

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÉSSIKA BATISTA GUIMARÃES

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM UM REVESTIMENTO DE  
AÇO MARTENSÍTICO 410 NiMo PELO PROCESSO FCAW PULSADO  
UTILIZANDO MODELOS DE REGRESSÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2020

JÉSSIKA BATISTA GUIMARÃES

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM UM REVESTIMENTO DE  
AÇO MARTENSÍTICO 410 NiMo PELO PROCESSO FCAW PULSADO  
UTILIZANDO MODELOS DE REGRESSÃO**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno

Co-orientadora: Profa. Dra. Elisângela Aparecida da Silva Lizzi

CORNÉLIO PROCÓPIO

2020

---

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

G963 Guimarães, Jéssika Batista

Estudo dos parâmetros de soldagem em um revestimento de aço martensítico 410 NiMo pelo processo FCAW pulsado utilizando modelos de regressão / Jéssika Batista Guimarães. – 2020.

99 f. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: João Roberto Sartori Moreno.

Coorientador: Elisângela Aparecida da Silva Lizzi.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2020.

Bibliografia: p. 89-97.

1. Análise de regressão. 2. Otimização. 3. Taguchi, Métodos (controle de qualidade). 4. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Moreno, João Roberto Sartori, orient. II. Lizzi, Elisângela Aparecida da Silva, coorient. III Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

---

### Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Bibliotecário/Documentalista responsável:  
Simone Fidêncio de Oliveira Guerra – CRB-9/1276

Título da Dissertação N° 048:

# “Estudo Dos Parâmetros De Soldagem Em Um Revestimento De Aço Martensítico 410 NiMo Pelo Processo Fcaw Pulsado Utilizando Modelos De Regressão”.

por

## Jéssika Batista Guimarães

Orientador: **Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, Linha de Pesquisa: **Caracterização dos Materiais**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 13h30 do dia 07 de julho de 2020. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

---

Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno  
(Orientador – UTFPR-CP)

---

Profa. Dra. Elisangela Aparecida da Silva Lizzi  
(Coorientadora - UTFPR-CP)

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Tulio  
(UTFPR-CP)

---

Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini  
(UNESP - Ilha Solteira)

Visto da coordenação:

---

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me fortaleceu e me fez capaz de alcançar todos os meus objetivos.

Aos meus orientadores, João Roberto Sartori Moreno e Elisângela Aparecida da Silva Lizzi que sempre tiveram muita paciência e disponibilidade, dando todo suporte necessário para a conclusão dessa pesquisa. E agradeço também aos professores que aceitaram o convite para participar da banca da minha defesa. Não esquecendo, devo agradecer muito ao professor Celso Alves Corrêa que ao longo de muitos anos, desde a graduação, vem me acompanhando e também é responsável por essa conquista.

Agradeço aos meus familiares e amigos que sempre me deram uma palavra de confiança, não permitindo que eu desista. E ao meu filho Gustavo, que sempre foi e será uma inspiração para que eu cresça na vida.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Câmpus Cornélio Procopio) por concederem todos os equipamentos e estrutura necessária para a realização deste trabalho.

## RESUMO

GUIMARÃES, Jéssika Batista. **Estudo dos parâmetros de soldagem em um revestimento de aço martensítico 410 NiMo pelo processo FCAW pulsado utilizando modelos de regressão.** 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2020.

A presente dissertação tem por finalidade a análise e otimização dos parâmetros de soldagem do processo por arame tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding) pulsado, utilizando como metal de adição o aço inoxidável martensítico 410 NiMo, com base na geometria dos cordões de solda resultantes a cada ensaio. As variáveis de influência adotadas foram a corrente média, a frequência de pulsação, a velocidade de soldagem e a distância bico contato peça, sendo cada variável testada em três níveis diferentes. Já as características geométricas avaliadas, ou seja, as variáveis resposta, são a largura, o reforço, a penetração, a área de reforço, a área de penetração, o índice de convexidade e a diluição. Para se cumprir o objetivo proposto foram utilizadas técnicas estatísticas como ferramentas de análise, sendo, numa primeira fase, empregado o método de design robusto (Taguchi), para estabelecer quais as combinações de parâmetros seriam executadas em cada ensaio, nos fornecendo uma matriz L9. E em uma segunda fase, foram construídos modelos de regressão linear múltiplos para seleção dos parâmetros mais significativos, seguido de análises de regressão linear múltipla, que proporcionaram uma modelagem para otimização dos parâmetros de acordo com o conjunto de respostas. Com base nos resultados gerados percebeu-se que a corrente média afetou quase todas as respostas, apenas com exceção a área de reforço. A velocidade de soldagem apenas não interferiu na penetração e na área de penetração, porém a distância bico de contato-peça influencia significativamente no reforço e no índice de convexidade. De acordo com os ensaios realizados, a maior largura (11,51 mm) foi obtida em corrente média de 230 A, com velocidade de soldagem de 300 mm/min, frequência de pulsação de 22,22 Hz e distância bico de contato peça de 36 mm.

Palavras chave: FCAW pulsado, Taguchi, análise de regressão, otimização, 410 NiMo.

## ABSTRACT

GUIMARÃES, Jéssika Batista. **Study of welding parameters in a 410 NiMo martensitic steel coating by the pulsed FCAW process using regression models.** 99f. Dissertation (Master's Degree in Mechanical Engineering) - Mechanical Engineering Postgraduate Program, Federal Technological University of Paraná, Cornélio Procópio, 2020.

The present dissertation aims to analyze and optimize the welding parameters of the pulsed tubular wire (FCAW - Flux Cored Arc Welding) process by using martensitic stainless steel 410 NiMo as the filler metal and based on the geometry of the weld beads resulting from each test. The influence variables adopted were the average current, the pulsation frequency, the welding speed and the contact-tip-workpiece distance, each variable being tested at three different levels. The geometric characteristics evaluated, that is, the response variables, are the width, the reinforcement, the penetration, the reinforcement area, the penetration area, the convexity index and the dilution. In order to achieve the proposed objective, statistical techniques were used as analysis tools, and, in the first phase, the robust design method (Taguchi) was used to establish which combinations of parameters would be performed in each test, providing us with an L9 matrix. In a second phase, multiple linear regression models were built to select the most significant parameters, followed by multiple linear regression analyzes, that provided a model for optimization of parameters according to the set of responses. Based on the results generated, it was noticed that the average current affected almost all responses, with the exception of the reinforcement area. The welding speed just did not interfere with the penetration and in the penetration area. However, the contact-tip-workpiece distance significantly influences the reinforcement and the convexity index. Therefore it is sure, according to the tests done, that the biggest obtained width (11,51 mm) was at the medium current of 230 A, welding speed of 300 mm/min, pulsation frequency of 22.22 Hz and contact-tip-workpiece distance of 36 mm.

Keywords: pulsed FCAW, Taguchi, regression analysis, optimization, 410 NiMo.

## LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS

### Letras Gregas

$\epsilon$  - resíduos

### Abreviações

ANOVA – Análise de Variância

AP – Área de penetração do cordão de solda (mm)

AR – Área de reforço do cordão de solda (mm)

ASM – American Society Materials

ASME – *American Society Materials Engineering*

ASTM – *American Society Testing Materials*

AWS – *American Welding Society*

CCEP – Corrente Contínua Eletrodo Positivo

CM – Corrente Média (A)

D - Diluição

DBCP – Distância Bico de Contato Peça (mm)

Dg – Parâmetro de destacamento da gota

F – Frequência de pulsação (Hz)

FCAW - Fluxed Cored Arc Welding

GMAW – Gas Metal Arc Welding

HRC – Dureza Rockwell C

$I_b$  - Corrente de base (A)

IC – Índice de Convexidade [%]

$I_m$  – Intensidade da corrente média (A)

$I_p$  - Corrente de pico (A)

ISO – International Standard Organization

L – largura cordão de solda (mm)

MAG – Metal Active Gas

MAPE - Mean Absolute Percentage Error

MIG – Metal Inert Gas

P – Penetração do cordão de solda (mm)

R – Reforço do cordão de solda (mm)

RMS – *Root Mean Square*

RSM – *Response Surface Methodology*

SAE - *Society of Automotive Engineers*

$t_b$  - Tempo de base (ms)

TIG – Soldagem com Eletrodo de Tungstênio

$t_p$  – Tempo de pico (ms)

V – Tensão da soldagem

VS – Velocidade de soldagem (mm/min.)

$y_i$  – Valor real observado

$\hat{y}_i$  - Valor ajustado dos modelos

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Deposição dos cordões de solda para a realização do processo de revestimento.....  | 17 |
| Figura 2 – Geometria obtida do cordão de solda na soldagem convencional e de revestimento.....  | 18 |
| Figura 3 – Formas e diâmetros dos arames tubulares utilizados no processo de soldagem FCAW: (a) com gás de proteção; (b) autoprotégido. ....      | 20 |
| Figura 4 - Geometria dos arames tubulares utilizados para soldagem FCAW. ....   | 22 |
| Figura 5 - Oscilograma da corrente pulsada ilustrando a formação e destacamento da gota da ponta do eletrodo durante o processo de soldagem. .... | 26 |
| Figura 6 - Estudo da influência da corrente média de soldagem nos resultados da diluição para diferentes velocidades de soldagem.....             | 29 |
| Figura 7 - Influência da variação na Distância Bico Contato Peça nas variáveis do processo.....   | 31 |
| Figura 8 - Representação da macrografia do cordão de solda para obtenção da diluição. ....  | 32 |
| Figura 9 - Diretrizes para delineamento de experimento.....   | 33 |
| Figura 10 - Etapas a seguir para o Método Taguchi. ....   | 35 |
| Figura 11 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios.....   | 44 |
| Figura 12 - Distribuição e localização dos principais equipamentos da bancada de ensaios.....   | 45 |
| Figura 13 - Bancadas de fixação da tocha de soldagem e dos corpos de prova. ....  | 45 |
| Figura 14 - Dispositivo para fixação dos corpos de prova.....   | 48 |
| Figura 15 - Representação do seccionamento realizado em todos os corpos de prova. ....  | 54 |
| Figura 16 - Geometria do cordão de solda de revestimento. ....  | 59 |
| Figura 17 - Geometria dos cordões de solda obtidos nos ensaios de soldagem. ....  | 59 |
| Figura 18 - Cordões de solda obtidos nos ensaios adotando uma corrente de 170 A e 230 A.....  | 61 |
| Figura 19 - Sinal simultâneo de corrente e tensão obtido em um dos ensaios.....   | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20 - Sinais de corrente e tensão para um ensaio com corrente média de 230 A.....                                    | 63 |
| Figura 21 - Efeito das variáveis na Largura.....   | 70 |
| Figura 22 - Efeito das variáveis no Reforço.....   | 71 |
| Figura 23 - Efeito das variáveis na Penetração.....  | 72 |
| Figura 24 - Efeito das variáveis no Índice de Convexidade.....   | 73 |
| Figura 25 - Efeito das variáveis na Área de Penetração. ....   | 74 |
| Figura 26 - Efeito das variáveis na Área de Reforço. ....  | 75 |
| Figura 27 - Efeito das variáveis na Diluição. ....   | 76 |
| Figura 28 - Gráfico de Probabilidade Normal dos resíduos das variáveis resposta.....                                       | 78 |
| Figura 29 – Resultados representados graficamente para o Acerto Absoluto Percentual e MAPE em cada variável resposta. .... | 86 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química dos principais aços inoxidáveis martensíticos (% peso).....                                     | 23 |
| Tabela 2 - Tabela esquemática do Teste de Hipótese. ....  | 39 |
| Tabela 3 - Hipóteses para o Teste de ANOVA.....   | 40 |
| Tabela 4 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem. ....   | 49 |
| Tabela 5 - Variáveis de influência e seus níveis.....   | 51 |
| Tabela 6 - Valores dos ensaios com corrente pulsada.....  | 53 |
| Tabela 7 - Sinais adquiridos durante os ensaios.....  | 55 |
| Tabela 8 - Resultados da morfologia do cordão de solda com corrente pulsada. ....   | 58 |
| Tabela 9 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Largura. ...  | 65 |
| Tabela 10 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para o Reforço. 65  |    |
| Tabela 11 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Penetração.....  | 66 |
| Tabela 12 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para o Índice de Convexidade. ....                                    | 66 |
| Tabela 13 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Área de Penetração.....  | 66 |
| Tabela 14 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Área de Reforço.....   | 66 |
| Tabela 15 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Diluição. 67   |    |
| Tabela 16 - Análise de Variância (ANOVA) obtida através da Análise de Regressão para as variáveis de resposta (p-valor). .... | 67 |
| Tabela 17 - Valores medidos e previstos para Largura, Reforço, Penetração e Área de Penetração. ....                          | 79 |
| Tabela 18 - Valores medidos e previstos para Área de Reforço, Índice de Convexidade e Diluição.....                           | 80 |
| Tabela 19 - Acerto percentual e MAPE obtidos para largura e reforço. ....   | 82 |
| Tabela 20 - Acerto percentual e MAPE obtidos para penetração e índice de convexidade. ....                                    | 82 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 21 - Acerto percentual e MAPE obtidos para área de penetração e área de reforço. ....     | 83 |
| Tabela 22 - Acerto percentual e MAPE obtidos para diluição. ....                                 | 84 |
| Tabela 23 - Resultados do Acerto Absoluto Percentual e do MAPE para cada variável resposta. .... | 85 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Variações do processo de soldagem com arame tubular.....                      | 20 |
| Quadro 2 - Composição química das barras chatas de aço SAE 1020.....                     | 43 |
| Quadro 3 - Composição química do metal de adição EC410NiMo EC. ....                      | 44 |
| Quadro 4 - Equipamentos utilizados na bancada de ensaios. ....                           | 46 |
| Quadro 5 - Demais equipamentos utilizados.....   | 47 |
| Quadro 6 - Quadro geral com as equações de regressão para cada variável<br>resposta..... | 68 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                              | <b>9</b>  |
| 1.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....                   | 11        |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>                                | <b>13</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL .....                               | 13        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                        | 13        |
| <b>3 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                   | <b>14</b> |
| 3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM.....                          | 14        |
| 3.1.1 Soldagem de Revestimento .....                   | 16        |
| 3.1.2 Soldagem com Arame Tubular.....                  | 18        |
| 3.2 METAL DE ADIÇÃO: AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO ..... | 22        |
| 3.3 FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO.....       | 24        |
| 3.4 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM ..... | 28        |
| 3.4.1 Tensão e Corrente de soldagem.....               | 28        |
| 3.4.2 Velocidade de Soldagem .....                     | 30        |
| 3.4.3 Distância Bico de Contato da Peça (DBCP).....    | 30        |
| 3.4.4 Gás de Proteção .....                            | 31        |
| 3.4.5 Diluição.....                                    | 32        |
| 3.5 DESENHO EXPERIMENTAL .....                         | 33        |
| 3.5.1 Projeto Robusto/Método Taguchi.....              | 34        |
| 3.6 ANÁLISE DE REGRESSÃO.....                          | 35        |
| 3.6.1 Teste de hipóteses.....                          | 38        |
| 3.6.2 Análise de Resíduos.....                         | 41        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                     | <b>43</b> |
| 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....                         | 43        |
| 4.2 EQUIPAMENTOS .....                                 | 44        |
| 4.3 CORPOS DE PROVA E SENSORES .....                   | 48        |
| 4.4 PARÂMETROS FIXOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM .....     | 49        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....                                 | 50        |
| 4.6 ENSAIOS METALOGRAFICOS .....                                    | 53        |
| 4.7 AQUISIÇÃO DOS SINAIS .....                                      | 55        |
| 4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....                                      | 56        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS .....</b>                  | <b>57</b> |
| 5.1 MORFOLOGIA DOS CORDÕES DE SOLDA.....                            | 57        |
| 5.2 RESULTADO DOS SINAIS OBTIDOS .....                              | 62        |
| 5.3 RESULTADOS DOS MODELOS DE REGRESSÃO .....                       | 64        |
| <b>6 CONCLUSÕES .....</b>   | <b>87</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>89</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>98</b> |
| <b>A) Análise de Resíduos: Resíduos x Valores Previstos .....</b>   | <b>98</b> |
| <b>B) Análise de Resíduos: Resíduos x Ordem de Observação .....</b> | <b>99</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos o desenvolvimento para que a energia elétrica se tornasse uma realidade no cotidiano humano passou a ser um dos grandes desafios da engenharia. O Brasil possui uma das maiores matrizes energéticas hidráulicas do mundo. A contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional é da ordem de 65%, participando quase 88% de toda energia elétrica renovável gerada no país (BUENO, 2017). Apesar de se constatar uma tendência de aumento de outras fontes renováveis, possíveis pelos desenvolvimentos tecnológicos, ainda verifica-se que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil. Assim, é fundamental continuar buscando por turbinas hidráulicas com a máxima eficiência e sem falhas.

As turbinas hidráulicas são máquinas que transformam a energia disponível no fluxo de um curso de água em energia mecânica, na forma de movimento de rotação. Porém, a erosão por cavitação é um fenômeno indesejável e prejudicial, sendo o responsável por grandes perdas e danos no setor elétrico. A substituição de uma unidade hidráulica já instalada seria inviável do ponto de vista técnico e econômico, sendo os custos com reparos significativos, e a maior consequência é a parada da unidade hidráulica por vários dias, para recuperação das superfícies erodidas por cavitação (BONACORSO, 2004).

A cavitação é um processo altamente prejudicial ao bom funcionamento das turbinas hidráulicas geradoras de energia, e dentre os danos causados, pode-se citar a erosão de contornos dos perfis de rotores, vibrações e ruídos e também a diminuição da eficiência das turbinas hidráulicas e sua queda de potência, resultantes da perda de massa.

Em detrimento desses problemas decorrentes, as pesquisas têm se voltado para o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas que possibilitem a recuperação desses equipamentos sem que haja a necessidade de uma

substituição. Nessa linha de pesquisa, temos cada vez mais o desenvolvimento da técnica de revestimentos aplicados por meio da soldagem, proporcionando não somente a recuperação de peças de equipamentos desgastados, mas também a confecção de novos produtos e processos industriais (SIQUEIRA; SILVA, 2016).

Na soldagem de revestimento o objetivo principal é obter um cordão com a menor diluição possível, obtendo-se na morfologia do cordão uma penetração pequena, a maior largura e reforço possível, para um melhor rendimento do processo.

Entre os processos que se destacam no segmento da soldagem, com utilização crescente, temos o FCAW (Flux Cored Arc Welding). Este processo é evidenciado no meio industrial por apresentar grande capacidade produtiva, assegurada principalmente pela alta densidade de corrente, o que garante alta taxa de fusão, alto fator de trabalho e automatização do processo. Porém, a correlação entre suas variáveis atuam de forma complexa, onde necessitam de certo grau de domínio e habilidade do operador, supervisor e engenheiro de soldagem, para garantir o melhor aproveitamento de suas qualidades operacionais (SOUZA; FERRARESI, 2013).

Além disso, temos com o avanço de novas tecnologias, principalmente eletrônica para a fabricação de fontes de soldagem a arco voltaico, há a possibilidade da utilização de corrente pulsada nos processos de soldagem. Estudos recentes mostram que a corrente pulsada proporciona a obtenção de uma maior taxa de deposição quando comparada a corrente convencional, além de um maior controle dos parâmetros durante a soldagem. Estes estudos revelam as melhores condições de soldagem quando utilizadas correntes pulsadas, sendo alguns desses autores: SARNI (2011); SILVA (2006); MELO (2018) e entre outros.

A soldagem é um processo industrial que vem sendo potencialmente desenvolvida, porém ainda há poucos estudos referentes à influência dos parâmetros que permeiam o processo quanto ao formato geométrico do cordão. Uma análise mais detalhada das variáveis do processo de soldagem, a

partir de um software adequado, permite otimizar as respostas, consequentemente possibilitando uma maior utilização do processo.

Toda nova metodologia que possibilite a redução do tempo e custo na soldagem, além da melhoria na qualidade das soldas, é de grande interesse para o meio científico e industrial. Portanto, este trabalho buscou como objetivo estudar o processo de revestimento usando o processo de soldagem por arame tubular pulsado, realizando um único cordão de solda, levantando os valores das morfologias obtidas. Foram efetuados ensaios experimentais e análises estatísticas baseadas no método Taguchi, buscando a otimização do processo de soldagem e mantendo a qualidade da solda. Também houve a investigação dos parâmetros adotados das variáveis de influência, nos resultados obtidos nas variáveis respostas.

## 1.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 estão os objetivos que permeiam este trabalho, tanto os objetivos específicos como o objetivo geral do estudo.

Para o Capítulo 3 ficou reservada a revisão da literatura dos principais conteúdos que serviram de base para a execução deste estudo, apresentando alguns tópicos com conceitos sobre soldagem por arame tubular, soldagem de revestimento, principais parâmetros do processo, aços inoxidáveis martensíticos, e uma explanação dos tipos de ferramentas utilizadas para as análises estatísticas efetuadas.

No Capítulo 4 temos a apresentação dos materiais e equipamentos necessários para realização os experimentos, bem como suas características principais e especificações, além de uma explicação detalhada desde como os corpos de prova foram preparados, até o fim do processo de soldagem, com a definição de todos os parâmetros que permaneceram constantes, das variáveis de influência e os níveis adotados.

O Capítulo 5 demonstra os resultados obtidos em cada ensaio e as análises realizadas, sendo apresentados por meio de gráficos, tabelas, figuras e equações, contemplando desde os dados coletados ao final dos ensaios até as análises estatísticas aplicadas.

E para o Capítulo 6 estão presentes em tópicos as principais conclusões obtidas com base no estudo realizado para esta dissertação.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi a análise e otimização dos parâmetros de soldagem, utilizando o processo de soldagem por arame tubular em chapas de aço, com corrente pulsada, avaliando as melhores condições de qualidade e produtividade nos cordões de solda. As variáveis de influência analisadas foram corrente média, velocidade de soldagem, frequência de pulsação e distância bico de contato/peça. E as variáveis resposta obtidas foram largura, reforço, penetração, área de reforço, área de penetração, índice de convexidade e diluição.

Para alcançar o objetivo principal, primeiramente foi realizada uma análise da influência dos parâmetros de entrada no processo de soldagem. Posteriormente, selecionadas as variáveis de influência mais significativas, sendo estas estudadas de maneira mais detalhada por modelos de regressão, e por fim a otimização do processo a partir de ferramentas estatísticas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar a morfologia do cordão de solda;
- Averiguar de que forma os parâmetros de soldagem influenciam no processo de revestimento;
- Investigar utilizando modelos de regressão quais variáveis de influência afetam as variáveis de resposta;
- Utilizar modelagem estatística no processo de soldagem com arame tubular em função de um conjunto de respostas específicas;
- Contribuir com os estudos referentes à revestimentos utilizando o processo de soldagem por arame tubular.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será descrito um resumo da literatura apresentando os principais temas que abordam o trabalho realizado. Os tópicos elencados serão escritos com base em autores que analisaram em suas pesquisas o mesmo assunto abordado neste estudo e pesquisadores já conhecidos na área da soldagem pelas suas contribuições. A revisão bibliográfica trata justamente disto, da explanação de alguns tópicos mais relevantes e pertinentes ao trabalho realizado.

Teremos um breve histórico da soldagem e suas aplicações, uma explicação sobre a soldagem por arame tubular e suas principais características, a importância da soldagem de revestimento, apresentação dos metais empregados nos ensaios, o cuidado na seleção dos parâmetros de soldagem e variáveis respostas analisadas, e demais temas referente às análises estatísticas utilizadas nos resultados.

A consulta à literatura foi recorrente durante toda a realização do trabalho apresentado, a fim de enriquecer o conhecimento e melhor compreensão dos fatos, buscando em livros, artigos, monografias, dissertações, teses e demais trabalhos acadêmicos e científicos que tratam sobre o tema soldagem, nos idiomas português e inglês. Foram utilizadas referências mais antigas, mais de relevante importância, até pesquisas efetuadas recentemente. Também foram buscadas informações em meio eletrônico, apostilas e vídeos.

#### 3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

De acordo com a evolução histórica do processo de soldagem, podemos dizer que essa prática já é utilizada há muitos anos atrás, afinal nossos antepassados já usavam da técnica de união de materiais por brasagem. Um dos objetivos principais em usufruir do processo de soldagem naquela época

era a fabricação de armas e instrumentos cortantes. O processo de soldagem só passou a ter uma maior aplicação e progresso a partir da descoberta do gás  $C_2H_2$  e da produção de arco elétrico (MODENESI; MARQUES, 2012).

Primeiramente, a soldagem era definida como “a junção de metais por fusão”, porém com o avanço da tecnologia, descobriu-se que não é necessário que sempre haja de fato o processo de fusão para que ocorra a união, ou que seja apenas entre metais. Portanto, segundo a tradução da definição dada pela *American Welding Society (AWS)*, temos: “soldagem é o processo de junção de materiais que produz a coalescência dos materiais mediante aquecimento deles a temperatura apropriada com ou sem aplicação de pressão, ou com aplicação apenas de pressão, e com ou sem o uso de material de enchimento” (MODENESI; MARQUES, 2000).

A soldagem visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (ALVES, 2016).

Tornou-se um dos processos mais importantes dentro de um setor industrial, podendo ser utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. O seu campo de aplicação é grande, podendo atender desde componentes eletrônicos pequenos até grandes estruturas e equipamentos (MONTEIRO, 2011).

Existem diversos tipos de operações que podem ser empregadas para se realizar uma soldagem. Como exemplo, a soldagem por eletrodo-escória, por arco submerso, por eletrodo revestido, MIG/MAG, plasma, por arame tubular e dentre outras. Cada processo de soldagem possui suas características próprias e objetivos para cada aplicação, a definição do processo de soldagem a ser utilizado depende de um conjunto de fatores a serem considerados, como o metal de adição, o processo de soldagem adequado em sintonia com o equipamento a ser utilizado, a localização e tamanho da peça, e ainda o soldador adequado, entre outros.

