisadas com cuidado, pois, para Samohyl (2009), o excesso de padrões e regras pode ocasionar um grande número de alarmes falsos, o erro tipo I explicado a seguir.

Para Montgomery (2004) e Machado (2010) as cartas de controle podem ser divididas em dois grupos: as CC para variáveis que são para valores contínuos como dimensão, peso e volume, e expressam as características de qualidade de algum produto; as CC para atributos são utilizadas quando estas características são de ordem quantitativa, mas é expressa de maneira não contínua, apenas em números inteiros como número de defeitos, ou então são qualitativas, onde os dados são classificados como conforme ou não conforme. As cartas que serão utilizadas neste estudo são as cartas para variáveis, visto que a característica de qualidade avaliada é quantitativa. Optou-se pelo gráfico de controle para médias amostrais $\bar{x} - R$ devido aos subgrupos serem formados por menos de 10 observações (KUME; 1993).

As cartas de controle para médias amostrais (\bar{x}) demonstram o comportamento da característica de qualidade ao longo do tempo, permitindo concluir se a mesma está sob

controle estatístico. Para tal, os limites de controle das CC \bar{x} são definidos de forma análoga aos intervalos de confiança, ou seja, cercando a estimativa média por uma região com alta probabilidade de conter o parâmetro. Embora seja usual fixar essa probabilidade, também conhecida como nível de confiança $(1-\alpha)$, em 95%, as CC são estruturadas com $1-\alpha=99,73\%$, o que corresponde a três erros-padrão, conforme Equação 1 (MONTGOMERY; 2004).

$$LSC = \bar{\bar{x}} + \frac{3}{d_2\sqrt{n}}\bar{R}$$

$$\text{Linha Central} = \bar{\bar{x}} \quad (1)$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - \frac{3}{d_2\sqrt{n}}\bar{R}$$

Onde:

$\bar{\bar{x}}$ = média das médias dos subgrupos

\bar{R} = média da amplitude dos subgrupos

n = tamanho da amostra

d_2 = constante para construção de gráficos de controle. Valor médio da distribuição baseada na razão entre a amplitude e o desvio-padrão para subgrupos de tamanho n

Como informação complementar às cartas \bar{x} as cartas de controle para amplitudes (R) permitem que seja identificado se há ou não variabilidade significativa no processo indicando se a variabilidade do processo está ou não sob controle e em qual momento isto ocorre. Os limites de controle para R dependem das médias das amplitudes, além do número de amostras dos subgrupos e podem ser calculados de acordo com a Equação 2.

$$LSC = \bar{R} + 3d_3\frac{\bar{R}}{d_2}$$

$$\text{Linha Central} = \bar{R} \quad (2)$$

$$LIC = \bar{R} - 3d_3\frac{\bar{R}}{d_2}$$

Onde:

\bar{R} = média da amplitude dos subgrupos

d_2 e d_3 = constante para construção de gráficos de controle, *dependentes do número de observações dos subgrupos*

$d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = \text{estimador para o desvio padrão}$

2.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é um teste de hipóteses amplamente utilizado em estatística experimental para investigar o efeito de uma variável qualitativa (utilizada para formação de grupos) sobre uma variável resposta quantitativa. A hipótese nula (H_0) da ANOVA é a de igualdade entre as médias dos k grupos: $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$. Com esta finalidade, Paese et al. (1999) e Downing e Clark (2002) afirmam que a ANOVA permite fazer um teste dos dados que possibilita esta comparação da igualdade das médias e identificação de diferenças significativas nos grupos. A lógica da ANOVA está na decomposição da variância total da variável resposta em duas partes: uma relacionada aos tratamentos ou grupos (entre tratamentos ou grupos) e outra relacionada ao erro experimental (dentro dos tratamentos ou grupos). Do ponto de vista prático, a hipótese nula da ANOVA será rejeitada se o *p-value* associado à estatística F resultante for inferior ao nível de significância (α) adotado.

2.4 TESTE DE HIPÓTESES E TIPOS DE ERROS

A análise de uma carta de controle pode ser interpretada em analogia a um teste de hipótese: ao considerar a LC como sendo a média do processo, pode se pensar em um teste de hipóteses onde esta é a hipótese nula H_0 . Hipótese de que cada valor da carta de controle está de acordo com a média do processo, e uma vez que este valor ultrapassar os limites de controle rejeita-se a hipótese nula, aceitando assim a hipótese H_1 de que os valores não estão de acordo com a média do processo (MONTGOMERY, 2004). Em toda decisão tomada há um risco associado, ou seja, uma probabilidade de erro (SAMOHYL, 2009).

Ao testar-se uma hipótese existem dois tipos de erros que estão classificados da seguinte maneira: (i) erro do tipo I, que ocorre quando se rejeita H_0 e esta é verdadeira e (ii) erro tipo II que ocorre quando hipótese nula é falsa e não é rejeitada. Considera-se a hipótese nula como sendo o processo sob controle estatístico. O erro do tipo I pode ocorrer com uma probabilidade de acordo com o nível de significância (α) escolhido, e o erro tipo II (β) depende do valor α e do tamanho amostral n (INDEZEICHAK, 2005; MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Montgomery e Runger (2009) e Silva et al. (2004) afirmam ainda que α e β são valores inversamente proporcionais desde que n permaneça o mesmo.

2.5 ANÁLISE DE CAPACIDADE

Enquanto que a partir das cartas de controle é possível analisar se o processo está sob controle estatístico, através da análise dos resultados obtidos em relação aos limites de controle, Costa et al. (2005) e Tonini (2010) afirmam que a análise de capacidade permite fazer uma análise levando em consideração as especificações do produto para identificar a capacidade do processo em produzir itens conformes através dos índices Cp, Cpk, Pp e Ppk. Cada índice gera uma informação diferente para a tomada de decisão. Segundo Montgomery (2004) e Samohyl (2009), os índices Cp e Cpk são utilizados para fazer a análise de capacidade de processos sob controle estatístico, enquanto os índices Pp e Ppk são para processos que não estão sob controle estatístico. Montgomery (2004) afirma ainda que quando um processo está sob controle os índices Cp e Pp são iguais, assim como Cpk e Ppk. Uma ressalva deve ser feita em relação aos índices Pp e Ppk, apesar destes serem utilizados e alguns autores indicarem seu uso, Kotz e Lovelance¹ (1998 apud MONTGOMERY, 2004) são contra esta utilização e considera um desperdício de esforço, por não permitir interpretação significativa sobre a capacidade do processo nem propriedades estatísticas determináveis.

Antes de trabalhar com os índices de controle, deve ser feita uma análise sobre a distribuição de probabilidade dos dados. A suposição de normalidade é razoável para a maior parte das características de qualidade. Admitindo-se tal distribuição como válida tem-se, caso sejam adotados os Limites Naturais de Tolerância (LNT), como sendo a média mais ou menos três σ a probabilidade de produzir peças conformes. O valor que está entre os LNT superior e inferior na Figura 2, é a probabilidade de produzir peças conformes e a soma dos valores fora do LNT é a probabilidade de produzir peças não conformes. Para diferentes distribuições de probabilidade esses valores são diferentes, por isso é importante à identificação da distribuição dos dados (MONTGOMERY, 2004).

