

## CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP) NA ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE UMA LIGA METÁLICA DE FERRO FUNDIDO NODULAR

Nathalia Tessari Moraes<sup>1</sup>, Mylena Guerra<sup>2</sup>, Leandro Luís Corso<sup>3</sup>

**Resumo:** Dependendo da aplicação mecânica, componentes podem necessitar de um controle mais ou menos rígido quanto à sua composição química, objetivando o atendimento as normas de processo que são designadas. Cada elemento químico em uma peça fundida é associado a características mecânicas que a mesma apresenta em sua aplicação, por isso é considerado fundamental o controle destes dados. Em geral, as peças de ferro fundido nodular necessitam de maior resistência mecânica, como é o caso da peça estudada neste trabalho, que está sujeita à grande esforço mecânico. Considerando também o grande número de retrabalhos apresentados com relação a avaliação dos componentes, busca-se por meio desse estudo apresentar uma análise da composição da liga metálica aplicando o Controle Estatístico de Processo (CEP). Com auxílio de um espectrômetro, foi possível obter os dados e aplicar a ferramenta de qualidade para o carbono, o silício e o manganês. Dessa forma, foi possível observar se o processo precisa ser revisado para garantir a qualidade estabilidade como padrão.

**Palavras chave:** CEP, Fundição, Composição Química.

## STATISTICAL PROCESS CONTROL (SPC) IN CHEMICAL COMPOSITION ANALYSIS OF A NODULAR CAST IRON METAL ALLOY

**Abstract:** Depending on the mechanical application, components may require more or less strict control over their chemical composition to meet the designated process standards. Each chemical element in a cast part is associated with mechanical characteristics that it presents in its application, so it is considered fundamental the control of these data. In general, nodular cast iron parts require greater mechanical strength, as is the case studied in this work, which is subject to great mechanical stress. Considering also the large number of reworks presented regarding the evaluation of the components, this study aims to present an analysis of the composition of the alloy using the Statistical Process Control (CEP). Using a spectrometer, it was possible to obtain the data and apply the quality tool for carbon, silicon and manganese. Thus, it was possible to observe whether the process needs to be reviewed to ensure quality stability as standard.

**Key-words:** SPC, Cast, Chemical Composition.

### 1. Introdução

Em uma empresa do ramo metal mecânico localizada em uma cidade do interior do Rio Grande do Sul são produzidos cubos e tambores para veículos automotores. No processo desta empresa, verificou-se que o índice de retrabalho de itens fundidos pode estar estritamente relacionado à composição química do metal utilizado.

---

<sup>1</sup> (Universidade de Caxias do Sul), [ntmoraes1@ucs.br](mailto:ntmoraes1@ucs.br).

<sup>2</sup> (Universidade de Caxias do Sul), [mguerra10@ucs.br](mailto:mguerra10@ucs.br).

<sup>3</sup> Autor, correspondente, (Universidade de Caxias do Sul), [lcorso@ucs.br](mailto:lcorso@ucs.br).

O ferro fundido nodular é utilizado para peças que necessitam de maior resistência mecânica, como é o caso dos produtos analisados no estudo. A importância deste trabalho recai em que avaliar componentes que ficam localizadas na parte externa do veículo, onde sofrem com impactos, mudanças de temperatura e ambiente.

Entre os principais elementos químicos presentes na liga que trazem essas características ao fundido estão o Carbono (C), o Silício (Si) e o Manganês (Mn). Dessa forma, é imprescindível um controle frequente das quantidades desses elementos para garantir a qualidade total dos produtos.

Este artigo visa demonstrar por meio do Controle Estatístico de Processo (CEP) uma análise desses três químicos presentes na liga com intuito de verificar a capacidade do processo e apresentar soluções para as amostras que apresentam variação fora da especificação para evitar cartas de correção e retrabalhos.

O presente estudo de caso foi realizado a partir da coleta dos dados com a utilização de um espectrômetro, visando coletar informações para controlar o processo de fundição do metal.