### 3.1.1 Soldagem de Revestimento

O custo com substituição de componentes que se desgastam ou se danifica durante um serviço é muito elevado, e nesse raciocínio é que ocorre o desenvolvimento de um leque de técnicas buscando os reparos do equipamento sem a necessidade de sua troca imediata. Dentre esses métodos temos a soldagem de revestimento, possibilitando restaurar as partes dando condições de reutilização. Muitas vezes esses reparos até proporcionam uma vida mais longa do que do componente original, afinal há a possibilidade de se depositar um revestimento mais resistente ao desgaste, impacto, abrasão ou corrosão do que o fornecido pelo material original (ESAB, 2012).

As turbinas hidráulicas, onde são consideradas aquelas que utilizam especificamente para transformar a energia hidráulica (a energia de pressão e a energia cinética) de um fluxo de água em energia mecânica, na forma de torque e velocidade de rotação para a geração de energia elétrica, são um exemplo de equipamentos que sofrem pelo fenômeno de cavitação (CORRÊA, 2018).

As turbinas Francis e Kaplan de alta velocidade específica são as mais sujeitas à incidência de cavitação em virtude de depressões ocorridas com maior frequência. A água entra nesse rotor radialmente, com alta pressão e velocidade. A existência de partículas sólidas (areia, quartzo, entre outros), presentes na água de diversos rios, associado com a alta velocidade e pressão, ocasiona desgaste por erosão no rotor. Esse desgaste é caracterizado por remoção de material da superfície pelo impacto dessas partículas sólidas. Outro fenômeno também altamente prejudicial ao bom funcionamento das turbinas hidráulicas é a cavitação. Dentre os danos que podem ser provocados, pode-se citar a erosão de contornos dos perfis de rotores, vibrações e ruídos e também a diminuição da eficiência das turbinas hidráulicas e sua queda de potência, resultantes da perda de massa.

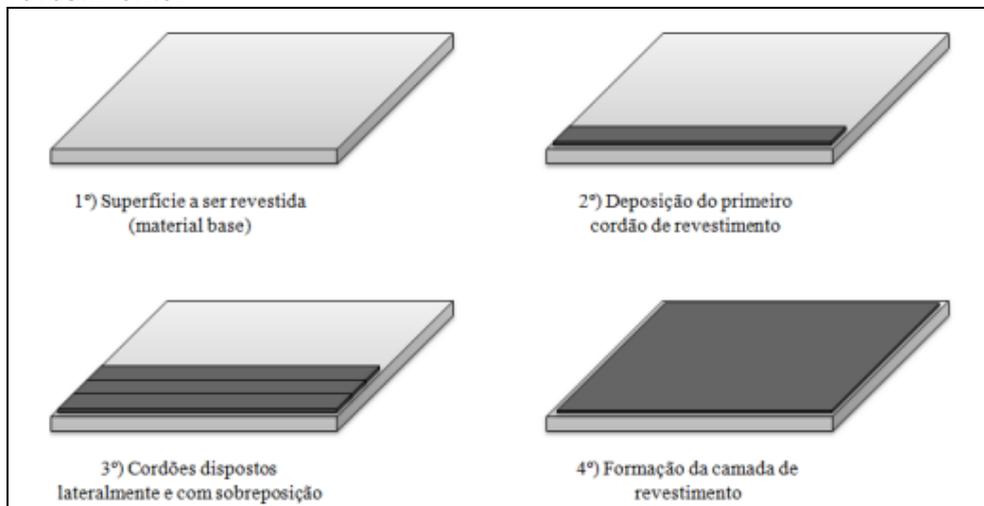
Em muitos casos, esse nível de desgaste é bastante rápido e a consequência é a perda de eficiência energética e a necessidade de paradas para manutenção, para reparo ou substituição da peça. Essas paradas são

demoradas, possuem risco elevado e são bastante onerosas (MUSARDO, 2006).

Assim, temos a soldagem de revestimento uma solução destes problemas comuns nas usinas hidrelétricas.

A soldagem de revestimento, portanto, é definida pela AWS como a deposição de um metal de adição em camada sobre a superfície de outro metal objetivando obter propriedades ou dimensões desejadas. A Figura 1 representa o princípio da soldagem de revestimento.

**Figura 1 - Deposição dos cordões de solda para a realização do processo de revestimento.**

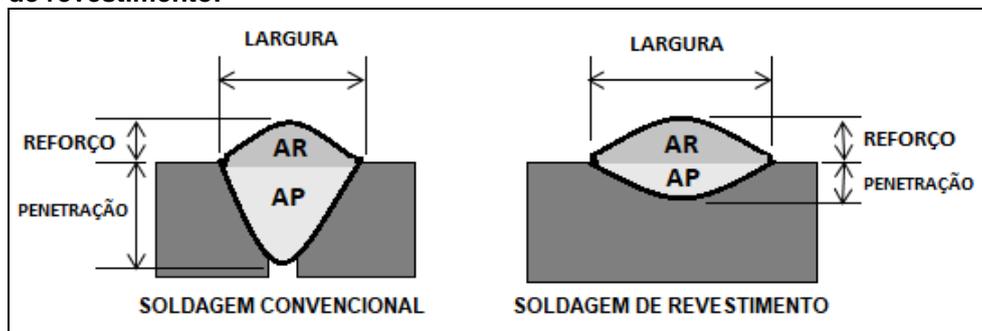


Fonte: SPEZIALI (2018).

A geometria do cordão de solda obtido pelo processo de soldagem de revestimento é um dos principais fatores que diferencia este método dos demais convencionais. Com o perfil obtido verifica-se a possibilidade de recobrir grandes áreas com menores números de passes, assim, consequentemente contribuindo para economia de material e tempo. Portanto, nota-se que um dos maiores desafios deste método consiste em ajustar os parâmetros do processo para que possibilite que o material depositado adquira a geometria desejada (GOMES, 2010).

A Figura 2 representa a diferença na geometria dos cordões de solda do processo de soldagem convencional e de revestimento para melhor compreensão de como deve ser o resultado final em cada processo.

**Figura 2 – Geometria obtida do cordão de solda na soldagem convencional e de revestimento.**



AP: Área de Penetração; AR: Área de Reforço.

Fonte: Autoria Própria.

A partir da Figura 2, é possível observar que em aplicações convencionais, o objetivo é alcançar uma grande Área de Penetração (AP) e uma Área de Reforço (AR) pequena, porém na soldagem de revestimento, acontece justamente o inverso, a busca é pela Área de Reforço maior possível e pouca Área de Penetração. Além disso, é necessário o cuidado com a diluição que ocorre durante o processo de soldagem.

A diluição é o nome dado à mistura do metal de base com o metal de adição durante a soldagem, sendo que quando o objetivo é realizar revestimentos o interessante é reduzir ao máximo essa diluição. No caso dos valores da diluição apresentados neste trabalho, referem-se à diluição geométrica, ou seja, a diluição foi apresentada na forma de porcentagens, no qual foram obtidas a partir dos resultados mensurados da geometria do cordão de solda.

### 3.1.2 Soldagem com Arame Tubular

A soldagem por arame tubular ou FCAW (Flux Cored Arc Welding) como é comumente chamada, é um processo de soldagem onde ocorre a coalescência entre metais através de um arco elétrico estabelecido entre a

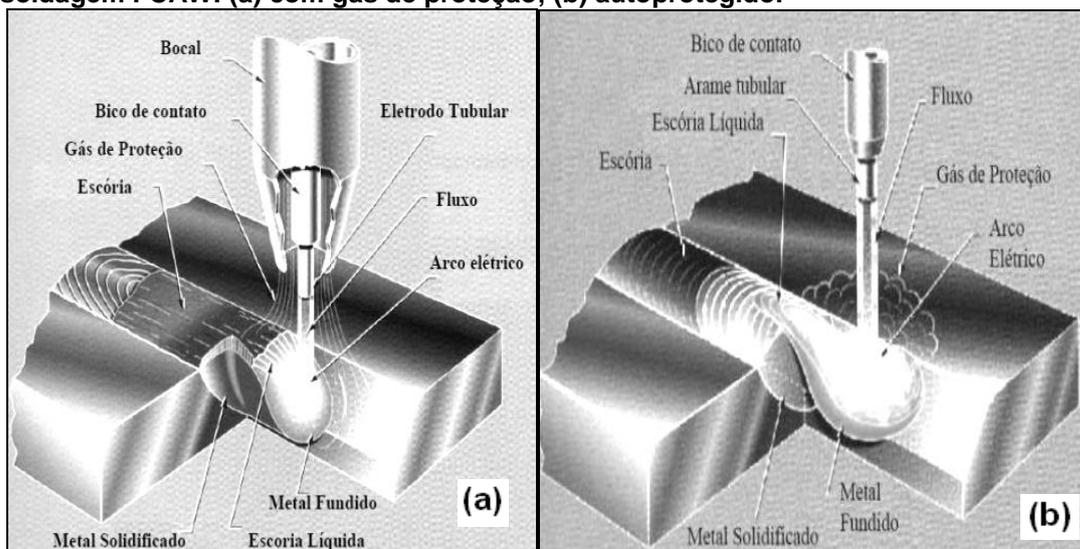
peça a ser soldada e um eletrodo alimentado continuamente (RODRIGUES, 2005).

Uma maneira fácil de compreender como acontece o processo da soldagem por arame tubular é pensar na soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding), ou mais conhecida como MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas) e usada em grande escala. Os procedimentos de soldagem adotados nos dois processos se assemelham bastante no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento, apenas se diferem pelo fato de que a soldagem por arame tubular possui um arame com formato tubular que possui um fluxo em seu interior. As vantagens desses dois métodos de soldagem é que possuem um alto fator de trabalho e alta taxa de deposição, porém no arame tubular ainda é possível obter uma alta versatilidade da soldagem, em comparação aos eletrodos revestidos, no ajuste da composição química e facilidade do trabalho em campo.

GOMES (2006) salienta que a popularidade do processo FCAW tem crescido devido às possíveis vantagens que este processo oferece, tais como: alta qualidade do metal de solda depositado; excelente aparência do cordão de solda; boas características do arco; baixo nível de respingos. Também acrescenta que existe uma taxa de fusão do arame tubular maior que do arame sólido na mesma faixa de corrente, pois o invólucro tubular metálico tem menor massa condutora e isso proporciona maior densidade relativa de corrente.

Na Figura 3 temos as formas e diâmetros de arames tubulares normalmente utilizados no processo de soldagem por arame tubular.

**Figura 3 – Formas e diâmetros dos arames tubulares utilizados no processo de soldagem FCAW: (a) com gás de proteção; (b) autoprottegido.**



Fonte: CORRÊA (2006).

Como observamos na Figura 3 o método de soldagem por arame tubular possui variações nos eletrodos adotados. Pela representação (a) verificamos que no metal de adição há uma proteção do arco complementada por um gás de proteção e em (b) apenas o metal de adição proporciona a proteção necessária através do fluxo interno do arame (RODRIGUES, 2005).

O Quadro 1 explica as principais diferenças em cada uma dessas variações e sua aplicação.

**Quadro 1 - Variações do processo de soldagem com arame tubular.**

**(continua)**

|                            |                    |  |
|----------------------------|--------------------|--|
| <b>Com gás de proteção</b> | <b>Metal Cored</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possuem em seu interior um fluxo composto por pós metálicos, proporcionando assim alta eficiência de deposição (95%).</li> <li>- Geram baixa quantidade de fumos (melhor ambiente de trabalho), respingos (menor índice de retrabalho) e também baixo índice de hidrogênio difusível.</li> <li>- São arames de alta produtividade e indicados para soldagem de alta responsabilidade.</li> <li>- Bastante utilizados na indústria automobilística.</li> </ul> |
|                            | <b>Flux Cored</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possuem em seu interior um fluxo composto por pós não metálicos, proporcionando alta produtividade através de maiores velocidades de soldagem.</li> <li>- Formação de escória que além de proteger a poça de fusão, contribui para um melhor desempenho na soldagem fora de posição.</li> </ul>   |

**Quadro 1 - Variações do processo de soldagem com arame tubular.****(conclusão)**

|                            |                       |   |
|----------------------------|-----------------------|---|
|                            |                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bastante utilizados nas indústrias de construção naval, offshore e em pipelines.</li> <li>- Podem ser do tipo rutilico ou básico, sendo o rutilico mais comum e indicado para aplicações gerais e o básico para aplicações que requerem altíssima tenacidade.</li> </ul>   |
| <b>Sem gás de proteção</b> | <b>Autoprottegido</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possuem em seu interior um fluxo composto por elementos capazes de gerar os gases necessários para proteção da poça de fusão e do arco elétrico, não necessitando desta maneira de uma fonte externa de proteção gasosa.</li> <li>- É uma ótima alternativa para soldagem em campo em substituição aos eletrodos revestidos, uma vez que proporciona maior produtividade em relação ao processo SMAW (MMA).</li> </ul> |

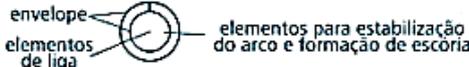
Fonte: ESAB.

Algumas das funções do fluxo interno contido no interior do arame (eletrodo) são: melhoria nas características do arco elétrico; melhoria na transferência do metal de solda; proteção da poça de fusão, formando escória; e em alguns casos, a adição de elementos à liga.

Os arames tubulares apresentam várias configurações de secção transversal, podendo ser simplesmente um tubo ou configurações mais complexas. A Figura 4 mostra as geometrias básicas dos arames tubulares.

**Figura 4 - Geometria dos arames tubulares utilizados para soldagem FCAW.**

| tipo | seção   | símbolo  |
|------|---|--|
| 1    |  |  |
| 2    |  |  |
| 3    |  |  |
| 4    |  |  |
| 5    |  |  |
| 6    |  |  |



Fonte: KUNTZ (2016).

A utilização do processo de soldagem com arames tubulares tem aumentado significativamente nos últimos anos, no Brasil e no mundo. Esse processo de soldagem foi desenvolvido para atender às necessidades das empresas que buscam aumentar a competitividade e reduzir custos. Portanto, as altas taxas de deposição e o desenvolvimento de novos consumíveis têm levado as empresas a migrar para este processo.

### 3.2 METAL DE ADIÇÃO: AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO

O aço inoxidável martensítico é uma liga composta, em sua base, com a mistura de ferro com no mínimo 10,5% de cromo, assim se tornando muito superior ao aço normal, conferindo maior resistência a impactos, ao calor e à corrosão. Além disso, possuem teores de carbono inferiores a 0,1%, teores de cromo entre 12 e 18% e teores de níquel entre 2 e 4% (JOPEMAR, 2016).

Em altas temperaturas, esses aços possuem uma microestrutura austenítica, porém, após passar posteriormente pelo processo de têmpera, a austenita se transforma em martensita, conferindo maior dureza e resistência mecânica.

Essa classe de aços inoxidáveis foi desenvolvida a fim de atender a necessidade da indústria de uma liga que apresentasse comparativamente aos demais aços inoxidáveis, certa resistência à corrosão, elevada dureza, resistência ao desgaste e fosse susceptível de endurecimento por tratamentos térmicos. Entretanto, devido ao tratamento térmico e à presença de carbono, sua aplicação fica limitada tipicamente a temperaturas abaixo de 450° C (ZANELLA, 2018).

A Tabela 1 apresenta os principais aços inoxidáveis martensítico, onde o carbono é o principal responsável pela dureza apresentada pelos mesmos, assim estão agrupados de acordo com o teor de carbono.

**Tabela 1 - Composição química dos principais aços inoxidáveis martensíticos (% peso).**

| Grupo | Tipo          | Composição    |             |           |      |           |  |
|-------|---------------|---------------|-------------|-----------|------|-----------|--|
|       |               | C             | Cr          | Mn        | Si   | Ni        | Outros                                   |
| 1     | 410NiMo       | 0,05          | 11,4–14,0   | 0,50-1,00 | 0,60 | 3,5-5,5   | 0,50 – 1,00 Mo                           |
|       | CA-6NM        | 0,06          | 11,5-14,0   | 1,00      | 1,00 | 3,5-4,5   | 0,40-1,00 Mo                             |
| 2     | 403           | 0,15          | 11,5-13,0   | 1,00      | 0,50 | -         | -  |
|       | 410           | 0,15          | 11,5-13,5   | 1,00      | 1,00 | -         | -  |
|       | 414           | 0,15          | 11,5-13,5   | 1,00      | 1,00 | 1,25-2,50 | -  |
|       | 416           | 0,15          | 12,0-14,0   | 1,25      | 1,00 | -         | 0,15 S mín.;<br>0,6 Mo                   |
|       | 420           | 0,15<br>mín.  | 12,0-14,0   | 1,00      | 1,00 | -         | -  |
|       | 422           | 0,20-<br>0,25 | 11,5 – 13,5 | 1,00      | 0,75 | 0,5-1,0   | 0,75-1,0Mo;<br>0,75-1,0 W;<br>0,15-0,3 V |
|       | 431           | 0,20          | 15,0 – 17,0 | 1,00      | 1,00 | 1,25-2,50 | -  |
|       | CA-15         | 0,15          | 11,5-14,0   | 1,00      | 1,50 | 1,00      | 0,50 Mo                                  |
|       | 440 A         | 0,60-<br>0,75 | 16,0-18,0   | 1,00      | 1,00 | -         | 0,75 Mo                                  |
|       | 440 B         | 0,75-<br>0,95 | 16,0-18,0   | 1,00      | 1,00 | -         | 0,75 Mo                                  |
| 440 C | 0,95-<br>1,20 | 16,0-18,0     | 1,00        | 1,00      | -    | 0,75 Mo   |  |

Fonte: ZANELLA (2018).

Pela Tabela 1 verifica-se que o grupo 1 é formado pelos aços que apresentam um teor de carbono de no máximo 0,06% em peso, onde esses

aço apresentam uma dureza máxima de 35 HRC. No grupo 2, temos os aços com teores de carbono acima de 0,06% até 0,30% em peso, e apresentam dureza entre 35 a 55 HRC, após o tratamento térmico de têmpera. Por fim, o grupo 3, que possuem teores de carbono acima de 0,30% em peso, chegando a durezas entre 55 e 65 HRC, após têmpera.

O aço inoxidável martensítico é utilizado em diversas aplicações, onde se procura uma elevada resistência à corrosão, elevada resistência mecânica e dureza. Portanto, este tipo de aço é aplicado em componentes de turbinas a vapor, em componentes de bombas de líquidos corrosivos, em árvores e hélices marinhas, em componentes de aeronaves, além de utensílios de cozinha e cutelaria (facas e tesouras), instrumentos cirúrgicos (tesouras cirúrgicas, porta-agulha e bisturis, entre outros), na indústria petroquímica em componentes usados para craqueamento, na indústria alimentícia em componentes em contato direto com alimentos e também em lâminas de barbear (ZANELLA, 2018).

Uma das vantagens destes aços é que, como outros tipos de aço inox, são totalmente recicláveis, possibilitando o seu uso em novas aplicações, sem a necessidade de buscar matéria-prima, preservando o meio ambiente.

### 3.3 FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

A transferência de metal durante o processo de soldagem quando se utiliza o arco elétrico pulsado permite ótimas taxas de deposição em todas as posições. A corrente é a característica que se modifica ao longo do processo. A corrente de pico é a responsável pelo aumento na aceleração momentânea da taxa de fusão do arame. Já a corrente de base, representada pelo nível mais baixo, possui diversas funções, como: manter o arco, gerar uniformidade na limpeza catódica, fundamental na soldagem do alumínio, iniciar a fusão do arame e propiciar a formação e o crescimento da gota metálica a ser destacada pela ação da corrente de pico (ANDRADE, 2012).

Portanto, a função da pulsação é obter, por combinação o rendimento da fonte de trabalho com dois níveis de corrente. No nível alto de intensidade de

corrente, há uma corrente alta aplicada num determinado intervalo de tempo, onde acontece o destacamento da gota; e no nível mais baixo de corrente com um determinado tempo, há a formação da gota, para que esta seja destacada no nível superior de corrente (CORRÊA, 2018).

Diante das pesquisas apresentadas nas referências deste trabalho, verifica-se que o uso da corrente pulsada proporciona uma redução na geração de fumos e respingos, pelo controle dos parâmetros de pulso durante a soldagem e o refino da estrutura bruta de solidificação do cordão de solda, possibilitando a diminuição de trincas de solidificação.

Os parâmetros elétricos envolvidos na soldagem com corrente pulsada são definidos pela corrente de pico ( $I_p$ ), corrente de base ( $I_b$ ), tempo de pico ( $t_p$ ), tempo de base ( $t_b$ ), além da velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem e da tensão de soldagem.

A Figura 5 ilustra um oscilograma da corrente pulsada e mostra os parâmetros que a definem, assim como acontece o processo até o destacamento da gota. Com base nestes parâmetros elétricos, temos a Equação 1 que apresenta como calcular a corrente média ( $I_M$ ) do processo (PESSOA, 2009):

$$I_M = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (1)$$

$I_M$ : corrente de média;

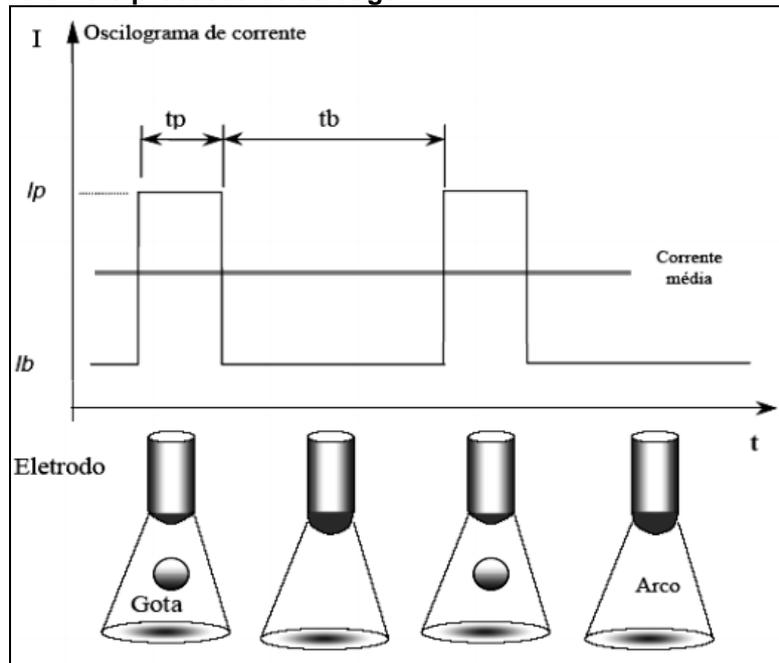
$I_p$ : corrente de pico;

$I_b$ : corrente de base;

$t_p$ : tempo de pico;

$t_b$ : tempo de base.

**Figura 5 - Oscilograma da corrente pulsada ilustrando a formação e destacamento da gota da ponta do eletrodo durante o processo de soldagem.**



$I_b$ : corrente de base;  $I_p$ : corrente de pico;  $t_b$ : tempo de base;  $t_p$ : tempo de pico.

Fonte: PESSOA (2009).

Pela Figura 5, se observa uma onda periódica com a alternância da corrente de soldagem em dois níveis bem definidos (corrente de pico ( $I_p$ ) e corrente de base ( $I_b$ )), com o intuito de controlar a transferência metálica. Como já foi mencionado, o valor da corrente de base empregado é baixo para que não ocorra a transferência metálica, ou seja, enquanto estiver na corrente baixa, há a formação de uma gota de metal líquido na extremidade do eletrodo ao mesmo tempo em que se mantém o arco aberto, além de ocorrer o resfriamento da poça de fusão propiciando a manutenção e estabilidade do arco elétrico durante a soldagem, onde, em conjunto com o tempo de base ( $t_b$ ) sustenta a gota, dando estabilidade ao ânodo e cátodo. Já o valor da corrente de pico, atua no destacamento da gota metálica formada previamente na ponta do eletrodo, assim tendo a necessidade valores maiores de corrente para propiciar uma melhor estabilidade do arco elétrico e uma menor quantidade de respingos (DIAZ et. al, 2018).

Os valores da corrente de pico e da corrente de base empregadas no processo de soldagem pulsado são extremamente importantes e devem ser controladas, assim como, o tempo de pico e tempo de base. Afinal, na corrente

de pico é necessário se obter uma corrente alta o suficiente para proporcionar o destacamento da gota, com um tempo de pico mínimo, para garantir que nesse período apenas uma gota seja destacada. E o mesmo ocorre para a corrente de base, pois é necessário uma corrente baixa o suficiente, porém não nula ( $I_b \neq 0$ ), para a formação da gota, com um tempo de base também mínimo, permitindo que apenas uma gota seja formada neste período. Tanto a corrente de pico como a corrente de base possuem valores sempre positivos, isto é, nos oscilogramas que representam o comportamento da onda periódica (conforme Figura 5) resultante do processo pulsado, a onda sempre estará formada acima do eixo X. Portanto, quando trabalhamos com corrente pulsada, temos uma corrente de pico ( $I_p$ ) e a duração do tempo de pico ( $t_p$ ) preservados, já a corrente de base ( $I_b$ ) e a duração do tempo de base ( $t_b$ ) são ajustados com base na corrente média estipulada.

O valor da corrente depende de diversos fatores, entre eles o diâmetro do eletrodo, o metal de adição (arame) utilizado e a sua composição química. Na corrente pulsada, é possível controlar a frequência do destacamento da gota, porém a amplitude e a frequência devem ser tratadas como variáveis independentes (CÔRREA, 2018).

Sendo que, é necessário que apenas uma gota se destaque a cada pulso de corrente, temos como principais parâmetros que controlam o tipo de transferência, o tempo e a corrente de pico, onde esta influência pode ser representada pelo parâmetro de destacamento da gota ( $Dg$ ) apresentado na Equação 2 (MODENESI, 2012):

$$Dg = I_p^2 t_p \quad (2)$$

$Dg$ : parâmetro de destacamento da gota;

$I_p$ : corrente de pico;

$t_p$ : tempo de pico.