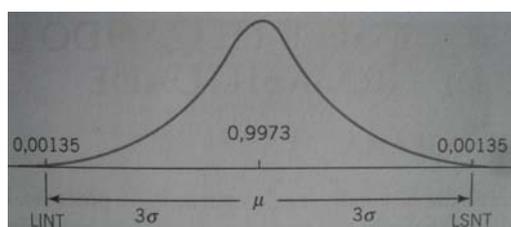


Figura 2 – extraído de Montgomery (2004, p.221)

¹ KOTZ, S., LOVELANCE, C. R. Process Capability Indices in Theory and Practice, 1998.

Para calcular os índices de capacidade são necessários, segundo Machado (2010), os limites de especificação, ou seja, os requisitos mínimos necessários para que o produto, ou processo possa ser considerado conforme. Dessa maneira tem-se a Equação 3 que serve para calcular o C_p para especificações bilaterais. Montgomery (2004) ressalta que como geralmente não se possui o desvio padrão populacional, o mesmo deve ser estimado a partir do desvio padrão amostral.

$$C_p = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} \quad (3)$$

A característica do C_{pk} , de levar em consideração o posicionamento dos dados, é devido ao fato de que ele é formado por outros dois coeficientes que analisam separadamente os limites superior e inferior de especificação, de acordo com as Equações 4 (FOGLIATTO et al. 2003; MACHADO, 2010; MONTGOMERY, 2004).

$$C_{pk} = \min(C_{ps}, C_{pi})$$

$$C_{ps} = \frac{LSE-\mu}{3\sigma} \quad (4)$$

$$C_{pi} = \frac{\mu-LIE}{3\sigma}$$

2.6 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A análise de regressão múltipla é uma técnica utilizada para investigar a relação entre uma variável dependente e um conjunto de variáveis independentes (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). A técnica permite a estimação de valores futuros para a variável dependente, dado um conjunto de dados de entrada para as variáveis independentes (PEDRINI; CATEN, 2009; DOWNING; CLARK, 2002).

O modelo base de regressão linear múltipla é representado pela Equação 5 onde β_j para $j = 0, 1, 2 \dots, k$ são os coeficientes de regressão, Y é a variável dependente dos regressores x_j e o valor e é o erro aleatório da equação (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e \quad (5)$$

Os coeficientes de regressão β_j indicam a influência de cada variável independente sobre a variável dependente. Para o caso de β_1 possuir valor igual a 10, e os outros coeficientes manterem-se fixos, ao valor da variável dependente aumentará em 10 vezes o

valor de x_1 . Se o mesmo fosse negativo, a variável dependente diminuiria em 10 vezes. Esta interpretação serve para todos os coeficientes β_j , incluindo β_0 com a diferença que a influência do β_0 sobre Y é ele mesmo, ou seja, considerando os demais coeficientes como sendo 0, o valor de Y será o próprio β_0 em função deste não estar diretamente associado a nenhuma variável.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Esta pesquisa tem por finalidade gerar conhecimentos para que sejam aplicados na prática, caracterizando-a como aplicada. É uma pesquisa quantitativa uma vez que todos os dados são analisados por meios estatísticos, e a partir disto são tomadas decisões. É exploratória, pois seu objetivo é de evidenciar os problemas e construir hipóteses sobre eles. Esta pesquisa será desenvolvida baseada em material bibliográfico e artigos científicos, o que, segundo Gil (2008), faz com que seja caracterizada como pesquisa bibliográfica. Também é classificada, segundo Gil (2008), como estudo de caso por explorar situações as quais não se sabe os limites, descrever determinada situação e explicar variáveis que são a causa de certos fenômenos. O método de trabalho será de acordo com as 5 etapas propostas a seguir e que estão representadas em forma de fluxograma no APÊNDICE A – Fluxograma das etapas do trabalho.

I. Nesta etapa, o processo é estudado para entender seu funcionamento e as etapas do processo. São levantadas informações gerais como as entradas e saídas do processo, os produtos que nele são processados, volume de produção e principais fatores que o influenciam. Também é feita a identificação do problema que será estudado.

II. Definição dos tipos de dados que serão necessários para o estudo de acordo com o problema identificado na etapa anterior. Uma vez definidos, os dados históricos existentes são analisados a fim de verificar se os mesmos são confiáveis ou se há a necessidade de dados diferentes. Segue-se então a coleta de dados.

III. Identificação do tipo de carta de controle mais adequado para analisar os dados via software Minitab 16 e definição de hipóteses. Fazer análises estatísticas dos dados históricos. Elaboração do diagrama de causa e efeito e fazer as análises estatísticas pertinentes ao problema identificado.

IV. Com as informações obtidas nas etapas anteriores, são aplicadas as melhorias propostas e posterior comparação dos resultados.

V. Por fim, são feitas conclusões sobre as melhorias geradas.

Com este método buscou-se a estruturação do trabalho de maneira a auxiliar o andamento do mesmo e o atingimento dos objetivos gerais e específicos.

4. APLICAÇÃO PRÁTICA

4.1 Descrição do Processo de Galvanização

A linha de produção na qual se situa a etapa do processo estudada é composta por 24 desbobinadores. Cada desbobinador comporta uma bobina de arame trefilado com comprimento e peso variável de acordo com a espessura deste, que é conduzido através de uma cuba contendo chumbo líquido dividida em duas partes: a primeira em 450°C e a segunda em 720°C. As principais funções da cuba de chumbo são: (i) limpar a superfície do material retirando sabão e óxidos e (ii) realizar tratamento térmico. Arames de média resistência passam apenas pela primeira parte da cuba de chumbo, e arames de alta resistência passam nas duas partes, sendo que, na segunda, devido à maior temperatura, o arame sofre modificações em suas propriedades físicas. Ao final de cada uma delas o arame é conduzido por orifícios com grafite, cuja função é evitar o arraste de chumbo para a 3ª etapa, na qual o arame passa por um banho de imersão em líquido refrigerante para evitar reações químicas indesejáveis.

A 4ª etapa é a de decapagem ácida por ácido clorídrico (HCl). Este processo consiste na imersão do material em um tanque contendo ácido clorídrico diluído, no qual o material passa e os pontos de oxidação da superfície do arame são eliminados através de reações químicas. Como o ácido é uma substância volátil, tanto na entrada como na saída do tanque, existe uma cortina de água que tem a função de evitar a perda de HCl através da evaporação. O objetivo da fluxagem (5ª etapa) é remover os últimos resquícios de óxido e tratar a superfície do arame para permitir maior aderência do zinco durante a galvanização. Como a fluxagem é feita através da imersão do arame em uma solução líquida, é necessário fazer a secagem do arame, 6ª etapa, para que ele não entre na cuba de zinco com qualquer sobra de água, evitando reações indesejáveis como oxidação ou explosões pelo contato da água com o zinco em elevadas temperaturas. Finalmente, o arame passa para a penúltima etapa (7ª), que é

a galvanização. Esta ocorre através da imersão do arame em zinco líquido a 450°C. Por fim, o arame já galvanizado passa por um polimento/limpeza que consiste em o arame passar por gaxetas, que podem ser compostas de diferentes tipos de matérias como fibra de carbono e grafite ou fibras sintéticas. Finalmente o material está galvanizado e é bobinado novamente. Todo este processo ocorre a uma velocidade constante, e está demonstrado em forma de fluxograma na Figura 3.

