

**MATHEUS SCOPARO ALBERTO**

**Análise estatística de um processo de solda por arco submerso**

**Matheus Scoparo Alberto**

**Análise estatística de um processo de soldagem por arco submerso**

Trabalho de Graduação Engenharia Mecânica  
da Faculdade de Engenharia do Campus de  
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
diploma de Graduação em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Alexandre de  
Oliveira

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A334a | <p>Alberto, Matheus Scoparo</p> <p>Análise estatística de um processo de solda por arco submerso /<br/>Matheus Scoparo Alberto. – Guaratinguetá, 2018.<br/>41 f : il.<br/>Bibliografia: f. 41</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade<br/>Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.<br/>Orientador: Prof. Dr. Francisco Alexandre de Oliveira</p> <p>1. Arco de soldagem submersa. 2. Otimização matemática. 3.<br/>Estatística - Análise I. Título</p> <p>CDU: 621.791</p> |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

  
Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária/CRB-8/9203

**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**MATHEUS SCOPARO ALBERTO**

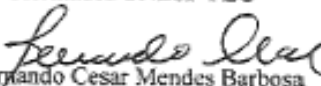
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

  
Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Francisco Alexandre de Oliveira  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Fernando Cesar Mendes Barbosa  
UNESP – FEG

Prof. Luis César Ferreira Motta Barbosa  
UNESP-FEG

## **DADOS CURRICULARES**

### **MATHEUS SCOPARO ALBERTO**

|                   |                                                                                                                                          |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 29.01.1993 – Cambará /PR                                                                                                                 |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Adinaldo Alberto<br>Edneia Scoparo                                                                                                       |
| <b>2012/2017</b>  | Graduação em Engenharia Mecânica<br>Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá<br>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” |

Dedico este trabalho de modo especial, à  
minha família, minha companheira e  
amigos especiais.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus. Agradeço a minha família que nunca deixou de me apoiar.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Francisco Alexandre de Oliveira* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Adinaldo e Edneia*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

aos meus companheiros de trabalho, quem me incentivaram e me mantiveram focado na realização do trabalho de graduação com o intuito de melhorar os processos da Fábrica X.

à minha companheira Camila, por sempre me incentivar a nunca desistir.

“Desenvolver força, coragem e paz interior demanda tempo. Não espere resultados rápidos e imediatos, sob o pretexto de que decidiu mudar. Cada ação que você executa permite que essa decisão se torne efetiva dentro de seu coração”

Dalai Lama

## RESUMO

Este trabalho consiste no estudo estatístico de um processo de soldagem industrial de uma planta de conformação e soldagem de tubos a partir de chapas ou bobinas. Nele aprofundamos no tema da influência das oscilações de três parâmetros que entendemos como mais importantes, são eles: Tensão de soldagem (V), Corrente de Solda (A) e velocidade de stickout (mm/seg). Iremos utilizar análise estatística buscando a equação de otimização do sistema através de softwares como o Minitab, assim como os limites de controle inferior e superior, Média dos parâmetros no processo, Variância e Desvio Padrão dos mesmos, para então entender como melhorar o processo industrial, minimizando os problemas e focando nos parâmetros críticos. Com os resultados obtidos iremos apresenta-los para a planta estudada verificando a possibilidade de utilizar a equação de otimização obtida no trabalho de graduação para assim então confirmar que o caminho tomado para a melhoria do processo teórico também se aplica na pratica, podendo reduzir custo e tempo de processo. Esperamos concluir com o projeto quais as melhores condições de trabalho que podemos utilizar para que as variações sejam controladas de maneira a minimiza-las.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise estatística. Solda SAW. Variância. Desvio padrão. Otimização.

## **ABSTRACT**

This work consists on a statistical study of an industrial welding process that consist on a forming and welding pipes plant from coils and plates. In it, we will study the influence of oscillations on three parameters that we consider the most important Welding Voltage (V), Welding Current (A) and Stickout Speed (mm / sec). We will use statistical analysis to find the optimization equation of the system through software such as Minitab, as well as the lower and upper control limits, Average of the parameters in the process, the variance and the standard deviation of the parameters, to understand how to improve the industrial process, minimizing problems and focusing on critical parameters. With the results obtained we will present them to the studied plant, verifying the possibility of using the optimization equation obtained in the graduation work, thus confirming that the path taken for the improvement of the theoretical process is also applied in practice, being able to reduce cost and process time. We hope to conclude with the project the best working conditions we can use so that the variations are controlled in a way that minimizes them.

**KEYWORDS:** Statistic analysis. SAW welding. Variance. Standard deviation. Optimization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Processo completo de solda por arco submerso .....                           | 16 |
| Figura 2 – Corrente no coração de solda.....                                            | 17 |
| Figura 3 – Tensão no cordão de solda .....                                              | 17 |
| Fluxograma 1 – Mapa de processos do trabalho de graduação .....                         | 23 |
| Figura 4 – Ilustração de mordedura .....                                                | 44 |
| Figura 5 – Ilustração de falta de penetração .....                                      | 46 |
| Figura 6 – Ilustração de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada e (c) alinhada. .... | 49 |
| Figura 7 – Probabilidade estatística da tensão no arame 1 .....                         | 20 |
| Figura 8 – Capacidade estatística da tensão no arame 1.....                             | 25 |
| Figura 9 – Probabilidade estatística da corrente no arame 1 .....                       | 26 |
| Figura 10 – Capacidade estatística da corrente no arame 1.....                          | 27 |
| Figura 11 – Probabilidade estatística da tensão no arame 2 .....                        | 28 |
| Figura 12 – Capacidade estatística da tensão no arame 2.....                            | 29 |
| Figura 13 – Probabilidade estatística da corrente no arame 2 .....                      | 30 |
| Figura 14 – Capacidade estatística da corrente no arame 2.....                          | 31 |
| Figura 15 – Probabilidade estatística da tensão no arame 3 .....                        | 32 |
| Figura 16 – Capacidade estatística da tensão no arame 3.....                            | 33 |
| Figura 17 – Probabilidade estatística da corrente no arame 3 .....                      | 34 |
| Figura 18 – Capacidade estatística da corrente no arame 3.....                          | 35 |
| Figura 19 – Probabilidade estatística da tensão no arame 4 .....                        | 36 |
| Figura 20 – Capacidade estatística da tensão no arame 4.....                            | 37 |
| Figura 21 – Probabilidade estatística da corrente no arame 4 .....                      | 38 |
| Figura 22 – Capacidade estatística da corrente no arame 4.....                          | 39 |
| Figura 23 – Probabilidade estatística da velocidade de solda .....                      | 40 |
| Figura 24 – Capacidade estatística da velocidade de solda .....                         | 41 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – EPS – Parâmetros de soldagem .....                      | 16 |
| Tabela 2 – Valor crítico correspondente ao grau de confiança ..... | 20 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| PPM | Partes por milhão            |
| LCI | Limites de controle inferior |
| LCS | Limites de controle superior |
| AWS | American Welding Society     |

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$  – média das amostras

$\sigma$  – desvio padrão das amostras

$\bar{\bar{x}}$  – média da média dos subgrupos

LCI – limite de controle inferiores

LCS – limite de controle superior

N – número de amostras

T – temperatura

## SUMÁRIO

|          |                                                  |           |
|----------|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                          | <b>14</b> |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA .....                              | 15        |
| 1.2      | OBJETIVO .....                                   | 15        |
| <b>2</b> | <b>DESENVOLVIMENTO .....</b>                     | <b>16</b> |
| 2.1      | O PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO .....   | 16        |
| 2.2      | ESTUDO TEÓRICO .....                             | 19        |
| 2.2.1    | Controle estatístico .....                       | 19        |
| <b>3</b> | <b>MÉTODO .....</b>                              | <b>22</b> |
| 3.1      | ANÁLISE DOS CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM .....        | 23        |
| 3.1.1    | Arame de Solda 1 .....                           | 23        |
| 3.1.1.1  | Tensão .....                                     | 23        |
| 3.1.1.2  | Corrente de Solda .....                          | 25        |
| 3.1.2    | Arame de Solda 2 .....                           | 27        |
| 3.1.2.1  | Análise estatística da Tensão .....              | 27        |
| 3.1.2.2  | Análise estatística da Corrente .....            | 29        |
| 3.1.3    | Arame 3 .....                                    | 30        |
| 3.1.3.1  | Análise estatística da Tensão no Arame 3 .....   | 30        |
| 3.1.3.2  | Análise estatística da Corrente no Arame 3 ..... | 32        |
| 3.1.4    | Análise estatística do Arame 4 .....             | 34        |
| 3.1.4.1  | Tensão .....                                     | 34        |
| 3.1.4.2  | Corrente .....                                   | 36        |
| 3.1.5    | Análise estatística da velocidade de Solda ..... | 37        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                           | <b>40</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                         | <b>41</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

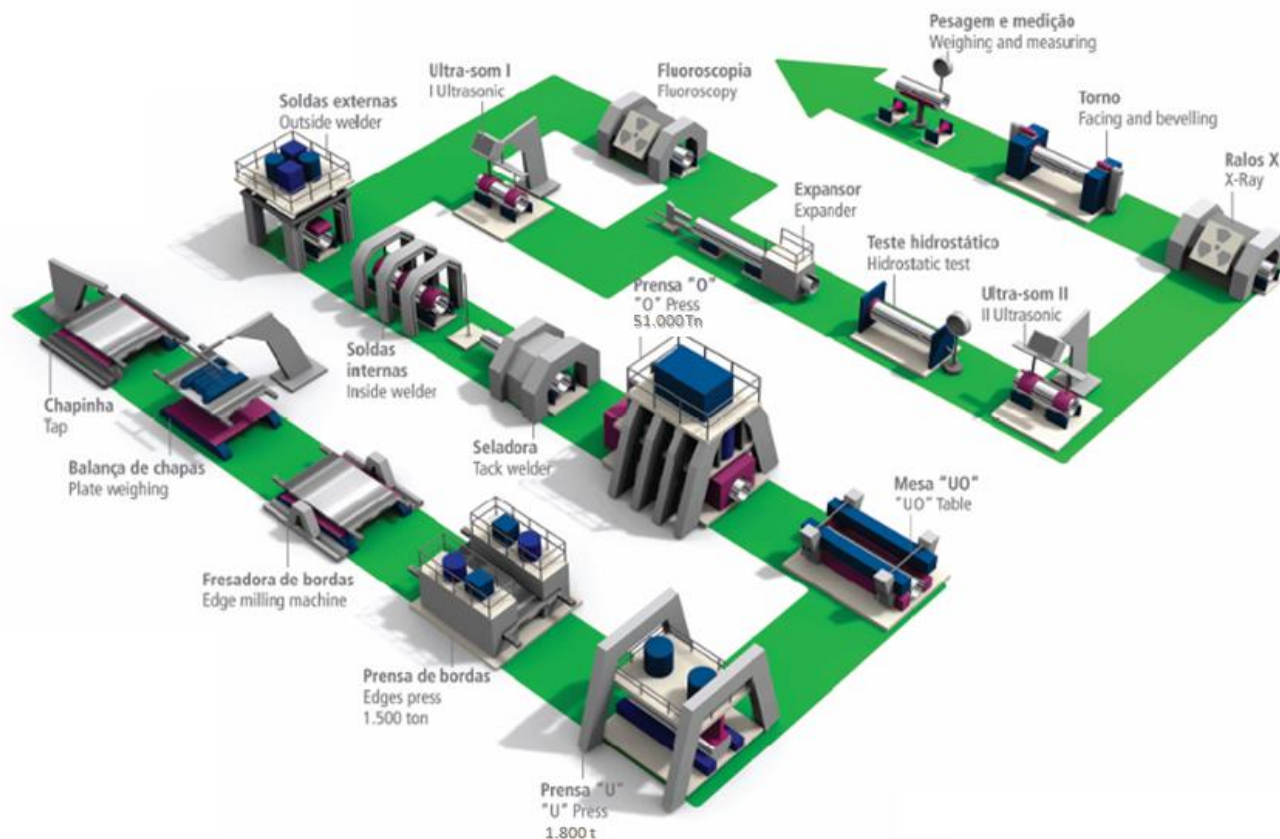
A habilidade de monitorar os parâmetros é de suma importância para um processo de solda manual e de importância crucial para um processo automatizado. Os avanços tecnológicos tornaram possível o controle em tempo real das variáveis como tensão (V), corrente (A) e velocidade de soldagem (in/min) assim como temperatura de solda (T) e umidade do fluxo. Dessa maneira possibilitaram uma melhoria no controle estatístico do processo de modo a utilizar de valores reais e atuais como *input* nos softwares de análises.

Nesse trabalho de graduação iremos realizar uma análise estatística por meio de softwares como o Minitab e Excel com a intenção de identificar possíveis melhorias em pontos individuais do processo, onde poderemos reduzir valores de rejeição com custo elevado para a produção, dessa maneira podendo levar as conclusões para os gestores da Fábrica X e por fim tentar atingir no real as melhorias no processo identificadas no projeto de graduação.

“O trabalho é um processo, e todo o processo tem de ser controlado. Para tornar o trabalho produtivo, portanto, requer-se a construção dos controles adequados para o processo de trabalho.” (DRUNKEL, Peter F.)