## 2. Referencial teórico

Nesta seção serão abordados os principais conceitos que baseiam teoricamente a análise realizada para o controle estatístico do processo de fabricação do ferro nodular, tais como: CEP, gráficos de controle e capacidade do processo.

### 2.1 Controle Estatístico de Processo (CEP)

Com o intuito de obter um controle cada vez mais preciso dos processos das empresas e para garantir uma melhoria contínua, o Controle Estatístico de Processo (CEP) está sendo cada vez mais utilizado. Com base em Montgomery e Runger (2003) o CEP utiliza algumas ferramentas que auxiliam na busca de um processo cada vez melhor, como: Cartas de Controle por Variáveis e Cartas de Controle por Atributos; Capacidade do Processo, Sistema de Medição e Inspeção por Amostragem.

Para Deming (1990), as metas do CEP são: melhorar a qualidade, ampliar o conhecimento do processo e identificar oportunidades de melhorias; aumentar a quantidade de produtos produzidos sob condições ótimas de produção; diminuir o custo por unidade; economizar com o custo de produtos defeituosos, refugos e retrabalhos; reduzir gargalos de produção e atrasos na entrega; aumentar a satisfação dos clientes.

Com isso, para aplicar o método é importante que algumas etapas sejam seguidas, que de acordo com Werkema (2006) se baseiam nas descritas a seguir na Quadro 1.

Quadro 1 – Etapas CEP

<b>1 - Definir padrão a ser atingido</b>
<b>2 - Inspeção do que foi produzido</b>
<b>3 – Diagnóstico das não conformidades</b>
<b>4- Identificação das causas das não conformidades</b>
<b>5 – Eliminação corretiva das causas</b>
<b>6 – Atualização dos padrões dos produtos e/ou processos</b>

Fonte: Os autores (2019)

Assim, a partir do levantamento dos dados é possível controlar o processo em tempo real de acordo com a variabilidade apresentada. Segundo Martins & Laugeni (2005) as causas da variabilidade podem ser divididas em duas formas, as causas comuns e as especiais. Sendo que as comuns acontecem de forma inevitável e aleatória e para eliminá-las é necessário melhorias no sistema. E as especiais acontecem por razões que estão ao alcance das pessoas envolvidas no processo, podendo então, serem eliminadas. A partir disso é importante que o processo sempre seja corrigido e atualizado, sendo por correção dos limites ou por ações gerenciais.

Para Montgomery (2009) o componente mais vital do sucesso da implantação do CEP é o compromisso e envolvimento da gerência, sendo que os demais colaboradores de uma organização se guiarão por ela como um exemplo para que se torne parte da cultura organizacional da empresa a busca pela redução da variabilidade dos processos.

## 2.2 Gráficos de Controle

Para analisar se um processo está sob controle estatístico, é necessário o levantamento dos dados do processo, normalmente é um número alto de dados, para isso é importante que seja colocado em um gráfico para poder visualizar melhor e realizar o controle de forma mais eficaz.

Os gráficos de controles, segundo Montgomery (2009), contêm uma linha central ou média (LC), que representa o valor médio de uma variável que está sendo analisada. E duas outras linhas horizontais, limite superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC). Para que o processo esteja sob controle, é preciso que os dados coletados quando plotados estejam dentro dos limites definidos, caso contrário é necessário que uma ação corretiva seja implantada.

No processo aqui analisado, para garantir a qualidade do componente fabricado é necessário que este seja ferro nodular, e para isso algumas especificações de composição química devem ser seguidas. São 3 os principais elementos que garantem essa característica, o Carbono, Silício e Manganês, com percentuais específicos para que o ferro seja nodular. Portanto, os limites de especificação são definidos da seguinte forma representada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Limites composição Ferro Nodular

Elemento	LIC (%)	LC (%)	LSC (%)
Carbono	3,55	3,5788	3,66
Silício	2,25	2,3676	2,51

Manganês	0,35	0,4576	0,49
----------	------	--------	------

Fonte: os autores (2019)