Nos estudos desenvolvidos por SIVARAMAN et. al. (2016), mostrou-se que a soldagem FCAW com corrente pulsada é capaz de aumentar a taxa de deposição em 42% e velocidade de soldagem em 20%.

### 3.4 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Existe uma série de parâmetros que precisam ser considerados no processo de soldagem por serem capazes de influenciar e governar, em maior ou menor grau, os resultados do processo. A sua inter-relação é capaz de afetar as características operacionais da solda, como em sua produção, geometria e aspecto final do cordão.

Segundo MOREIRA (2008), as variáveis de soldagem podem ser divididas em quatro grupos básicos:

- Variáveis pré-determinadas: seleção do metal de base, escolha do metal para realizar a solda.
- Variáveis de fundo: tipo do processo de soldagem, equipamento, projeto da junta, técnica de solda, forma e diâmetro do eletrodo, fluxo, tipo de gás, etc.
- Variáveis primárias: tipo e intensidade da corrente, tensão, velocidade de soldagem.
- Variáveis secundárias: comprimento do eletrodo, em relação à peça qual a posição da tocha de soldagem.

Os cuidados na seleção destas variáveis, sendo elencadas algumas delas anteriormente, como intensidade da corrente, tensão, velocidade de soldagem, comprimento do eletrodo, posição da pistola e entre outras, conseqüentemente geram a obtenção dos melhores resultados. Optar pelas variáveis pensando no tipo de aplicação desejada é dar condições a alcançar os objetivos estipulados.

Abaixo serão descritos alguns destes parâmetros e variáveis respostas obtidas no processo de soldagem e que serão analisados neste trabalho.

#### 3.4.1 Tensão e Corrente de soldagem

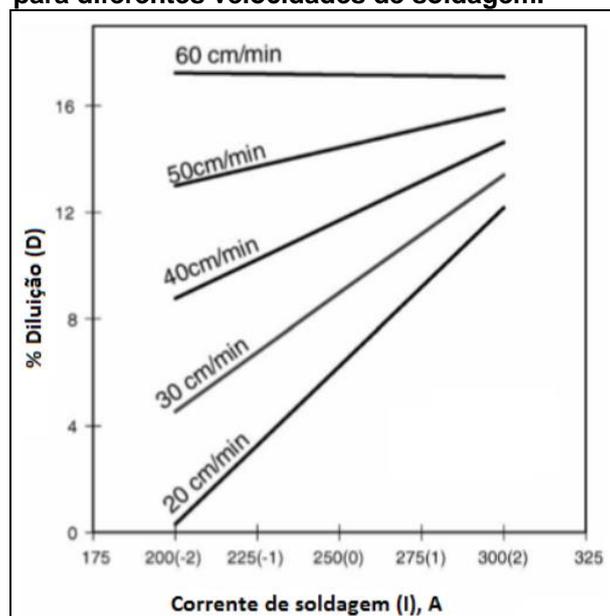
A tensão de soldagem é conhecida como a tensão entre o eletrodo e a peça é influenciada pela: corrente do arco, o perfil da ponta do eletrodo, a distância bico de contato peça e pelo tipo de gás de proteção (SANTANA, 2016).

A variável tensão é significativa quanto à geometria da solda, pois afeta o modo de transferência metálica e está associada diretamente ao comprimento do arco. Quando a tensão diminui a penetração aumenta e quando a tensão aumenta, o comprimento do arco também aumenta, aumentando assim, a probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras (KUNTZ, 2016).

A corrente de soldagem influencia a penetração e a largura da solda de maneira diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a corrente maior será a penetração e a largura do cordão. Já o reforço do cordão tende a diminuir com o aumento da corrente para soldas com metal de adição.

SANTANA (2016) apresenta um estudo realizado por autores diversos que avaliam a influência da corrente de soldagem para algumas velocidades de soldagem em revestimentos depositados por FCAW (Figura 6).

**Figura 6 - Estudo da influência da corrente média de soldagem nos resultados da diluição para diferentes velocidades de soldagem.**



Fonte: SANTANA (2016).

Na Figura 6, verifica-se que o aumento da corrente de soldagem gera um aumento na diluição.

#### 3.4.2 Velocidade de Soldagem

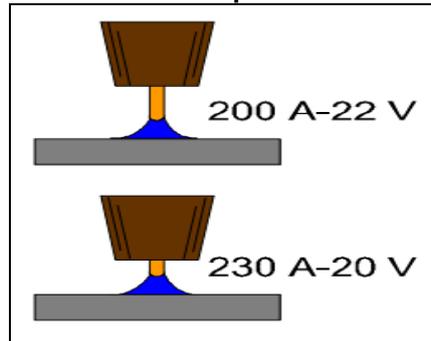
A velocidade de soldagem representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta de solda. Observa-se que a penetração, primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias. Quando a velocidade é muito baixa, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Por outro lado para velocidades de soldagem muito altas, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui, podendo ocorrer ainda mordeduras ao longo do cordão (GOMES, 2006).

#### 3.4.3 Distância Bico de Contato da Peça (DBCP)

Com o aumento da extensão do eletrodo (DBCP) temos uma queda na amperagem e uma elevação na voltagem de serviço. Uma menor quantidade de corrente é necessária para fundir o arame devido ao aquecimento do mesmo pelo aumento da resistência elétrica do circuito. Portanto, aumentando-se a distância bico contato peça, aumentamos a taxa de fusão do arame e vice-versa (SOLCI, 2015).

A Figura 7 representa a influência da extensão do eletrodo nas variáveis do processo. Observa-se uma variação nos valores de corrente e tensão em função da altura do bico de contato. Para o primeiro DBCP alcançou-se uma corrente média de 200 A e uma tensão de 22 V, já no segundo caso, diminuindo o DBCP, temos uma corrente de 230 A e uma tensão de 20 V.

**Figura 7 - Influência da variação na Distância Bico Contato Peça nas variáveis do processo.**



Fonte: SOLCI (2015).

#### 3.4.4 Gás de Proteção

O gás de proteção possui como objetivo principal manter o nitrogênio e o oxigênio presentes na atmosfera fora da poça de fusão durante a soldagem, isso porque estes gases são prejudiciais ao processo, pois podem reagir com os constituintes presentes na solda. Além disso, o gás de proteção também promove a estabilidade do arco e a uniformidade da transferência metálica (CASTRO, 2015).

O gás de proteção pode ser inerte ou ativo, ou uma mistura dos dois tipos. Sendo inerte, quando não reage quimicamente com a maioria dos metais, e ativo, quando reage com os outros elementos.

Dentre os gases de proteção mais usados na soldagem FCAW em arames que não são autoprotégidos, pode-se citar o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em misturas deste com o argônio (Ar), e hélio (He) combinado com oxigênio ( $\text{O}_2$ ) (CASTRO, 2015).

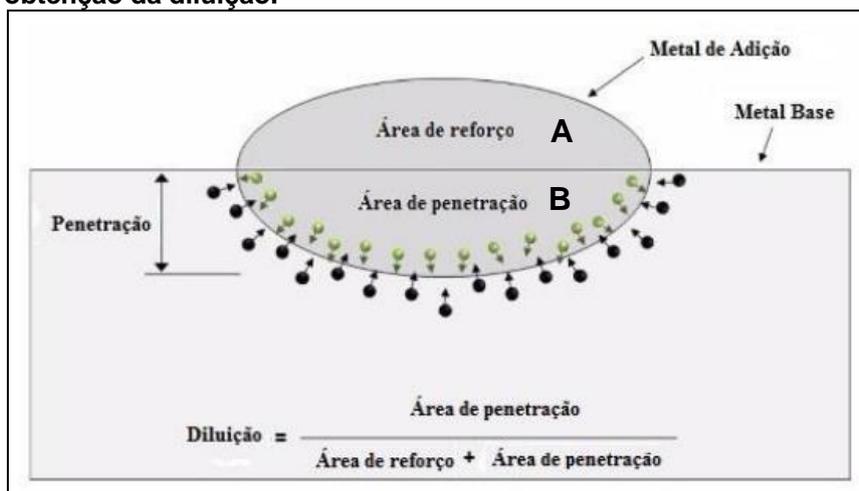
A utilização do gás de proteção adequado garante a eficiência da deposição da solda e o custo, sendo o hélio (He) o gás mais caro, o Ar de preço intermediário e o  $\text{CO}_2$  o mais barato.

### 3.4.5 Diluição

A diluição pode ser medida pela seção transversal de soldas em macrografias. Seu valor pode variar entre 100% (soldas sem metal de adição) e 0% (brasagem). O controle da diluição é importante quando se deseja controlar a participação do metal base na formação da solda, como exemplo, na soldagem de metais dissimilares, na deposição de revestimentos especiais sobre uma superfície metálica, na soldagem de metais de composição química desconhecida, algo comum em soldagem de manutenção e na soldagem de materiais que tenham altos teores de elementos prejudiciais à zona fundida, como o carbono e o enxofre (SILVA, 2010).

O cálculo da diluição (D) pode ser representado pela razão entre a área proporcional da quantidade de metal base (B) pela soma da área proporcional de material de adição fundido (A) com a área (B). Para revestimentos o desejável é uma baixa porcentagem de diluição. A Figura 8 ilustra as áreas do cordão de solda utilizadas nos cálculos (NETO, 2018).

**Figura 8 - Representação da macrografia do cordão de solda para obtenção da diluição.**



Fonte: NETO (2018).

### 3.5 DESENHO EXPERIMENTAL

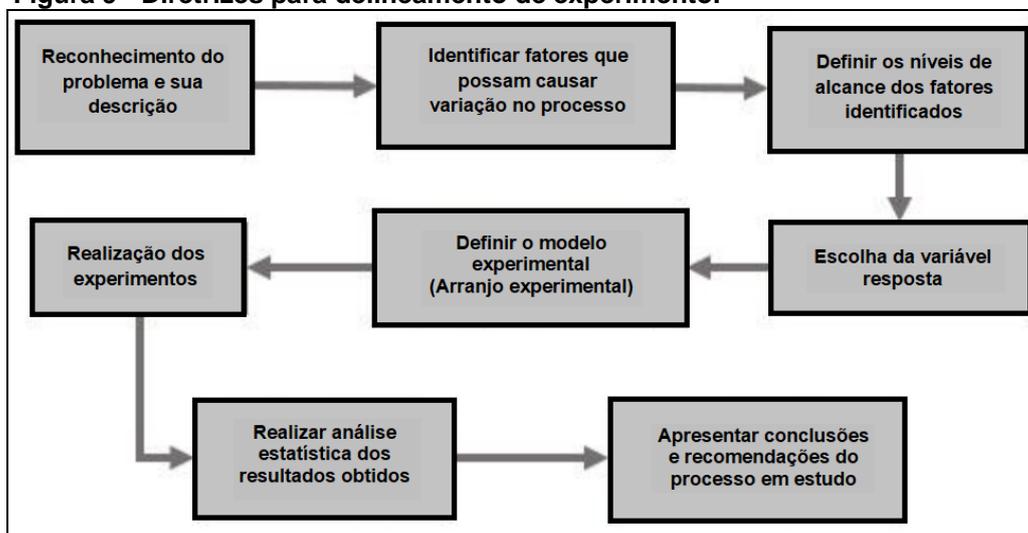
Para se desenvolver novos produtos e processos é necessário obter a maior quantidade de informações a respeito do comportamento de determinado fenômeno. Portanto, verifica-se a importância de se conhecer e usufruir de métodos científicos cada vez mais, para que se torne possível.

Quando há um planejamento detalhado para a realização de um determinado experimento, obtemos a minimização de custos operacionais e a garantia de que os resultados obtidos irão conter dados relevantes para a solução almejada. Além disso, obtêm-se produtos com melhores características, uma redução no tempo de desenvolvimento e na sensibilidade desses produtos quanto às variações das condições ambientais, aumentando a produtividade (RODRIGUES, 2005).

Um bom planejamento é aquele capaz de projetar um experimento e fazer com que ele forneça as informações desejadas. E para que isso aconteça é importante de se tenha claramente a ideia do objetivo do estudo, saber a melhor maneira de coleta de dados e como estes resultados serão avaliados.

Para um Projeto de Experimentos (Figura 9) ser bem sucedido, há algumas etapas a serem seguidas:

**Figura 9 - Diretrizes para delineamento de experimento.**



Fonte: NETO (2018).

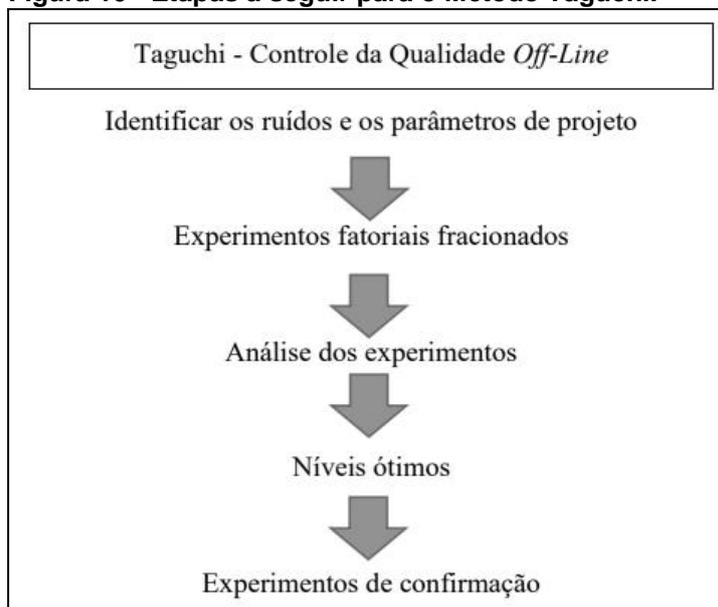
Segundo NETO (2018) pode ser definido três pilares que estruturam e definem como os experimentos devem ser conduzidos:

- Aleatorização: tornar os testes aleatórios com os parâmetros de entrada, evitando ou minimizando os ruídos.
- Replicação: é a possibilidade de repetir os testes em vários cenários estabelecidos, analisando a variabilidade.
- Blocagem: Separação das variáveis afins na qual se deseja obter uma resposta.

### 3.5.1 Projeto Robusto/Método Taguchi

O método Taguchi é um método de projeto de experimentos fatoriais, ou seja, é somente executada uma fração do número total de combinações das variáveis de entrada. Para isso, o Dr. Genichi Taguchi propôs a utilização de matrizes compostas por vetores ortogonais para definir os testes a serem realizados. Portanto, o método de Taguchi é uma série de testes em que são feitas alterações nas variáveis de entrada de um sistema ou processo, de modo que seja possível identificar e justificar as razões para as alterações nas variáveis de saída (SCHONS, 2015).

Taguchi define o que este chamou de Controle da Qualidade *Off-line*, que consiste em etapas que serão desenvolvidas buscando-se obter produtos de alta qualidade e baixo custo. As etapas estão representadas esquematicamente na Figura 10 (FARIA, 2017).

**Figura 10 - Etapas a seguir para o Método Taguchi.**

Fonte: FARIA (2017).

1. Identificar os ruídos e os parâmetros de projeto ou processo que afetam significativamente o desempenho e que possam ser manipulados, bem como os seus níveis potenciais;
2. Realizar experimentos fatoriais fracionados no produto e no processo utilizando-se da matriz ortogonal;
3. Analisar os resultados dos experimentos para determinar o nível ótimo de operação dos parâmetros estudados;
4. Realizar um experimento de confirmação para certificar-se que esse nível de operação dos parâmetros realmente melhora a qualidade.

### 3.6 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Os modelos de regressão são amplamente expansíveis para estudar diversos fenômenos, inseridos em diferentes cenários como: computação, administração, engenharias, biologia, agronomia, saúde, sociologia, etc. O objetivo dessa técnica analítica é obter uma equação que explique

satisfatoriamente a relação entre uma variável resposta ( $Y$ ) e uma ou mais variáveis explicativas ( $X$ ), possibilitando fazer predição de valores da variável de interesse. Neste trabalho o interesse é estudar os resultados obtidos nos ensaios e interpretar os parâmetros obtidos para maximização dos resultados obtidos via delineamento experimental Método Taguchi, para isso será utilizado especificamente modelos de regressão linear múltipla.

Uma equação de regressão que contenha mais de um regressor é chamado de modelo de regressão linear múltipla, expresso pela Equação 3:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + \epsilon \quad (3)$$

Temos uma relação funcional entre as variáveis, onde a função estatística explica grande parte da variação de  $Y$  pelas variáveis  $X$ 's. Entretanto, uma parcela da variabilidade de  $Y$  não é explicada por  $X$ 's, assim sendo atribuída ao acaso, ou seja, ao erro aleatório ( $\epsilon$ ). Portanto:

$Y$  = é a variável dependente ou de resposta ;

$X$ 's = são as variáveis independente ou explanatória

$b_k$  = são os coeficientes de regressão;

$\epsilon$  = são os resíduos ou erro aleatório.

Assim, pela análise de regressão nos são fornecidas equações de regressão de primeira ordem, que minimizam os erros baseando em estimação via mínimos quadrados. Os resultados estão organizados em tabelas de Análise de Variância (ANOVA).

A tabela da ANOVA nos demonstra quais as variáveis de influência (corrente média, velocidade de soldagem, frequência de pulsação e distância bico de contato peça) mais interferem diretamente na variável resposta de interesse (largura, reforço, penetração, área de reforço, área de penetração, índice de convexidade e diluição). A decisão é baseada na medida p-valor, onde p-valor ou valor p é definido como o menor nível de significância que nos leva a rejeitar  $H_0$ , e sabe-se que o nível de significância é definido como a probabilidade condicional de  $P$  (Rejeitar  $H_0 / H_0$  é verdadeiro).

Para entender o p-valor e como funciona o teste de hipóteses, é necessário previamente definir-se o nível de significância, ou seja, descrever sobre os erros associados aos testes de hipóteses.

GHAZALI et. al. (2015), PRASAD et. al. (2012), ACHEBO et. al. (2015), KUMAR et. al. (2017), SANTOS et. al. (2015), CARMELOSSI et. al. (2013) e dentre outros autores, são exemplos de pesquisadores que empregaram como análise estatística de seus dados, a análise de variância, a partir de um planejamento experimental com base no método Taguchi, possibilitando identificar quais os parâmetros influenciariam significativamente em suas respostas.

Uma outra abordagem comum é baseada em modelos de superfície de resposta (*RSM – Response Surface Methodology*), sendo esta uma ferramenta que permite avaliar como as respostas são afetadas quando as variáveis de entrada são ajustadas fora da região de interesse, saber quais variáveis de entrada quando combinadas afetam a resposta e também saber quais valores destas variáveis terão a resposta desejada (maximizada ou minimizada) e qual a superfície de resposta mais próxima deste ótimo (RODRIGUES, 2005).

Esta técnica matemática e estatística é utilizada para a análise e modelamento de problemas onde a resposta de interesse é influenciada por vários parâmetros e o objetivo é otimizar esta resposta (RODRIGUES, 2005).

As Equações 4 e 5 apresentam os polinômios de primeira e segunda ordem geralmente utilizados:

#### Primeira Ordem com iteração

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad (4)$$

#### Segunda Ordem com iteração

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad (5)$$

Estes polinômios analisam os dados e sugerem a existência de uma relação funcional entre suas variáveis, surgindo então, a função matemática que exprime esse relacionamento.

### 3.6.1 Teste de hipóteses

Em se tratando de análise de significância dos parâmetros, esta pode ser realizada baseado em critérios métricos, como intervalos de confiança, estimativa dos parâmetros e, o meio mais comum, julgando pelo p-valor associado a cada parâmetro estudado. Utilizando um nível de significância de 5%, quando se tem o  $P_{\text{valor}}$  menor que 0,05, pode-se dizer que este parâmetro é significativo, ou seja, exerce influência no processo.

Uma hipótese estatística é uma afirmação sobre os parâmetros de uma ou mais populações. As afirmações são chamadas de hipóteses, e o procedimento de tomada de decisão sobre a hipótese é chamado de teste de hipóteses.

Portanto, para a aplicação de um teste de hipóteses é necessário o uso de uma sequência de etapas (MONTGOMERY; RUNGER, 2012):

1. Parâmetros de interesse: a partir do contexto do problema, identifique o parâmetro de interesse;
2. Hipótese nula,  $H_0$ : estabeleça a hipótese nula;
3. Hipótese alternativa,  $H_1$ : especifique uma hipótese alternativa apropriada,  $H_1$ .
4. Estatística de teste: determine uma estatística apropriada de teste;
5. Regra de decisão sob  $H_0$  se: critérios de rejeição ou não rejeição da hipótese nula ( $H_0$ );
6. Cálculos: calcule quaisquer grandezas amostrais necessárias, substitua-as na equação para a estatística de teste e calcule esse valor.
7. Conclusões: decida se  $H_0$  deve ou não ser rejeitada e reporte isso no contexto do problema.

Porém, na prática, todo esse procedimento formal e rígido pode ter atalhos, sem perder o rigor metodológico. Em geral, o pesquisador/experimentalista toma a decisão sobre a questão de interesse na etapa analítica do planejamento de experimentos, executando especificamente, três etapas:

1. Especificar a estatística de teste/modelo estatístico a ser usada para atingir o objetivo da pesquisa;
2. Especificar a localização da região crítica com base na hipótese e distribuição probabilística da estatística do teste;
3. Especificar os critérios de rejeição (tipicamente, o valor de  $\alpha$  induzido pelo valor de  $p$ , no qual a rejeição deveria ocorrer).

Deste modo, considere dois tipos de erros, com base na teoria de probabilidade condicional:

- ERRO TIPO I:  $P$  (rejeita  $H_0$ , mas  $H_0$  é verdadeira)
- ERRO TIPO II:  $P$  (não rejeita  $H_0$ , mas  $H_0$  é falsa)

Desta forma, é possível construir uma tabela de dupla entrada com essas informações (Tabela 2) (MONTGOMERY; RUNGER, 2012):

**Tabela 2 - Tabela esquemática do Teste de Hipótese.**

| <b>Decisão</b>    | $H_0$ é verdadeira       | $H_0$ é falsa            |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| Não rejeita $H_0$ | Sem erro                 | Erro tipo II ( $\beta$ ) |
| Rejeita $H_0$     | Erro tipo I ( $\alpha$ ) | Sem erro                 |

**Fonte: Autoria Própria.**

A probabilidade de se cometer um erro tipo I é geralmente chamada nível de significância do teste sendo denotada por  $\alpha$ . A probabilidade de se cometer um erro tipo II é denotada por  $\beta$ . Já a probabilidade  $1 - \beta$  é geralmente chamada de poder do teste. A probabilidade de se cometer o erro tipo II ( $\beta$ ) é geralmente usada para o cálculo do tamanho amostral.

Vale ressaltar que o nível de significância do teste  $\alpha$  é fixado antes da coleta dos dados. Portanto, o menor valor de  $\alpha$  que nos levaria a rejeitar a hipótese nula  $H_0$  é chamado p-valor.

O teste para a significância da regressão é um teste para determinar se existe uma relação linear entre a variável de resposta ( $Y$ ) e um subconjunto de regressores  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . As hipóteses apropriadas estão expressas na Tabela 3 (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

**Tabela 3 - Hipóteses para o Teste de ANOVA.**

$$H_0: b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0$$

$$H_1: b_j \neq 0 \text{ para no mínimo um } j$$

---

$H_0$ : hipótese nula;  $H_1$ : hipótese alternativa.

Fonte: MONTGOMERY; RUNGER (2012).

Portanto, a rejeição de  $H_0: b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0$  implica que pelo menos uma das variáveis regressoras  $x_1, x_2, \dots, x_k$  contribui significativamente para o modelo e aquela variável tem um efeito na variável resposta diferente de zero.

Em modelos de regressão múltipla, é útil construir estimativas de intervalos de confiança para os coeficientes de regressão ( $b_j$ ), quanto menor a amplitude do intervalo de confiança, melhor a precisão da estimativa obtida para o coeficiente estimado pelo modelo. É importante enfatizar, que esses métodos estatísticos são válidos como procedimento analítico, somente se os erros/resíduos ( $\epsilon_i$ ) sejam paramétricos com distribuição de probabilidade normal e independentemente distribuídos, com média zero e variância constante  $\sigma_\epsilon^2$ .

Assim, pode-se estabelecer que quando  $p\text{-valor} \leq$  nível de significância (0,05), é possível concluir que há uma evidência estatística significativa de associação entre a variável de resposta e as variáveis independentes do experimento em questão, rejeitando a hipótese nula no teste de hipóteses.

Assim, sabendo que em um processo de soldagem temos inúmeras variáveis de entrada, que quando trabalhadas em diferentes níveis nos resultam em diferentes resultados quanto ao cordão de solda obtido, nota-se a necessidade em detectar quais destas variáveis de entrada influenciam em cada variável resposta. Afinal, nem sempre uma variável de entrada influenciará igualmente em todas as respostas. Desse modo, este trabalho utiliza as equações de regressão, associado ao teste de hipóteses, para verificar quais variáveis interferem nos resultados a cada ensaio realizado. Para isso, utilizamos o auxílio computacional, onde todas as análises foram realizadas no programa estatístico MINITAB, adotando um nível de significância de 5%.

### 3.6.2 Análise de Resíduos

Os resíduos (Equação 6) de um modelo de regressão são expressos por:

$$\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (6)$$

sendo,  $i = 1, 2, \dots, n$ , em que  $y_i$  é uma observação real e  $\hat{y}_i$  é o valor ajustado correspondente.