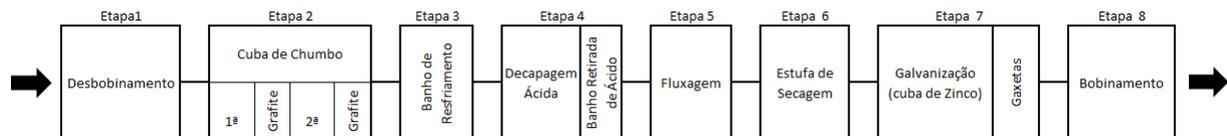


Figura 3 – Fluxograma do Processo de Galvanização

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

Dentre as oito etapas que compõem a linha de produção, a 4ª etapa – decapagem ácida – está diretamente associada ao problema de pesquisa deste estudo. O ácido clorídrico utilizado como decapante químico possui alto valor agregado impactando diretamente nos custos estabelecidos para a célula. Deste modo, recomenda-se otimizar este processo garantindo a correta decapagem do material, o que deverá reduzir o consumo de ácido para que os custos também sejam diluídos. Além disso, minimizando o descarte de ácido, espera-se menor impacto ambiental, contribuindo com a política da empresa.

4.2 Características Atuais do Processo de Decapagem Ácida

A qualidade da decapagem ácida depende da concentração do ácido clorídrico. Se a concentração for muito baixa, o material não será decapado corretamente e, em contrapartida, se for muito alta, o processo gera desperdício de ácido, seja por evaporação ou por arraste.

Atualmente, a empresa trabalha com limites de especificação de concentração de 66,6g/l a 74g/l. Esse intervalo foi determinado por, até então, entender que estes valores são os mais adequados para o processo, porém sabe-se que estes valores podem ser reduzidos e que o material pode ser decapado de maneira igualmente eficiente com menores índices de concentração. Um dos motivos pelo qual a empresa está utilizando estes valores é que não existe um padrão para a colocação de ácido na cuba de decapagem, então para evitar problemas na decapagem, a concentração é mantida em nível elevado.

Hoje, para identificar a necessidade da inserção de ácido na linha, são retiradas amostras três vezes ao dia, uma em cada turno. A análise destas amostras é feita pelo setor de

Controle de Qualidade com equipamento e ferramentas adequadas para garantir que o valor encontrado para a concentração seja confiável. Quando, este valor encontrado chega próxima ao nível mínimo, o ácido é adicionado sem uma quantidade padrão, ficando a critério do conhecimento do operador. Além disso, não se tem certeza do volume exato de ácido adicionado pelo fato de o medidor de vazão, mesmo sendo próprio para a utilização em soluções ácidas, estragar frequentemente. O indicador de quanto ácido foi adicionado é uma espécie de janela contendo um tubo de vidro que está ligado ao tanque de decapagem, mostrando o nível da solução dentro do tanque. Este tubo contém as indicações de nível máximo e mínimo do tanque, mas não contém escala numérica que indique o volume do tanque de forma exata, conforme a Figura 4.

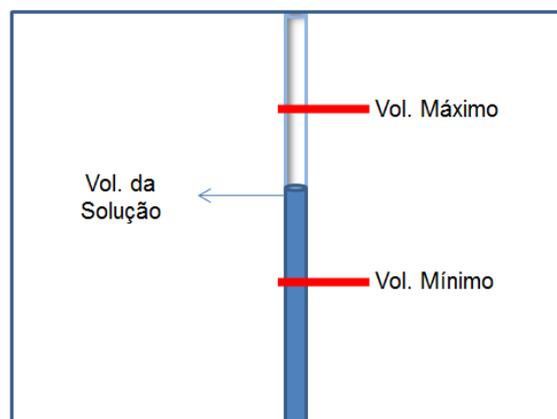


Figura 4 – Esquema da janela para visualização do nível

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

Quando o volume está próximo do mínimo, também é um indicador de que ácido deve ser adicionado para que o arame fique submerso na solução. Nestes casos, junto com o ácido, também é necessário adicionar água para não deixar a concentração a um nível muito elevado e para completar o volume do tanque, cuja capacidade máxima é de aproximadamente 4.100 litros. Esta ação também não é realizada de acordo com uma quantidade padrão para adição, tornando mais difícil o controle sobre a concentração de ácido. Sabendo disso, existe interesse de que os valores da concentração sejam reduzidos para diminuir perdas, custos e impactos ambientais, por meio do monitoramento via cartas de controle e padronização de atividades. Assim, a concentração poderia ser mantida dentro dos valores especificados.

4.3 Análise do Problema

Os dados da concentração de ácido já eram acompanhados historicamente, o que possibilitou a realização de um estudo para identificação de causas de variação e análise do

comportamento dessa característica de qualidade. Como as amostras são retiradas três vezes ao dia, uma em cada turno, optou-se por trabalhar com subgrupos de tamanho três, considerando cada turno um subgrupo. Buscou-se identificar se o turno tem influência sobre a concentração de HCl por meio de *boxplot* (Figura 5) e ANOVA (Figura 6).

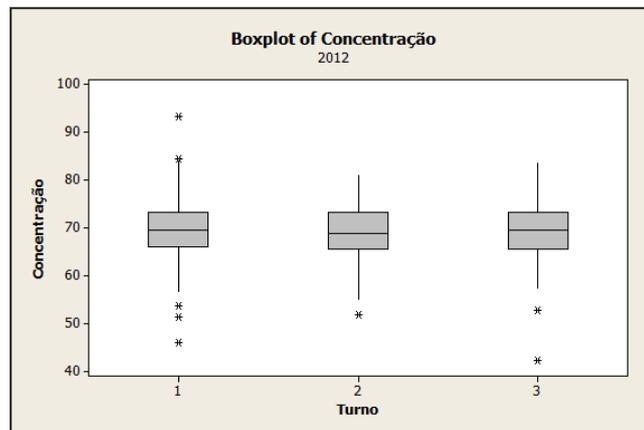


Figura 5 – Box Plot para Subgrupo Turno (1: manhã; 2: tarde e 3: noite) vs Concentração

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

A Figura 8 revela que os três subgrupos apresentam comportamento muito semelhante, não indicando diferença tanto na mediana como na amplitude interquartílica. O turno da manhã mostra-se bastante simétrico quanto à distribuição das observações, porém, com 5 possíveis *outliers*. O turno da tarde apresenta o segundo interquartil ligeiramente abaixo do centro, indicando que os dados estão mais concentrados abaixo da mediana, e apresenta apenas um *outlier*. O turno da noite apresenta a distribuição ligeiramente mais concentrada acima da mediana, com dois possíveis *outliers*.

Anova para Concentração vs Turno						
Source	DF	SS	MS	F	P	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Turno	2	53,7	26,8	0,65	0,523	
Error	248	10241,7	41,3			
Total	250	10295,4				
S = 6,426 R-Sq = 0,52% R-Sq(adj) = 0,00%						
				Level	N	Mean StDev
				1	88	69,699 6,853
				2	86	68,744 5,718
				3	77	68,713 6,666
Pooled StDev = 6,426						
						68,0 69,0 70,0 71,0

Figura 6 – Anova para Concentração vs Turno

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

Uma ANOVA em relação ao turno revelou que os mesmos não têm influência sobre a concentração, uma vez que a mesma demonstrou o valor de $p = 0,523$, não sendo significativo a um nível de significância de 5%. Assim, não foi possível rejeitar a hipótese nula de igualdade na concentração média de HCl por turno.