A partir dos limites de especificação, é possível avaliar a capacidade do processo. O estudo apresenta um gráfico para a coleta dos percentuais presentes nas amostras analisadas de cada elemento e comparar com os limites de controle calculados para verificar se a variabilidade existente é aceitável ou não e se o processo é de qualidade, garantindo que o processo forma ferro nodular. O limite central é baseado na média das médias e os limites inferior e superior, são obtidos somando ou subtraindo o fator tabelado A3 para este tipo de gráfico multiplicado pela média do desvio padrão. As fórmulas utilizadas apresentam-se a seguir, onde A<sub>3</sub> para 25 amostras, vale 0,606.

$$LSC\bar{X} = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S} \quad (1)$$

$$LC\bar{X} = \bar{\bar{X}} \quad (2)$$

$$LI\bar{X} = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S} \quad (3)$$

### 2.3 Capacidade de processos

No presente trabalho foram calculados os índices de capacidade de processo, segundo Costa et. al (2009) os índices de capacidade de processo são parâmetros que indiretamente medem o quanto o processo consegue atender as especificações.

Então, além do processo estar sob controle, é necessário que as especificações sejam atendidas, que as composições químicas sejam seguidas de acordo com o padrão necessário para que se tenha um produto de qualidade e com a característica necessária para desempenhar sua aplicação da melhor forma possível.

Para avaliar se o processo é capaz ou não, é possível utilizar o índice potencial do processo Cp, o qual relaciona a variação permitida do processo com a faixa de variação real do processo (COSTA, EPPRECHT e CARPINETTI, 2004). E também o Cpk que é conhecido como Índice de Performance que segundo Chase; Jacobs e Aquilano (2006) mede o quanto o processo é capaz de produzir itens dentro dos limites de controle. Suas equações são representadas [a seguir](#).

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (4)$$

$$Cpk = \min \left( \frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{LIE - \bar{X}}{3\sigma} \right) \quad (5)$$

Sendo que de acordo com Costa, EpprecheteCarpinetti (2004) são interpretados da seguinte forma. Se o resultado dos índices for maior ou igual a 1,33, quer dizer que o processo é capaz e confiável; de 1 até 1,33 é razoavelmente capaz e relativamente confiável. Se for menor que 1, o processo é incapaz e não possui condições de manter as

especificações ou padrões.

### 3. Metodologia

O presente estudo de caso foi realizado a partir da coleta dos dados de um turno de produção da empresa, por meio do relatório extraído do espectrômetro utilizado para controlar o processo realizado.

A partir desses relatórios, foi possível analisar os percentuais da composição química do produto, com o intuito de verificar se as composições de Carbono, Silício e Manganês estavam dentro dos limites padrões do ferro nodular, característica imprescindível para a aplicação do componente produzido.

Para isso, através do Controle Estatístico de Processo e com a utilização dos gráficos de controle foi possível verificar a variabilidade dos percentuais de Carbono, Silício e Manganês das amostras analisadas. O padrão do ferro nodular já estabelece os limites de controle para que delimitem a variação das composições, tornando possível verificar se o processo está sob controle e se está atendendo às especificações. Além disso, foi também calculado os índices de capacidade do processo,  $C_p$  e  $C_{pk}$ , a fim de verificar se o processo é capaz ou não de atender o que propõe. Para a elaboração dos gráficos utilizou-se as ferramentas disponíveis no Microsoft Office Excel<sup>®</sup> 2007.

### 4. Resultados obtidos

Os dados obtidos por meio da medição pelo espectrômetro no dia 10/04/2019 estão apresentados de forma resumida nas tabelas 3, 4 e 5 para representarem as medições da porcentagem de Carbono, Silício e Manganês, respectivamente. Para esse caso foram utilizados os gráficos c e limites já pré-estabelecidos pelas normas da empresa de acordo com a ASTM, que é o órgão responsável pela normalização dos fundidos.

A Tabela 2 fornece a medição da porcentagem de carbono presente na liga bem como os limites superior e inferior estabelecidos pela empresa e o limite central calculado pela média das medições.