Para melhor identificação dos problemas iremos focar no subprocesso de solda interna, como mostrado na figura 1, onde nele foi identificado em conjunto com a Fábrica X o maior número de problemas recorrentes, sendo assim acreditamos que possa ser realizado um trabalho de melhoria significativo em relação à essa máquina de solda.

Figura 1 – Processo completo de solda por arco submerso



Fonte: Confidencial Fábrica X.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No atual cenário econômico do país os investimentos em trabalhos voltados a redução de custo de rejeição em processos industriais oferecem benefícios de baixo custo e altíssimo retorno econômico para a empresa beneficiada.

## 1.2 OBJETIVO

O principal objetivo do trabalho de graduação é identificar pontos de atenção no processo de solda por arco submerso, onde analisaremos apenas três variáveis, Tensão (V), Corrente (A) e Velocidade de solda (in/min), finalizando o projeto com a apresentação de melhorias e redução de custos no processo

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O PROCESSO DE SOLDA POR ARCO SUBMERSO

No processo de soldagem o consumível é mantido em um espaço entre a ponta derretida do eletrodo e a poça de fusão, a ponta do arame de soldagem, o arco elétrico e a parte da chapa onde será depositada a solda ficam cobertos por uma camada de material mineral granulado, que é chamado de fluxo de soldagem.

Sendo assim, a solda por arco submerso não apresenta fagulhas, tornando desnecessário equipamentos de proteção contra a radiação.

Para nosso estudo o processo de soldagem é constituído de 4 arames com os parâmetros de solda apresentados na tabela 1.

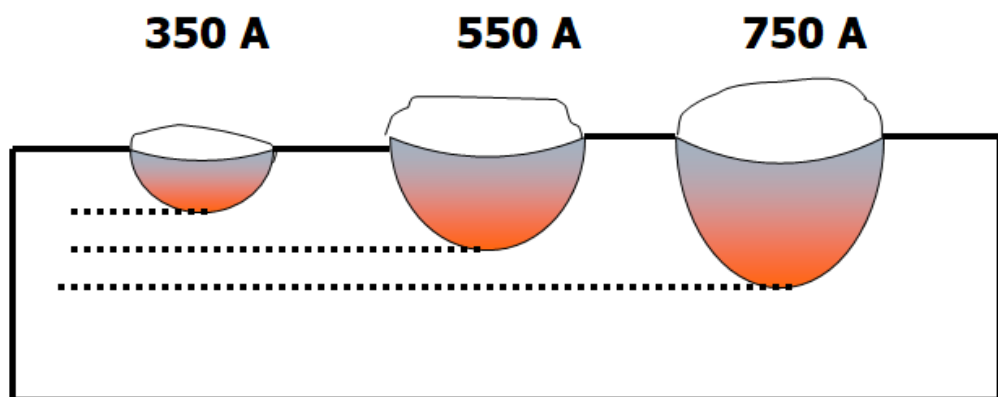
Tabela 1 – EPS – Parâmetros de soldagem

|                     | Arame 1 | Arame 2 | Arame 3 | Arame 4 | Units  |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Tensão              | 31      | 40      | 40      | 41      | V      |
| Corrente            | 940     | 900     | 830     | 780     | A      |
| Velocidade de Solda | 42      | 42      | 42      | 42      | in/min |

Fonte: Confidencial Fábrica X.

Como podemos observar os valores de corrente são superiores a 750 A, como mostra na figura 2 a seguir, temos a intenção de adquirir uma maior penetração do cordão de solda.

Figura 2 – Penetração do cordão de solda

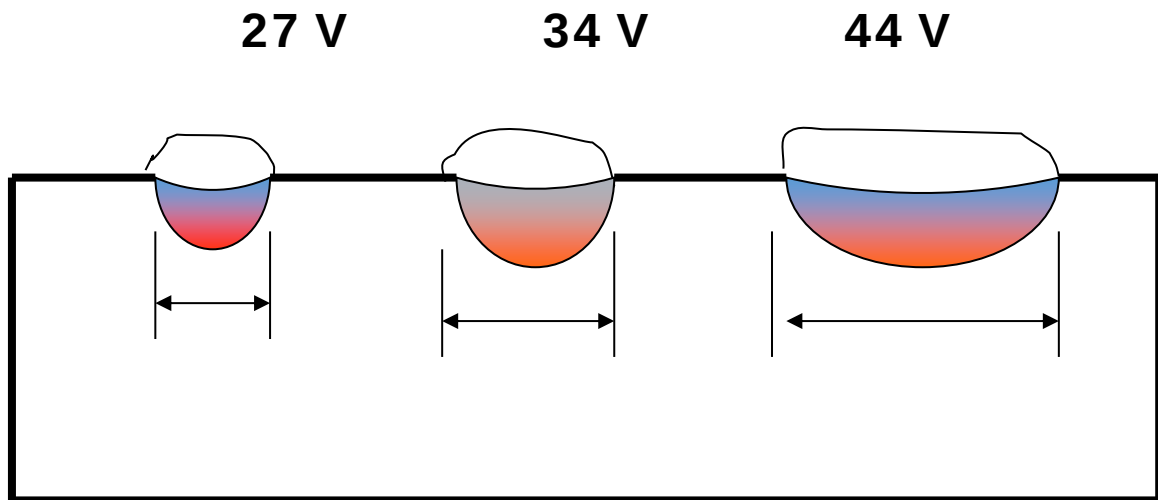


Fonte: AWS (1987).

Podemos observar que no arame 1 a corrente é maior que nos demais, sendo que a mesma vai diminuindo ao longo dos arames, pois a cada consumível a profundidade da solda também é menor. Confirmamos essa informação observando que no 4º arame a corrente de solda é menor que as demais, pois no último passe é necessária uma menor penetração.

Já para tensão de solda (V) observamos que os valores ficam em torno de 40 Volts, tendo como base a figura 3 é possível observar que o processo de soldagem necessita de uma largura do cordão de solda média.

Figura 3 – Tensão no cordão de solda

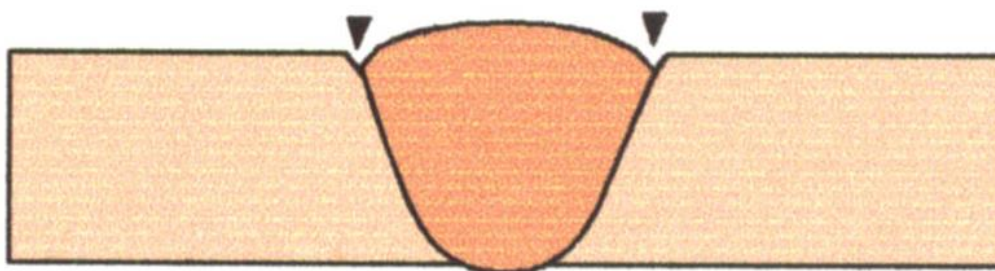


Fonte: AWS (1987).

Nota-se que no Arame 1 a tensão de solda é menor que as subsequentes, isso se deve ao fato de que no primeiro arame a largura do cordão deve ser menor como mostra a figura 4, sendo assim, a tensão vai aumentando de acordo com os arames a seguir, sendo maior no último arame, pois é onde acontece a maior espessura de soldagem.

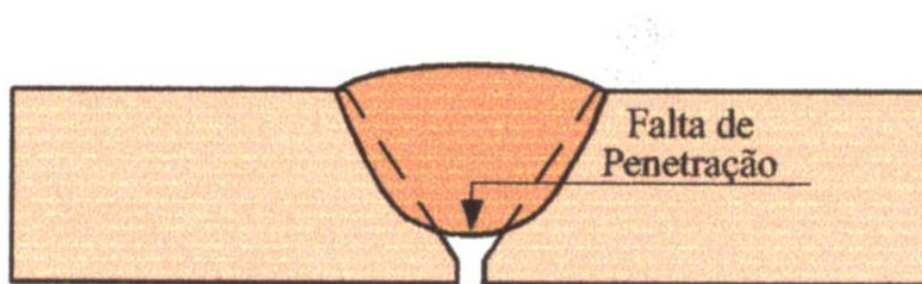
No nosso trabalho iremos focar em problemas de solda na máquina interna B, onde aconteceram os maiores problemas de soldagem referentes ao último projeto da Fábrica X. Daremos mais importância para defeitos de solda e não defeitos de matéria prima. Os defeitos de solda que devemos ter como principais são: Mordedura (figura 4), Falta de Penetração (Figura 5) e Porosidade (Figura 6).

Figura 4 – Ilustração de Mordedura



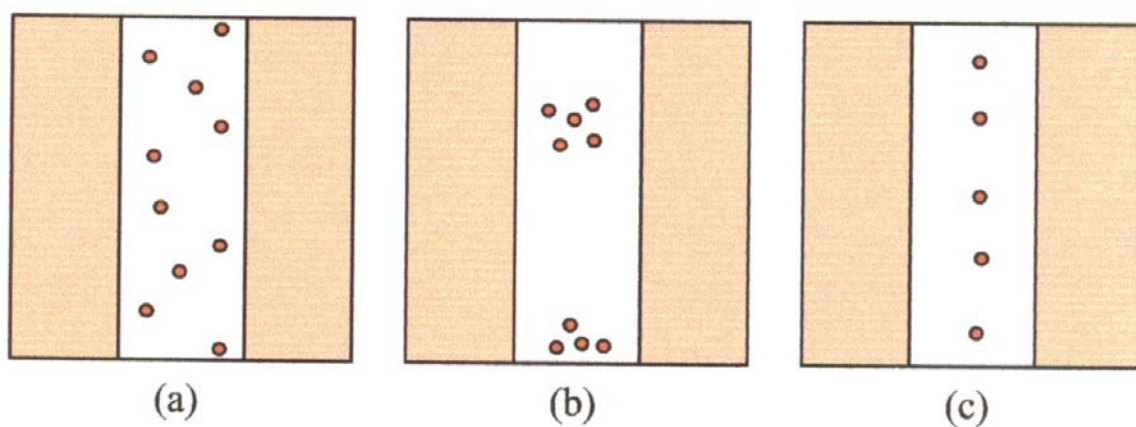
Fonte: AWS (1987).

Figura 5 – Ilustração de falta de Penetração



Fonte: AWS (1987).

Figura 6 – Ilustração de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada e (c) alinhada.

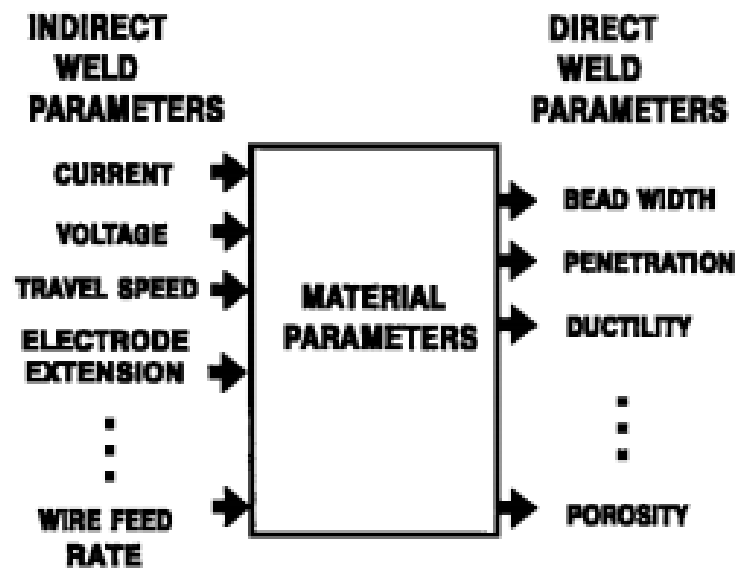


Fonte: AWS (1987).

## 2.2 MÉTODO DE PESQUISA

Existem vários tipos de controle estatísticos que podemos utilizar, cada um com seu propósito específico. Sendo o objetivo do nosso trabalho monitorar os parâmetros de solda principais (Figura 7) como, tensão, corrente e velocidade de solda, vamos durante o nosso trabalho identificar a média, desvio padrão, média dos subgrupos, tamanho da amostra necessária, limites de controle e calcular com o auxílio do software minitab a capacidade do nosso processo.

Figura 7 – Parâmetros de soldagem



Fonte: AWS (1987).

### 2.2.1 Controle estatístico

Os dados para análise do processo foram retirados diretamente das máquinas de solda da Fábrica X

Ao calcular a média dos subgrupos podemos identificar como se comporta a distribuição das amostras no universo. A média encontrada permite ao controlador, prever e tomar decisões precisas sobre o processo de soldagem

O número de amostras (n) foi calculado da seguinte maneira, com erro de 2%. Temos:

$$n = \left( \frac{Z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (1)$$

Tendo como grau de confiança desejado de 95% podemos da tabela 2 encontrar o Z.

Tabela 2 – Valor crítico correspondente ao grau de confiança

| Grau de confiança desejado | Escore z |
|----------------------------|----------|
| 80%                        | 1,28     |
| 85%                        | 1,44     |
| 90%                        | 1,65     |
| 95%                        | 1,96     |
| 99%                        | 2,58     |

Fonte: Costa (2004)

Assim sendo utilizando  $Z=1,96$ , desvio padrão de 0,61 – Amostra de Tensão Cordão 1 e E-1% encontramos o número de amostras de 15.000. Dessa maneira, o total de amostras utilizadas no trabalho foi de 20.000.