Não tendo influência do turno sobre a concentração, optou-se por organizar os dados históricos em subgrupos diários de tamanho $n=3$ e, a partir daí, construir cartas de controle do tipo $\bar{x} - R$. A Figura 7 A e B apresenta as cartas construídas para os meses de Junho e Setembro, nas quais é possível observar que ao menos um ponto ficou fora dos limites de controle. Também é possível observar que os dados aparentemente não estão se comportando de maneira aleatória, com diversos pontos seguidos abaixo da linha central e, logo em seguida diversos pontos consecutivos acima da linha central. Na parte R também ocorreu ao menos um ponto fora dos limites de controle em ambas as cartas, porém, em momentos diferentes das cartas \bar{x} . O processo apresentou alta variabilidade desses meses, amplitude média da ordem de 7,15 e 8,98g/l, respectivamente.

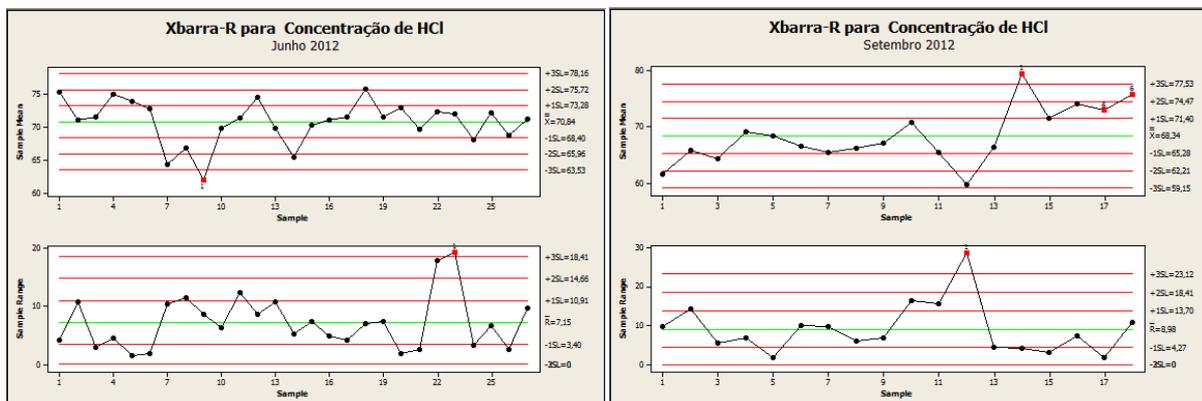


Figura A – Concentração de Ácido Junho

Figura B – Concentração de Ácido Setembro

Figura 7 – Cartas de Controle 2012

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

Apesar de a média do processo ter chegado bem próxima ao valor alvo de 70,3g/l, estes diversos pontos citados evidenciam que sobre o processo não está atuando apenas da presença do ruído aleatório e que, portanto, causas especiais também estão presentes, o que caracteriza o processo como fora de controle estatístico.

Por fim, buscando explorar ainda mais os dados históricos, foi realizada uma análise de capacidade do processo, tomando como limites de especificação a concentração mínima de 66,6 e máxima de 74g/l. O gráfico A da Figura 8 apresenta a série temporal da média dos subgrupos para a concentração de HCl, considerando os últimos quatro meses de 2012 e a análise de capacidade do processo.

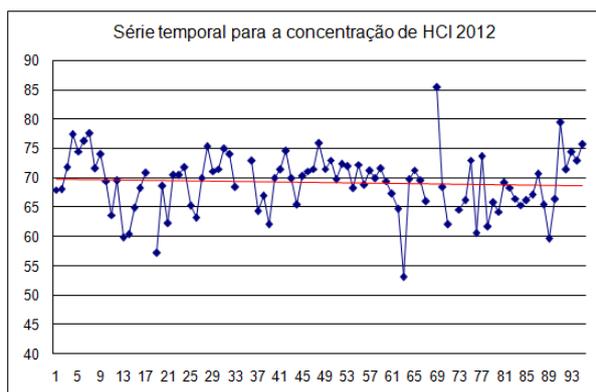


Figura A – Série Temporal para Concentração

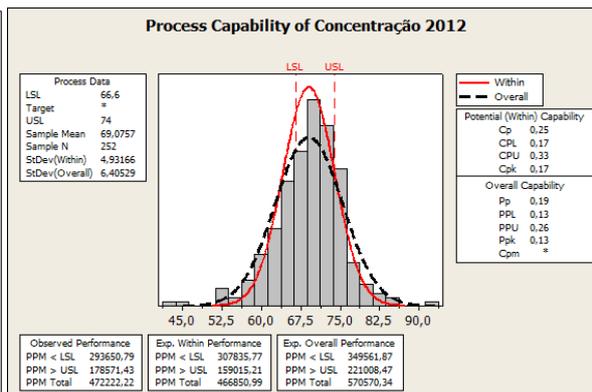


Figura B – Análise de Capacidade para a Concentração

Figura 8 – Série temporal e Análise de capacidade para 2012

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

Na série temporal fica clara a alta variabilidade, e se forem demarcados os limites de especificação mínima de 66,6 e máxima 74g/l, diversos pontos estavam ultrapassando-os. Foi traçada uma linha de tendência sobre os dados, a qual apresenta tendência decrescente bastante suave em relação à média do processo, variando apenas 2 pontos nos meses analisados. Além disso, a média ficou bastante próxima do valor alvo para concentração, da mesma maneira que nas CC.

Os coeficientes de capacidade (Figura 8 B) se apresentaram muito baixos ($CP_k=0,17$), indicando a incapacidade do processo em respeitar as especificações. Em função do processo não estar sob controle estatístico, as interpretações do coeficiente Cpk não devem ser tomadas como definitivas.

Para identificar as diferentes causas de variação do processo e o consequente alto consumo de ácido, foi elaborado um diagrama de causa e efeito, onde foram identificadas diferentes hipóteses das causas que estão descritas no APÊNDICE B.

Para algumas dessas causas foram tomadas diferentes ações para melhoria da linha em paralelo a realização deste trabalho e que não fazem parte do escopo do mesmo, portanto não estão aqui descritas. Porém, estas melhorias tiveram influência no andamento do estudo, pois a partir delas reduziram-se os níveis máximo e mínimo da concentração do ácido. Estes foram alterados de 66,6 para 55,5g/l e de 74 para 66,6g/l, reduzindo o valor-alvo para 61g/l, sendo que esta nova concentração manteve os padrões de qualidade anteriores. Os resultados e análises após estas melhorias estão descritos a seguir.

Uma nova análise da influência do turno foi realizada. O Box Plot e a ANOVA são apresentados na Figura 9 A e B. O turno continua não apresentando influência significativa sobre a concentração do ácido, sendo o valor de $p=0,568$ na ANOVA.