Ao se realizar uma análise de resíduos pretendemos verificar se o modelo de regressão que está a ser utilizado é adequado. Para tal, os resíduos devem atingir pressupostos estatísticos (RODRIGUES, 2012), sendo:

$$Y = bX + \epsilon \quad (7)$$

sendo,  $Y = (y_1, \dots, y_n)$ ,  $X$  a matriz do modelo,  $b = (b_0, \dots, b_p)$  e  $\epsilon = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_n)$ ,

- a)  $\epsilon_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , seguem distribuição normal de probabilidade;
- b)  $\text{var}(\epsilon_i) = \sigma^2$ ,  $i = 1, \dots, n$ , tem variância constante (homoscedasticidade);
- c)  $\epsilon_i$  e  $\epsilon_j$ ,  $i \neq j$ , são independentes;
- d) não existem *outliers* influentes, tem média zero.

Para verificar esses pressupostos, há algumas estratégias que se chamam análise diagnóstica dos resíduos. Para *a)* utiliza-se um gráfico dispersão, onde no eixo x tem-se os resíduos e no eixo y tem-se os quantis de uma distribuição normal empírica. Caso, os resíduos tenham distribuição aproximadamente normal, irão se dispor aleatoriamente ao redor de uma reta de 45°, pois quer dizer que se aproximam do valor empírico do quantil de uma distribuição normal padrão, condicionado ao formato regular de uma reta perfeita. Existem outros métodos para avaliação diagnóstica, como por exemplo, teste de hipótese, porém neste trabalho utilizou-se somente a elaboração desses gráficos. Para *b)* utiliza-se um gráfico de dispersão onde no eixo y tem-se os resíduos e no eixo x tem os valores ajustados pelo modelo (valores preditos), este gráfico é útil para detectar problemas na variabilidade dos dados, caso a homoscedasticidade seja atendida teremos um gráfico sem nenhum padrão aparente, ou seja, se aproximará em uma nuvem de pontos. Para *c)* utiliza-se um gráfico de dispersão onde no eixo y tem-se os resíduos e no eixo x tem a ordem de coleta dos dados/tempo, neste caso, é possível

verificar se eles estão correlacionados no tempo. Caso não seja possível identificação de um padrão, pode-se inferir que os resíduos são independentes entre si. Para *d)* é possível verificar se há outliers nos gráficos anteriores caso haja algum ponto discrepante no gráfico construído no plano cartesiano.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e equipamentos necessários à realização dos ensaios, bem como o planejamento experimental adotado.

Os procedimentos foram realizados no laboratório de soldagem, de ensaios dos materiais e de processos de fabricação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Cornélio Procópio.

### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

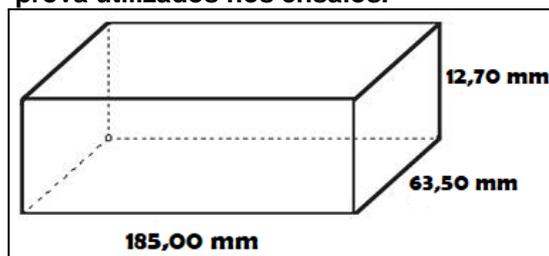
Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram retirados de barras chatas trefiladas com 63,5 mm de largura, 12,7 mm de espessura e comprimento de 6 metros. Estes foram seccionados em uma serra fita (especificada no Quadro 5) com comprimento de 185 +/- 0,5 mm. A Figura 11 representa as dimensões dos corpos de prova e o Quadro 2 apresenta a composição química do material, fornecida pelo fabricante através de certificado da composição química.

**Quadro 2 - Composição química das barras chatas de aço SAE 1020.**

| Elementos                             | C             | Mn            | Si            | P             | S                                 | Cu            | Cr            | Ni            | Sn            | N<br>(ppm) |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| Teor (%)                              | 0,18/<br>0,23 | 0,30/<br>0,60 | 0,10/0,<br>30 | 0,030<br>máx. | 0,03<br>5<br>máx.                 | 0,200<br>máx. | 0,150<br>máx. | 0,150<br>máx. | 0,060<br>máx. | 80         |
| <b>Resistência à Tração<br/>(MPa)</b> |               |               |               | 440           | <b>Limite de Escoamento (MPa)</b> |               |               |               |               | 330        |

Fonte: GERDAU.

**Figura 11 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios.**



Fonte: Autoria Própria.

Como metal de adição, ou seja, para a soldagem do cordão, foi utilizado um arame tubular inoxidável martensítico com diâmetro de 1,2 mm, classificado de acordo com a norma ASME 2007, seção II, parte C (AWS SFA 5-22), cuja especificação é AWS EC410NiMo MC. O Quadro 3 apresenta a composição química deste material, também fornecida pelo fabricante.

**Quadro 3 - Composição química do metal de adição EC410NiMo EC.**

| Elementos                  | C     | Si    | Mn    | P     | S                          | Cr     | Ni    | Mo    |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|--------|-------|-------|
| Teor (%)                   | 0,027 | 0,440 | 0,590 | 0,024 | 0,006                      | 12,500 | 4,860 | 0,430 |
| Resistência à Tração (MPa) |       |       |       | 910   | Limite de Escoamento (MPa) |        |       | 830   |

Fonte: ESAB.

## 4.2 EQUIPAMENTOS

A bancada de ensaios utilizada para a realização da soldagem compõe-se de uma fonte de soldagem, um equipamento de deslocamento da tocha de soldagem e um sistema em módulos para obtenção de sinais simultâneos da operação de solda (amperímetro e voltímetro).

A Figura 12 demonstra uma ilustração de alguns dos equipamentos principais utilizados para realização dos experimentos, bem como a sua distribuição e localização na bancada de ensaios.

Foram construídas duas bancadas separadas, para que o sistema de deslocamento da tocha (Tartilope) não afetasse os corpos de prova, evitando qualquer influência de vibração do deslocamento da tocha. A Figura 13 apresenta uma foto da bancada de fixação dos corpos de prova e a bancada de fixação do sistema de deslocamento automático da tocha de soldagem.

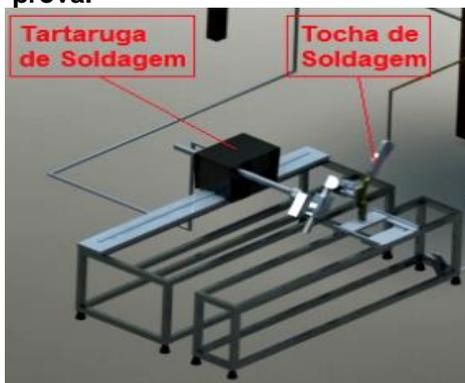
**Figura 12 - Distribuição e localização dos principais equipamentos da bancada de ensaios.**



1: Fonte de soldagem; 2: Alimentador de arame; 3: Sistema de refrigeração da tocha; 4: Sistema de aquisição de dados; 5: Tocha; 6: Sistema de deslocamento da tocha; 7: Gases de proteção.

Fonte: DÍAZ et al (2018).

**Figura 13 - Bancadas de fixação da tocha de soldagem e dos corpos de prova.**



Fonte: Adaptado de CORRÊA (2018).

A seguir, no Quadro 4, estão descritas as principais características dos componentes destas bancadas.

**Quadro 4 - Equipamentos utilizados na bancada de ensaios.**

(continua)

| <b>EQUIPAMENTO</b>                             | <b>MODELO</b>                      | <b>FABRICANTE</b>                      | <b>CARACTERÍSTICAS</b>   |
|--|------------------------------------|--|--|
| Fonte de soldagem multiprocesso                | Inversal 450                       | IMC Soldagem                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonte eletrônica chaveada no secundário;</li> <li>- Corrente: contínua ou alternada (convencional ou pulsada).</li> <li>- Corrente Nominal: 450 A;</li> <li>- Tensão de entrada: 220, 380, ou 440 V trifásica;</li> <li>- Tensão em vazio: 56 V.</li> </ul> |
| Sistema de alimentação de arame                | STA-20 / digital                   | IMC-SOLDAGEM                           | -  |
| Tocha reta refrigerada a água                  | Tocha MIG Reta TBI 511 AUT – 2,0 M | TBI                                    | - Diâmetro utilizável: 1,2 a 2,4 mm.   |
| Carro motriz                                   | Tartilope V2                       | SPS – Sistemas e Processos de Soldagem | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tartaruga de soldagem com deslocamento controlável nos eixos X e Y;</li> <li>- Eixo X: velocidade de até 160 cm/min.</li> <li>- Eixo Y: velocidade de até 300 cm/min.</li> </ul>  |
| Sistema de aquisição de dados em módulos       | NI cDAQ-9172                       | National Instruments                   | Número de Entradas: 08   |
| Módulo de saída analógica                      | NI 9205                            | National Instruments                   | - Número de canais: conexão para 32 entradas/saídas para 16 canais com saída de +/-10 V, amostragem simultânea de 250 ks/s por canal e 16 bits de resolução.   |
| Transdutor de corrente para placa de aquisição | 600R010V AC-220VAC                 | SECON - Sensores e Instrumentos        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de corrente: CC (corrente contínua) ou CA (corrente alternada).</li> <li>- Faixa de medição: -600 a 600 A para corrente contínua e 0 a 600 A</li> </ul>  |

**Quadro 4 - Equipamentos utilizados na bancada de ensaios.****(conclusão)**

| <b>EQUIPAMENTO</b>                           | <b>MODELO</b>             | <b>FABRICANTE</b>                     | <b>CARACTERÍSTICAS</b>  |
|--|---------------------------|---------------------------------------|---|
|  |                           |                                       | para corrente alternada.<br>- Saída para placa de aquisição: 0 a 10 V.                              |
| Transdutor de tensão para placa de aquisição | 100V010V<br>AC-<br>220VAC | SECON -<br>Sensores e<br>Instrumentos | - Faixa de medição: 0 a 100 V para corrente contínua.<br>- Saída para placa de aquisição: 0 a 10 V. |

**Fonte: Autoria Própria.**

Os equipamentos elencados acima foram montados na bancada de ensaios para a realização da soldagem. Além destes, mais alguns instrumentos fazem-se necessários para a realização das análises, sendo os principais descritos no Quadro 5.

**Quadro 5 - Demais equipamentos utilizados.**

| <b>EQUIPAMENTO</b>                        | <b>MODELO</b> | <b>FABRICANTE</b>        | <b>CARACTERÍSTICAS</b>                      |
|---|---------------|--------------------------|---|
| Forno Mufla para aquecimento              | NT-380        | Novatécnica              | - Faixa de temperatura: 100 a 1100°C.       |
| Gabinete de jateamento por sucção         | GS-9075X      | CMV Indústrias Mecânicas | -   |
| Balança semianalítica                     | BL3200H       | Shimadzu                 | - Capacidade: 3200 g;<br>- Leitura: 0,01 g. |
| Serra de fita contínua                    | FM-335        | Franho                   | -   |
| Termômetro infravermelho digital portátil | ITTI – 1600   | Instrutemp               | - Faixa de temperatura: - 32 a +1650° C.    |
| Câmera Digital                            | DSLR-A350X    | SONY                     | - Resolução: 14.2 Megapixels.               |

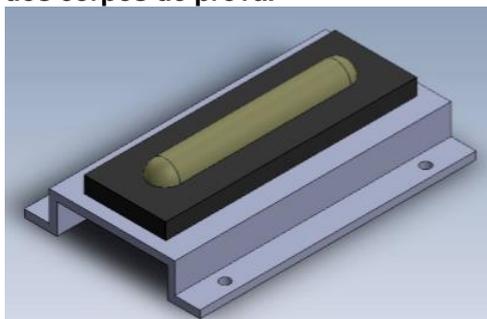
**Fonte: Autoria Própria.**

### 4.3 CORPOS DE PROVA E SENSORES

A primeira etapa realizada foi uma limpeza nos corpos de prova, isso para que se obtivesse uma superfície isenta de graxa, óleo e contaminantes. Para isso, todos os corpos de prova foram submetidos a um processo de jateamento abrasivo com granalha de aço angular G-25 S-280, com grau de dureza D, de acordo com a norma SAE J444 (1993).

Foi construído um dispositivo para fixação e posicionamento dos corpos de prova, no qual o mesmo ficará fixo na bancada de ensaios, isso para que os corpos de prova ficassem sempre no mesmo local e sem movimento. A Figura 14 representa este dispositivo.

**Figura 14 - Dispositivo para fixação dos corpos de prova.**



Fonte: CORRÊA (2018).

A temperatura de interpasse adotada foi de 150°C. Para que fosse possível controlar que todos os corpos de prova estivessem nessa temperatura antes da soldagem, eles foram aquecidos em um forno mufla NT-380, onde estão descritas suas principais características no Quadro 5, à uma temperatura de 200°C por cerca de três horas. Ao atingir esta temperatura estabelecida, os corpos de prova eram levados à bancada de ensaios e posicionados no dispositivo acoplado a mesa de soldagem. Após esse processo, sua temperatura foi controlada por um termômetro infravermelho digital. Assim, ao atingir uma temperatura superficial de 150°C, a soldagem foi realizada. Esses procedimentos foram realizados em todos os ensaios.

Vale ressaltar que, uma vez que trabalhamos com um termômetro infravermelho, deve-se ter o cuidado no momento de aferir as temperaturas, levando em consideração a coloração das superfícies das amostras,

verificando se possuem certa homogeneidade. Assim, justamente por esse motivo, é que se teve o cuidado de realizar o aquecimento em todas as peças por três horas até atingir a homogeneização em 200 °C.

Nesse sistema montado para a realização dos ensaios, ainda foram utilizados sensores (voltímetro e amperímetro), também especificados no Quadro 4, para obter a coleta dos sinais e possibilitar as análises necessárias para apresentação dos resultados. Esses dados foram obtidos durante a soldagem do cordão.

#### 4.4 PARÂMETROS FIXOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Para determinar quais parâmetros e níveis seriam adotados nos ensaios finais, foi realizada uma pesquisa na literatura buscando uma base em trabalhos que utilizaram as condições que buscamos, ou seja, utilizando soldagem com arame tubular pulsada de revestimento. Muitos desses autores já foram mencionados na seção 3 deste trabalho (Revisão da Literatura). Além disso, foram realizados ensaios experimentais para testar quais seriam os parâmetros mantidos constantes, quais as variáveis de influência e seus níveis, e quais as variáveis de resposta. Já definindo inicialmente que para este trabalho será realizada uma soldagem de revestimento, de deposição, e com um único cordão de solda.

Portanto, os parâmetros mantidos constantes estão descritos na Tabela 4.

**Tabela 4 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem.**  
(continua)

| PARÂMETRO                          | NÍVEL                 |
|------------------------------------|-----------------------|
| Polaridade do Eletrodo             | CCEP                  |
| Gás de proteção                    | Argônio + 2% Oxigênio |
| Vazão do gás                       | 15 litros/min.        |
| Ângulo da tocha                    | 90°                   |
| Posição de soldagem                | Plana                 |
| Temperatura de interpasse          | 150°C                 |
| Velocidade de alimentação do arame | 8,5 m/min.            |

**Tabela 4 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem.**  
(conclusão)

| PARÂMETRO             | NÍVEL |
|-----------------------|-------|
| Quantidade de cordões | 01    |
| Corrente de Pico (Ip) | 350 A |
| Tempo de Pico (tp)    | 10 ms |

**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nessa etapa do planejamento dos experimentos, temos uma sequência de testes que são realizados, com as condições inicialmente estipuladas, e ao longo dos ensaios essas variáveis de entrada são propositalmente modificadas em diferentes níveis para que assim seja possível analisar o que acontece nas variáveis de resposta.

A importância de se realizar um planejamento dos experimentos é principalmente se obter resultados satisfatórios e ao mesmo tempo economia. Afinal, quando se realiza um planejamento, se limita uma pequena quantidade de experimentos que nos fornecerá certo grau de repetibilidade, confiabilidade, com conclusões válidas e objetivas, e ao mesmo tempo, dispensando grandes gastos com uma enorme quantidade de ensaios, desperdiçando tempo e material.

Esse planejamento deve ser bem elaborado, tomando cuidado na escolha desde os equipamentos que serão necessários a realização dos experimentos, até a forma como esses dados serão coletados.

Para a escolha da quantidade desses experimentos a serem realizados, temos alguns pontos que podem nos ajudar em sua determinação, por exemplo, determinando quais as variáveis que mais influenciarão nos resultados e atribuir níveis a essas variáveis, buscando aperfeiçoar e minimizar a variabilidade dos resultados.

Além disso, muitas ferramentas estatísticas quando bem aplicadas também podem contribuir para auxiliar nesse planejamento, por exemplo, com a redução do número de ensaios mais sem prejudicar a qualidade da informação; realizar um estudo simultâneo das diversas variáveis, separando

seus efeitos; trazendo confiabilidade aos resultados; representar o processo a partir de formulações matemáticas; e elaborar conclusões a partir dos resultados qualitativos.

Para este trabalho, foi adotado um modelo comum de matriz, onde apresenta as variáveis e níveis a serem trabalhados. Portanto, a partir do planejamento experimental ficou definido a utilização de 4 variáveis e 3 níveis.

Para estipular os níveis empregados em cada ensaio, é necessário levar em consideração que os valores de corrente e tensão na rede elétrica oscilam constantemente, não sendo possível estabelecer e manter os valores adotados. Portanto, a norma para calibração de máquinas de solda permite uma oscilação para mais ou menos na corrente e tensão, dos valores apresentados nos amperímetros e voltímetros das mesmas.

Os níveis de corrente que foram adotados são para se obter uma corrente inferior a de transição da transferência metálica do tipo curto-circuito para globular, assim obtendo uma menor energia Joule e menor distorção nas peças.

A partir dessas definições, foram realizados ensaios preliminares para a verificação desses níveis escolhidos, para determinar se poderiam ser alterados ou mantidos para a fase final dos experimentos.

A Tabela 5 apresenta, após a realização dos ensaios de teste, portanto, quais as variáveis e níveis adotados.

**Tabela 5 - Variáveis de influência e seus níveis.**

| <b>Variáveis/Níveis</b>          | <b>-1</b> | <b>0</b> | <b>1</b> |
|----------------------------------|-----------|----------|----------|
| Corrente Média de Soldagem (A)   | 170       | 200      | 230      |
| Frequência da Pulsação (Hz)      | 18,18     | 20,00    | 22,22    |
| Velocidade de Soldagem (mm/min.) | 300       | 350      | 400      |
| Distância Bico Contato Peça (mm) | 30        | 35       | 40       |

**Fonte: Autoria Própria.**

Para combinação dos parâmetros e níveis necessários à realização dos ensaios, foi utilizado o método TAGUCHI.

O Método Taguchi também é rotulado como a técnica de Design Robusto, ele se concentra principalmente em aumento da produtividade de engenharia para desenvolver rapidamente novos produtos a uma taxa baixa, e gerenciamento baseado em valor. O Design Robusto concentra-se na melhoria da produtividade de engenharia. Seguem-se 4 passos principais para implantação do método: Formulação do problema; Coleta de dados; Análise de efeitos do fator; Previsão/Confirmação.

As colunas das matrizes obtidas a partir do método Taguchi, são balanceadas e ortogonais. Isto significa que em cada par de colunas, todas as combinações de fatores ocorrem o mesmo número de vezes. Os experimentos ortogonais permitem estimar o efeito de cada fator sobre a resposta independentemente de todos os outros fatores. Assim, a notação L(ensaios) (níveis ^ fatores) indica o seguinte:

- L(ensaios) = número de ensaios;
- (níveis ^ fatores) = número de níveis para cada fator ^ número de fatores.

Portanto, ao se estipular 4 variáveis e 3 níveis, sendo Corrente Média (170; 200 e 230 A), Frequência de Pulsção (18,18; 20,00 e 22,22 Hz), Velocidade de Soldagem (300; 350 e 400 mm/min.) e Distância Bico Contato Peça (30; 35 e 40 mm) , teremos uma matriz com a melhor combinação destes parâmetros com o intuito de maximização do processo, neste caso uma matriz  $L_9(3^4)$ .

Além disso, o método proporciona outras ferramentas principais: o diagrama P; a função ideal; a função de perda quadrática; a relação sinal-ruído; e vetores ortogonais, também adotados nas análises dos resultados.

A Tabela 6 apresenta as combinações de parâmetros fornecidas pelo programa e aplicados durante os ensaios.

**Tabela 6 - Valores dos ensaios com corrente pulsada.**

| Experimento | Corrente Média (A) | Frequência da Pulsção (Hz) | Velocidade de Soldagem (mm/min.) | Distância Bico Contato Peça (mm) |
|-------------|--------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1           | 170                | 18,18                      | 300                              | 30                               |
| 2           | 200                | 20,00                      | 300                              | 35                               |
| 3           | 230                | 22,22                      | 300                              | 40                               |
| 4           | 230                | 20,00                      | 350                              | 30                               |
| 5           | 170                | 22,22                      | 350                              | 35                               |
| 6           | 200                | 18,18                      | 350                              | 40                               |
| 7           | 200                | 22,22                      | 400                              | 30                               |
| 8           | 230                | 18,18                      | 400                              | 35                               |
| 9           | 170                | 20,00                      | 400                              | 40                               |

Fonte: Autoria Própria.

É necessário utilizar aleatorização para realização dos ensaios, assim minimizando erros de funcionamento de algum instrumento, erros de medições, erros do sistema de instrumentação e precisão dos equipamentos. Portanto, a realização dos ensaios para corrente pulsada obedeceu a seguinte sequência: 2, 5, 4, 8, 7, 3, 9, 6, 1. Sendo que, cada ensaio foi realizado com uma repetição para a obtenção de um maior número de resultados e assim possibilitar as análises estatísticas, desta forma, a sequência ficou: 2, 2, 5, 5, 4, 4, 8, 8, 7, 7, 3, 3, 9, 9, 6, 6, 1, 1. Portanto, temos uma matriz L2, onde a sequência aleatória foi obtida a partir do software MINITAB.

#### 4.6 ENSAIOS METALOGRAFICOS

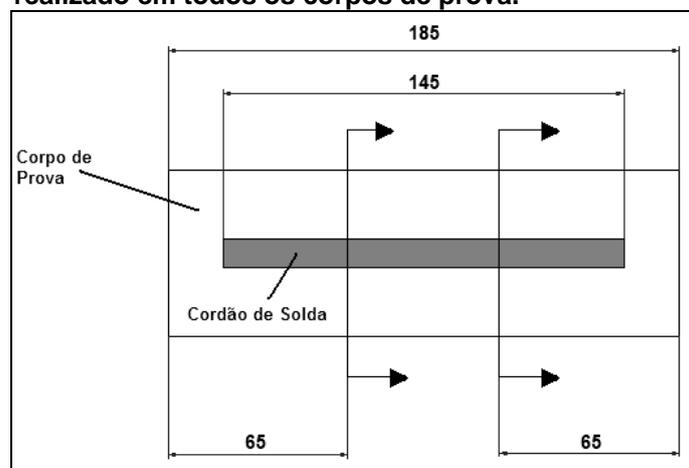
Os ensaios metalográficos são procedimentos utilizados para o estudo da macro ou microestrutura de um material, e auxiliam para complementar as análises realizadas referentes às variáveis de influência utilizadas durante a soldagem.

Nesses ensaios foram realizados cortes de seções demarcadas nos corpos de prova para possibilitar o estudo da superfície, assim possibilitando determinar as várias fases presentes dentro de todas as regiões do cordão do

revestimento, como a zona fundida, a zona afetada termicamente e o metal de base.

Em todas as amostras foram realizados ensaios de macrografia e microestrutura. A Figura 15 apresenta como foi realizado o corte da seção em todos os corpos de prova, da mesma forma, para se obter uma homogeneidade nos resultados.

**Figura 15 - Representação do seccionamento realizado em todos os corpos de prova.**



Fonte: Autoria Própria.

Em cada corpo de prova, o corte foi realizado por uma serra de fita contínua com avanço hidráulico, descrita no Quadro 5, onde foram selecionadas duas seções, para posteriormente possibilitar a realização da média da morfologia.

Após as seções realizadas, os corpos de prova ainda foram diminuídos em seu tamanho para facilitar no polimento das amostras. Os mesmos foram levados a uma serra tipo "cut-off", da marca Presi Mecatome, modelo OS 250 e posteriormente embutidos com baquelite em pó.

Os corpos de prova, após o corte, ainda foram polidos metalograficamente em uma politriz modelo DP-10 da PANAMBRA, utilizando uma técnica de lixamento manual com granulometria cada vez menor, mudando a direção em 90° no sentido horário em cada lixa subsequente até o

desaparecimento dos riscos da lixa anterior. A sequência das lixas utilizadas foram 100, 200, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh.

O ataque realizado após o polimento foi com o reagente Nital a 4% durante 1 minuto. Em seguida, as amostras foram lavadas com água corrente, e depois lavadas com acetona. Após as lavagens, foram secas utilizando ar quente.

Estando preparadas, as amostras foram fotografadas com uma câmera digital e as dimensões da morfologia do cordão obtidas através do software AUTOCAD.

#### 4.7 AQUISIÇÃO DOS SINAIS

Os sinais que envolvem a realização dos ensaios foram captados e desenvolvidos no software LabVIEW, onde são chamados de instrumentos virtuais. Esse software possibilita a análise dos dados e processamento dos sinais de forma mais eficiente.

A Tabela 7 apresenta os sinais captados durante a realização dos ensaios de soldagem. Foi realizada uma simulação numérica nos sinais analógicos adquiridos (tensão e corrente) e convertidos em sinais digitais pelo sistema de aquisição modular. O número de amostras foi de 100.000 pontos e a taxa de aquisição de 25.600 Hz em todos os ensaios realizados. A simulação numérica foi realizada com o apoio do software MATLAB.