Tendo encontrado o número de amostras nós podemos partir para o cálculo da média da seguinte maneira:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2)$$

Dessa maneira encontramos para cada arame de solda as suas respectivas médias, levando em consideração o número total de amostras para esse consumível e os valores das amostras.

Dando continuação no cálculo dos fatores importantes para análise, temos como tarefa o cálculo do desvio padrão. Que foi calculado da seguinte maneira:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (x_i - \mu)^2}}{n} \quad (3)$$

Também calculamos a na sequência os controles estatísticos para subgrupos. Tendo por subgrupo um total de 700 amostras aproximadamente ( $n=700$ ), podemos realizar o calculo da média dos subgrupos através da fórmula a seguir.

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum \bar{x}_i \quad (4)$$

E para finalizar os cálculos estatísticos temos o desvio padrão dos subgrupos calculados pela fórmula.

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{k \sum \bar{x}_i^2 - [\sum \bar{x}_i]^2}{k(k-1)}} \quad (5)$$

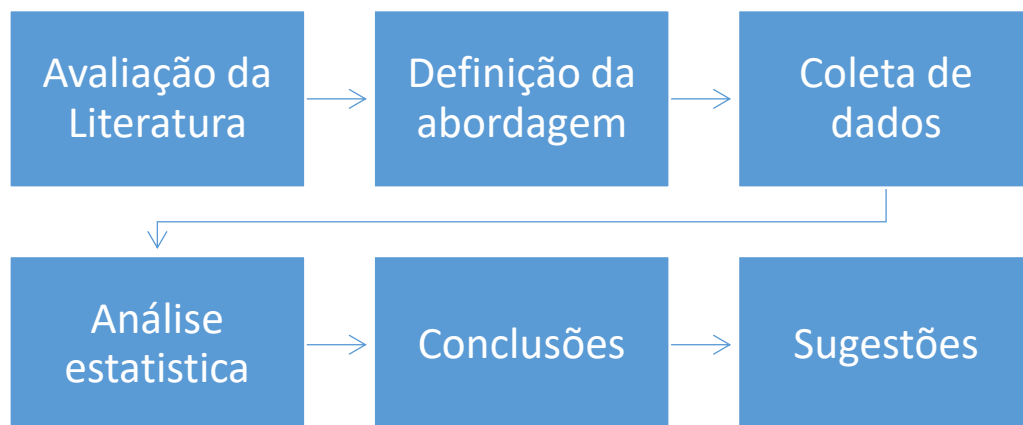
Para esse trabalho não foi necessário calcular o Range das amostras nem seus Limites de Controle Superior (LCS) e Limites de Controle Inferior (LCI), pois nas especificações de soldagem que são padronizadas pelo projeto já constam tais valores. Por exemplo para Tensão a tolerancia é de 4 V, sendo seu LCS o o seu alvo somado a tolerância, e o LCI o seu alvo subtraído da tolerância

### 3. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa realizada utilizou um método quantitativo, ou seja, foi definido variáveis específicas, afim de se obter uma resposta real em relação a proposta desejada. Durante a análise a proposta adotada foi de um processo industrial que possui interesse em melhorias relevantes que se mostram atrativas para a Fábrica X.

Inicialmente foram avaliados materiais acadêmicos que já haviam sido divulgados que abordassem análises estatísticas. Partindo desse principio podemos focar em materiais sobre processo de solda por arco submerso sendo a base da pesquisa a análise estatística desses mesmos. Tendo o foco definido o trabalho foi baseado em pesquisas (George, 1997), (MOHSEN KAZEMI, 2015) que serviram como norte para o início do trabalho.

Fluxograma 1 – Mapa de processo do trabalho de graduação



Fonte: Produção do próprio autor

Após a definição da literatura, optou-se por um estudo do caso sendo que os dados já estavam presentes no processo industrial da Fábrica em questão, concomitantemente trabalhando com dados empíricos pautados na prática.

Seguindo com a pesquisa o foco voltou-se para a coleta de dados para a base. Para tal foi utilizado um programa específico da Fábrica X onde é possível retirar dados das máquinas de solda específicas, para cada tubo escolhido como representante de um conjunto de amostras.

Em posse dos dados partiu-se para a elaboração dos gráficos para análise do processo em conjunto dos parâmetros estatísticos de maior importância para se tomar decisões representativas em relação a mudanças no processo.

Com os gráficos elaborados foi possível extrair informações a fim de perceber pontos de melhorias no sistema como um todo, analisando os consumíveis de solda separadamente. Por fim com as análises realizadas e obtidas a conclusão pode-se levar melhorias para a planta onde os responsáveis irão optar por realiza-las ou não.

De forma simplificada o fluxo do projeto de graduação está mostrado no Fluxograma 1.

### 3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

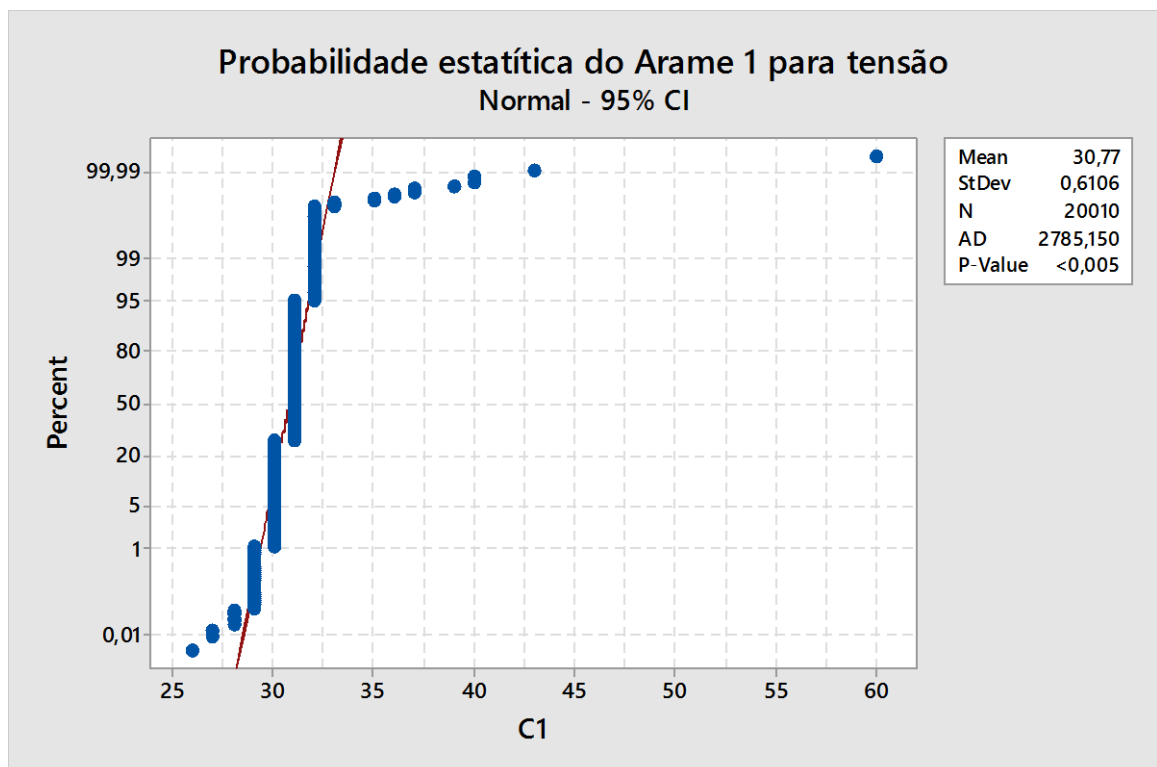
#### 3.1.1 Arame de Solda 1

##### 3.1.1.1 Tensão

Para o Arame de Solda 1 temos da Tabela 1 que sua tensão deve ser de 31V para atingir os objetivos esperados para esse consumível. Após coletar as 20000 amostras para esse critério nós utilizamos do Minitab para realização da Análise estatística.

A Figura 7 Ilustra a probabilidade estatística dos valores do arame 1 na tensão enquanto a Figura 8 Ilustra a capacidade do processo para esse Arame em relação a Tensão.

Figura 7 – Probabilidade estatística para tensão no Arame 1



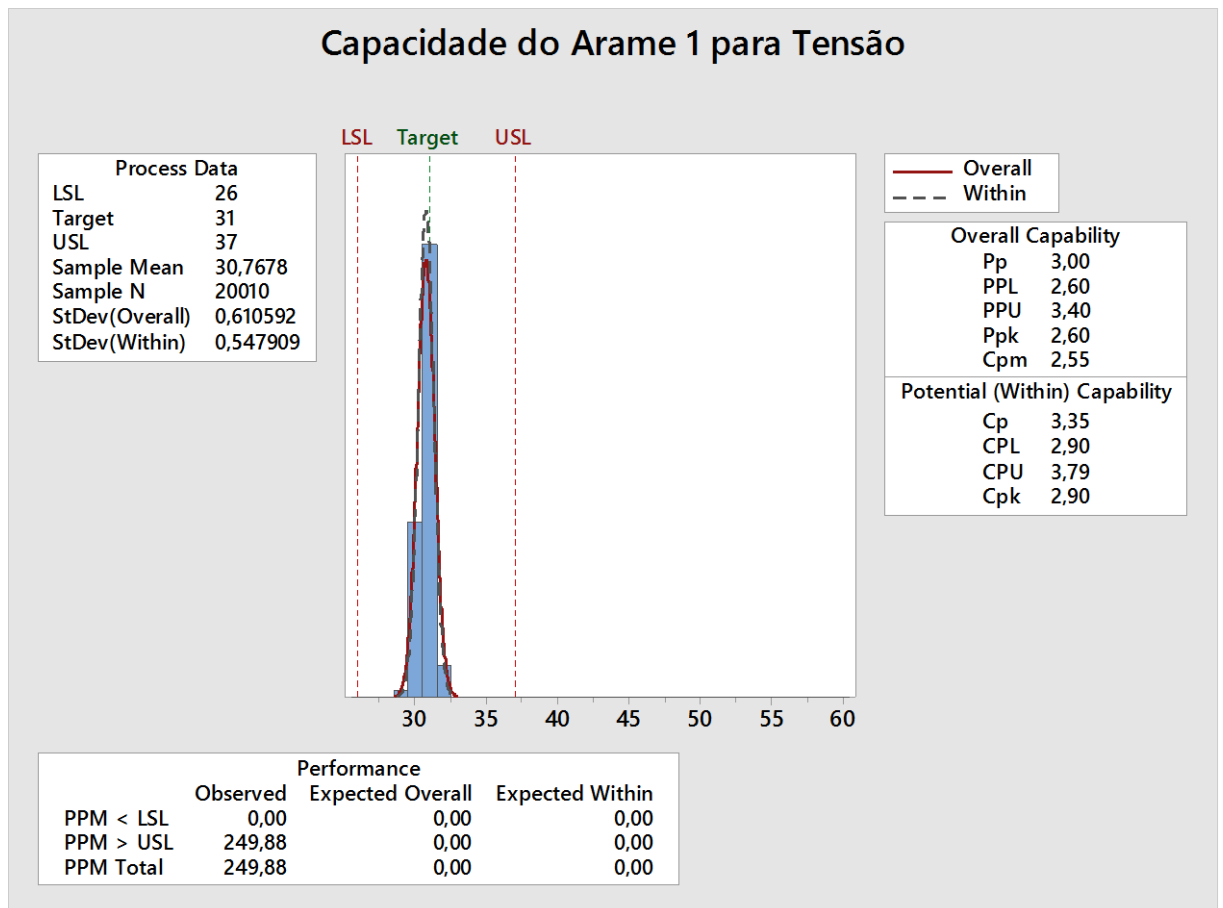
Fonte: Produção do próprio Autor

Podemos analisar esse gráfico de tal modo que percebemos a média do processo em torno de 30,77 identificando que o processo está ajustado com os parâmetros de solda estipulados para ele, do mesmo modo olhamos o desvio padrão e percebemos que ele chega em torno de 0,61 o que demonstra que mesmo tirando ou adicionando o desvio padrão na média, nós não atingiríamos os LCS ou LCI, o que significa que o processo está controlado.

Analisando o P-Value obtido também podemos concretizar essa informação.

Um ponto de preocupação são os pontos acima de 35 e abaixo de 26 que indicam que há pontos fora dos limites, porém na análise da capacidade do processo veremos que esses pontos são de importância menor para o processo.