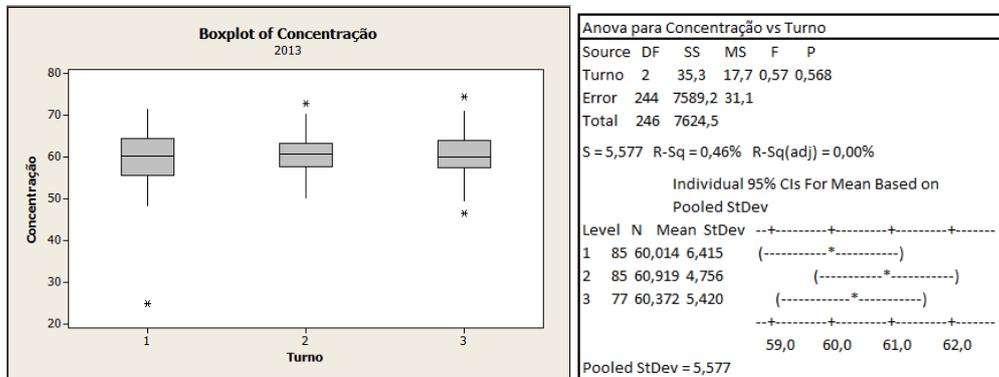


Figura A – Box Plot para Concentração

Figura B – Anova para Concentração

Figura 9 – Box Plot e Anova para 2013

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

A Figura 10 apresenta as novas CC, as quais revelam que o processo ainda apresenta alta variabilidade, sendo muitas observações com diferença de mais de um desvio padrão entre elas, mas, apesar da alta variabilidade, não é possível dizer que o processo não está sob controle estatístico, pois o mesmo não apresentou valores fora dos limites de controle nos dois meses. Apenas uma regra de sensibilização foi quebrada, no ponto 25 onde quatro de cinco pontos estão a mais de um desvio em relação a LC, não sendo esta, sozinha, uma razão forte para considerar o processo fora de controle estatístico.

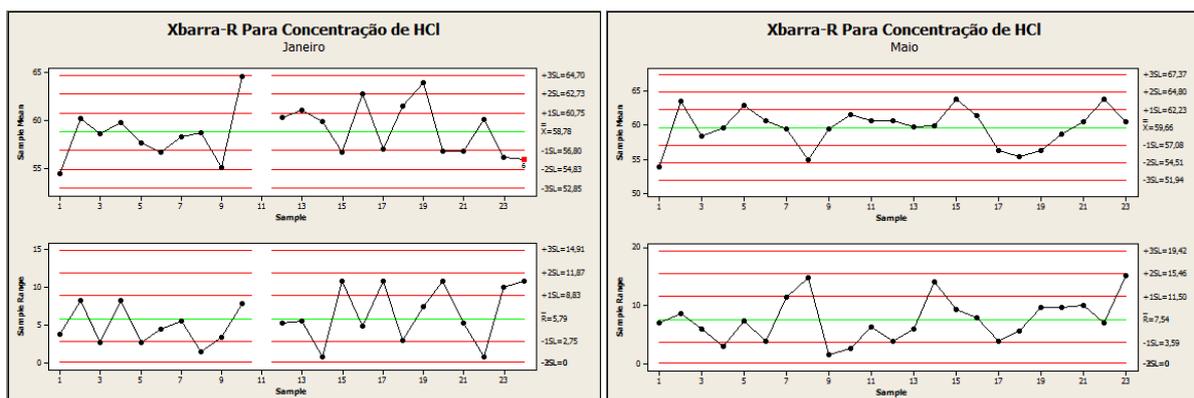


Figura A – CC Concentração de Ácido Janeiro

Figura B – CC Concentração de Ácido Maio

Figura 10 – Cartas de Controle para 2013

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

Analisando a série temporal dos três primeiros meses de 2013 na Figura 11 A, é possível perceber a alta variabilidade dos dados, mas a média do processo continua bastante próxima do valor-alvo, com uma leve tendência crescente. A análise de capacidade (Figura 11 B) complementa a informação, indicando que o processo continua não capaz de respeitar às

especificações, com $Cp_k=0,40$. Este valor está bastante abaixo do mínimo desejado (1,33), porém o histograma da análise de capacidade permite concluir que o processo está centrado, o que é desejável.

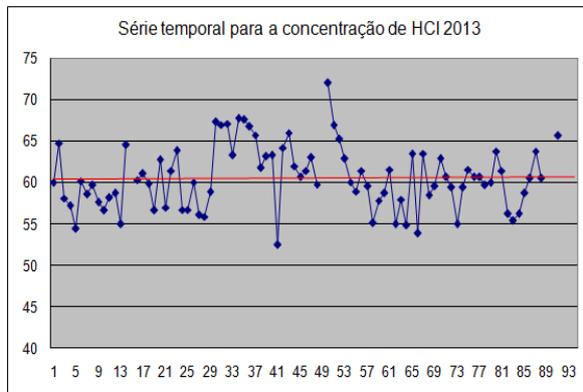


Figura A – Histograma para Concentração

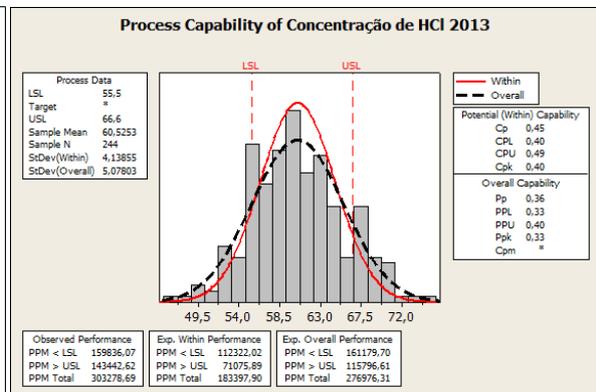


Figura B - Análise de capacidade para Concentração

Figura 11 – Série Temporal e Análise de Capacidade para 2013

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

Comparando os resultados anteriores e posteriores as melhorias, conclui-se que houve uma ligeira melhora. Em alguns meses o processo pode ser considerado sob controle estatístico e, também, registrou-se um pequeno aumento no Cpk . Constatou-se que o processo estava operando fora dos limites de especificação em vários momentos e que a variabilidade continuou elevada, evidenciando que as melhorias aplicadas à linha não foram suficientes para a resolução do problema, sendo necessárias novas ações sobre o processo atual.

4.4 Proposta de Melhoria

Um dos itens com maior citação no diagrama de causa e efeito refere-se à falta de um procedimento padrão e de um cálculo para o volume de ácido a ser adicionado na cuba, o qual não teve ações na primeira etapa do trabalho. O problema é que não se sabe qual é a influência na concentração do tanque exercida pela adição de certa quantidade de ácido, ou seja, ao adicionar 100 litros de ácido, supondo que a concentração da linha está a 61 g/l, não se sabe qual será a concentração resultante. Mesmo se esta relação fosse conhecida, ainda teria o problema de não se conhecer o volume exato de solução ácida contida dentro do tanque, pelo fato da janela demonstrada na Figura 6 não possuir escala nem representação do volume dentro do tanque, apenas do nível do mesmo, além de não se saber quanto ácido está sendo adicionado.

Para tentar solucionar esses problemas, considerando análise feita após as melhorias, identificou-se a necessidade de se conhecer: (i) o volume de ácido adicionado, (ii) a influência

deste volume de ácido adicionado, (iii) o volume e concentração dentro do tanque, (iv) a relação da concentração e do volume dentro do tanque com o volume de ácido adicionado e (v) a concentração resultante. Pode-se observar que todos os cinco itens citados estão relacionados, pois, ao adicionar ácido, a concentração da linha vai aumentar, mas esta aumentará em proporções diferentes se o volume e concentração da linha estiverem baixos ou altos.