**Tabela 7 - Sinais adquiridos durante os ensaios.**

| <b>Sinal do Processo</b> | <b>Faixa de Variação</b> | <b>Faixa Condicionada</b> |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Tensão do Arco           | 0 – 100 V                | 0 – 10 V                  |
| Corrente de Soldagem     | 0 - 600 A                | 0 – 10 V                  |

**Fonte: Autoria Própria.**

## 4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Todo procedimento de análise estatística dos dados coletados foram executados com o apoio do software MINITAB. Foram geradas as equações de regressão de primeira ordem, as tabelas ANOVA, os gráficos de efeitos e avaliados como as variáveis de influência interferem nas variáveis respostas, os gráficos de resíduos necessários para o diagnóstico do modelo gerado e os valores preditos pela equação de regressão.

A verificação da boa adequação do modelo estatístico obtido é realizada por uma avaliação diagnóstica dos resíduos. Portanto, neste trabalho optou-se pela análise gráfica de resíduos. Será apresentado o gráfico de probabilidade normal, comumente chamado de *Normal Q-Q Plot*, ou seja, aquele que verifica a pressuposição de que os resíduos são distribuídos normalmente. E em anexo serão apresentados os demais gráficos diagnósticos:

- Gráfico dos resíduos *versus* os valores previstos: verifica a homoscedasticidade do modelo, isto é,  $\sigma^2$  constante.

- Gráfico dos resíduos *versus* a ordem de observação ou ordem da coleta dos dados: avalia a hipótese de independência dos dados, isto é, se não há auto correlação entre os resíduos.

Além disso, é importante citar que os *outliers* podem ser visualizados em qualquer um destes gráficos, porém como se trata de um ensaio robusto com ensaios preliminares para prever a combinação de maximização desses resultados no experimento específico, dificilmente terá *outliers* em estudos com esse desenho experimental, devido ao uso de método Taguchi.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos segundo os procedimentos e metodologias apresentadas anteriormente no Capítulo 4. Os valores que serão apresentados referem-se aos ensaios experimentais e ensaios finais realizados.

### 5.1 MORFOLOGIA DOS CORDÕES DE SOLDA

Para soldagem de revestimento, o importante é se obter uma grande largura e uma pequena penetração e diluição. Assim, buscando sempre diminuir a quantidade de passes a serem realizados. O índice de convexidade, também deve ser o menor possível.

As variáveis de resposta, ou seja, os resultados que buscamos ao final dos ensaios, para este estudo foram Largura, Reforço, Penetração, Área de Reforço, Área de Penetração, Índice de Convexidade e Diluição. Sendo que, os valores determinados para Largura, Reforço, Penetração, Área de Reforço e Área de Penetração medidas através do software AUTOCAD. Já o Índice de Convexidade e Diluição, obtido a partir do cálculo das equações 8 e 9 apresentadas abaixo.

$$\text{Índice de Convexidade (\%)} = \frac{\text{Reforço}}{\text{Largura}} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{\text{Área de Penetração}}{\text{Área de Penetração} + \text{Área de Reforço}} \times 100 \quad (9)$$

Como já mencionado no Capítulo 4, cada combinação de parâmetros foi utilizado para um ensaio, e para cada um deles foi realizado uma réplica, para se obter uma maior confiabilidade dos resultados.

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos em cada experimento para a morfologia do cordão com corrente pulsada e sua respectiva repetição.

Tabela 8 - Resultados da morfologia do cordão de solda com corrente pulsada.

| PARÂMETROS DE SOLDAGEM |     |       |     |      | RESULTADOS |       |       |        |        |        |        |
|------------------------|-----|-------|-----|------|------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| ENSAIOS                | CM  | F     | VS  | DBCP | L          | R     | P     | IC     | AP     | AR     | D      |
|                        |     |       |     |      |            |       |       |        |        |        |        |
| 2                      | 170 | 18,18 | 300 | 30   | 8,140      | 4,350 | 2,050 | 53,440 | 8,770  | 27,960 | 23,877 |
| 3                      | 200 | 20,00 | 300 | 33   | 10,690     | 4,110 | 2,340 | 38,447 | 12,480 | 32,600 | 27,684 |
| 4                      | 200 | 20,00 | 300 | 33   | 11,040     | 4,090 | 2,690 | 37,047 | 13,970 | 29,870 | 31,866 |
| 5                      | 230 | 22,22 | 300 | 36   | 11,460     | 3,420 | 2,230 | 29,843 | 12,190 | 30,330 | 28,669 |
| 6                      | 230 | 22,22 | 300 | 36   | 11,510     | 3,590 | 2,150 | 31,190 | 11,370 | 30,950 | 26,867 |
| 7                      | 230 | 20,00 | 350 | 30   | 10,060     | 3,560 | 2,540 | 35,388 | 11,420 | 26,920 | 29,786 |
| 8                      | 230 | 20,00 | 350 | 30   | 10,130     | 3,610 | 2,550 | 35,637 | 11,560 | 26,600 | 30,294 |
| 9                      | 170 | 22,22 | 350 | 33   | 8,130      | 4,110 | 1,880 | 50,554 | 8,500  | 23,990 | 26,162 |
| 10                     | 170 | 22,22 | 350 | 33   | 7,920      | 4,200 | 1,860 | 53,030 | 7,750  | 25,180 | 23,535 |
| 11                     | 200 | 18,18 | 350 | 36   | 10,480     | 3,710 | 2,820 | 35,401 | 13,930 | 28,230 | 33,041 |
| 12                     | 200 | 18,18 | 350 | 36   | 9,860      | 3,650 | 2,500 | 37,018 | 11,500 | 26,060 | 30,618 |
| 13                     | 200 | 22,22 | 400 | 30   | 9,810      | 3,320 | 2,070 | 33,843 | 9,750  | 23,170 | 29,617 |
| 14                     | 200 | 22,22 | 400 | 30   | 9,630      | 3,270 | 2,480 | 33,956 | 11,950 | 22,010 | 35,188 |
| 15                     | 230 | 18,18 | 400 | 33   | 9,750      | 3,520 | 2,080 | 36,103 | 10,660 | 23,290 | 31,399 |
| 16                     | 230 | 18,18 | 400 | 33   | 10,040     | 3,140 | 2,130 | 31,275 | 10,720 | 22,230 | 32,534 |
| 17                     | 170 | 20,00 | 400 | 36   | 8,980      | 3,400 | 1,980 | 37,862 | 9,750  | 20,540 | 32,189 |
| 18                     | 170 | 20,00 | 400 | 36   | 9,120      | 3,250 | 1,590 | 35,636 | 8,050  | 20,880 | 27,826 |

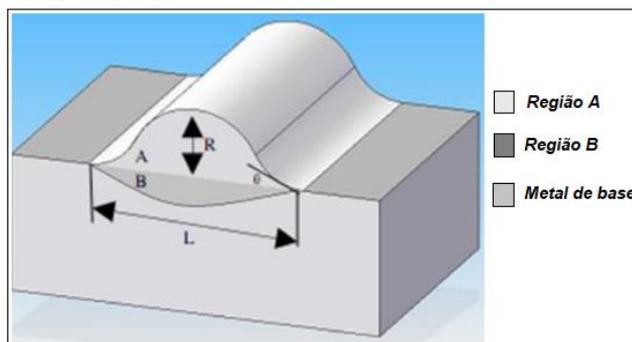
CM: Corrente Média (A); F: Frequência de Pulsção (Hz); VS: Velocidade de Soldagem (mm/min); DBCP: Distância Bico de Contato Peça (mm); L: Largura (mm); R: Reforço (mm); P: Penetração (mm); IC: Índice de Convexidade (%); AP: Área de Penetração (mm<sup>2</sup>); AR: Área de Reforço (mm<sup>2</sup>); D: Diluição (%).

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 16 abaixo apresenta um cordão de solda de revestimento com suas áreas obtidas em tons diferentes de cores para explicitar cada região. Com base nela (Figura 16) temos a Figura 17 que apresenta os resultados visuais da geometria dos cordões obtidos pelos experimentos.

As ilustrações traçadas na Figura 17 foram executadas no software AUTOCAD, como mencionado anteriormente, sendo que as dimensões representadas ilustram a média dos valores coletados e apresentados na Tabela 8, para cada combinação de variáveis.

**Figura 16 - Geometria do cordão de solda de revestimento.**



R: reforço; L: largura; A: área de reforço; B: área de penetração.

Fonte: Adaptado de ALVES; BUENO (2016).

**Figura 17 - Geometria dos cordões de solda obtidos nos ensaios de soldagem.**

| CORRENTE (A) | VELOCIDADE DE SOLDAGEM (mm/min.) |                                  |                                  |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|              | 300                              | 350                              | 400                              |
| 170          | <br>Freq.: 18,18Hz<br>DBCP: 30mm | <br>Freq.: 22,22Hz<br>DBCP: 33mm | <br>Freq.: 20,00Hz<br>DBCP: 36mm |
| 200          | <br>Freq.: 20,00Hz<br>DBCP: 33mm | <br>Freq.: 18,18Hz<br>DBCP: 36mm | <br>Freq.: 22,22Hz<br>DBCP: 30mm |
| 230          | <br>Freq.: 22,22Hz<br>DBCP: 36mm | <br>Freq.: 20,00Hz<br>DBCP: 30mm | <br>Freq.: 18,18Hz<br>DBCP: 33mm |

Fonte: Autoria Própria.

Observamos que para correntes mais baixas, nesse caso para 170 A, o reforço ficou muito alto e conseqüentemente, uma largura pequena, quando comparados às correntes maiores, como a de 200 e 230 A. Portanto, de acordo com as variáveis e níveis adotados neste trabalho, para atender as condições de uma soldagem de revestimento, ou seja, diminuir passes para o

revestimento da área de interesse, os melhores resultados são alcançados na prática com a utilização dos valores de correntes superiores, como a de 200 e 230 A. Fato que pode ser comprovado observando tanto a Tabela 8 como a Figura 17 que apresentam os resultados visuais e mensurados.

Pelos resultados apresentados verificamos a influência dos parâmetros no cordão de solda resultante. A seguir, foram discutidos cada parâmetro da morfologia do cordão de solda (largura, reforço, penetração, índice de convexidade, área de penetração, área de reforço e diluição).

Um primeiro destaque se dá no aumento da largura do cordão conforme o aumento da corrente média e da distância bico de contato peça. Obtivemos uma largura mínima de 7,920 mm para a corrente de 170 A e a máxima de 11,510 mm para a corrente de 230 A. Este resultado, já era algo esperado, afinal quanto maior a concentração de calor na ponta do eletrodo, maior será o aquecimento, fazendo com que uma maior quantidade de material se deposite na poça de fusão.

No reforço, notamos um valor máximo de 4,750 mm com a corrente de 170 A, e um valor mínimo de 3,140 mm para as condições trabalhadas com uma corrente de 230 A. Portanto, verifica-se um comportamento inverso a largura, afinal à medida que a corrente aumenta, o reforço diminui. Também há uma redução no reforço à medida que se aumenta a velocidade de soldagem e a distância bico de contato peça. Na soldagem de revestimento um reforço menor pode representar uma maior resistência mecânica do revestimento quanto a impactos produzidos contra si por diversos agentes.

Já para área de reforço encontramos valores maiores com a redução da velocidade de soldagem. Nos ensaios obtemos uma área de reforço máxima de 33,140 mm<sup>2</sup> com uma velocidade de soldagem de 300 mm/min e um valor mínimo de 20,540 mm<sup>2</sup> com uma velocidade de soldagem de 400 mm/min.

Na penetração, encontramos um valor mínimo de 1,590 mm na corrente de 170 A e um valor máximo de 2,820 mm com corrente de 200 A. Há um aumento na penetração à medida que se aumenta a corrente.

O mesmo que ocorre para a área de penetração, onde obteve um valor mínimo de 7,750 mm<sup>2</sup> na corrente de 170 A e máximo de 13,970 mm<sup>2</sup> com a corrente de 200 A. Esse comportamento da geometria do cordão de solda

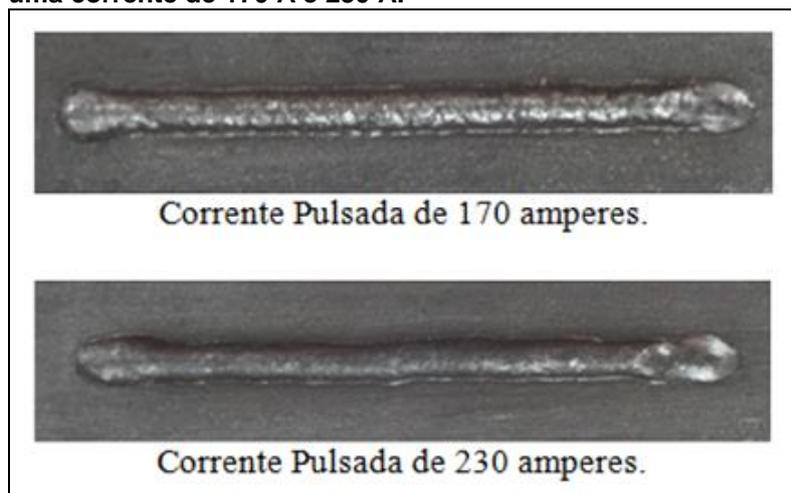
também era previsto, pois como já foi dito, a medida que se aumenta a corrente média, há uma maior quantidade de material depositado, conseqüentemente resulta também em um aumento da área de penetração. Porém, para um cordão de solda de revestimento, o importante é se obter o menor valor de penetração. Mas, é necessário se considerar que todas as variáveis atuam juntas durante a soldagem.

Quanto ao índice de convexidade, que leva em conta os valores da largura e reforço para ser obtido (Equação 8), foram encontrados um valor mínimo de 29,843% com a corrente de 230 A e um valor máximo de 53,440% com a utilização da corrente de 170 A. Houve uma diminuição do índice de convexidade com o aumento dos níveis de cada variável.

E a diluição, utilizando a Equação 9, ficou entre 35,188 % com a corrente de 200 A e 19,874 % na corrente de 170 A. Observa-se um aumento da diluição com o crescimento da corrente média, da distância bico de contato peça e da velocidade de soldagem.

Na Figura 18 temos a fotografia obtida dos cordões de solda em dois dos ensaios, onde um deles adotou uma corrente de 170 A e o outro de 230 A, apenas para visualização do aspecto superficial obtido nas amostras.

**Figura 18 - Cordões de solda obtidos nos ensaios adotando uma corrente de 170 A e 230 A.**



Fonte: Autoria Própria.

Para a soldagem de revestimento, preferencialmente é importante se obter uma menor diluição possível, pois garante uma menor quantidade de

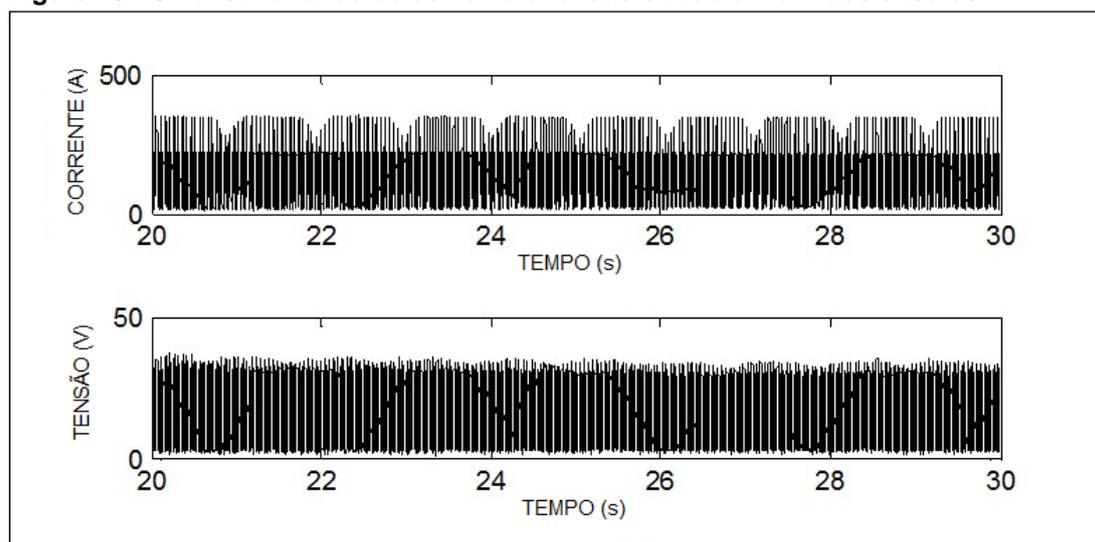
mistura do metal de adição no metal de base. Mas, sempre devemos observar os parâmetros como um todo, e levar em consideração outras variáveis importantes, como largura, reforço e penetração antes de estipular quais os níveis serão adotados.

## 5.2 RESULTADO DOS SINAIS OBTIDOS

Uma vez que os ensaios foram realizados com corrente pulsada, foram coletados os sinais simultaneamente de corrente e tensão a cada experimento realizado, conforme a metodologia descrita na seção 4.7 deste trabalho.

A Figura 19 demonstra o sinal obtido de um dos ensaios com os resultados da corrente e tensão RMS (*Root Mean Square*) para um intervalo de 10 segundos, sendo o período entre 20 e 30 segundos. Corrente e tensão RMS, significa que estamos nos referindo a corrente e tensão eficaz, ou seja, quando um equipamento é ligado nem toda corrente e tensão estipulada são absorvidos, portanto, chamamos de corrente e tensão eficaz, aquela que de fato é realmente absorvido.

**Figura 19 - Sinal simultâneo de corrente e tensão obtido em um dos ensaios.**

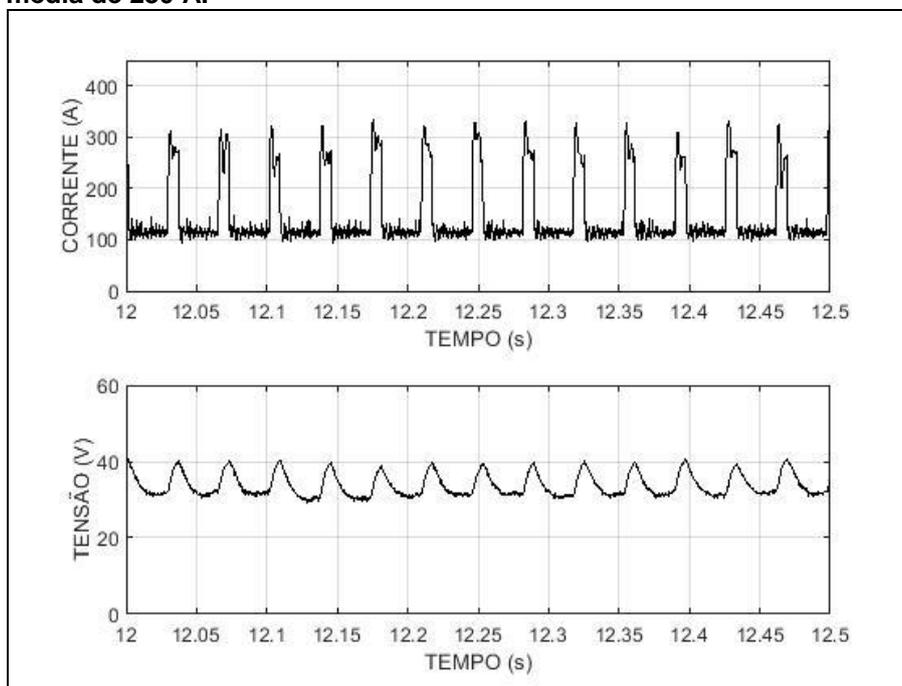


Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 19 verificamos os pulsos que acontecem tanto na corrente,

como na tensão de maneira simultânea. Porém, observamos que para um intervalo de tempo de 10 segundos, esses sinais acabam não sendo visualizados de forma clara. Portanto, para uma melhor compreensão dos resultados, os sinais foram seccionados num intervalo de 0,5 segundos, no período entre 12 e 12,5 segundos, onde está representado na Figura 20 para um ensaio onde foi utilizada uma corrente média de 230 A, frequência de pulsação de 20,00 Hz, velocidade de soldagem de 350 mm/min. e distância bico contato peça de 30 mm.

**Figura 20 - Sinais de corrente e tensão para um ensaio com corrente média de 230 A.**



**Fonte: Autoria Própria.**

A partir da Figura 20 é possível identificar de forma mais objetiva os picos obtidos, visualizando que a cada pico de corrente, temos um pico simultâneo gerado na tensão. A cada pico de tensão, há uma transferência de material do eletrodo para a poça de fusão, e essa transferência ocorre sempre no tempo de pico. Se houvesse mais de uma gota sendo transferida no tempo de pico ou no tempo de base, existiria outro pico de tensão e corrente neste momento. Portanto, de acordo com a onda formada na Figura 20, verificamos que os destacamentos da gota estão uniformes e regulares.

DUTRA (1989) cita que a estabilidade do processo de soldagem pode

ser verificada pela regularidade na formação e destacamento da gota metálica, isso pode ser analisado a partir da repetibilidade dos valores de corrente e tensão obtidos, ou seja, a partir da regularidade da transferência observada nos oscilogramas.

Para uma melhor análise e visualização do fenômeno da transferência metálica e do tipo de transferência obtida a cada instante do processo de soldagem, seria necessário filmar todo o ensaio, porém como este não é o foco deste trabalho, apenas apresentamos a Figura 19 e Figura 20, no qual se referem aos oscilogramas obtidos de um dos ensaios executados para observação do comportamento dos sinais durante a soldagem quando adotada uma corrente pulsada.

DÍAZ et al (2018) também encontraram oscilogramas semelhantes aos apresentados neste trabalho, ou seja, com o mesmo comportamento uniforme, tendo em suas pesquisas adotado o método de soldagem FCAW pulsada, com metal de base o aço SAE 1015 e metal de adição o AWS E71T-1M.

### 5.3 RESULTADOS DOS MODELOS DE REGRESSÃO

Além destes resultados obtidos nos ensaios, foram realizados estudos estatísticos dos valores encontrados com o intuito de analisar e interpretar os resultados obtidos, especificamente com o uso de modelos de regressão linear múltipla.

Como já descrito no Capítulo 3, a análise de regressão é um conjunto de ferramentas estatísticas que são usadas para modelar e explorar relações entre variáveis que estão relacionadas de maneira não determinística. Portanto, o modelo de regressão linear múltipla, representado pela Equação 3 apresentada anteriormente, é onde há mais de um regressor. Assim, serão mostrados os resultados dos modelos de regressão obtidos utilizando primeiramente os resultados das tabelas de ANOVA, que nos mostra quais as variáveis de influência, sendo, corrente média, velocidade de soldagem, frequência de pulsação e distância bico de contato peça, que interferem diretamente na variável resposta de interesse, sendo, largura, reforço,

penetração, área de reforço, área de penetração, índice de convexidade e diluição. Ou seja, foi gerado um modelo de regressão para cada variável regressora e estudado os resultados, bem como, gerado gráfico de interações para entender a maximização das variáveis de influência em relação ao processo de soldagem.

É importante retomar, que quando *p-valor* for menor que nível de significância (0,05 ou 5%), é possível concluir que há evidência estatística de influência entre a variável de resposta e as variáveis independentes do experimento em questão, rejeitando a hipótese nula no teste de hipóteses.

Os valores da Tabela 8, que apresenta os resultados obtidos em cada experimento para a morfologia do cordão com corrente pulsada e sua respectiva repetição, foram utilizados para a realização da Análise de Variância (ANOVA) sequencial que estão apresentados nas Tabelas 9 à 15. Foram feitos os cálculos para os modelos de regressão linear múltipla para cada variável de interesse (largura, reforço, penetração, índice de convexidade, área de reforço, área de penetração e diluição), e nas tabelas tem-se o p-valor associado aos resultados, sendo que onde houve rejeição de  $H_0$  os p-valores estão em negritos.