Tabela 2 – Dados para o Carbono

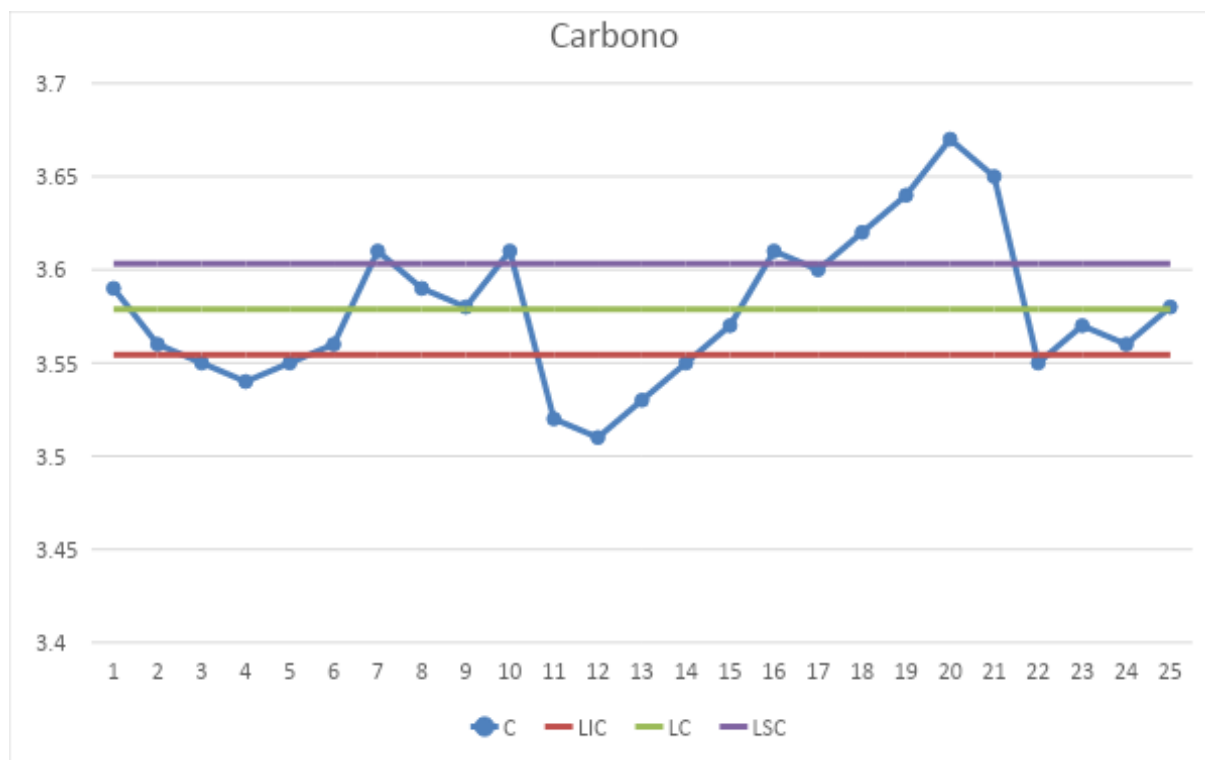
C	CARBONO		
	LIC	LC	LSC
3,59	3,55	3,58	3,60
3,56	3,55	3,58	3,60
3,55	3,55	3,58	3,60
3,54	3,55	3,58	3,60
3,55	3,55	3,58	3,60
3,56	3,55	3,58	3,60
3,61	3,55	3,58	3,60
3,59	3,55	3,58	3,60
3,58	3,55	3,58	3,60
3,61	3,55	3,58	3,60
3,52	3,55	3,58	3,60
3,51	3,55	3,58	3,60
3,53	3,55	3,58	3,60

3,55	3,55	3,58	3,60
3,57	3,55	3,58	3,60
3,61	3,55	3,58	3,60
3,60	3,55	3,58	3,60
3,62	3,55	3,58	3,60
3,64	3,55	3,58	3,60
3,67	3,55	3,58	3,60
3,65	3,55	3,58	3,60
3,55	3,55	3,58	3,60
3,57	3,55	3,58	3,60
3,56	3,55	3,58	3,60
3,58	3,55	3,58	3,60

Fonte: os autores (2019)

O Gráfico 1 foi obtido através dos dados disponibilizados na Tabela 3. Nele é possível observar-se cada ponto de medição realizado bem como analisar os pontos que estão fora dos limites.