Observando a intercorrelação entre as variáveis, considerou-se que a Análise de Regressão Linear Múltipla pode fornecer a resposta necessária ao problema, pois fica evidente a existência de variáveis dependentes e independentes. Com o intuito de organizar um conjunto de dados para realização da Regressão, foi proposta uma estruturação da coleta de dados com as seguintes variáveis: (1) volume do tanque antes de adicionar HCl; (2) concentração de HCl no tanque antes da adição de HCl; (3) Volume de HCl adicionado; (4) Concentração de HCl no tanque após adição de HCl.

Destas variáveis, apenas a 2 e 4 seriam possíveis de serem coletadas na situação atual do processo. Como já foi mencionado, não existe indicador exato do volume de solução dentro do tanque nem a informação de quanto ácido foi adicionado a linha. O indicador mais próximo do volume de solução contido no tanque é a janela demonstrada na Figura 6, que na verdade mede o nível desta solução, porém, identificou-se que não havia necessidade de se saber o volume do tanque, mas, se for criada uma escala nesta janela, seria possível criar uma medida de volume específica para este caso. Esta proposta resultou numa modificação da janela, onde foi inserida uma escala como demonstrado na Figura 12.

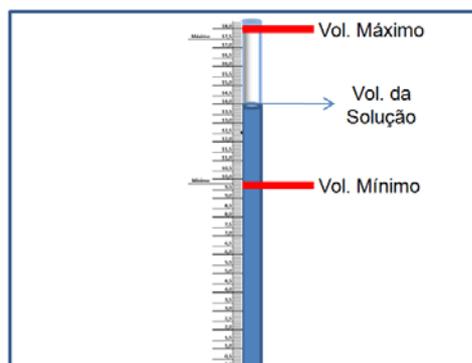


Figura 12 – Esquema da janela para visualização do volume após inserção da escala

Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

O valor que esta escala fornece foi chamado de unidade de volume, se o nível estiver no 15, então o tanque terá 15 unidades de volume da solução ácida. A escala não será uma

representante do volume total do tanque, se o nível da escala estiver no 0 não indica que o tanque está vazio, mas ela servirá para o propósito do trabalho, pois o nível do tanque deve sempre estar entre o máximo e o mínimo indicado na janela. Esta solução só foi possível de ser adotada em função de este tanque possuir dimensões iguais da sua base ao seu topo, sendo então a variação da régua igual para um mesmo volume, durante toda sua extensão, 1 unidade de volume sempre terá o mesmo valor.

Resolvido o problema do volume de solução contido no tanque, o problema agora está em saber quantos m³ de ácido são adicionados à linha. Como o medidor de vazão do ácido que será adicionado não é confiável, o problema foi solucionado de maneira simples. Antes de adicionar ácido na linha, deve-se anotar o valor marcado para as unidades de volume na janela e após a adição anota-lo novamente, dessa maneira o volume de ácido adicionado será obtido pela diferença do volume posterior pelo anterior, resultado no volume de ácido adicionado na mesma unidade de volume do tanque. Com isso foi criada uma tabela para coleta de dados na linha que está representada na Tabela 1 do APÊNCIDE C. A diferença entre os dados que seriam necessários anteriormente ficou apenas no item 3, que passou de Volume de HCl adicionado para volume do tanque após adição de HCl.

Para realização desta coleta, foi criado um procedimento para que todos os envolvidos procedam da mesma forma, de acordo com as etapas e restrições demonstradas na Tabela 2 do APÊNCIDE C, as quais foram repassadas aos operadores.

4.5 Resultados

Após 10 dias de coleta, foram obtidos os dados contidos no APÊNCIDE D. Foi realizada uma análise de regressão para entender qual a influência de cada uma das variáveis sobre a concentração de HCl na linha. Como a linha funciona em três turnos, os dados coletados nos primeiros dias de amostra foram retirados da análise, por considerar-se que é necessário o aprendizado e cumprimento de todos.

O volume de HCl que deve ser adicionado a linha foi considerado como a variável dependente, e as demais como independentes. Antes de realizar a análise de regressão, as variáveis foram submetidas a uma análise de correlação. Neste caso, a variável Volume 1 apresentou altíssima correlação com a variável Volume de HCl, o que demonstrou que os operadores estavam adotando espontaneamente o valor 14,5 como alvo, o que pode ser observado ao somar-se os dados da primeira e quarta coluna do APÊNCIDE D, onde o

resultado será sempre próximo de 14,5. Esse fato tornou o Volume de HCl quase que perfeitamente correlacionado ao Volume 1. De qualquer forma, antes de remover a variável da análise foi feito um teste. Os resultados estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1

The regression equation is					S = 0,287965 R-Sq = 97,0% R-Sq(adj) = 94,8%					
Va = 7,37 - 0,648 V1 - 0,108 C1 + 0,138 C2										
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P					
Constant	7,369	2,526	2,92	0,043	Regression	3	10,7971	3,5990	43,40	0,002
Vol. antes HCl	-0,64754	0,09960	-6,50	0,003	Residual Error	4	0,3317	0,0829		
Conc. antes HCl	-0,10818	0,03625	-2,98	0,041	Total	7	11,1288			
Conc. depois HCl	0,13824	0,04338	3,19	0,033						
C1 = Conc. antes HCl C2 = Conc. depois HCl Va = Vol.de ácido a adicionar										

Fonte: elaborado pelo autor (2013)

Conforme o resultado, a regressão foi significativa a um nível de confiança de 95%, pois $p=0,002$, assim como todas variáveis da equação de regressão. Porém, conforme o esperado o coeficiente da variável Volume 1 faz com que a mesma tenha comportamento bastante diferente do esperado e que é observado na realidade. O coeficiente desta variável foi negativo, ou seja segundo a equação, quanto menor o volume dentro do tanque, maior será a quantidade necessária de ácido a ser adicionada, o que é contrário a realidade, pois quanto menor o volume de uma solução, mais concentrada ela será para um mesmo volume de HCl.

A partir disto, foi removida então a variável Volume 1 da análise, e foi feita novamente a regressão, gerando os resultados expressos na Tabela 2.

Tabela 2

The regression equation is					S = 0,875973 R-Sq = 65,5% R-Sq(adj) = 51,7%					
Va = 0,34 - 0,256 C1 + 0,257 C2										
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P					
Constant	0,345	6,947	0,05	0,962	Regression	2	7,2921	3,6461	4,75	0,070
Conc. antes HCl	-0,25594	0,08590	-2,98	0,031	Residual Error	5	3,8366	0,7673		
Conc. depois HC	0,2572	0,1196	2,15	0,084	Total	7	11,1288			
C1 = Conc. antes HCl C2 = Conc. depois HCl Va = Vol.de ácido a adicionar										

Fonte: elaborado pelo autor (2013)

A nova regressão também se mostrou significativa, porém a um nível de confiança de 90%. O coeficiente negativo para concentração antes da adição de HCl demonstra que, quanto maior esta concentração inicial, menor será o volume de ácido necessário a ser adicionado, e o coeficiente da concentração depois da adição de HCl positivo mostra que quanto maior for esta concentração, maior será o volume de ácido a ser adicionado.