**Tabela 9 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Largura.**

| Fator                           | GL | Seq. SS | Adj. SS | Adj. MS | F     | P            |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|-------|--------------|
| Regressão                       | 4  | 14,4168 | 14,4168 | 3,6042  | 9,68  | 0,001        |
| Corrente Média (A)              | 1  | 10,8680 | 10,8680 | 10,8680 | 29,18 | <b>0,000</b> |
| Frequência de Pulsação (Hz)     | 1  | 0,0553  | 0,0553  | 0,0553  | 0,15  | 0,706        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1  | 1,8802  | 1,8802  | 1,8802  | 5,05  | <b>0,043</b> |
| DBCP (mm)                       | 1  | 1,6133  | 1,6133  | 1,6133  | 4,33  | 0,058        |
| Erro                            | 13 | 4,8421  | 4,8421  | 0,3725  |       |              |
| Total                           | 17 | 19,2590 |         |         |       |              |

GL: Graus de Liberdade; Seq. SS: Soma Sequencial dos Quadrados; Adj. SS: Soma Ajustada dos Quadrados; Adj. MS: Quadrados Médios Ajustados; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 10 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para o Reforço.**

| Fator                           | GL | Seq. SS | Adj. SS | Adj. MS | F     | P            |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|-------|--------------|
| Regressão                       | 4  | 2,8820  | 2,8820  | 0,72049 | 20,42 | 0,000        |
| Corrente Média (A)              | 1  | 0,8640  | 0,8640  | 0,86403 | 24,49 | <b>0,000</b> |
| Frequência de Pulsação (Hz)     | 1  | 0,1151  | 0,1151  | 0,11513 | 3,26  | 0,094        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1  | 1,6207  | 1,6207  | 1,62067 | 45,93 | <b>0,000</b> |
| DBCP (mm)                       | 1  | 0,2821  | 0,2821  | 0,28213 | 8,00  | <b>0,014</b> |
| Erro                            | 13 | 0,4587  | 0,4587  | 0,03528 |       |              |
| Total                           | 17 | 3,3407  |         |         |       |              |

GL: Graus de Liberdade; Seq. SS: Soma Sequencial dos Quadrados; Adj. SS: Soma Ajustada dos Quadrados; Adj. MS: Quadrados Médios Ajustados; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 11 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Penetração.**

| Fator                           | GL | Seq. SS | Adj. SS | Adj. MS | F    | P            |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|------|--------------|
| Regressão                       | 4  | 0,64376 | 0,64376 | 0,16094 | 1,81 | 0,187        |
| Corrente Média (A)              | 1  | 0,46021 | 0,46021 | 0,46021 | 5,18 | <b>0,040</b> |
| Frequência de Pulsação (Hz)     | 1  | 0,07004 | 0,07004 | 0,07004 | 0,79 | 0,391        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1  | 0,10083 | 0,10083 | 0,10083 | 1,13 | 0,306        |
| DBCP (mm)                       | 1  | 0,01267 | 0,01267 | 0,01267 | 0,14 | 0,712        |
| Erro                            | 13 | 1,15500 | 1,15500 | 0,08885 |      |              |
| Total                           | 17 | 1,79876 |         |         |      |              |

GL: Graus de Liberdade; Seq. SS: Soma Sequencial dos Quadrados; Adj. SS: Soma Ajustada dos Quadrados; Adj. MS: Quadrados Médios Ajustados; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 12 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para o Índice de Convexidade.**

| Fator                           | GL | Seq. SS | Adj. SS | Adj. MS | F     | P            |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|-------|--------------|
| Regressão                       | 4  | 778,63  | 778,63  | 194,656 | 10,74 | 0,000        |
| Corrente Média (A)              | 1  | 567,10  | 567,10  | 567,096 | 31,28 | <b>0,000</b> |
| Frequência de Pulsação (Hz)     | 1  | 10,06   | 10,06   | 10,059  | 0,55  | 0,470        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1  | 89,10   | 89,10   | 89,104  | 4,91  | <b>0,045</b> |
| DBCP (mm)                       | 1  | 112,37  | 112,37  | 112,366 | 6,20  | <b>0,027</b> |
| Erro                            | 9  | 22,50   | 22,50   | 2,500   |       |              |
| Total                           | 17 | 1014,35 |         |         |       |              |

GL: Graus de Liberdade; Seq. SS: Soma Sequencial dos Quadrados; Adj. SS: Soma Ajustada dos Quadrados; Adj. MS: Quadrados Médios Ajustados; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 13 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Área de Penetração.**

| Fator                           | GL | Seq. SS | Adj. SS | Adj. MS | F    | P            |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|------|--------------|
| Regressão                       | 4  | 29,6083 | 29,6083 | 7,4021  | 2,91 | 0,064        |
| Corrente Média (A)              | 1  | 23,7445 | 23,7445 | 23,7445 | 9,34 | <b>0,009</b> |
| Frequência de Pulsação (Hz)     | 1  | 0,5580  | 0,5580  | 0,5580  | 0,22 | 0,647        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1  | 3,1212  | 3,1212  | 3,1212  | 1,23 | 0,288        |
| DBCP (mm)                       | 1  | 2,1845  | 2,1845  | 2,1845  | 0,86 | 0,371        |
| Erro                            | 13 | 33,0625 | 33,0625 | 2,5433  |      |              |
| Total                           | 17 | 62,6708 |         |         |      |              |

GL: Graus de Liberdade; Seq. SS: Soma Sequencial dos Quadrados; Adj. SS: Soma Ajustada dos Quadrados; Adj. MS: Quadrados Médios Ajustados; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 14 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Área de Reforço.**

| Fator                           | GL | Seq. SS | Adj. SS | Adj. MS | F      | P            |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|--------|--------------|
| Regressão                       | 4  | 240,835 | 240,835 | 60,209  | 29,86  | 0,000        |
| Corrente Média (A)              | 1  | 6,206   | 6,206   | 6,206   | 3,08   | 0,103        |
| Frequência de Pulsação (Hz)     | 1  | 2,266   | 2,266   | 2,266   | 1,12   | 0,308        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1  | 231,704 | 231,704 | 231,704 | 114,90 | <b>0,000</b> |
| DBCP (mm)                       | 1  | 0,658   | 0,658   | 0,658   | 0,33   | 0,578        |
| Erro                            | 13 | 26,215  | 26,215  | 2,017   |        |              |
| Total                           | 17 | 267,050 |         |         |        |              |

GL: Graus de Liberdade; Seq. SS: Soma Sequencial dos Quadrados; Adj. SS: Soma Ajustada dos Quadrados; Adj. MS: Quadrados Médios Ajustados; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 15 – Tabela ANOVA obtida da Análise de Regressão para a Diluição.**

| Fator                           | GL | Seq. SS | Adj. SS | Adj. MS | F    | P            |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|------|--------------|
| Regressão                       | 4  | 140,904 | 140,904 | 35,2260 | 4,13 | 0,022        |
| Corrente Média (A)              | 1  | 56,706  | 56,706  | 56,7065 | 6,65 | <b>0,023</b> |
| Frequência de Pulsção (Hz)      | 1  | 0,299   | 0,299   | 0,2986  | 0,04 | 0,854        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1  | 74,585  | 74,585  | 74,5846 | 8,75 | <b>0,011</b> |
| DBCP (mm)                       | 1  | 9,314   | 9,314   | 9,3142  | 1,09 | 0,315        |
| Erro                            | 13 | 110,804 | 110,804 | 8,5234  |      |              |
| Total                           | 17 | 251,708 |         |         |      |              |

GL: Graus de Liberdade; Seq. SS: Soma Sequencial dos Quadrados; Adj. SS: Soma Ajustada dos Quadrados; Adj. MS: Quadrados Médios Ajustados; F: fator F; P: fator P.

**Fonte: Autoria Própria.**

A partir destes resultados, pode-se verificar qual variável individualmente afetou a variável resposta, caso a variável exerça influencia no processo, pra saber a magnitude desta influencia é necessário avaliar a estimativa dos parâmetros obtidas nos modelos segundo as equações de regressão.

A Tabela 16 nos fornece um resumo com todos os p-valores encontrados a partir da Análise de Variância (ANOVA). De forma clara, é possível verificar qual a variável resposta testada e quais os parâmetros interferem nestes resultados.

**Tabela 16 - Análise de Variância (ANOVA) obtida através da Análise de Regressão para as variáveis de resposta (p-valor).**

| Fator                              | L            | R            | P            | AP           | AR           | IC           | D            |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 - Corrente Média (A)             | <b>0,000</b> | <b>0,000</b> | <b>0,040</b> | <b>0,009</b> | 0,103        | <b>0,000</b> | <b>0,023</b> |
| 2 - Frequência da Pulsção (Hz)     | 0,706        | 0,094        | 0,391        | 0,647        | 0,308        | 0,470        | 0,854        |
| 3- Velocidade de Soldagem (mm/min) | <b>0,043</b> | <b>0,000</b> | 0,306        | 0,288        | <b>0,000</b> | <b>0,045</b> | <b>0,011</b> |
| 4- DBCP (mm)                       | 0,058        | <b>0,014</b> | 0,712        | 0,371        | 0,578        | <b>0,027</b> | 0,315        |

L: largura (mm); R: reforço (mm); P: penetração (mm); IC: índice de convexidade (%); AP: área de penetração (mm<sup>2</sup>); AR: Área de Reforço (mm<sup>2</sup>); D: Diluição (%).

**Fonte: Autoria Própria.**

Na Tabela 16, vemos que a corrente média obteve influência sobre todas as variáveis, apenas com exceção da área de reforço. A frequência de pulsção não afetou nenhum dos parâmetros. A velocidade de soldagem também afetou quase todas as variáveis respostas, exceto a penetração e a área de penetração. Já a distância bico de contato peça afeta individualmente o reforço e o índice de convexidade.

Seguindo o modelo das equações de regressão linear múltipla (Equação 3), para as condições estabelecidas neste trabalho, ela deverá ser descrita da seguinte forma:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \epsilon$$

Y = variável resposta;

X<sub>1</sub> = corrente média (A);

X<sub>2</sub> = frequência de pulsação (Hz);

X<sub>3</sub> = velocidade de soldagem (mm/min);

X<sub>4</sub> = distância bico de contato peça (mm);

ε = erros aleatórios (resíduos);

Essas equações são apresentadas com base na ANOVA aplicada, e estão descritas no Quadro 6.

**Quadro 6 - Quadro geral com as equações de regressão para cada variável resposta.**

| RESPOSTAS                                | MODELOS MATEMÁTICOS  |
|--|--|
| Largura<br>(mm)                          | $1,49 + 0,03172 x_1 + 0,0335 x_2 - 0,00792 x_3 + 0,1222 x_4$   |
| Reforço<br>(mm)                          | $10,748 - 0,00894 x_1 - 0,0484 x_2 - 0,00735 x_3 - 0,0511 x_4$ |
| Penetração<br>(mm)                       | $2,67 + 0,00653 x_1 - 0,0378 x_2 - 0,00183 x_3 - 0,0108 x_4$   |
| Índice de Convexidade<br>(%)             | $146,4 - 0,2291 x_1 - 0,453 x_2 - 0,0545 x_3 - 1,020 x_4$      |
| Área de Penetração<br>(mm <sup>2</sup> ) | $2,34 + 0,0469 x_1 - 0,107 x_2 - 0,01020 x_3 + 0,142 x_4$      |
| Área de Reforço<br>(mm <sup>2</sup> )    | $59,20 + 0,0240 x_1 - 0,215 x_2 - 0,08788 x_3 - 0,078 x_4$     |
| Diluição<br>(%)                          | $-11,1 + 0,0725 x_1 - 0,078 x_2 + 0,0499 x_3 + 0,294 x_4$      |

Fonte: Autoria Própria.

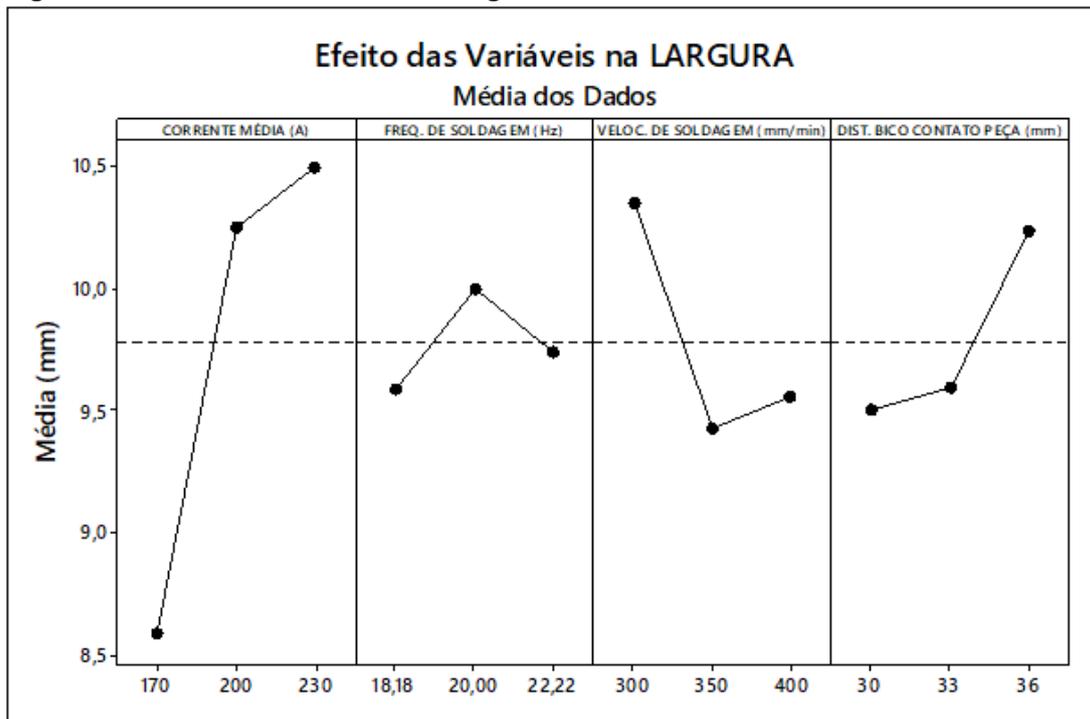
Pelos modelos de regressão linear múltipla de primeira ordem e sem iteração obtêm-se os coeficientes de regressão, estes possuem valores negativos e positivos. Portanto, quando há um sinal positivo isso indica que a variável é diretamente proporcional à resposta em estudo, enquanto que o sinal negativo indica que a relação entre as variáveis são inversamente proporcionais.

Para uma melhor visualização desses resultados apresentados na Tabela 8, e verificação das análises realizadas nas variáveis respostas detectando quais os parâmetros que mais influenciaram em cada ensaio, teremos também uma representação gráfica a partir das Figuras 21 à 27 associando cada parâmetro a cada resposta estudada.

A interpretação destes gráficos de efeitos é de forma bem simplificada, afinal quanto maior a diferença na inclinação entre as linhas, maior será a interação da variável. Logo, quando as linhas forem praticamente paralelas, não há nenhuma interação da variável com a resposta.

Além disso, podemos interpretar os gráficos de efeitos conjuntamente com as equações de regressão para cada resposta. Ou seja, como descrito anteriormente, toda vez que tivermos um parâmetro de regressão ( $b_i$ ) com valor positivo, isso significa que a variável de influência ( $x_i$ ) pela qual ele está multiplicado, afeta positivamente a variável resposta estudada, assim a maximização é dada no maior nível desta variável de influência. Já quando o parâmetro de regressão ( $b_i$ ) for negativo, ocorre o inverso. Significa que a variável de influência ( $x_i$ ) associada a ele influenciará negativamente na resposta, portanto, a maximização ocorre no menor nível da variável de influência.

Figura 21 - Efeito das variáveis na Largura.



Fonte: Autoria Própria.

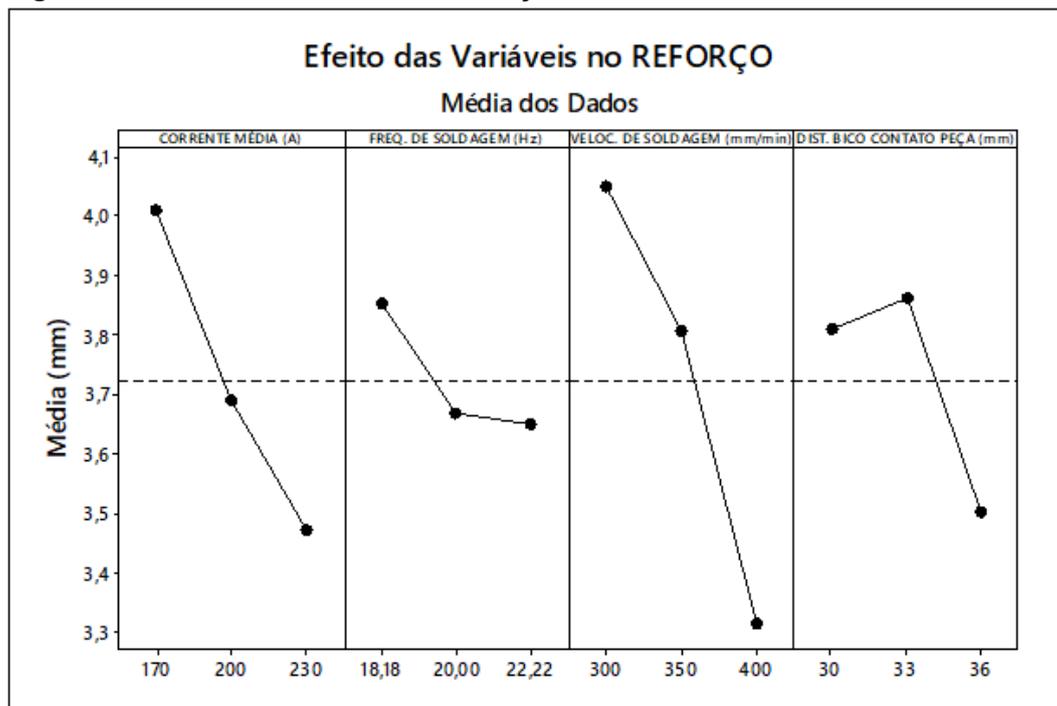
Pela Figura 21, observamos que se obteve uma média dos dados de 9,78 mm (linha pontilhada). E o comportamento dos cordões de solda obedeceu ao que se era esperado, ou seja, o crescimento da largura com um aumento da corrente média e da distância bico contato peça. Já com o aumento da velocidade, acontece o inverso, ou seja, a largura decresce, pois o arco elétrico permanece um tempo menor durante a soldagem na poça de fusão.

Já a frequência de pulsação obteve uma diferença pequena em suas retas, pois não se rejeitou  $H_0$  para esta variável ( $P=0,706$ ). As variáveis que afetaram com maior intensidade a largura foram a corrente média ( $P=0,000$ ), a velocidade de soldagem ( $P=0,043$ ) e em menor intensidade, porém bem próximo à distância bico contato peça ( $P=0,058$ ).

Comparando o gráfico (Figura 21) com sua equação de regressão (Quadro 6) a partir dos sinais de seus parâmetros de regressão, observamos a melhor combinação para maximizar a largura em: Corrente Média = 230 A; Frequência de Pulsação = 20,00 Hz; Velocidade de Soldagem = 300 mm/min; Distância Bico de Contato Peça = 36mm.

A mesma faixa de resultados também foi obtida por KURTULMUS et al (2015) que utilizou a soldagem FCAW em chapa de aço SAE 1015 como base e metal de adição AWS E71T-5; CARDOSO et al (2015), trabalhando com a soldagem GMAW, tendo como metal de base o aço 1020 e de adição o arame sólido ER70S; e SREERAJ et al (2013), que depositaram pelo processo GMAW o metal de adição ER308L.

**Figura 22 - Efeito das variáveis no Reforço.**



Fonte: Autoria Própria.

No reforço (Figura 22) a média dos resultados foi de 3,73 mm (linha pontilhada). Há um decréscimo do reforço conforme o aumento dos níveis de cada parâmetro. Estes resultados também já eram esperados, afinal o reforço se comporta de maneira inversamente proporcional à largura. Quanto maior a largura, menor será a altura do reforço no cordão de solda.

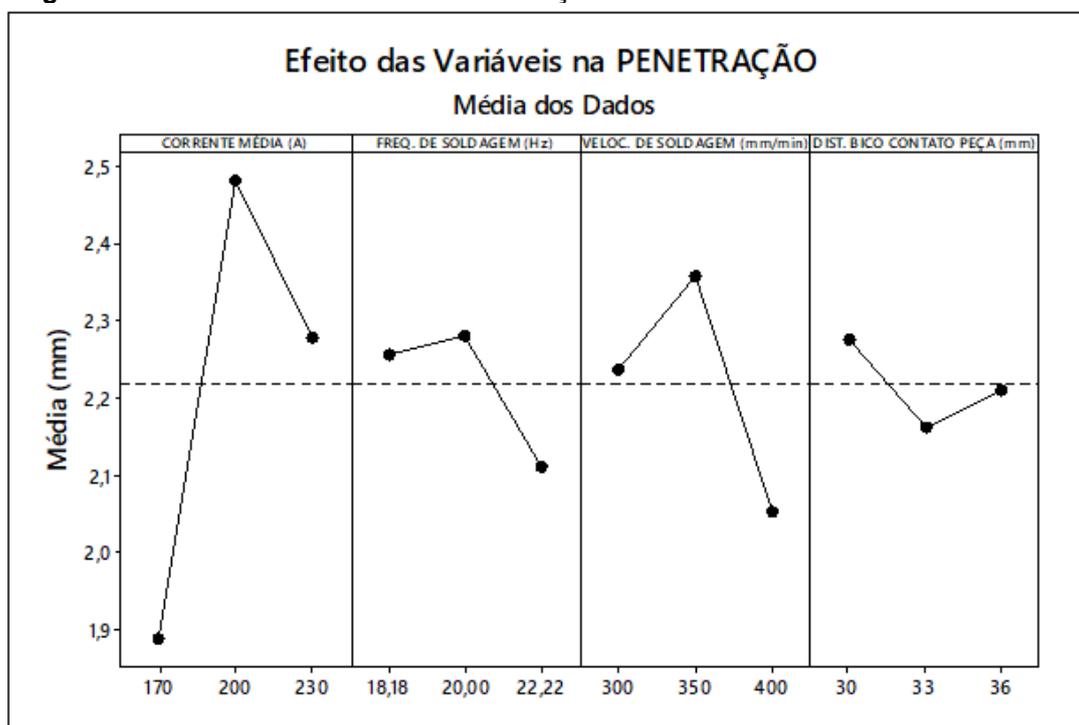
Os parâmetros de maior efeito nas variáveis foram a corrente média ( $P=0,000$ ), a velocidade de soldagem ( $P=0,000$ ) e a distância bico de contato peça ( $P=0,014$ ). Já a frequência de pulsação não rejeitou  $H_0$ , obtendo um  $P=0,094$ .

Comparando o gráfico (Figura 22) com sua equação de regressão (Quadro 6) a partir dos sinais de seus parâmetros de regressão, observamos a melhor combinação para maximizar o reforço em: Corrente Média = 170 A;

Frequência de Pulsação = 18,18 Hz; Velocidade de Soldagem = 300 mm/min; Distância Bico de Contato Peça = 33 mm.

Conforme as pesquisas encontradas na literatura, também temos alguns autores que verificaram essa faixa de valores de reforço, dentre eles, MOTA et, al. (2016) utilizando o processo MIG com metal de base 1020 e de adição uma superliga de níquel ER NiCrMo-4; CRUZ (2014) pelo método GMAW depositando o arame tubular 410NiMo MC em chapas planas do aço AISI 1020; e SREERAJ et. al. (2012) adotando o processo GMAW com chapas de aço macio da classe IS-2062 e eletrodo o aço inoxidável ER-308L.

Figura 23 - Efeito das variáveis na Penetração.



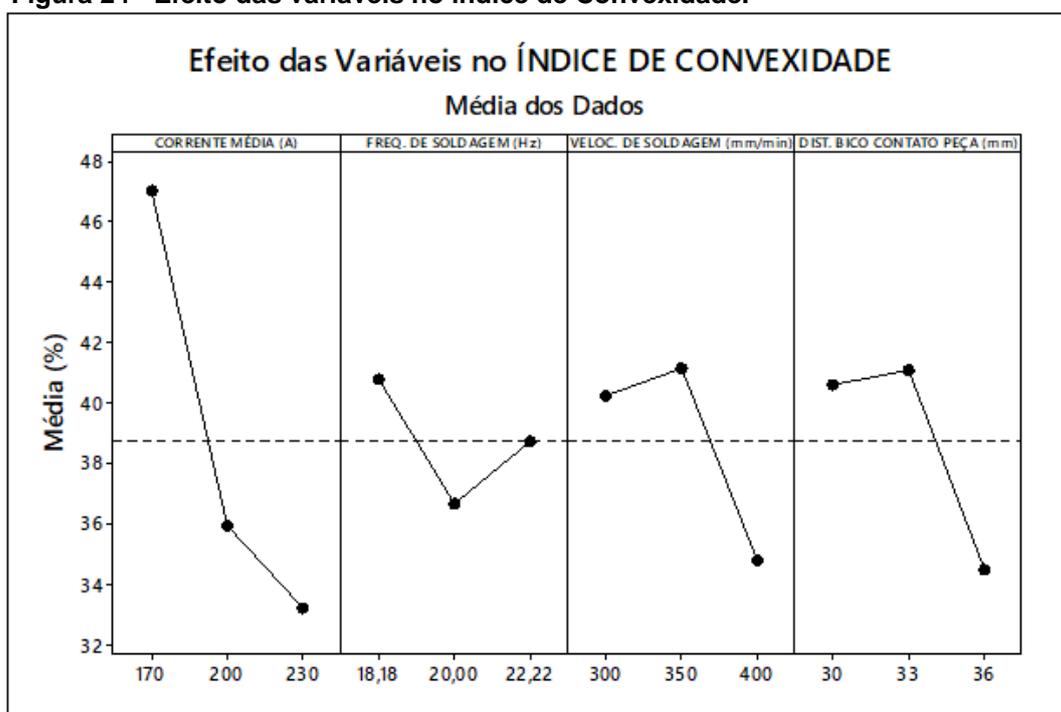
Fonte: Autoria Própria.

Na penetração (Figura 23) a média dos dados ficou em 2,22 mm (linha pontilhada). Nessa variável resposta temos uma maior intensidade de influência a partir da variação da corrente média ( $P=0,040$ ), pois se rejeitou  $H_0$ .

Comparando o gráfico (Figura 23) com sua equação de regressão (Quadro 6) a partir dos sinais de seus parâmetros de regressão, observamos a melhor combinação para minimizar a penetração em: Corrente Média = 170 A; Frequência de Pulsação = 22,22 Hz; Velocidade de Soldagem = 400 mm/min; Distância Bico de Contato Peça = 33 mm.

Podemos encontrar a mesma margem de valores de penetração nos trabalhos de MONDAL et. al. (2016) utilizando o processo GMAW, com deposição do aço inoxidável duplex E2209 T01 em amostras de aço de baixa liga E250; PRABHU e ALWARSAMY (2014) utilizando como eletrodo o aço inoxidável AISI 317L sobre o aço ASTM A105 pelo processo MIG pulsado; e DIAS et. al. (2010) também pelo método de soldagem por arame tubular, depositando o consumível AWS E316T1-4 sob chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304.

**Figura 24 - Efeito das variáveis no Índice de Convexidade.**



Fonte: Autoria Própria.

Quanto ao índice de convexidade (Figura 24), temos uma média dos dados de 38,73% (linha pontilhada). Há uma redução nesses índices à medida que se aumentam os níveis dos parâmetros.