Figura 8 – Capacidade do Arame 1 para Tensão



Fonte: Produção do próprio autor

Avaliando a capacidade do processo podemos observar que a curva do processo atual (Continua) contra a curva do processo melhorado (tracejada) estão muito próximas, assim como o Ppk e o Cpk dados pelo minitab demonstram que o processo está muito próximo do seu ótimo, sendo que algumas amostras passaram do LCS, um total de 250 PPM. Entendemos que essas

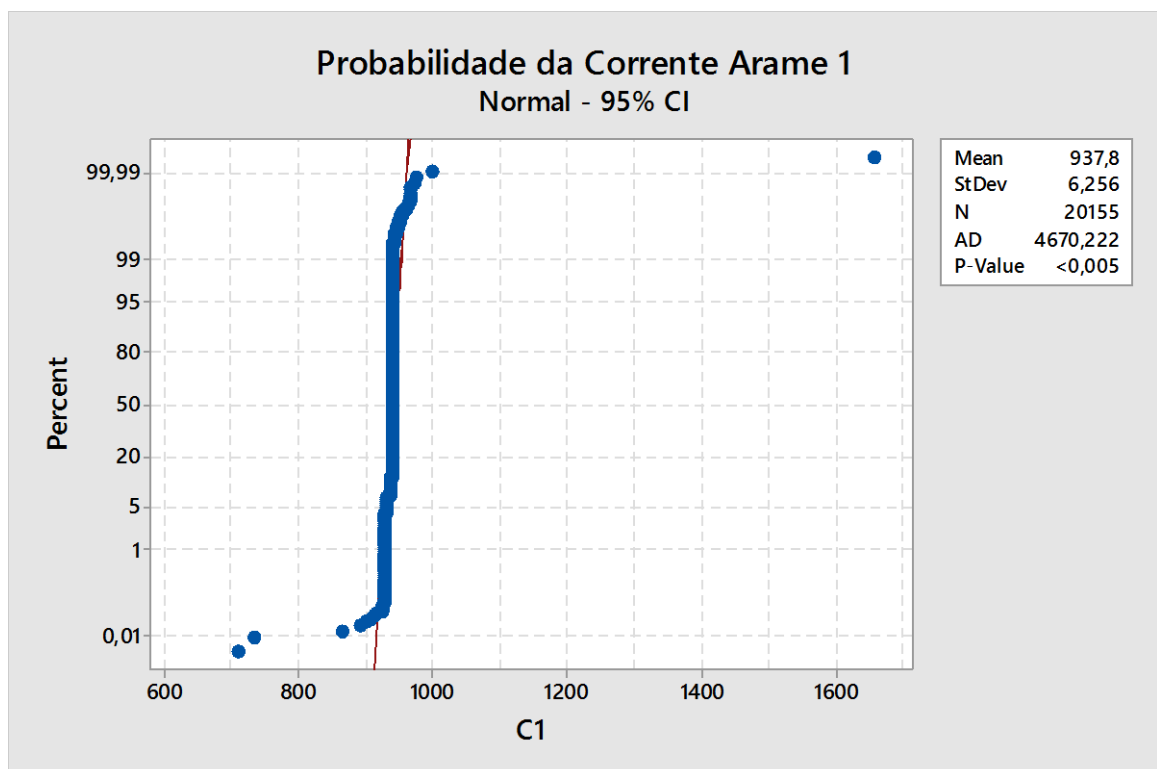
amostras que ultrapassaram o LCS são responsáveis pela causa das rejeições como Mordedura, Porosidade ou até mesmo Falta de Penetração. Sendo em um caso como podemos perceber na figura 7, essa tensão ficou próxima de 70 V o que pode ser motivo para uma falta de penetração devido ao fato da poça de solda ser mais larga que o comum.

### 3.1.1.2 Corrente de Solda

Da tabela 1 podemos identificar que a corrente de solda deve ser de 940 A com desvio de 90 A para cima ou para baixo. Essa corrente deve ser mais alta pelo fato do primeiro arame necessitar de uma maior penetração na metal base que os demais. Assim como na Tensão utilizamos o minitab para fazer a análise estatística das 20.000 amostras desse processo.

A Figura 9 Ilustra a probabilidade estatística dos valores do arame 1 na corrente enquanto a Figura 10 Ilustra a capacidade do processo para esse Arame em relação a corrente.

Figura 9 – Probabilidade da Corrente no arame 1

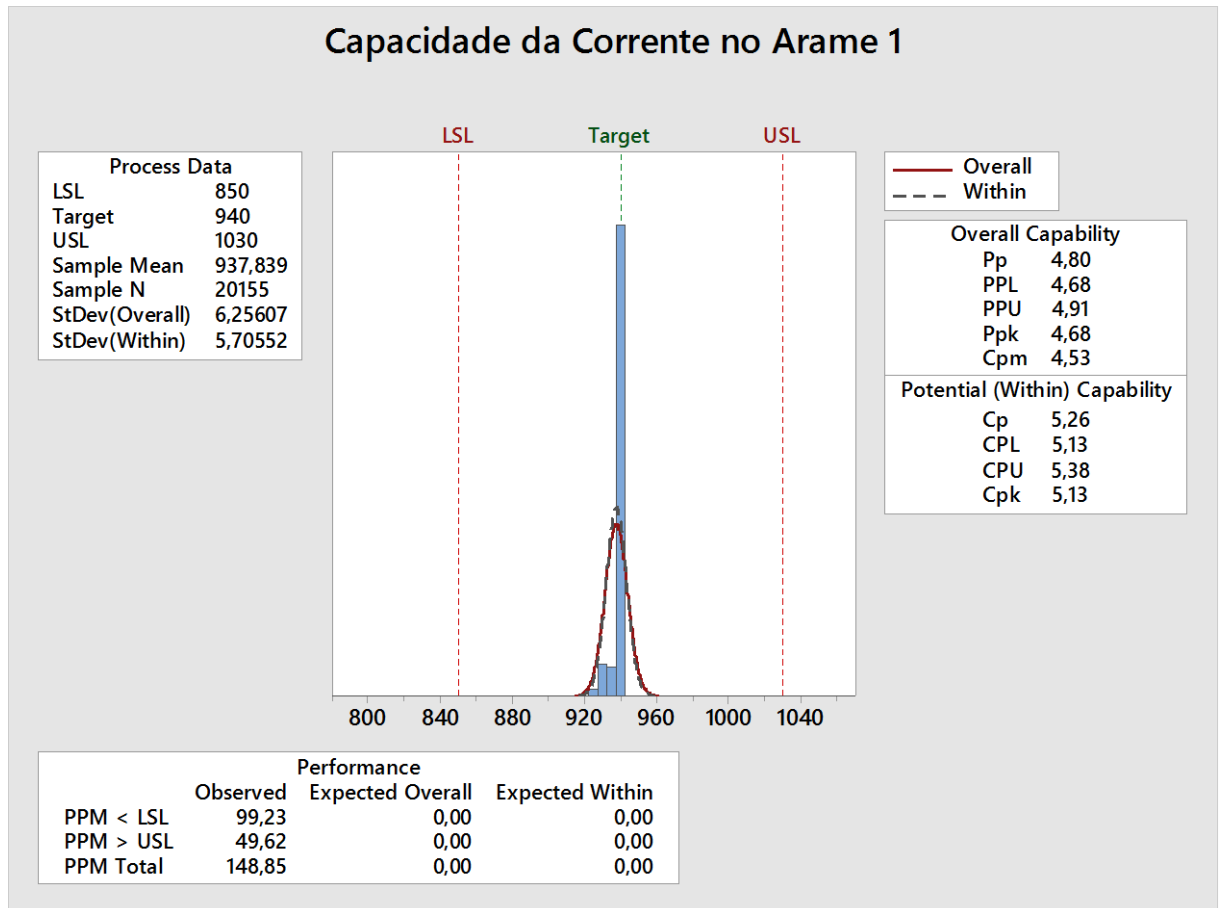


Fonte: Produção do próprio Autor

Podemos observar que Diferente da tensão valores da corrente se concentram mais em torno dos 940 A, porém também sujeitos a falhas, como mostradas no Ponto abaixo de 800 e no acima de 1600 A. Podemos aproveitar essa figura para analisar o P-Value que indica menor

que 0,05, o que nos mostra que podemos assumir essa hipótese como real. Ainda nessa figura, verificamos a média e seu desvio padrão, que indica um processo estável e com fatores estatísticos controlados dentro dos LCS e LCI.

Figura 10 – Capacidade da Corrente no Arame 1



Fonte: Produção do próprio Autor

Analisando o gráfico de capacidade da corrente no arame 1 podemos verificar a curva real (continua) contra a curva melhorada (tracejada) e verificar que as duas curvas estão muito próximas, demonstrando um processo muito perto do ótimo. Essa afirmação pode ser confirmada pela proximidade entre Ppk e o Cpk, indicadores de probabilidade e capacidade do processo, respectivamente, mostrados na imagem como 4,68 e 5,13. A possível melhoria no sistema se pode ser identificada principalmente nos pontos abaixo de 800 e acima de 1600 A, onde ocorreram os erros de processo. Também analisamos que diferente da tensão, o PPM atingido pela performance do processo abaixo do LCI e acima do LCS não chegaram a 150. O que indica um foco possível na melhoria da tensão do processo. Onde aconteceram mais rejeições em PPM.

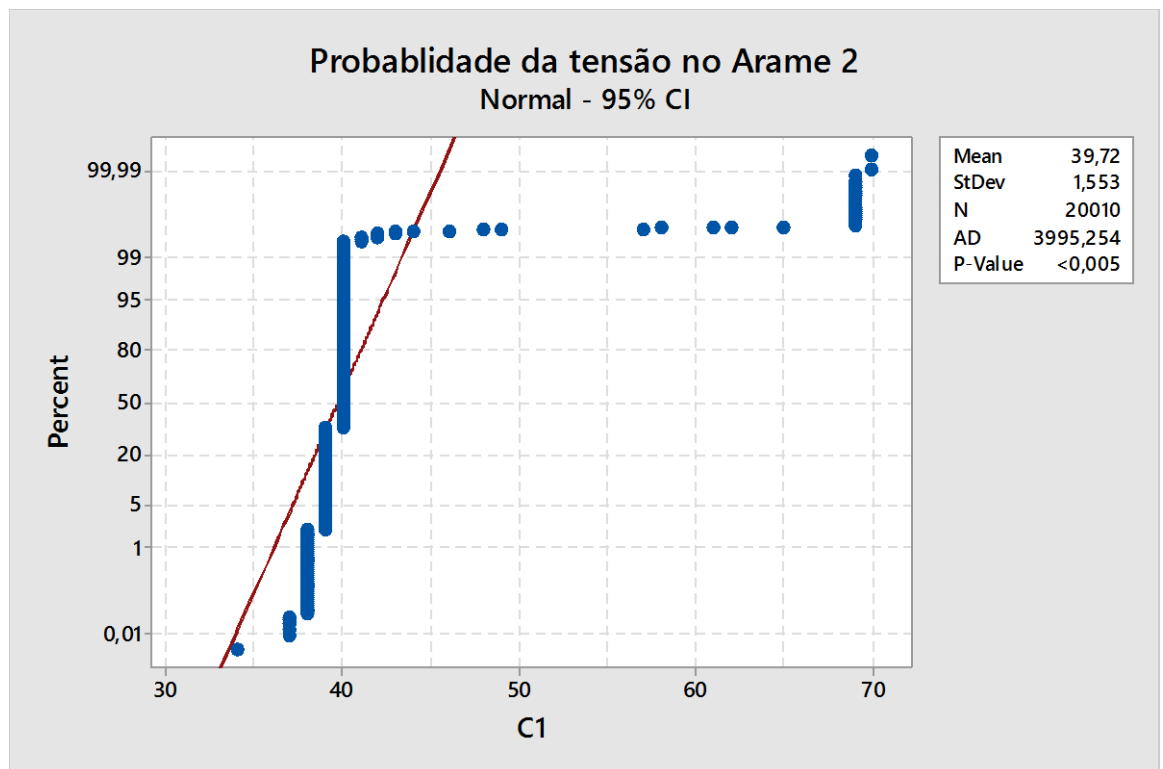
### 3.1.2 Arame de Solda 2

#### 3.1.2.1 Análise estatística da Tensão

Assim como no arame 1 foram retiradas 20.000 amostras da máquina de solda interna com a intenção de identificar as falhas ou parâmetros a serem melhorados. Da tabela 1 retiramos que os valores da tensão de solda e corrente de solda devem ser de 40 V e 900 A com um desvio para tensão de 4V e para a corrente de 90 A.

A Figura 11 Ilustra a probabilidade estatística dos valores do arame 2 na Tensão enquanto a Figura 12 Ilustra a capacidade do processo para esse Arame em relação a Tensão.