Os sinais dos coeficientes foram adequados, mas o problema desta regressão foi o baixo valor do coeficiente de determinação ($R-Sq$) de 65,5%. Ele é um indicador de que este

conjunto de variáveis deve explicar 65,5% da variação na concentração de ácido a ser adicionada, evidenciando que devem existir outras variáveis que influem no processo e não foram consideradas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação dos resultados de 2012 e 2013 permite observar que as ações tomadas sobre as causas especiais identificadas podem ter contribuído para a redução do consumo de ácido, porém o processo ainda apresenta demasiada variabilidade. A padronização do processo de adição de ácido deverá ser fundamental para manter a concentração em torno do valor alvo.

Apesar do resultado da análise de regressão não ter sido exatamente como o esperado, este foi considerado satisfatório, pois, ficou claro que existem mais variáveis que exercem influência de maneira significativa no processo e que devem ser consideradas para conseguir um resultado confiável. Porém, por experiência e conhecimento do processo, acredita-se que esta variável é o volume antes da adição de HCl, que apresentou correlação com o volume de ácido adicionado, pois dependendo do volume de solução ácida que estiver dentro do tanque, será necessário mais ou menos ácido para atingir a concentração esperada. A correlação apresentada pode ter sido gerada pelo fato de a quantidade de dados ser relativamente baixa, fazendo com que os mesmos não sejam suficientemente representativos do processo, dessa maneira, aconselha-se que novos dados devam ser coletados e uma nova análise de regressão realizada.

Com isso, considera-se que todos os objetivos deste trabalho foram atingidos, ainda que parcialmente. O processo foi estudado em detalhes, foi realizada uma análise do histórico dos dados com os atuais e identificado que o processo não sofreu melhorias suficientes. As causas especiais que provocam a variação no processo também foram identificadas e, sobre uma delas, foi proposta a padronização do processo decorrente de uma análise de regressão. Esta última, porém, pode ser considerada com êxito parcial, pois até o momento da conclusão deste trabalho não foi possível gerar a equação de regressão que explicasse a influência das variáveis no processo com alta representatividade. Contudo, isto pode ser continuado facilmente uma vez que todo o processo de coleta de dados foi estipulado e as variáveis necessárias identificadas, possibilitando refazer novas análises de regressão dentro de poucos dias.

REFERÊNCIAS

- CORRÊA, J. M. **Estudo de controle e análise da capacidade de processo de produção de água potável**. Tese (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Paraná – UFP, 2007.
- COSTA, A. F. B., EPPRECHT, E. K., CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de Qualidade**. 2 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2005.
- DOWNING, D., CLARK, J. **Estatística Aplicada**. 2 ed. São Paulo: Editora Saraiva., 2002.
- FOGLIATTO, F. S., FALCÃO, A. S. G., KRUMMENAUER, L. A., MULLER, A. F. Procedimento de monitoramento do desempenho de equipes de eletricitistas e do custo de atividades em redes de transmissão elétrica através d cartas de controle estatístico de processo. **XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Ouro Preto. ENEGEP, 2003.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6 ed. São Paulo: Editora Atlas S. A. 2008.
- HENNING, E., WALTER, O. M. C. F., SOUZA, N. S., SAMOHYL, R. W. Um estudo para a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo em indicadores de qualidade da agua potável. **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. Rio de Janeiro. 2011.
- HORA, H. R. M., COSTA, H. G. Tomada de decisão no MASP: uma contribuição para decisões utilizando a matriz AHP. **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Salvador. ENEGEP, 2009.
- ICZ PORTAL DA GALVANIZAÇÃO. **Mercado Brasileiro de Galvanização por Imersão a quente**. Higienópolis Disponível em: <<http://www.icz.org.br/portaldagalvanizacao/arquivos/mercado-brasileiro-de-galvanizacao.pdf>>. Acesso em 15 Abr. 2013.
- INDEZEICHAK, V. **Análise do controle estatístico da produção para empresa de pequeno porte: um estudo de caso**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2005.
- KUME, H. **Métodos estatísticos para melhoria da Qualidade**. São Paulo: Editora Gente, 1993.
- MACHADO, J. D. P. **Implantação de controle estatístico de processo na Sociedade Central de Cervejas S. A**. Tese (Mestrado em Engenharia de Gestão Industrial). Universidade Nova de Lisboa, 2010.

MAYER, P. C. **Redução da variabilidade em uma linha de produção de chapas de corpo de silos de grãos de corrugação 4” através da Implantação do Controle Estatístico do Processo**. Tese (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2004.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009.

PAESE, C., CATEN, C. T., RIBEIRO, J. L. D. Aplicação da análise de variância na implementação do CEP. **XIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro. ENEGEP, 1999.

PEDRINI, D. C. **Proposta de um método para aplicação de gráficos de controle de regressão no monitoramento de processos**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2009.

PEDRINI, D. C., CATEN, C. S. T. Modelagem estatística para previsão do teor de fósforo em ligas de ferromangânês. **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Salvador. ENEGEP, 2009.

RODRIGUES, M. D., CAMPOS, M. S., SOUZA, D. C. S. A utilização de gráficos de controle e análise de capacidade em uma empresa siderúrgica de Minas Gerais. **XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. São Carlos. ENEGEP, 2010.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora LTDA, 2009.