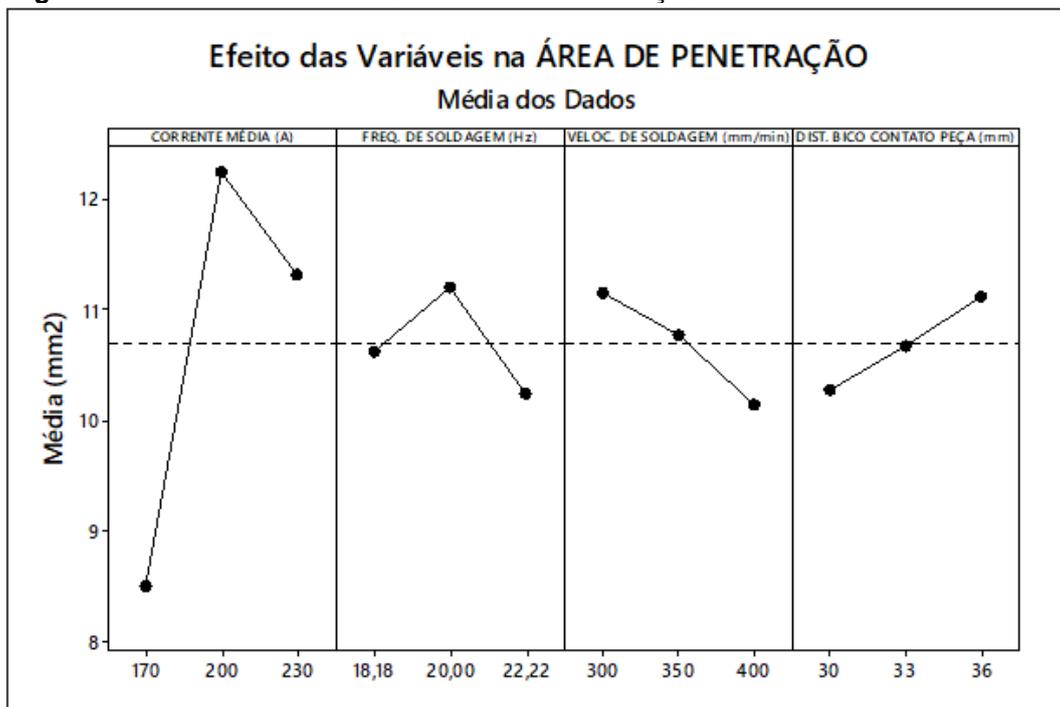
As variáveis que causam maior efeito foram a corrente média ( $P=0,000$ ), a velocidade de soldagem ( $0,045$ ) e a distância bico de contato peça ( $P=0,027$ ). Já a frequência de pulsação não rejeita  $H_0$ , obtendo um  $P=0,470$ .

Comparando o gráfico (Figura 24) com sua equação de regressão (Quadro 6) a partir dos sinais de seus parâmetros de regressão, observamos a melhor combinação para minimizar o índice de convexidade em: Corrente

Média = 230 A; Frequência de Pulsação = 20,00 Hz; Velocidade de Soldagem = 400 mm/min; Distância Bico de Contato Peça = 36 mm.

Estudos que obtiveram a mesma faixa de resultados foram KUWAHARA (2016) que utilizou a soldagem FCAW e os mesmos materiais de base e adição, encontrando uma média da largura de 10,57 mm; BATISTA et. al. (2011) aplicando cordões de solda de ligas de Ni (Hastelloy-276) pelo processo de soldagem Arco Submerso em aços C-Mn; e DÍAZ et. al. (2011) adotando a soldagem a plasma depositando a liga Stellite 6 (BT906) em chapas de aço carbono ABNT 1020.

Figura 25 - Efeito das variáveis na Área de Penetração.



Fonte: Autoria Própria.

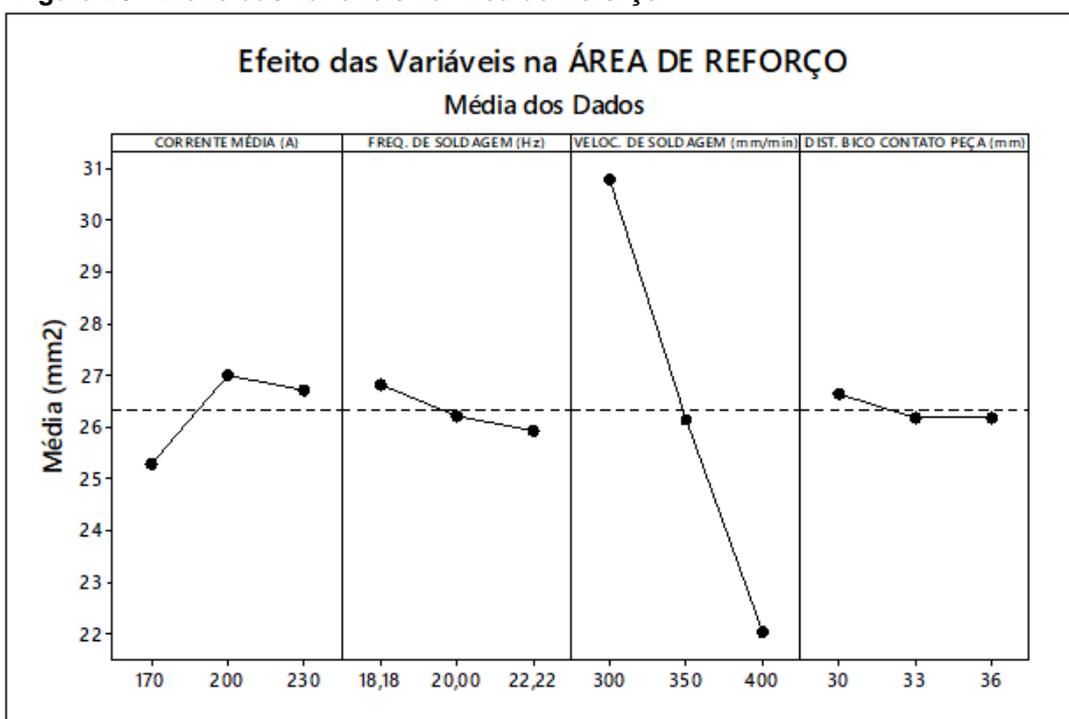
Para área de penetração (Figura 25) a média dos resultados foi de 10,70 mm<sup>2</sup> (linha pontilhada). Como é visível, o parâmetro de maior efeito foi a corrente média ( $P=0,009$ ), comprovado pelos resultados dos ensaios (Tabela 6) e visualmente pelo gráfico, pois foi a reta de maior diferença na inclinação, assim como na penetração, rejeitando  $H_0$ .

Comparando o gráfico (Figura 25) com sua equação de regressão (Quadro 6) a partir dos sinais de seus parâmetros de regressão, observamos a melhor combinação para minimizar a área de penetração em: Corrente Média =

170 A; Frequência de Pulsação = 22,22 Hz; Velocidade de Soldagem = 400 mm/min; Distância Bico de Contato Peça = 30 mm.

Os mesmos resultados também foram obtidos por STARLING et. al. (2011) adotando o processo FCAW com arames tubulares comerciais de fabricação nacional (destinados à soldagem de aços carbono comuns de baixo e médio teor de carbono) dos tipos básico (ASME SFA-5.20: E71T-5/E71T-5M), rutilico (ASME SFA-5.20: E71T-1/E71T-9/E71T-9M) e "metal cored" (ASME SFA-5.18: E70C-3M) sobre chapas de aço carbono comum (ABNT 1010); BIGLIA (2016) utilizando o arame AWS A5.18 ER70S-6 e metal de base o aço SAE 1020, utilizando o método de soldagem MAG.

Figura 26 - Efeito das variáveis na Área de Reforço.



Fonte: Autoria Própria.

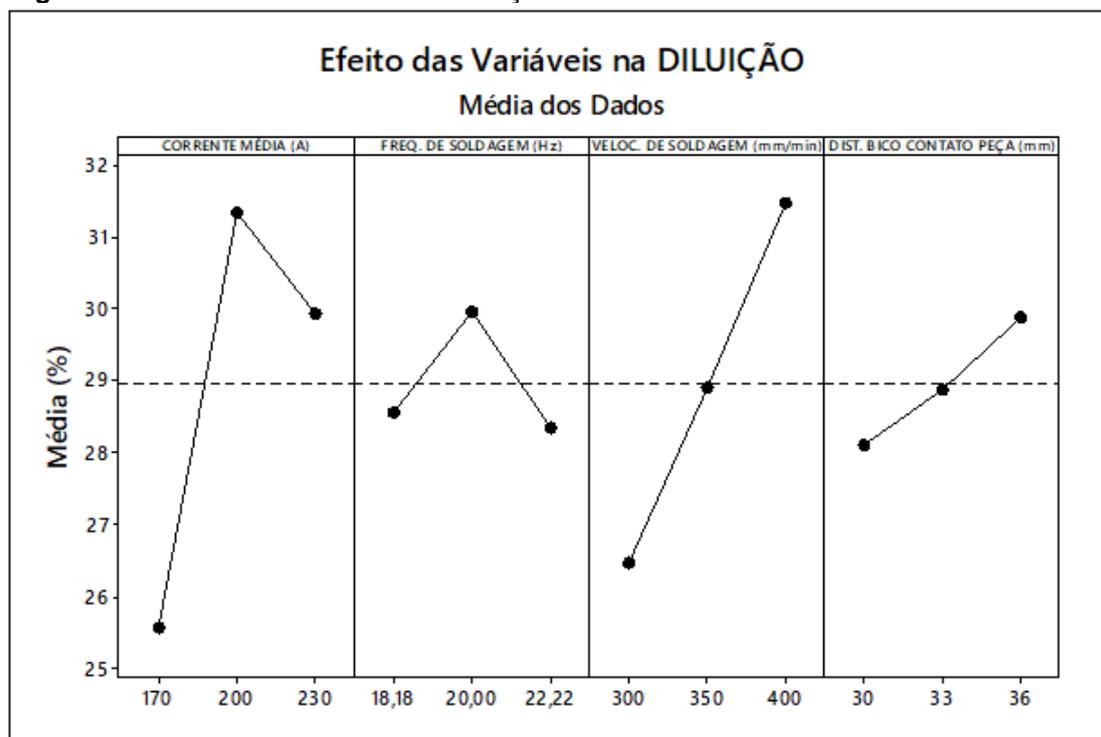
Na área de reforço (Figura 26), obtemos uma média dos dados de 26,33 mm<sup>2</sup>. O parâmetro de maior intensidade de efeitos foi a velocidade de soldagem ( $P=0,000$ ), rejeitando  $H_0$ , onde houve um decréscimo na área de reforço com o seu aumento, assim como no reforço.

Comparando o gráfico (Figura 26) com sua equação de regressão (Quadro 6) a partir dos sinais de seus parâmetros de regressão, observamos a melhor combinação para maximizar a área de reforço em: Corrente Média =

200 A; Frequência de Pulsação = 18,18 Hz; Velocidade de Soldagem = 300 mm/min; Distância Bico de Contato Peça = 30 mm.

Pesquisadores que também encontraram em seus estudos estes resultados para área de reforço foram BIGLIA (2016) utilizando o arame AWS A5.18 ER70S-6 e metal de base o aço SAE 1020, utilizando o método de soldagem MAG; CRUZ (2014) pelo método GMAW depositando o arame tubular 410NiMo MC em chapas planas do aço AISI 1020; e DÍAZ et. al. (2011) adotando a soldagem a plasma depositando a liga Stellite 6 (BT906) em chapas de aço carbono ABNT 1020.

**Figura 27 - Efeito das variáveis na Diluição.**



Fonte: Autoria Própria.

Na diluição (Figura 27) a média dos resultados foi de 28,95% (linha pontilhada). Pelo comportamento gráfico, verificamos os fatores de maior influência a corrente média ( $P=0,023$ ) e a velocidade de soldagem ( $P=0,011$ ). Já a frequência de pulsação e a distância bico contato peça obtiveram um valor de  $P$  igual a 0,854 e 0,315, respectivamente, não rejeitando  $H_0$ .

Comparando o gráfico (Figura 27) com sua equação de regressão (Quadro 6) a partir dos sinais de seus parâmetros de regressão, observamos a melhor combinação para minimizar a diluição em: Corrente Média = 170 A;

Frequência de Pulsação = 22,22 Hz; Velocidade de Soldagem = 300 mm/min; Distância Bico de Contato Peça = 30 mm.

Dentre as pesquisas levantadas na literatura com resultados semelhantes, temos MOTA et. al. (2016), utilizando o processo MIG com metal de base 1020 e de adição uma superliga de níquel ER NiCrMo-4; SILVA (2016), pelo método FCAW com metal de base o aço ABNT 1010 e metal de adição o arame tubular ASME SFA 5.20; e NOURI et. al. (2007) realizando um revestimento com o aço X65 e o aço inoxidável 316L pelo processo de soldagem GMAW pulsado.

Assim, ao confrontar os gráficos de efeitos nas variáveis (Figura 21 à 27) com as Tabelas 9 e 15 que fornecem os p-valores encontrados a partir das análises estatísticas, verificamos que em todos aqueles parâmetros que atenderam o nível de significância de 5%, ou seja, que obtiveram um p-valor inferior a 0,05, também foi o parâmetro que alcançou a maior diferença de inclinação na reta. Comprovando-se numericamente e de forma ilustrada os parâmetros mais influenciáveis em cada variável resposta.

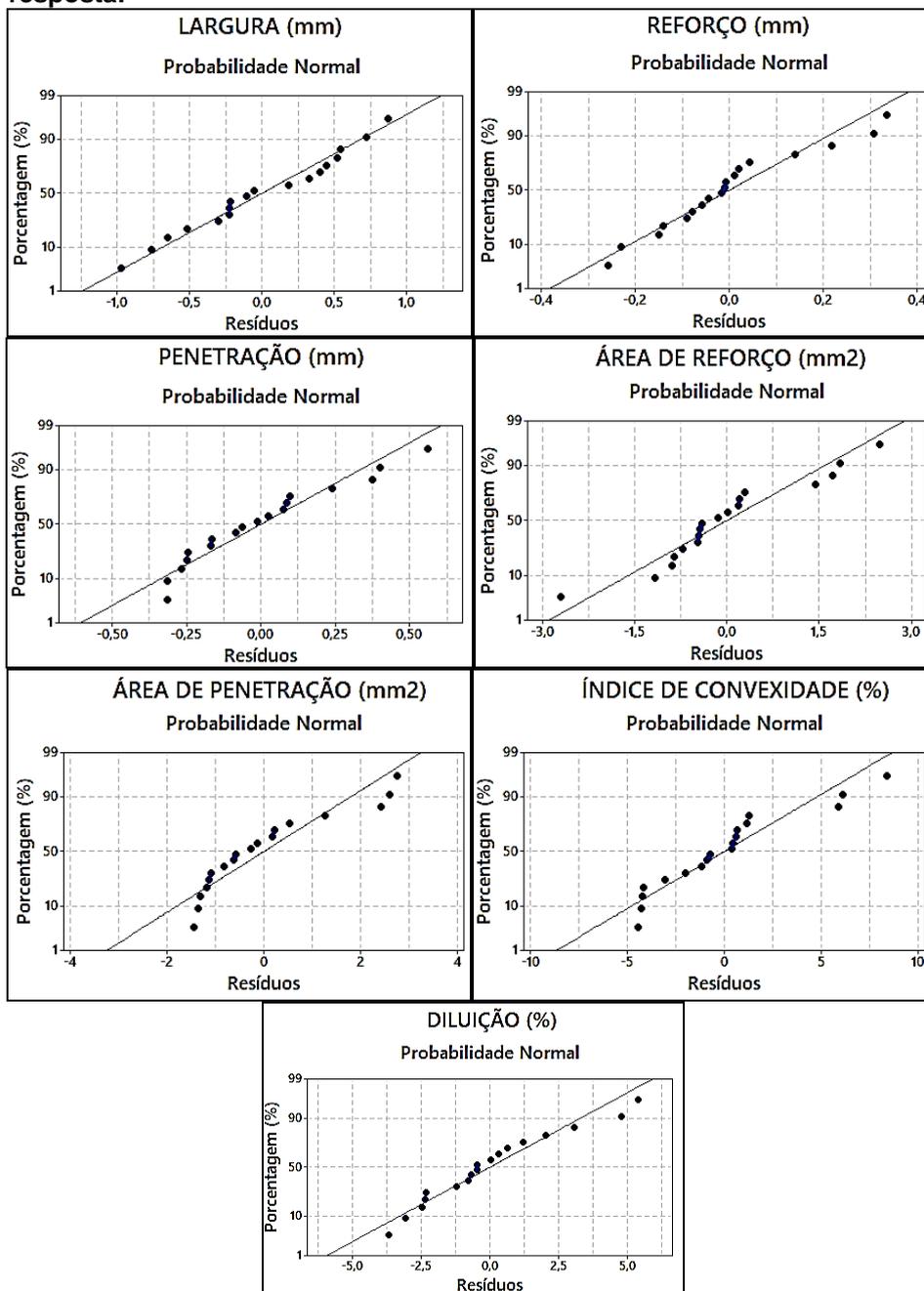
Uma vez estabelecidas às equações e feita a análise/interpretação dos gráficos de iterações, é necessário realizar uma análise diagnóstica com base nos pressupostos dos resíduos. Relembrando a Equação 6, os resíduos de um modelo de regressão são:

$$\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i$$

sendo,  $i = 1, 2, \dots, n$ , em que  $y_i$  é uma observação real e  $\hat{y}_i$  é o valor ajustado correspondente. Essa análise é frequentemente útil na verificação da suposição de que os erros sejam distribuídos de forma aproximadamente normal, com variância constante, assim como na determinação da utilidade dos termos adicionais no modelo.

A Figura 28 representa os gráficos de probabilidade normal dos resíduos para a Largura, o Reforço, a Penetração, o Índice de Convexidade, a Área de Penetração, Área de Reforço e Diluição.

**Figura 28 - Gráfico de Probabilidade Normal dos resíduos das variáveis resposta.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Nestes gráficos seus eixos são construídos contrastando os quantis teóricos de uma distribuição de probabilidade normal com os quantis observados dos resíduos obtidos pelo modelo. O que significa dizer que se os pontos se aproximam de uma reta de 45° (padrão linear perfeito), possibilita inferir que se aproximam de uma distribuição normal padrão.

Portanto, verifica-se que os resíduos registrados aproximam-se da diagonal, sem nenhum afastamento significativo, ou seja, a distribuição

empírica normal é verificada, pois os pontos se aproximam da reta. As outras suposições foram checadas com os gráficos de dispersão dos resíduos versus valores ajustados (anexo A) e também dos gráficos dos resíduos versus a ordem de coleta (anexo B), foi possível evidenciar que não há nenhum padrão aparente e por isso é possível inferir que a suposição de homocedasticidade e independência dos resíduos foi satisfeita, validando o modelo teórico estatístico utilizado neste trabalho para uma aplicação na predição, por exemplo.

Deste modo, na sequência será possível verificar a validade em se utilizar as equações de regressão, analisando qual o grau de confiabilidade dos resultados fornecidos.

Portanto, as equações de regressão apresentadas (Quadro 6) serão aplicá-las nos dados da Tabela 8 e assim proporcionar um estudo comparativo dos valores medidos e previstos pelo modelo estatístico.

As tabelas a seguirem apresentam os resultados dos valores previstos para cada ensaio. A Tabela 17 para os resultados da Largura, Reforço, Penetração e Área de Penetração e a Tabela 18 para a Área de Reforço, o Índice de Convexidade e a Diluição.

**Tabela 17 - Valores medidos e previstos para Largura, Reforço, Penetração e Área de Penetração.**

| Exp. | LARGURA<br>(mm) |          | REFORÇO<br>(mm) |          | PENETRAÇÃO<br>(mm) |          | ÁREA DE<br>PENETRAÇÃO<br>(mm <sup>2</sup> ) |          |
|------|-----------------|----------|-----------------|----------|--------------------|----------|---|----------|
|      | MEDIDO          | PREVISTO | MEDIDO          | PREVISTO | MEDIDO             | PREVISTO | MEDIDO                                      | PREVISTO |
| -    |                 |          |                 |          |                    |          |   |          |
| 1    | 9,240           | 8,789    | 4,750           | 4,609    | 1,970              | 2,219    | 8,220                                       | 9,582    |
| 2    | 8,140           | 8,789    | 4,350           | 4,609    | 2,050              | 2,219    | 8,770                                       | 9,582    |
| 3    | 10,690          | 10,169   | 4,110           | 4,099    | 2,340              | 2,314    | 12,480                                      | 11,221   |
| 4    | 11,040          | 10,169   | 4,090           | 4,099    | 2,690              | 2,314    | 13,970                                      | 11,221   |
| 5    | 11,460          | 11,561   | 3,420           | 3,570    | 2,230              | 2,393    | 12,190                                      | 12,818   |
| 6    | 11,510          | 11,561   | 3,590           | 3,570    | 2,150              | 2,393    | 11,370                                      | 12,818   |
| 7    | 10,060          | 10,358   | 3,560           | 3,616    | 2,540              | 2,451    | 11,420                                      | 11,691   |
| 8    | 10,130          | 10,358   | 3,610           | 3,616    | 2,550              | 2,451    | 11,560                                      | 11,691   |
| 9    | 8,130           | 8,896    | 4,110           | 3,892    | 1,880              | 1,943    | 8,500                                       | 9,068    |
| 10   | 7,920           | 8,896    | 4,200           | 3,892    | 1,860              | 1,943    | 7,750                                       | 9,068    |

**Tabela 17 - Valores medidos e previstos para Largura, Reforço, Penetração e Área de Penetração.**

| Exp. | (conclusão)  |          |              |          |                 |          |                                       |          |
|------|--------------|----------|--------------|----------|-----------------|----------|---------------------------------------|----------|
|      | LARGURA (mm) |          | REFORÇO (mm) |          | PENETRAÇÃO (mm) |          | ÁREA DE PENETRAÇÃO (mm <sup>2</sup> ) |          |
|      | MEDIDO       | PREVISTO | MEDIDO       | PREVISTO | MEDIDO          | PREVISTO | MEDIDO                                | PREVISTO |
| 11   | 10,480       | 10,078   | 3,710        | 3,666    | 2,820           | 2,258    | 13,930                                | 11,332   |
| 12   | 9,860        | 10,078   | 3,650        | 3,666    | 2,500           | 2,258    | 11,500                                | 11,332   |
| 13   | 9,810        | 9,085    | 3,320        | 3,410    | 2,070           | 2,079    | 9,750                                 | 9,538    |
| 14   | 9,630        | 9,085    | 3,270        | 3,410    | 2,480           | 2,079    | 11,950                                | 9,538    |
| 15   | 9,750        | 10,268   | 3,520        | 3,184    | 2,080           | 2,395    | 10,660                                | 11,802   |
| 16   | 10,040       | 10,268   | 3,140        | 3,184    | 2,130           | 2,395    | 10,720                                | 11,802   |
| 17   | 8,980        | 8,792    | 3,400        | 3,479    | 1,980           | 1,902    | 9,750                                 | 9,221    |
| 18   | 9,120        | 8,792    | 3,250        | 3,479    | 1,590           | 1,902    | 8,050                                 | 9,221    |

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 18 - Valores medidos e previstos para Área de Reforço, Índice de Convexidade e Diluição.**

| Exp. | (continua)                         |          |                           |          |              |          |
|------|------------------------------------|----------|---------------------------|----------|--------------|----------|
|      | ÁREA DE REFORÇO (mm <sup>2</sup> ) |          | ÍNDICE DE CONVEXIDADE (%) |          | DILUIÇÃO (%) |          |
|      | MEDIDO                             | PREVISTO | MEDIDO                    | PREVISTO | MEDIDO       | PREVISTO |
| 1    | 33,140                             | 30,659   | 51,407                    | 52,270   | 19,874       | 23,550   |
| 2    | 27,960                             | 30,659   | 53,440                    | 52,270   | 23,877       | 23,550   |
| 3    | 32,600                             | 30,753   | 38,447                    | 41,510   | 27,684       | 26,460   |
| 4    | 29,870                             | 30,753   | 37,047                    | 41,510   | 31,866       | 26,460   |
| 5    | 30,330                             | 30,762   | 29,843                    | 30,570   | 28,669       | 29,340   |
| 6    | 30,950                             | 30,762   | 31,190                    | 30,570   | 26,867       | 29,340   |
| 7    | 26,920                             | 27,313   | 35,388                    | 34,970   | 29,786       | 30,250   |
| 8    | 26,600                             | 27,313   | 35,637                    | 34,970   | 30,294       | 30,250   |
| 9    | 23,990                             | 25,163   | 50,554                    | 44,660   | 26,162       | 26,610   |
| 10   | 25,180                             | 25,163   | 53,030                    | 44,660   | 23,535       | 26,610   |
| 11   | 28,230                             | 26,516   | 35,401                    | 36,550   | 33,041       | 29,980   |
| 12   | 26,060                             | 26,516   | 37,018                    | 36,550   | 30,618       | 29,980   |
| 13   | 23,170                             | 21,722   | 33,843                    | 38,120   | 29,617       | 30,400   |
| 14   | 22,010                             | 21,722   | 33,956                    | 38,120   | 35,188       | 30,400   |
| 15   | 23,290                             | 23,075   | 36,103                    | 30,010   | 31,399       | 33,770   |

**Tabela 18 - Valores medidos e previstos para Área de Reforço, Índice de Convexidade e Diluição.**

| Exp. | ÁREA DE REFORÇO (mm <sup>2</sup> ) |          | ÍNDICE DE CONVEXIDADE (%) |          | DILUIÇÃO (%) |          |
|------|------------------------------------|----------|---------------------------|----------|--------------|----------|
|      | MEDIDO                             | PREVISTO | MEDIDO                    | PREVISTO | MEDIDO       | PREVISTO |
| 16   | 22,230                             | 23,075   | 31,275                    | 30,010   | 32,534       | 33,770   |
| 17   | 20,540                             | 21,012   | 37,862                    | 39,880   | 32,189       | 30,160   |
| 18   | 20,880                             | 21,012   | 35,636                    | 39,880   | 27,826       | 30,160   |

Fonte: Autoria Própria

Observamos que os valores medidos e previstos obtidos foram bem próximos, o que nos demonstra que as equações podem prever os resultados das variáveis de resposta com grande exatidão e com erro controlado. Vale ressaltar que a extrapolação dos achados somente é válida dentro do conjunto ( $y_i \in Y$ ), ou seja a equação só é válida no intervalo da variável resposta ao qual ela foi utilizada para construir o modelo estatístico, é impossível prever fora deste intervalo, pois o padrão matemático/estatístico pode mudar drasticamente invalidando a projeção.