Figura 11 – Probabilidade da tensão no arame 2

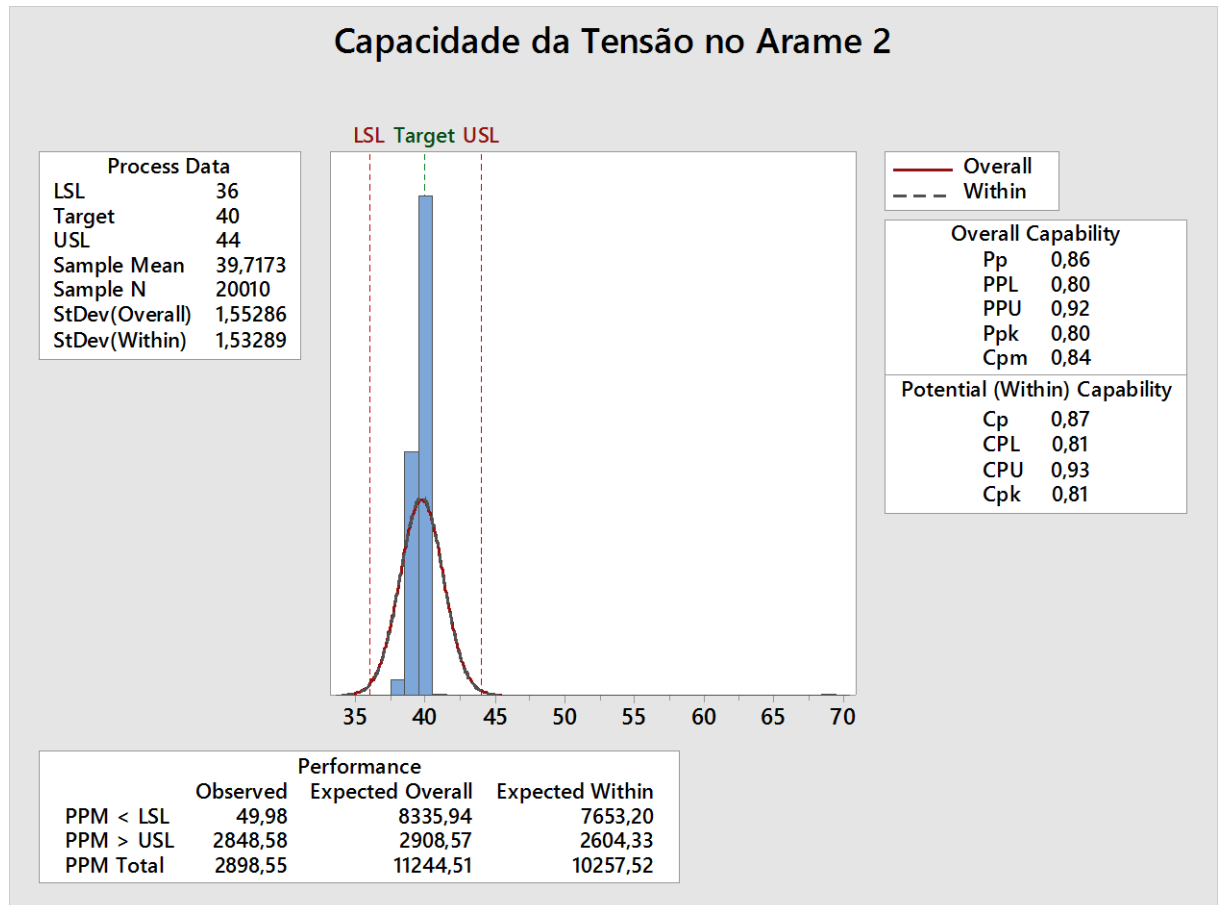


Fonte: Produção do próprio Autor

Analisando o gráfico podemos perceber que aproximadamente 1% de desvios ocorrem acima do LCS, que é 44 V, porém mesmo com esse desvio, média das amostras se manteve próxima da meta de 40 V devido ao fato de seu desvio padrão ser pequeno. Podemos também perceber que o P Value está abaixo de 0.05 o que indica que podemos considerar os dados reais. As principais amostras que ficaram próximas a 70 V foram encontradas em sua maioria no final dos tubos, onde aconteceram muitas oscilações da tensão na linha elétrica. O motivo encontrado

e explicado pelos engenheiros foi de que as escovas de aterramento entre o arame 1 e 2 estavam mais longes que o projetado, causando dificuldade na passagem da tensão pelo eletrodo, e quando isso acontecia a tensão aumentava para vencer essa resistência. Esse espaço foi reduzido e os problemas gerados pela mesma foram em sua maioria solucionados.

Figura 12 – Capacidade estatística da tensão no arame 2



Fonte: Produção do próprio Autor

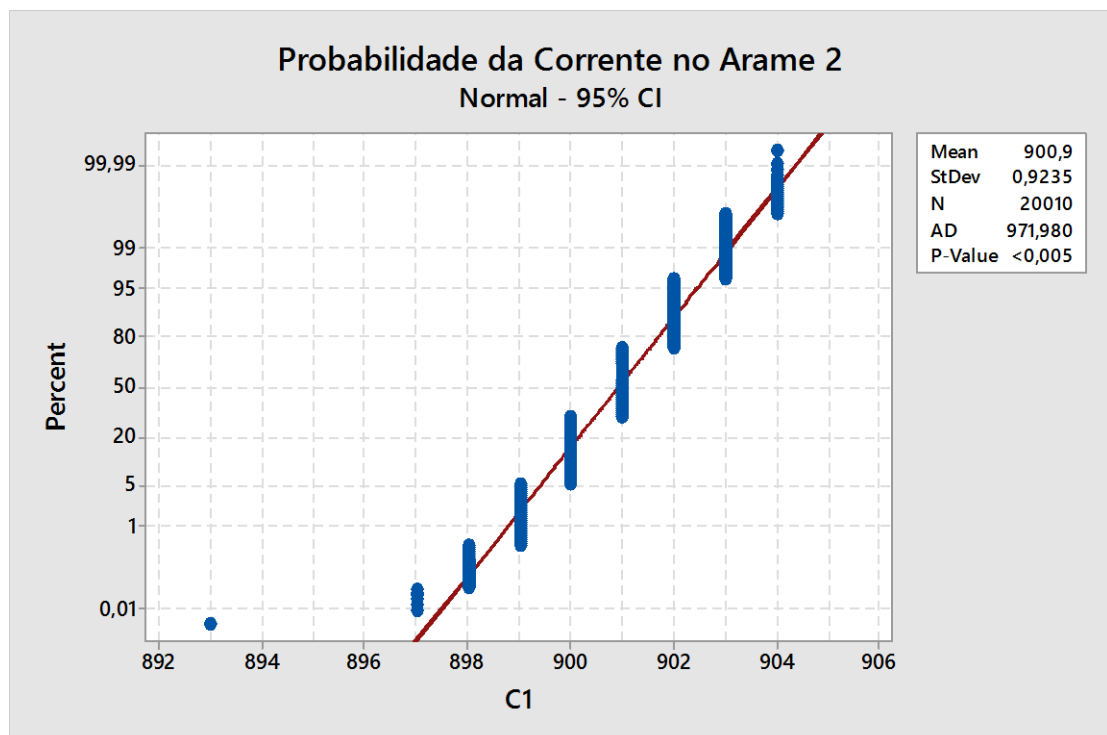
Apesar da probabilidade e os erros PPM indicarem um alto nível de amostras acima do LCS a curva real e melhorada do processo se mantiveram praticamente sobrepostas, indicadas pelo Ppk e Cpk, como 0,7 e 0,71, respectivamente. Indicando que o processo real, está praticamente otimizado. Podemos perceber um PPM de quase 3.000 amostras acima do LCS. Deve-se ao fato da distância entre as escovas de aterramento já comentadas anteriormente.

### 3.1.2.2 Análise estatística da Corrente

Como já citado acima, a corrente no arame de solda 2 deve ser de 900 A com desvio superior e inferior de 90 A. Sendo assim realizamos a análise das 20.000 amostras no minitab para indicadores estatísticos.

As figuras 13 e 14 mostram respectivamente para o probabilidade e capacidade do processo.

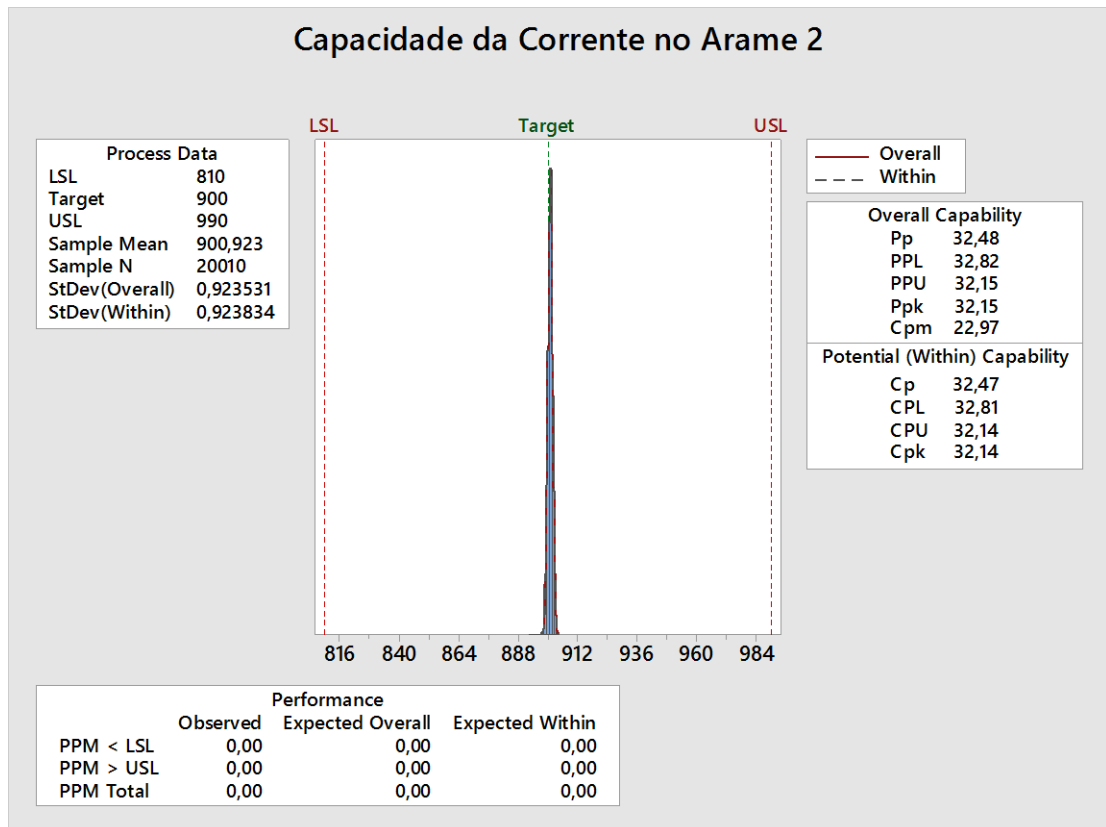
Figura 13 – Probabilidade da Corrente no Arame 2



Fonte: Produção do próprio Autor

Dado o fato que o alvo da corrente é de 900 A com desvio de 90 A Podemos concluir que a probabilidade da corrente para o arame 2 está otimizada pois sua média se encontra em 900,9 A e seu desvio em 0,9235. Sem mais comentário.

Figura 14 – Capacidade da Corrente no Arame 2



Fonte: Produção do próprio Autor

Assim como na tensão esse processo está otimizado, seu indicador de performance, Ppk, está alto e idêntico ao indicador de capacidade, Cpk. Respectivamente 32,15 e 32,14. Demonstrando assim e confirmando a análise.

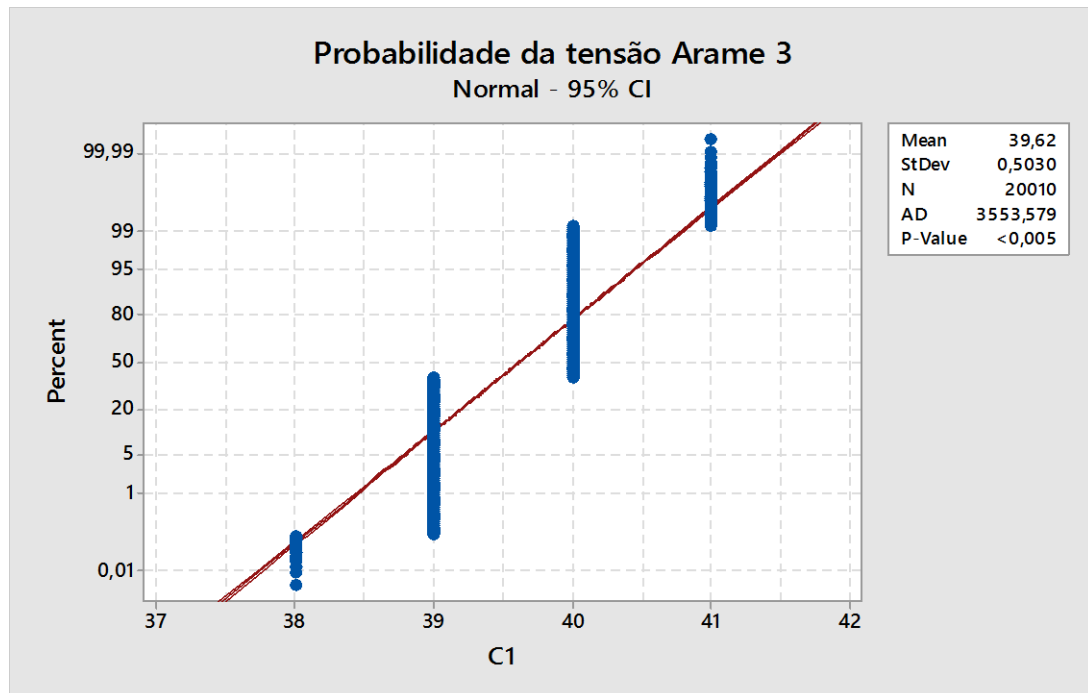
### 3.1.3 Arame 3

#### 3.1.3.1 Análise estatística da Tensão no Arame 3

Para o Arame de Solda 3 temos da Tabela 1 que sua tensão deve ser de 40V para atingir os objetivos esperados para esse consumível, com tolerância de mais ou menos 4V. Após coletar as 20000 amostras para esse critério nós utilizamos do Minitab para realização da Análise estatística.

A Figura 15 ilustra a probabilidade estatística dos valores do arame 3 na tensão enquanto a Figura 16 Ilustra a capacidade do processo para esse Arame em relação a Tensão.