Gráfico 1 – Gráfico de Controle para o Carbono



Fonte: os autores (2019)

A Tabela 3 apresenta os dados para a porcentagem de Silício.

Tabela 3 – Dados para o Silício

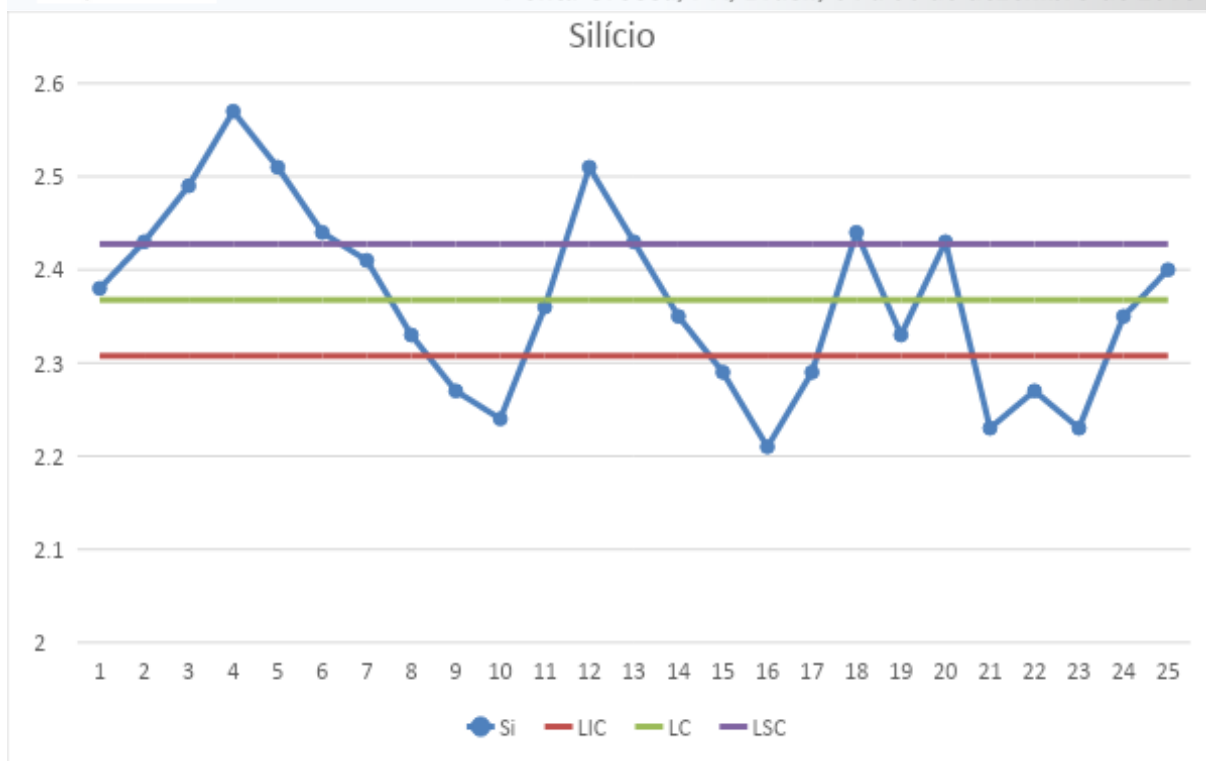
SILÍCIO
---------

<b>Si</b>	<b>LIC</b>	<b>LC</b>	<b>LSC</b>
2,38	2,31	2,37	2,43
2,43	2,31	2,37	2,43
2,49	2,31	2,37	2,43
2,57	2,31	2,37	2,43
2,51	2,31	2,37	2,43
2,44	2,31	2,37	2,43
2,41	2,31	2,37	2,43
2,33	2,31	2,37	2,43
2,27	2,31	2,37	2,43
2,24	2,31	2,37	2,43
2,36	2,31	2,37	2,43
2,51	2,31	2,37	2,43
2,43	2,31	2,37	2,43
2,35	2,31	2,37	2,43
2,29	2,31	2,37	2,43
2,21	2,31	2,37	2,43
2,29	2,31	2,37	2,43
2,44	2,31	2,37	2,43
2,33	2,31	2,37	2,43
2,43	2,31	2,37	2,43
2,23	2,31	2,37	2,43
2,27	2,31	2,37	2,43
2,23	2,31	2,37	2,43
2,35	2,31	2,37	2,43
2,40	2,31	2,37	2,43

Fonte: os autores (2019)

O Gráfico 2 mostra o controle do processo para o componente químico Silício. Podemos observar 3 pontos acima do limite e 4 pontos abaixo do limite, em um total de 45 pontos.

Gráfico 2 – Gráfico de Controle para o Silício



Fonte: os autores (2019)

A Tabela 4 contém os dados para o Manganês, componente essencial para inibir a formação de sulfeto de ferro, que posteriormente pode ocasionar a ferrugem.

Tabela 4 – Dados para o Manganês

Mn	MANGANÊS		
	LIC	LC	LSC
93,30	93,28	93,34	93,40
93,30	93,28	93,34	93,40
93,20	93,28	93,34	93,40
93,20	93,28	93,34	93,40
93,20	93,28	93,34	93,40
93,30	93,28	93,34	93,40
93,30	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,20	93,28	93,34	93,40
93,30	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,50	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,20	93,28	93,34	93,40