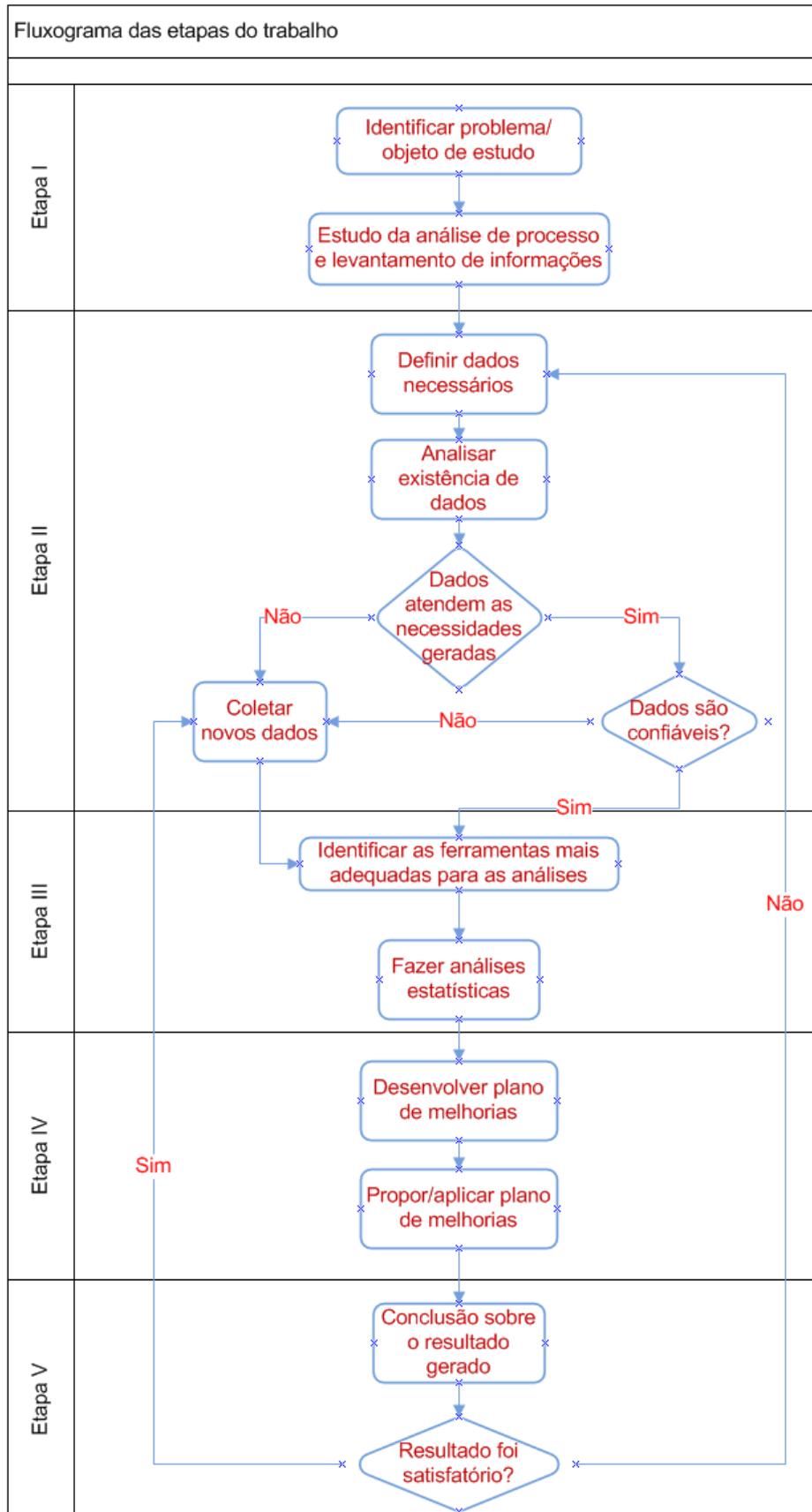
SOUZA, A. M., RIGÃO, M. H. Identificação de variáveis fora de controle em processos produtivos multivariados. **Revista Produção**, São Paulo, V.15 no.1, p.74-86, abr. 2005.

STEFANI, R. Z., NODARI, C. Aplicação da Ferramenta de CEP num Processo Siderúrgico. **XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro. ENEGEP, 2008.

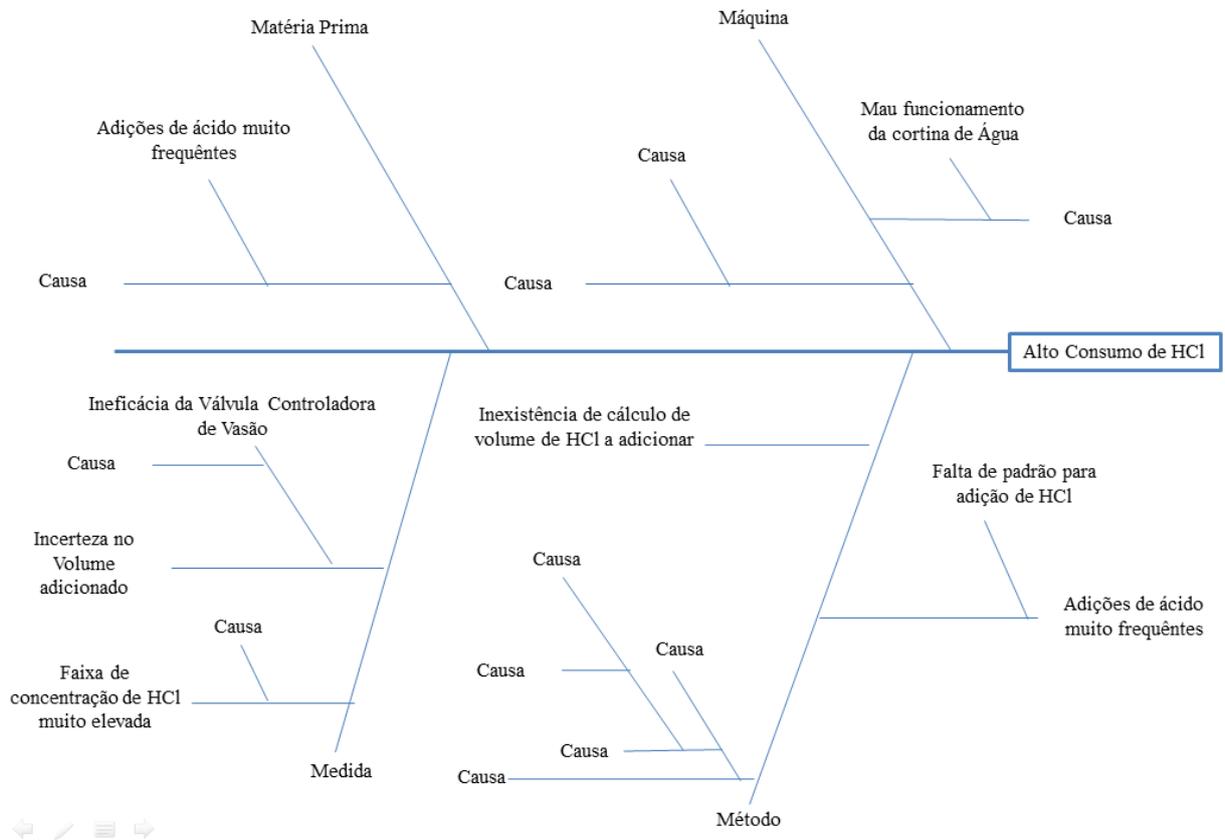
TONINI, A. C., SPÍNOLA, M. M. Uso de Índices Cp e Cpk no desenvolvimento de software: uma crítica. **XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. São Carlos. ENEGEP, 2010.

WESTERN ELECTRIC. **Statistical Quality Control Handbook**. Easton: The Mack Printing Company, 1956.

Apêndice A – Fluxograma da metodologia de trabalho



Apêndice B – Diagrama de Causa e Efeito



Apêndice D – Resultados obtidos na coleta de dados

Volume 1 (unidades de volume)	Concentração 1 (g/l)	Concentração 2 (g/l)	Volume HCl (unidades de volume)
13,5	62,53	64,38	1
13,7	60,68	60,68	0
11,5	52,91	62,16	2,7
12,5	55,5	65,86	2,5
10	60,68	66,23	3,5
13	65,12	71,41	1,5
14,5	65,49	65,49	0
13	62,53	65,49	1,5

PUCRS

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA



Trabalho de Conclusão de Curso – TCC

A

Coordenação Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

Na condição de aluno do curso de Engenharia de Produção, eu,

Eduardo Fellner

assumo a responsabilidade pelos dados utilizados na elaboração de meu Trabalho de Conclusão de Curso, bem como pela autoria do artigo desenvolvido sob o tema,

Implementação de Controle Estatístico de Processos em uma etapa do processo de galvanização de arames; estudo de caso no processo de decapagem ácida

tendo também a autorização da Instituição envolvida no estudo para uso dos dados.

Porto Alegre, 05 de julho de 2013.

Eduardo Fellner

Nome:
Aluno(a)