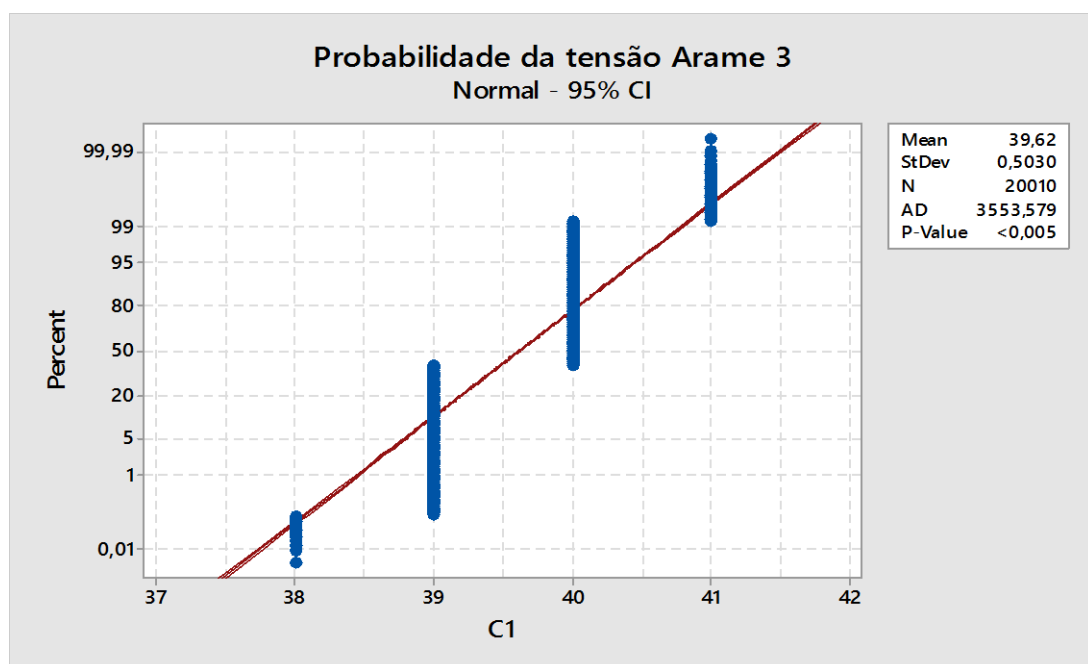
Figura 15 – Probabilidade da tensão no Arame 3



Fonte: Produção do próprio Autor

Podemos analisar a Figura 15 e afirmar que não houve amostras abaixo do LCI ou acima do LCS, dessa maneira o a qualidade do processo está otimizada. Com a média em 39,62, e seu desvio padrão de 0,5030, identificamos um p Value menor que 0,05 o que indica que as amostras são válidas para uma análise real.

Figura 16 – Capacidade da tensão no Arame 3



Fonte: Produção do próprio Autor

A capacidade do processo, como já identificada no gráfico de probabilidade, está otimizada. Comprovando essa afirmação com os índices Ppk e Cpk iguais em 2,40. Podemos também chegar a essa conclusão através das curvas reais e otimizadas, estando as mesmas sobrepostas.

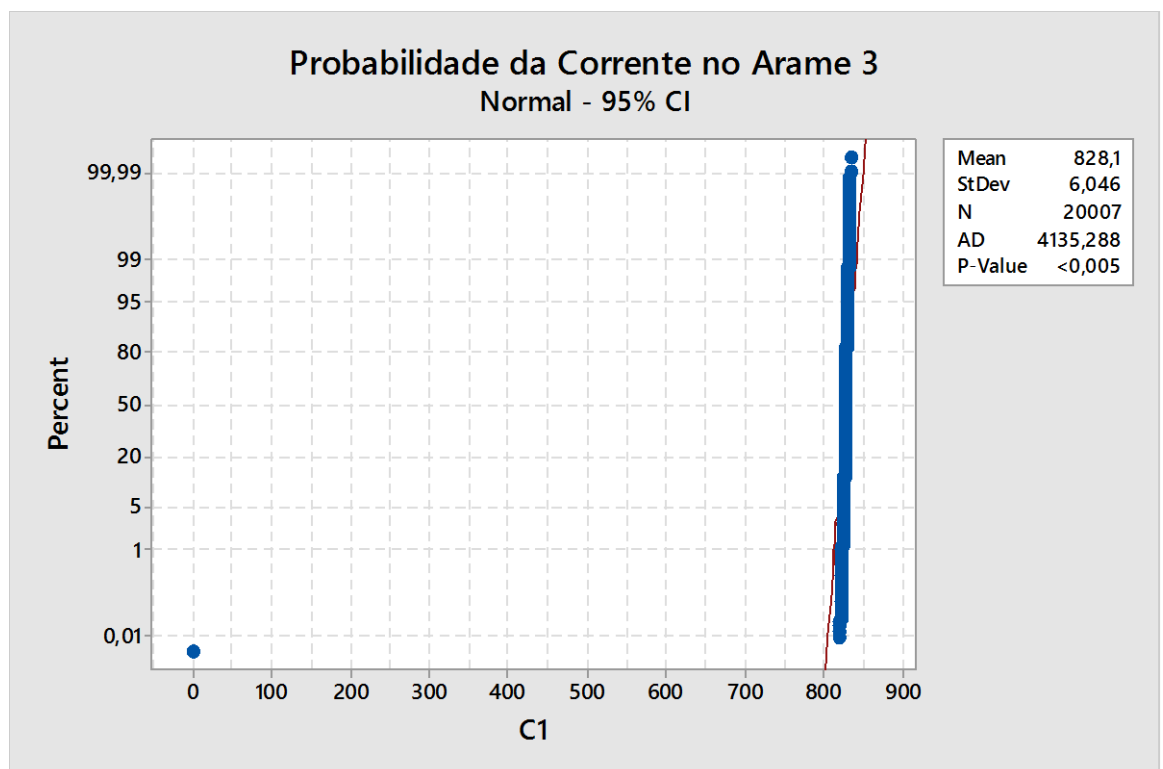
### 3.1.3.2 Análise Estatística da Corrente no Arame 3

Para o Arame 3 temos da tabela que sua corrente deve ter como alvo 830 A, o que demonstra uma menor necessidade de penetração na metal base, e uma maior largura da poça de fusão. Sua tolerância assim como nos outros arames é de 90 A superiores e inferiores.

Após a coleta das 20.000 amostras utilizamos do minitab para gerar a análise de probabilidade e capacidade da corrente para esse arame.

A figura 17 monstras a probabilidade da corrente nesse arame e a Figura 18 mostra a capacidade desse processo.

Figura 17 – Probabilidade da corrente no Arame 3

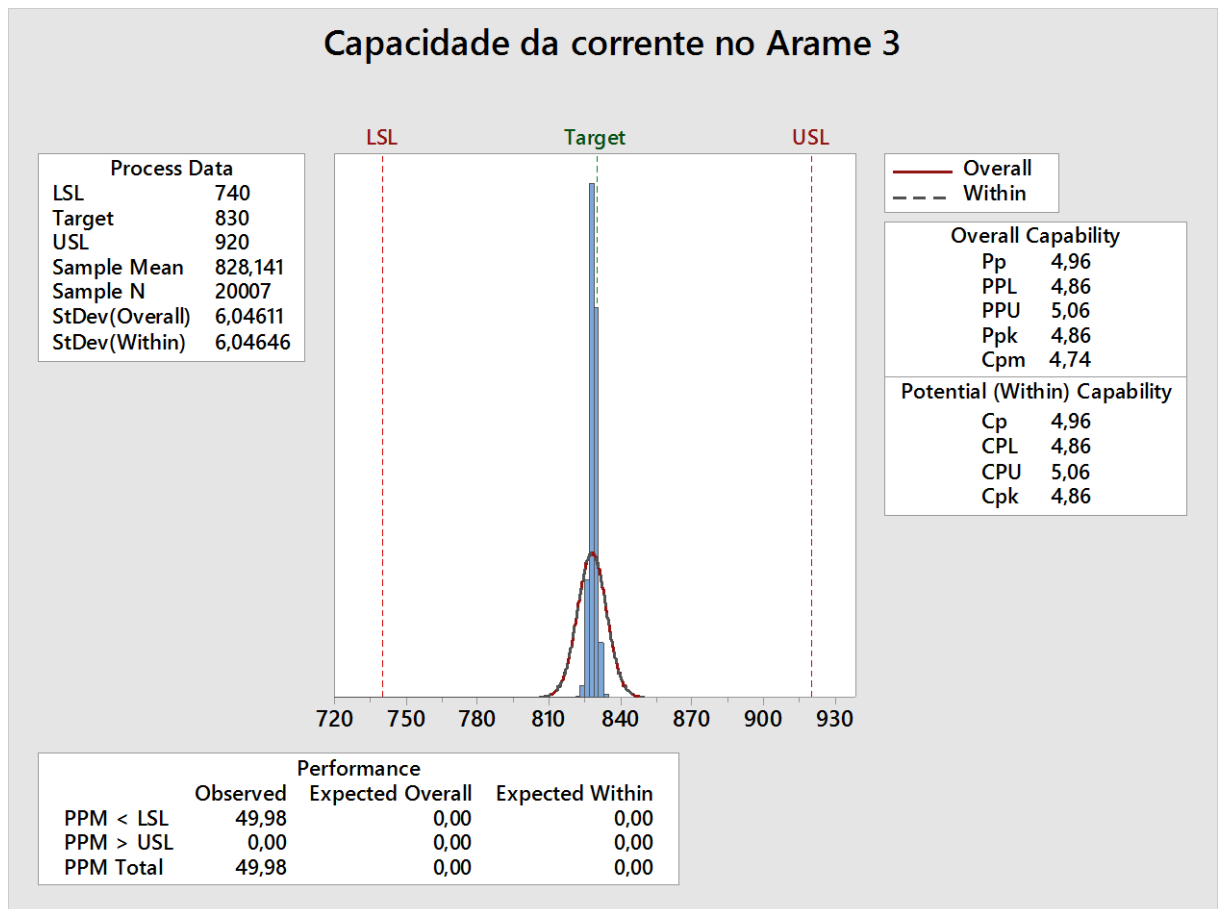


Fonte: Produção do próprio Autor

Podemos observar que algumas amostras foram apontadas com corrente igual a 0 A, isso pode ser devido a uma falha elétrica no aparelho, o que acarretou na perda do tubo, com uma

rejeição por falha de solda. Mesmo com essa falha podemos observar que a média das amostras se manteve muito próxima ao alvo de 830 A, sendo ela 828 A., porém um desvio padrão um pouco mais alto que o que estávamos tendo, de 6,046. Isso possivelmente aconteceu devido a falha de solda. Mesmo assim o P Value mostra um valor menor que 0,05 o que indica que as amostras podem ser utilizadas como reais.

Figura 18 – Capacidade da corrente no Arame 3



Fonte: Produção do próprio Autor

Pode-se perceber um Ppk e um CPK idênticos, sendo assim a performance do processo e sua capacidade se encontram equivalentes. Da mesma maneira estão suas curvas reais e melhorada. Com um Target de 840 e um PPM de apenas 50 amostras abaixo do LCI podemos entender que o Arame 3 necessita de melhorias de estabilidade da rede elétrica pois os valores zerados indicam que em algum momento faltou energia para esse arame. Não descartando a mesma hipótese do arame 2 das escovas de aterramento estarem distantes entre si.

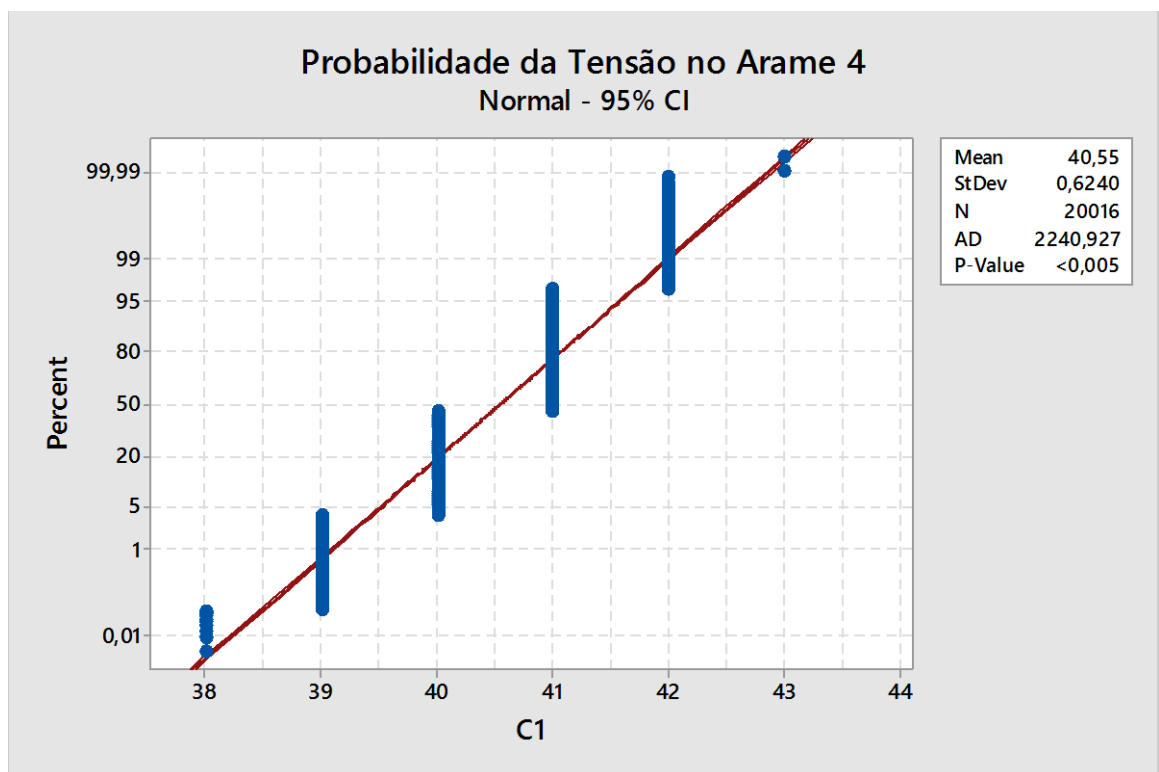
### 3.1.4 Análise estatística do Arame 4

#### 3.1.4.1 Tensão

Para o Arame 4 a tensão de solda aumenta levemente para 31 V, com a intenção de aumentar a largura da Poça de Solda, pois no último passe a poça deve fechar o cordão de solda onde sua largura está no tamanho máximo.