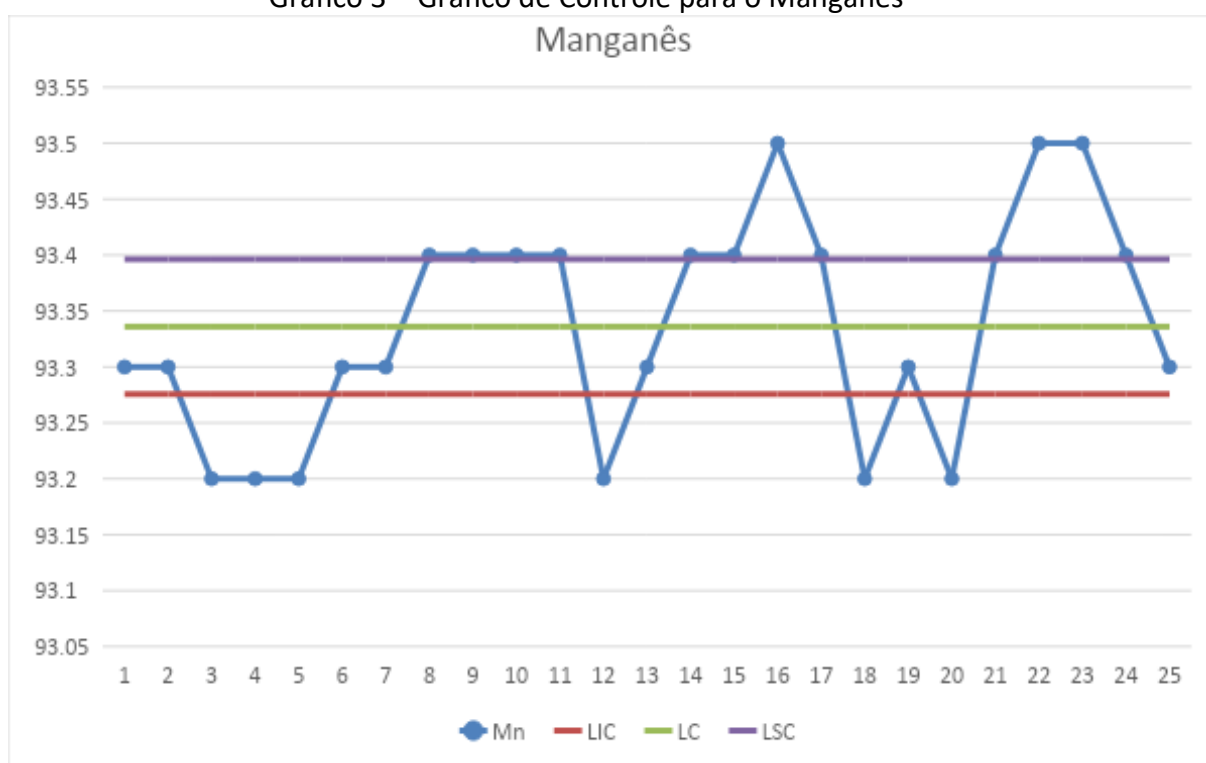


93,30	93,28	93,34	93,40
93,20	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,50	93,28	93,34	93,40
93,50	93,28	93,34	93,40
93,40	93,28	93,34	93,40
93,30	93,28	93,34	93,40

Fonte: os autores (2019)

No Gráfico 3 pode-se observar uma tendência de decaimento do componente ao longo das medições. O início está acima do limite superior e ao que tudo indica, se a medição fosse continuada, a tendência era de o componente ficar abaixo do limite inferior.

Gráfico 3 – Gráfico de Controle para o Manganês



Fonte: os autores (2019)

A partir das análises feitas por meio do Gráfico C, foram feitas as análises pelas Cartas de Controle, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Cartas de Controle

Elemento	Cp	Cpk
C	0,2065	0,2379
Si	0,2020	0,1939
Mn	0,2010	0,1876

Fonte: os autores (2019)

A fim de observar se o que levava a incapacidade do processo eram os pontos fora dos limites de controle, os mesmos foram removidos e as Cartas de Controle foram recalculadas. Os dados estão apresentados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Cartas de Controle (excluindo pontos fora dos limites)

Elemento	Cp	Cpk
C	0,4034	0,2474
Si	0,4803	0,5871
Mn	0,3904	0,2846

Fonte: os autores (2019)

## 5. Conclusões

Considerando que para o processo ser capaz é necessário um Cpk maior do que 1, esse processo está claramente incapaz para os três químicos. Mesmo se forem removidos os pontos fora dos limites, as Cartas de Controle não refletem um processo capaz, como apresentado na Tabela 6. Esse dado mostra que o processo deve ser reavaliado para que não resulte em grandes perdas de qualidade.

Além disso, o processo apresenta diversas oscilações nos gráficos de controle, característica de um desempenho pouco estável. A fundição de materiais de sucata e a re-fundição podem estar intrinsicamente ligada a esse resultado, uma vez que se perde parte do controle dos tipos de metal que está sendo fundido.

O controle de químicos é feito de modo que os mesmos podem ser corrigidos antes que a peça seja conformada. Porém isso acarreta em um custo para a empresa que poderia ser mais ameno caso o estudo do processo fosse melhor explorado.

Em resumo, o processo não possui pontos extremos fora dos limites, ou seja, encontra-se controlado na maior parte, mas as Cartas de Controle mostram que o processo está incapacitado e precisa ser reavaliado para garantir a qualidade do produto e minimizar o índice de retrabalho e desvios.

Aplicar o CEP nesse processo seria um passo simples visto que os dados já são obtidos diariamente pelo espectrômetro. Bastaria aplicar uma ferramenta que analisasse esses dados e, de forma automática, sinalizasse quando as medidas estivessem saindo fora dos controles.

## Referências

CHASE, R. B.; JACOBS, F. R. & AQUILANO, N. T. **Administração da produção para a vantagem competitiva**. Porto Alegre: Bookman, 2006

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. São Paulo: Atlas, 2004.

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

MARTINS, P. G. & LAUGENI, F. P. **Administração da Produção**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2006, 562 p.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4ª edição., Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

WERKEMA, M.C.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 2006.

Percentuais padrões do ferro nodular. Recuperado em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=162>. Junho, 2019.