Após a coleta dos 20.000 dados para a análise estatística, colocamos os valores de input no Minitab e realizamos as análises de probabilidade e capacidade do processo visualizando primeiramente a tensão de Solda no Arame 4. Sabendo que seu alvo é de 31 V com tolerância superior e inferior de 4V foram geradas as análises mostradas nas Figuras 19 e 20, probabilidade da tensão no Arame 4 e Capacidade da tensão no Arame 4 respectivamente.

Figura 19 – Probabilidade da Tensão no Arame 4

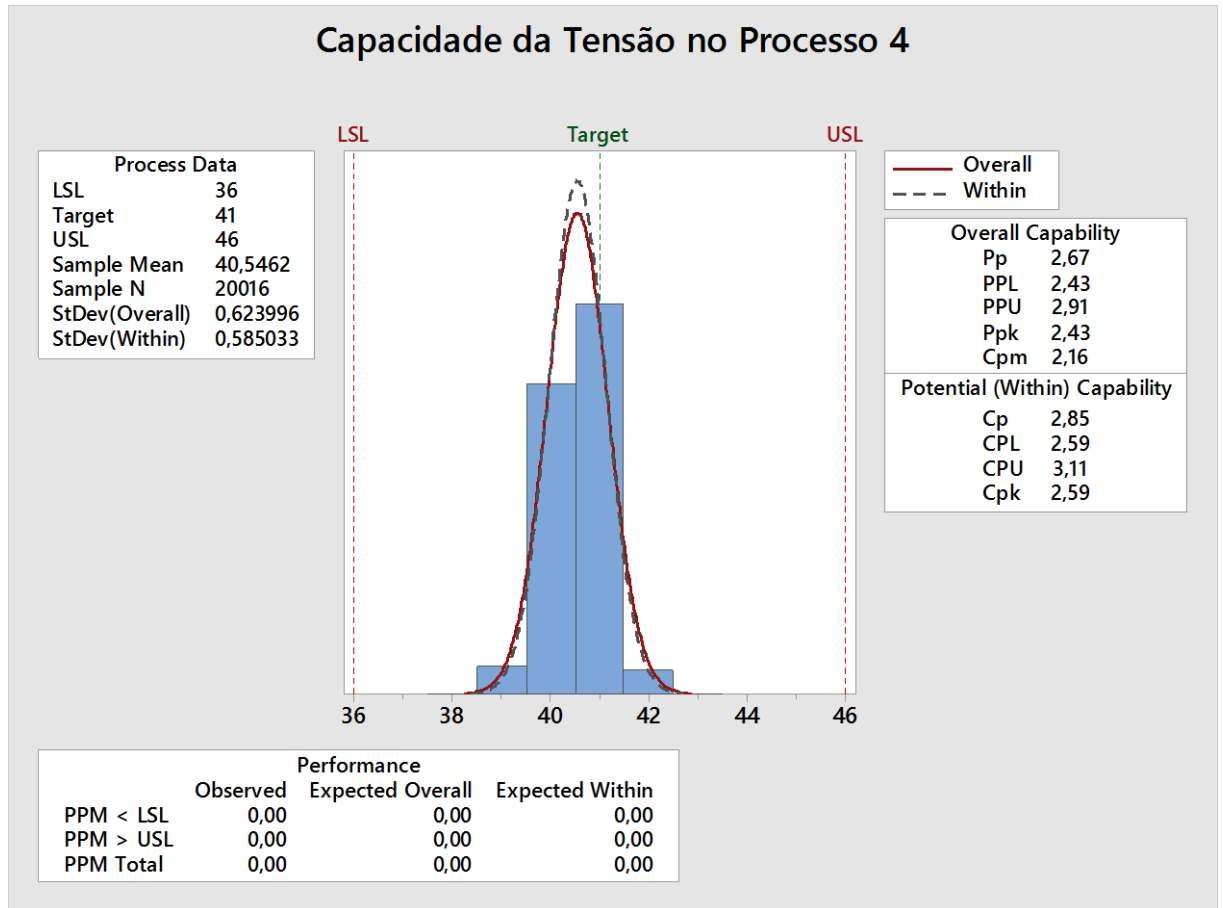


Fonte: Produção do próprio Autor

Foi observado na análise gerada uma média das amostras de 40,55 V com um desvio padrão de 0,62 V. Com um P Value menor de 0,05 mostrando que os valores podem ser assumidos como reais. Com a média tão próxima do alvo podemos entender que o processo

está próximo do otimizado, porém umas quantidades significativas de amostras ficaram em torno de 38 e 42 V, o que estica a curva real do processo, como mostrada na figura 20.

Figura 20 – Capacidade da tensão no Arame 4



Fonte: Produção do próprio Autor

Com essa análise observamos com mais precisão os efeitos do alinhamento da curva real, existe uma quantidade de amostras acima da curva real do processo, o ideal para um processo otimizado seria as amostras mais próximas do alvo de 41V com Ppk e Cpk iguais, porém para esse processo podemos observar uma diferença de 0,16 entre os indicadores do processo e os indicadores da capacidade. Mesmo com alguns problemas estatístico que podem ser corrigidos melhorando a inconstância elétrica das máquinas de solda, podemos identificar que para esse processo de tensão do arame 4 não houveram valores abaixo do LCI e nem acima do LCS, indicando um processo controlado, mas instável para o 4º arame.

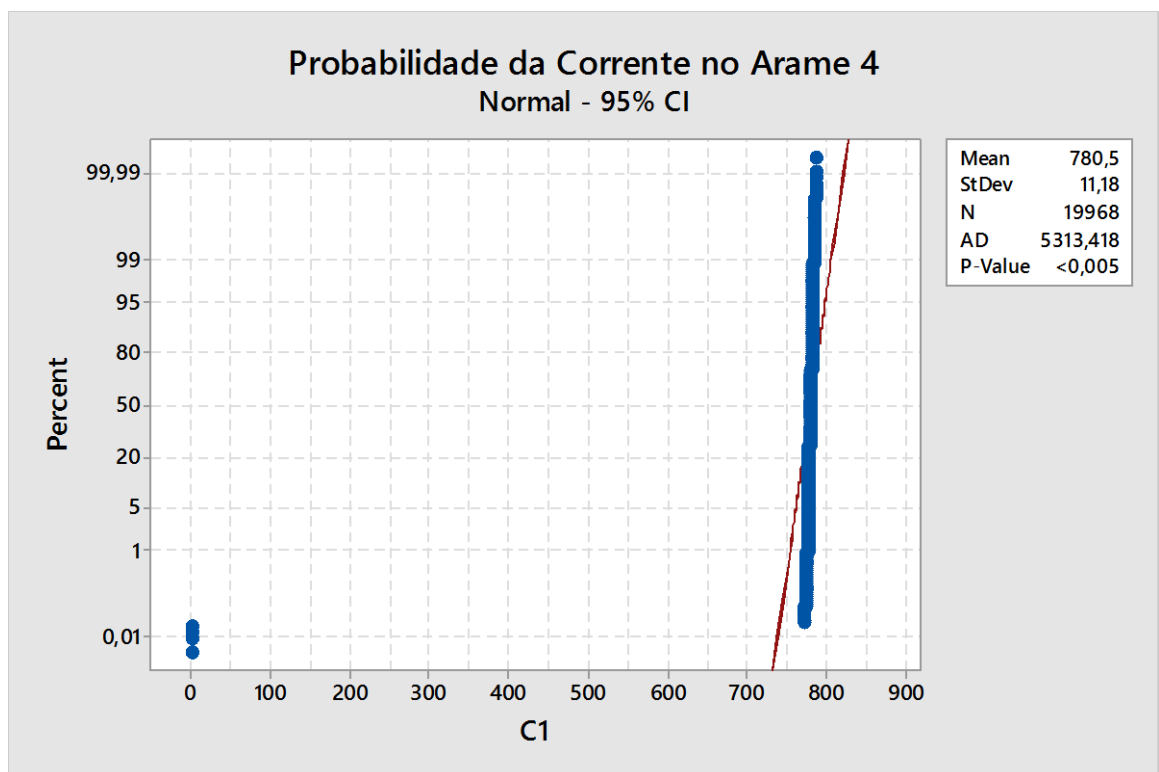
### 3.1.4.2 Corrente

Já para a corrente de soldagem no arame 4 temos da Tabela 1 um valor de 780 Amperes, a menor de todas as correntes, indicando uma menor necessidade de penetração na metal base em relação aos demais consumíveis.

A mesma tolerância é também adotada para esse arame, 90 A superiores e inferiores ao alvo.

Após coletar as 20.000 amostras utilizamos o Minitab para gerar as análises estatísticas desejadas do processo. A figura 21 irá nos mostrar a probabilidade da corrente no processo do Arame 4 e em sequência a figura 22 nos mostrará a capacidade do arame 4 referenciando a sua corrente.

Figura 21 – Probabilidade da Corrente no Arame 4

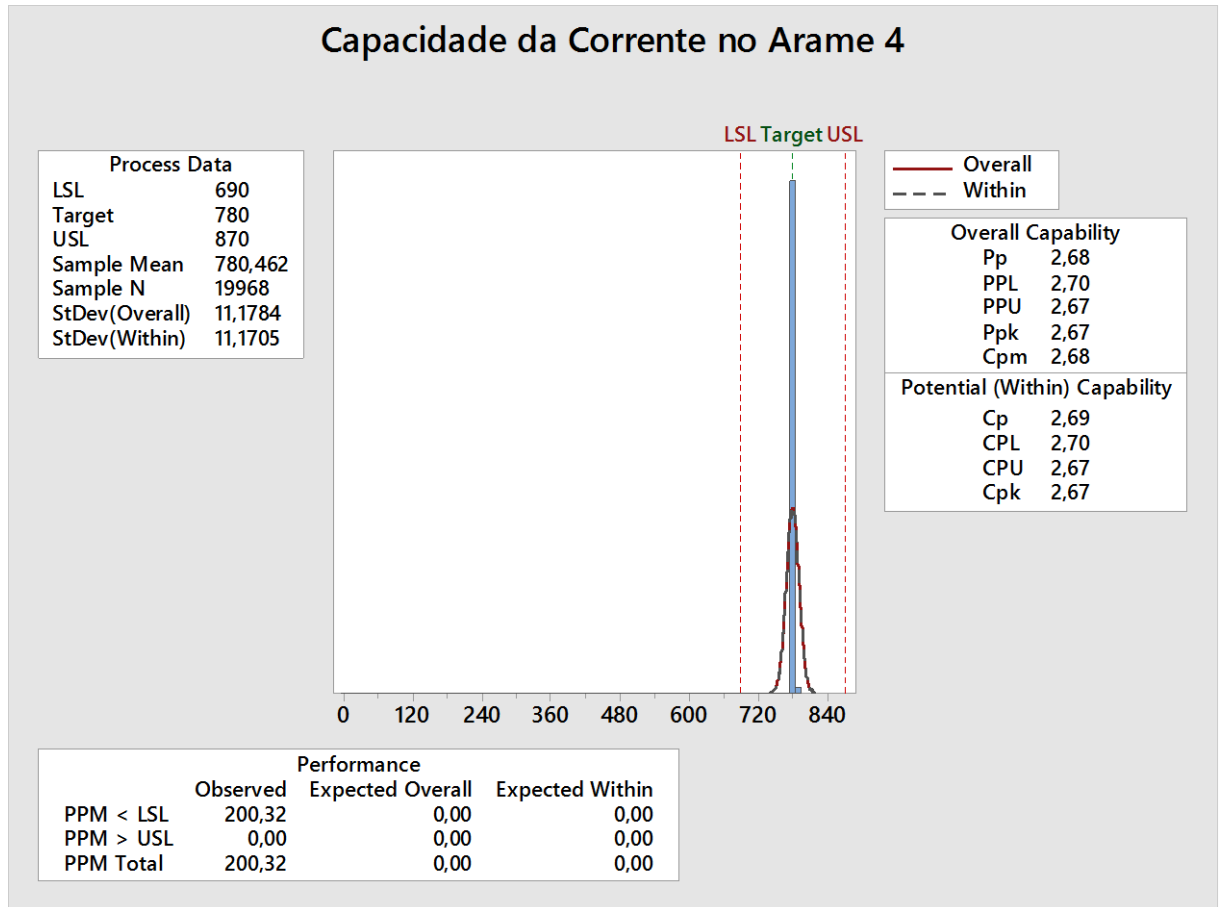


Fonte: Produção do próprio Autor

Podemos observar para a corrente no arame 4 que algumas amostras indicaram um valor de 0A o que poderia ser gerado por falhas nessa máquina de solda. Porém sua média está excelente em 780,5 A, sendo seu desvio padrão o maior entre os demais, 11,18 isso pode ter acontecido devido ao grande número de amostras abaixo do LCI.

Ainda assim seu P Value está abaixo de 0,05 o que demonstra valores de amostras reais.

Figura 22 – Capacidade da corrente no arame 4



Fonte: Produção do próprio Autor

A capacidade da corrente no Arame 4 está praticamente empatada entre real e otimizada. Sendo seu alvo o centro das amostras analisadas. Sendo que algumas amostras foram encontradas abaixo do LCI. Seu Ppk e Cpk estão exatamente iguais, com 2,67. Sendo que a curva real e ideal estão sobrepostas e dentro dos limites de controle.

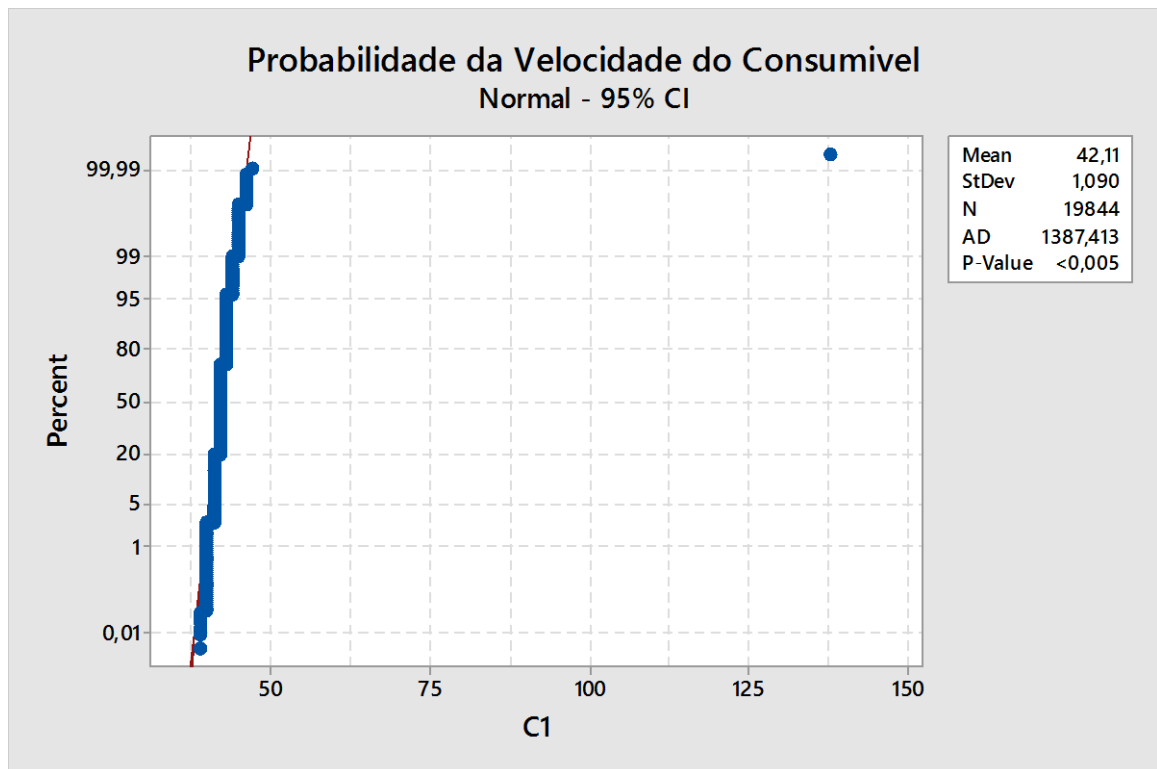
### 3.1.5 Análise estatística da velocidade de Solda

Assim como os arames de solda, a velocidade do consumível de soldagem também deve ser controlada com o objetivo de melhorar ou adequar as propriedades da solda como desejada.

Para essa obra foi projetado uma velocidade de consumível de 42in/min tendo uma tolerância de 4in/min.

Após a coleta de 20.000 amostras na máquina de solda, os dados foram adicionados no Minitab, onde foi feita a análise de probabilidade e a de capacidade do sistema. Como mostradas nas figuras 23 e 24, respectivamente

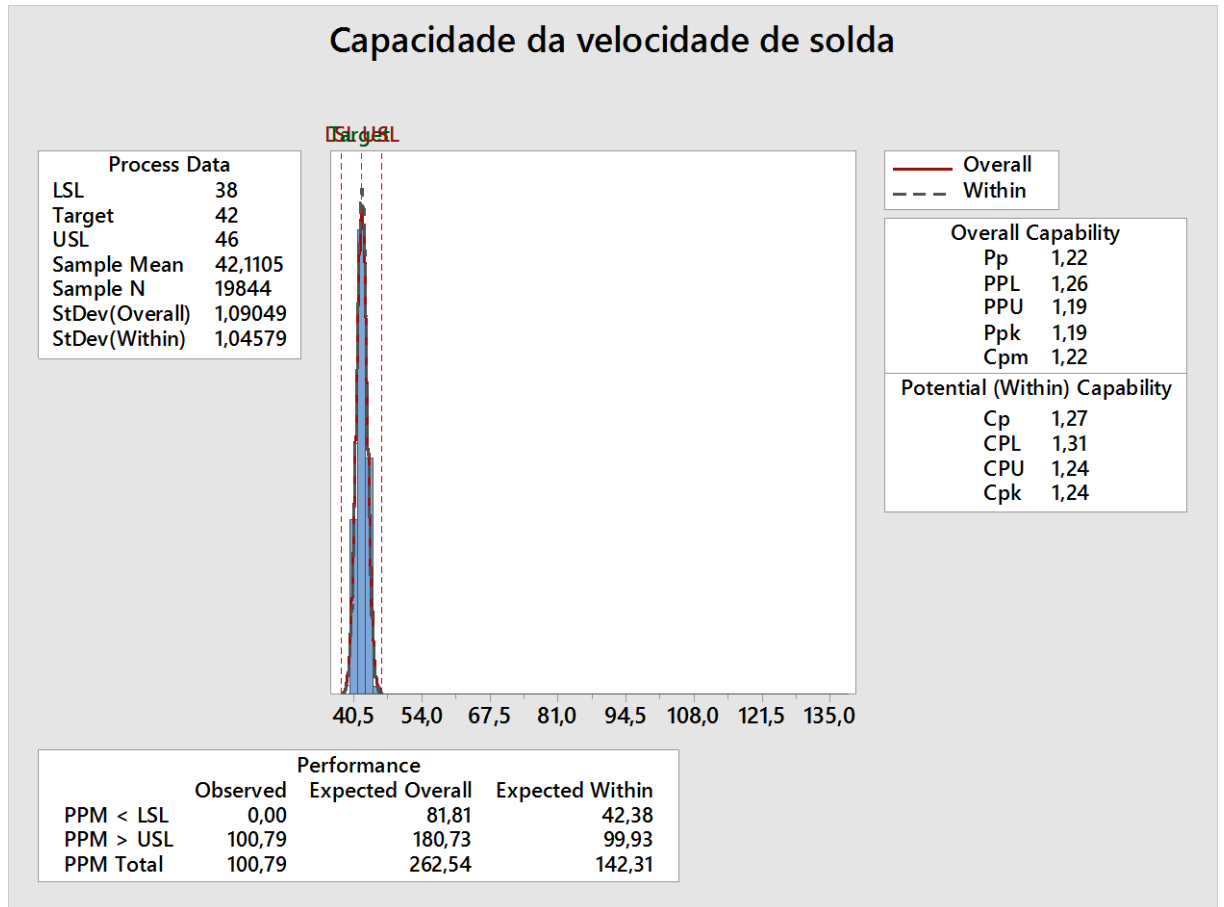
Figura 23 – Probabilidade da Velocidade de Consumível



Fonte: Produção do próprio Autor

Podemos observar uma média de 42,11 in/min, a qual está muito próxima do alvo traçado para o projeto, tendo um desvio padrão de 1,09, baixo em relação a sua tolerância. Podemos perceber uma pequena quantidade de amostras acima do LCS, o que pode ter sido causado por alguma perturbação no sistema de soldagem. Seu P Value mostra um valor menor que 0,05 que consiste em amostras reais e utilizáveis.

Figura 24 – Capacidade da velocidade de consumíveis



Fonte: Produção do próprio Autor

Tendo como final análise a capacidade da velocidade de solda, podemos observar que as amostras estão centralizadas com o alvo, sendo a diferença entre o alvo e sua média de 0,11 in/min, assim sendo seu Ppk e Cpk estão próximos, 1,19 e 1,24 respectivamente, porém mostrando que é possível haver melhorias no processo. A curva real e a curva melhorada não estão sobrepostas, sendo algumas amostras fora das mesmas. Devemos observar um PPM baixo em relação a outros parâmetros, porém não deixa de ser motivo para análises subsequentes.

## 4 CONCLUSÃO

Foi apresentado nesse trabalho a análise da probabilidade estatística e capacidade estatística do processo de solda por arco submerso da Fábrica X. A organização para apresentação da linha de raciocínio e dos fatos foi através de cinco etapas. Primeiramente foi apresentado os principais aspectos que compõem um projeto básico desse tipo de processo. Em sequência foi identificada a melhor metodologia de análise usada para definir a qualidade estatística do processo, por fim a metodologia foi aplicada para o estudo estatístico do processo de solda industrial.

Com o trabalho realizado podemos observar alguns pontos importantes de melhoria, em sua maioria todos os processos apresentam uma baixa quantidade de amostras acima ou abaixo dos Limites de Controle. Sendo assim as melhorias que devem ser feitas são de suma importância para otimização do processo.

Devemos se atentar ao fato de que a máquina de solda escolhida para análise está sendo usada no processo atualmente, porém ela é a máquina mais antiga sendo utilizada na Fábrica X, isso pode ser o fator principal gerador de oscilações dos parâmetros de soldagem.

Em conversa com os operados e líderes pude perceber que dependendo do soldador ele tem uma maior ou menor facilidade de lidar com essa máquina de solda, ou seja, operadores mais experientes sabem controlar essa máquina e fazer com que ela trabalhe dentro dos parâmetros desejados, já operadores mais jovens tendem a perder o controle da máquina uma vez que ela começa a oscilar, podendo gerar até mesmo a rejeição do tubo que está sendo soldado.

Em sua maioria os defeitos de solda gerados na máquina problema são ocasionados pelas oscilações da rede elétrica, oscilações do próprio equipamento antiquado ou até mesmo falta de treinamento dos soldadores. Essas ações serão levadas aos líderes da Fábrica.

Podemos concluir que nesse trabalho foram avaliados um total de 180.000 amostras que geraram médias que ficaram extremamente próximas aos seus alvos iniciais estipulados pelo projeto. Sendo assim as melhorias que devem ser feitas no mesmo são referentes a máquina de solda e seus operadores, ou até mesmo a linha elétrica da planta.

Uma observação também plausível foi a de que conversando com os líderes, muitos parâmetros de projetos como a distância entre as escovas de aterramento, não estão sendo utilizados como foram projetados, por algum motivo eles foram alterados e não foi tomada nenhuma providência para zera-los novamente. Esse ponto também será levado como sugestão a Fábrica.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding inspection**. 2nd ed. Miami: AWS, 1980.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding inspection**. 8th ed. Miami: AWS, 1987. v. 1.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for line pipe**. API 5L, 43rd Edition. Washington: API, 2004.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.
- COOK, G. E. GEORGE; BARNETT, J. ROBERT. Statistical process control application to weld process. **IEEE transactions on industry applications**. v. 33, n. 2, mar./apr. 1997. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/568010/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico da qualidade**. São Paulo: Atlas, 2004.
- DARESTANI, A.; SOROUGH, N. **Mina international journal of quality & reliability management**, v. 33, p. 2-24. jan. 2014. Disponível em: <<https://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/IJQRM-08-2013-0130>>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- FRANKEL, A. D. et al. **Controle estatístico de um processo em uma empresa de agronegócios**. Disponível em: < <https://periodicos.ufsm.br/reaufsm/article/view/7727/pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- Kazemi, M.; AGHAKHANI, M.; HAGHSHENAS-JAZI; et al. Optimization of the depth of penetration by welding input parameters in SAW process using response surface methodology, **Metallurgical and materials transactions**, v. 47B, feb. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-015-0492-x>>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- MINITAB. **Minitab 18 Statistical Software**. [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. 2017. Disponível em: <http://www.minitab.com>. Acesso em: 15 dez. 2017.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 4. ed. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- NAVEEN, A.; RAVICHANDRAN, M. Evaluation of seam welding parameters of stainless steel using taguchi technique. **Nova science publisher**, v. 7, 2016. Disponível em: <<https://search.proquest.com/openview/add2df21c0b25e1f85695c6ae55b2b8c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2034835>>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. p. 262-265.
- WAINER, E. et al. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1992.