Ainda, para mostrar a confiança na utilização das equações para previsão dos resultados foram realizadas análises calculando qual a porcentagem de acerto desses modelos matemáticos. Para isso foi aplicado um cálculo do MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) nos resultados medidos e previstos (Tabela 17 e 18).

O MAPE (Equação 11) significa um erro percentual médio absoluto e trata-se de um indicador de acerto de estimativa que varia entre 0% e 100%. Ou seja, o acerto percentual absoluto (Equação 10) obtido consiste no erro percentual absoluto (MAPE) subtraído de 100%.

$$\text{Acerto Percentual Absoluto} = 100\% - \text{MAPE} \quad (10)$$

$$\text{MAPE (\%)} = \left( \frac{\sum \left[ \frac{|(M(t) - P(t))|}{M(t)} \right]}{N} \right) \times 100 \quad (11)$$

M(t) = valores medidos

P(t) = valores previstos

N = número de períodos

As Tabelas 19 à 22 apresentam os valores do MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) e Acerto Percentual encontrados a partir da substituição dos resultados, obtidos pela ANOVA, nas equações do Quadro 6 para as variáveis resposta.

**Tabela 19 - Acerto percentual e MAPE obtidos para largura e reforço.**

| Exp.              | LARGURA |          |              | REFORÇO           |          |       |              |
|-------------------|---------|----------|--------------|-------------------|----------|-------|--------------|
|                   | MEDIDO  | PREVISTO | ERRO         | MEDIDO            | PREVISTO | ERRO  |              |
| 1                 | 9,240   | 8,789    | 0,049        | 4,750             | 4,609    | 0,030 |              |
| 2                 | 8,140   | 8,789    | 0,080        | 4,350             | 4,609    | 0,060 |              |
| 3                 | 10,690  | 10,169   | 0,049        | 4,110             | 4,099    | 0,003 |              |
| 4                 | 11,040  | 10,169   | 0,079        | 4,090             | 4,099    | 0,002 |              |
| 5                 | 11,460  | 11,561   | 0,009        | 3,420             | 3,570    | 0,044 |              |
| 6                 | 11,510  | 11,561   | 0,004        | 3,590             | 3,570    | 0,006 |              |
| 7                 | 10,060  | 10,358   | 0,030        | 3,560             | 3,616    | 0,016 |              |
| 8                 | 10,130  | 10,358   | 0,023        | 3,610             | 3,616    | 0,002 |              |
| 9                 | 8,130   | 8,896    | 0,094        | 4,110             | 3,892    | 0,053 |              |
| 10                | 7,920   | 8,896    | 0,123        | 4,200             | 3,892    | 0,073 |              |
| 11                | 10,480  | 10,078   | 0,038        | 3,710             | 3,666    | 0,012 |              |
| 12                | 9,860   | 10,078   | 0,022        | 3,650             | 3,666    | 0,004 |              |
| 13                | 9,810   | 9,085    | 0,074        | 3,320             | 3,410    | 0,027 |              |
| 14                | 9,630   | 9,085    | 0,057        | 3,270             | 3,410    | 0,043 |              |
| 15                | 9,750   | 10,268   | 0,053        | 3,520             | 3,184    | 0,095 |              |
| 16                | 10,040  | 10,268   | 0,023        | 3,140             | 3,184    | 0,014 |              |
| 17                | 8,980   | 8,792    | 0,021        | 3,400             | 3,479    | 0,023 |              |
| 18                | 9,120   | 8,792    | 0,036        | 3,250             | 3,479    | 0,070 |              |
| MAPE              |         |          | 4,80         | MAPE              |          |       | 3,20         |
| Acerto Percentual |         |          | <b>95,20</b> | Acerto Percentual |          |       | <b>96,80</b> |

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 20 - Acerto percentual e MAPE obtidos para penetração e índice de convexidade.**  
(continua)

| Exp. | PENETRAÇÃO |          |       | ÍNDICE DE CONVEXIDADE |          |       |
|------|------------|----------|-------|-----------------------|----------|-------|
|      | MEDIDO     | PREVISTO | ERRO  | MEDIDO                | PREVISTO | ERRO  |
| 1    | 1,970      | 2,219    | 0,126 | 51,407                | 52,270   | 0,017 |

**Tabela 20 - Acerto percentual e MAPE obtidos para penetração e índice de convexidade.  
(conclusão)**

| Exp.              | PENETRAÇÃO |          |              | ÍNDICE DE CONVEXIDADE |          |              |
|-------------------|------------|----------|--------------|-----------------------|----------|--------------|
|                   | MEDIDO     | PREVISTO | ERRO         | MEDIDO                | PREVISTO | ERRO         |
| 2                 | 2,050      | 2,219    | 0,082        | 53,440                | 52,270   | 0,022        |
| 3                 | 2,340      | 2,314    | 0,011        | 38,447                | 41,510   | 0,080        |
| 4                 | 2,690      | 2,314    | 0,140        | 37,047                | 41,510   | 0,120        |
| 5                 | 2,230      | 2,393    | 0,073        | 29,843                | 30,570   | 0,024        |
| 6                 | 2,150      | 2,393    | 0,113        | 31,190                | 30,570   | 0,020        |
| 7                 | 2,540      | 2,451    | 0,035        | 35,388                | 34,970   | 0,012        |
| 8                 | 2,550      | 2,451    | 0,039        | 35,637                | 34,970   | 0,019        |
| 9                 | 1,880      | 1,943    | 0,034        | 50,554                | 44,660   | 0,117        |
| 10                | 1,860      | 1,943    | 0,045        | 53,030                | 44,660   | 0,158        |
| 11                | 2,820      | 2,258    | 0,199        | 35,401                | 36,550   | 0,032        |
| 12                | 2,500      | 2,258    | 0,097        | 37,018                | 36,550   | 0,013        |
| 13                | 2,070      | 2,079    | 0,004        | 33,843                | 38,120   | 0,126        |
| 14                | 2,480      | 2,079    | 0,162        | 33,956                | 38,120   | 0,123        |
| 15                | 2,080      | 2,395    | 0,151        | 36,103                | 30,010   | 0,169        |
| 16                | 2,130      | 2,395    | 0,124        | 31,275                | 30,010   | 0,040        |
| 17                | 1,980      | 1,902    | 0,039        | 37,862                | 39,880   | 0,053        |
| 18                | 1,590      | 1,902    | 0,196        | 35,636                | 39,880   | 0,119        |
| MAPE              |            |          | 9,29         | MAPE                  |          | 7,02         |
| Acerto Percentual |            |          | <b>90,71</b> | Acerto Percentual     |          | <b>92,98</b> |

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 21 - Acerto percentual e MAPE obtidos para área de penetração e área de reforço.  
(continua)**

| Exp. | ÁREA DE PENETRAÇÃO |          |       | ÁREA DE REFORÇO |          |       |
|------|--------------------|----------|-------|-----------------|----------|-------|
|      | MEDIDO             | PREVISTO | ERRO  | MEDIDO          | PREVISTO | ERRO  |
| 1    | 8,220              | 9,582    | 0,166 | 33,140          | 30,659   | 0,075 |
| 2    | 8,770              | 9,582    | 0,093 | 27,960          | 30,659   | 0,097 |
| 3    | 12,480             | 11,221   | 0,101 | 32,600          | 30,753   | 0,057 |
| 4    | 13,970             | 11,221   | 0,197 | 29,870          | 30,753   | 0,030 |
| 5    | 12,190             | 12,818   | 0,052 | 30,330          | 30,762   | 0,014 |
| 6    | 11,370             | 12,818   | 0,127 | 30,950          | 30,762   | 0,006 |
| 7    | 11,420             | 11,691   | 0,024 | 26,920          | 27,313   | 0,015 |
| 8    | 11,560             | 11,691   | 0,011 | 26,600          | 27,313   | 0,027 |
| 9    | 8,500              | 9,068    | 0,067 | 23,990          | 25,163   | 0,049 |
| 10   | 7,750              | 9,068    | 0,170 | 25,180          | 25,163   | 0,001 |
| 11   | 13,930             | 11,332   | 0,187 | 28,230          | 26,516   | 0,061 |
| 12   | 11,500             | 11,332   | 0,015 | 26,060          | 26,516   | 0,017 |
| 13   | 9,750              | 9,538    | 0,022 | 23,170          | 21,722   | 0,062 |

**Tabela 21 - Acerto percentual e MAPE obtidos para área de penetração e área de reforço. (conclusão)**

| ÁREA DE PENETRAÇÃO |        |          |              | ÁREA DE REFORÇO   |          |              |
|--------------------|--------|----------|--------------|-------------------|----------|--------------|
| Exp.               | MEDIDO | PREVISTO | ERRO         | MEDIDO            | PREVISTO | ERRO         |
| 14                 | 11,950 | 9,538    | 0,202        | 22,010            | 21,722   | 0,013        |
| 15                 | 10,660 | 11,802   | 0,107        | 23,290            | 23,075   | 0,009        |
| 16                 | 10,720 | 11,802   | 0,101        | 22,230            | 23,075   | 0,038        |
| 17                 | 9,750  | 9,221    | 0,054        | 20,540            | 21,012   | 0,023        |
| 18                 | 8,050  | 9,221    | 0,145        | 20,880            | 21,012   | 0,006        |
| MAPE               |        |          | 10,22        | MAPE              |          | 3,33         |
| Acerto Percentual  |        |          | <b>89,78</b> | Acerto Percentual |          | <b>96,67</b> |

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 22 - Acerto percentual e MAPE obtidos para diluição.**

| DILUIÇÃO          |        |          |              |
|-------------------|--------|----------|--------------|
| Exp.              | MEDIDO | PREVISTO | ERRO         |
| 1                 | 19,874 | 23,550   | 0,185        |
| 2                 | 23,877 | 23,550   | 0,014        |
| 3                 | 27,684 | 26,460   | 0,044        |
| 4                 | 31,866 | 26,460   | 0,170        |
| 5                 | 28,669 | 29,340   | 0,023        |
| 6                 | 26,867 | 29,340   | 0,092        |
| 7                 | 29,786 | 30,250   | 0,016        |
| 8                 | 30,294 | 30,250   | 0,001        |
| 9                 | 26,162 | 26,610   | 0,017        |
| 10                | 23,535 | 26,610   | 0,131        |
| 11                | 33,041 | 29,980   | 0,093        |
| 12                | 30,618 | 29,980   | 0,021        |
| 13                | 29,617 | 30,400   | 0,026        |
| 14                | 35,188 | 30,400   | 0,136        |
| 15                | 31,399 | 33,770   | 0,076        |
| 16                | 32,534 | 33,770   | 0,038        |
| 17                | 32,189 | 30,160   | 0,063        |
| 18                | 27,826 | 30,160   | 0,084        |
| MAPE              |        |          | 6,83         |
| Acerto Percentual |        |          | <b>93,17</b> |

Fonte: Autoria Própria.

O cálculo do MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) nos revela a acurácia da previsão dos dados como uma porcentagem. Pode-se verificar que as equações de regressão que nos forneceu os valores previstos para os

ensaios foram bem significativas, afinal, como já foi visto, o erro entre os valores medidos nos ensaios e os valores previstos foi pequeno, e isso é comprovado a partir das porcentagens do MAPE apresentadas.

Obtivemos uma média do Acerto Absoluto Percentual de 93,62% e uma média dos valores do MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) de 6,38%. Estudos de engenharia com uso de modelos preditivos têm resultados satisfatórios com MAPE's em torno de 10%. Por exemplo, o estudo realizado por IDRIS et al (2018), no qual aplicaram o método de regressão linear múltipla nos resultados da geometria do cordão de solda realizado pelo processo de soldagem GMAW, onde o valor de MAPE encontrado foi de 7,78% para largura do cordão e 10,89% para altura do cordão. DEWAN et al (2015) realizaram uma soldagem por fricção (FSW) analisando a resistência a tração máxima nas juntas soldadas, onde aplicando o MAPE para observar a acurácia dos modelos preditivos aplicados, obtiveram resultados em torno de 7,7% nos valores previstos pelo processo de sistema de inferência neuro-difuso adaptativo otimizado (ANFIS) e cerca de 10,09% quando utilizado os modelos de redes neurais artificiais (RNA), e dentre outros autores.

Portanto, observamos que este presente trabalho se encontra acima do ponto de corte recomendado na literatura científica, pois obtemos um MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) médio em torno de 6% nos modelos gerados, ou seja, uma boa acurácia e extrapolação dos resultados experimentais.

A Tabela 23 demonstra um resumo apenas com os valores do Acerto Percentual Absoluto e o MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) para cada variável estudada. Além disso, estes resultados foram representados graficamente na Figura 29 para melhor visualização.

**Tabela 23 - Resultados do Acerto Absoluto Percentual e do MAPE para cada variável resposta.**

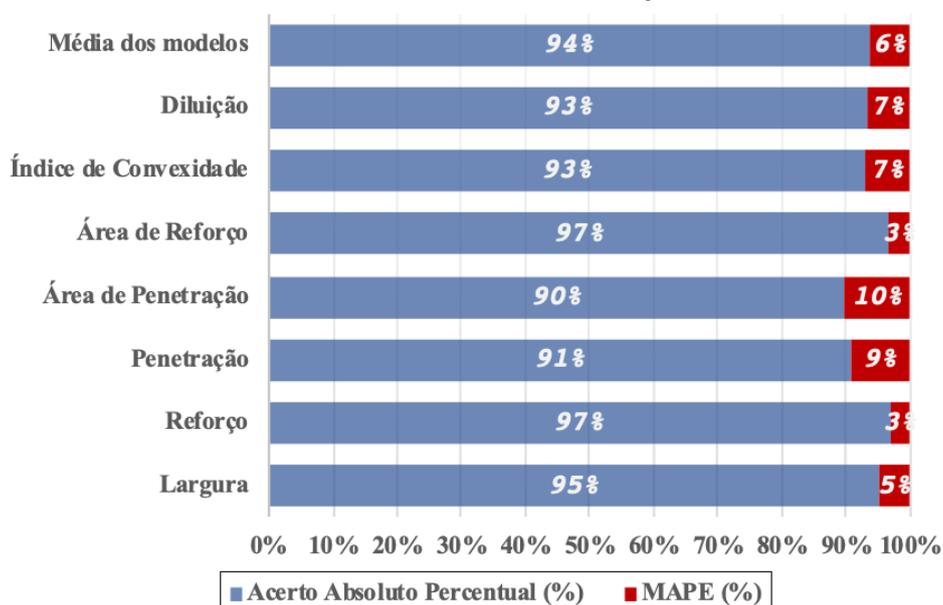
| MODELOS    | (continua)                     |          |
|------------|--------------------------------|----------|
|            | Acerto Absoluto Percentual (%) | MAPE (%) |
| Largura    | 95,20                          | 4,80     |
| Reforço    | 96,80                          | 3,20     |
| Penetração | 90,71                          | 9,29     |

**Tabela 23 - Resultados do Acerto Absoluto Percentual e do MAPE para cada variável resposta.**

| MODELOS               | (conclusão)                    |          |
|-----------------------|--------------------------------|----------|
|                       | Acerto Absoluto Percentual (%) | MAPE (%) |
| Área de Penetração    | 89,78                          | 10,22    |
| Área de Reforço       | 96,67                          | 3,33     |
| Índice de Convexidade | 92,98                          | 7,02     |
| Diluição              | 93,17                          | 6,83     |
| Média dos Modelos     | 93,62                          | 6,38     |

Fonte: Autoria Própria.

**Figura 29 – Resultados representados graficamente para o Acerto Absoluto Percentual e MAPE em cada variável resposta.**



Fonte: Autoria Própria.

Verificamos a partir de todas essas análises estatísticas dos ensaios de soldagem realizadas, que os modelos estatísticos de regressão, as análises de variância, os cálculos de MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) e demais equações empregadas foram satisfatórias de acordo com os parâmetros estabelecidos para sua validação, e permitem serem usadas com certa confiança para prever os resultados de um processo de soldagem.

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos para esta pesquisa, sendo determinar e otimizar as melhores condições para uma soldagem de revestimento através do processo de soldagem por arame tubular com corrente pulsada, conclui-se que:

- As variáveis de influência e suas interações foram determinantes para o controle do processo de soldagem, permitindo encontrar respostas com efeitos significativos para melhora de performance;
- A metodologia adotada de um projeto de análise dos experimentos com uso de design robusto, especificamente método TAGUCHI, forneceu dados importantes e eficazes, assim como a análise de estatística aplicada que proporcionou o estudo estatístico das respostas, mesmo com uma pequena quantidade de experimentos;
- Com base nos resultados dos modelos de regressão e visualizados pelas tabelas de análise de variância verifica-se que dentre os parâmetros estipulados, a corrente média (A) afetou quase todas as respostas, apenas com exceção a área de reforço. A velocidade de soldagem (mm/min) apenas não interferiu na penetração e na área de penetração. A distância bico de contato peça (mm) influencia significativamente no reforço e no índice de convexidade. E a frequência de pulsação (Hz) não afetou nenhuma das respostas;
- De acordo com os ensaios realizados a maior largura (11,51 mm) foi obtida em corrente média de 230 A, velocidade de soldagem de 300 mm/min, frequência de pulsação de 22,22 Hz e distância bico de contato peça de 36 mm;
- O modelo estatístico de regressão produzido foi eficaz quanto ao estudo das respostas obtidas demonstrando confiabilidade nos resultados encontrados, e adequado para predição e extrapolação dos achados;
- Os gráficos de resíduos confirmaram a adequação das equações de regressão obtidas, pois apresentaram um comportamento dos dados dentro de uma distribuição de probabilidade normal;

- Os gráficos de efeitos gerados pelo modelo de regressão foram condizentes com os resultados obtidos nos ensaios, afinal as variáveis de influência afetaram positivamente ou negativamente de acordo com cada variável resposta, da mesma forma que observado nos experimentos;
- Pelos resultados do cálculo do Acerto Percentual Absoluto, onde a média foi 93,62%, e um MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) com média de 6,38%, verificamos a acurácia dos modelos estatísticos proposto para descrever o processo de soldagem.

### **Recomendações para trabalhos futuros**

A partir deste trabalho observou-se que este assunto é muito extenso, possuindo uma diversidade de outras formas de ser explorado. Podemos citar algumas linhas de trabalhos futuros, tais como:

- Análise da influência de outros parâmetros de soldagem nas variáveis respostas, como exemplo mudando a inclinação da tocha de soldagem ou da mesa onde estão os corpos de prova;
- Utilização de modelos matemáticos adotados neste trabalho em outros processos de soldagens similares;
- Utilização de outras ferramentas estatísticas para efeitos comparativos dos resultados;
- Realizar uma análise de incertezas nos dados mensurados;
- Analisar de forma mais detalhada a transferência metálica obtida durante o processo de soldagem pulsado para um estudo mais aprofundado dos oscilogramas obtidos.

## REFERÊNCIAS

ACHEBO, Joseph; SALISU, Sule. **Reduction of undercuts in fillet welded joints using Taguchi Optimization Method**. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. Vol. 3. Pg. 171-179. Nigéria, 2015.

ALVES, Lucas S.; BUENO, Pedro H. B. **Estudo Comparativo de Desempenho do Processo FCAW Utilizando como Gases de Proteção 100%CO<sub>2</sub>, Ar + 25% CO<sub>2</sub> e Ar + 40% CO<sub>2</sub> Eletrodo Tubular E71T-1 como Consumível**. 75f. Universidade de Brasília – Projeto de Graduação. Brasília, 2016.

ALVES, Sérvulo J. F. **Estudo dos fumos e gases gerados no processo de soldagem Gas Metal Arc Welding (GMAW) em duas empresas do segmento metal mecânico de Pernambuco**. 99f. Universidade Federal de Pernambuco – Dissertação de mestrado. Recife, 2016.

ANDRADE, Augusto F. C. **Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Dissertação de Mestrado. Natal, 2012.

AZEVEDO, Tarcisio P. **Análise do desgaste abrasivo em revestimentos duros soldados com arame tubular sobre aço de alta resistência**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Trabalho de conclusão de curso. Jaraguá do Sul, 2017.

BATISTA, V; SILVA, M; MELO, R; MACIEL, T; SANTOS, M. **Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria e diluição de revestimentos de liga de níquel aplicados em aço API 5L Gr B**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. V 6, pg. 181-187. Campina Grande, 2011.

BIGLIA, Felipe M. **Análise do cordão de solda no processo de soldagem de caldeiras a vapor**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Trabalho de Conclusão de Curso. Guarapuava, 2016.

BUENO, Alexandre. **Estudo do comportamento de materiais e efeitos de parâmetros de processo para aumento de vida útil de turbinas hidráulicas tipo Francis**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Dissertação de Mestrado. São Paulo, 2017.

BONACORSO, Nelso G. **Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando a recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte.** 114f. Universidade Federal de Santa Catarina – Tese de Doutorado. Florianópolis, 2004.

CARDOSO, Fabiano; MACHADO, Adriano A; COLAÇO, Fernando H. G. **Avaliação da Geometria do Cordão de Solda Depositado com Diferentes Gases pelo Processo GMAW.** XLI Consolda – Congresso Nacional de Soldagem. Salvador, 2015.

CARMELOSSI, Michele S.; PAIVA, Anderson P.; LEME, Rafael C.; PERUCHI, Rogério S. **A análise envoltória de dados na otimização multiobjetivo do processo de soldagem MIG de rodas para veículos de grande porte.** XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador – Bahia, 2013.

CASTRO, Eliana C. J. **Avaliação de soldas produzidas por arames tubulares desenvolvidos em laboratório do tipo básico com adição de polímero como ingrediente do fluxo.** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, 2015.

CESPE-UnB. **Centro de Seleção e de Promoção de Eventos.** INPI. 2013. Disponível em <[http://www.cespe.unb.br/concursos/INPI\\_12/arquivos/INPI\\_13\\_015\\_22.pdf](http://www.cespe.unb.br/concursos/INPI_12/arquivos/INPI_13_015_22.pdf)>. Acesso em 19 out. 2019.

CORRÊA, Celso A. **Uma contribuição ao processo de soldagem de revestimento com arame tubular pulsado de um aço CA6NM aplicando o método de Taguchi.** Universidade Estadual de Campinas – Tese de Doutorado. Campinas, 2018.

CORRÊA, Celso A; TREVISAN, Roseana E. **Influência dos parâmetros da soldagem MIG pulsada e convencional na morfologia do cordão e na microestrutura.** 1º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Curitiba, 2001.

CORRÊA, Fábio R. T. **Efeito dos parâmetros de pulso sobre as características geométricas e desempenho da soldagem com arame tubular autoprotetido e corrente pulsada.** Faculdade de Engenharia da UNESP – Dissertação de Mestrado. Bauru, 2006.

CRUZ, Jorge A. G. **Uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW.** Universidade de Brasília – Dissertação de Mestrado. Brasília, 2014.

DEWAN, Mohammad W.; HUGGETT, Daniel J.; T. Warren L.; WAHAB, Muhammad A.; OKEIL, Ayman M. **Prediction of tensile strength of friction stir weld joints with adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and neural network.** NASA Technical Reports Server – NTRS. ISSN 0264-1275. Pg. 288-299. Estados Unidos, 2015.

DIAS, A; SILVA, E; COSTA, S; CORRÊA, E. **Aplicação da técnica de projeto e análise de experimento na soldagem do aço inoxidável AISI-304 com arame tubular.** 9º Simpósio de Mecânica Computacional. Universidade Federal de São João Del-Rei. Minas Gerais, 2010.

DÍAZ, Víctor V.; ACEVEDO, Francisco F.; CUNHA, Tiago V. **Uma Contribuição na Determinação das Variáveis da Corrente Contínua Pulsada para o Arame Tubular E71T-1M.** Soldagem & Inspeção – Artigo Técnico. Vol. 23, n.3, pg. 340-349. 2018.

DÍAZ, Víctor V.; DUTRA, Jair C.; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. **Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process.** InTech, 2011. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/arc-welding/hardfacing-byplasmatransferred-arc-process>>. Acesso em: 12 mai. 2020.

DUTRA, J. C. **Procedimento computadorizado de determinação, seleção e controle de variáveis na soldagem MIG/MAG.** Florianópolis: UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, 1989. 151p. Tese (Doutorado).

ELIAS, Márcio S. **Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento inox austenítico sobre aço SAE 4130.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2013.

ESAB – Centro de conhecimento. **Processos de soldagem: arames tubulares.** Disponível em <[https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_arames\\_tubulares.cfm](https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm)>. Acesso em 12 set. 2019.

ESAB – Centro de conhecimento. **Processos de soldagem: revestimento duro.** 2012. Disponível em <[https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_revestimento\\_duro.cfm](https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_revestimento_duro.cfm)>. Acesso em 23 nov. 2019.

FARIA, Robson E. **Modelagem e otimização da soldagem a ponto em chapas de aço galvanizado utilizando os métodos Taguchi e superfície de**

**resposta.** Universidade Federal de Itajubá – Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2017.

FERREIRA, Ana Carolina M. **Estudo de soldas obtidas pelo processo GMAW empregando o modo de transferência metálica por spray com misturas de proteção Ar+12%CO<sub>2</sub> e Ar+12%CO<sub>2</sub>+0,4%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.** Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Dissertação de Mestrado. Campos do Goytacazes, 2018.

FORD, Clay. **Understanding Q-Q Plots.** University of Virginia Library. Research Data Services + Sciences. Virgínia, 2015. Disponível em: <<https://data.library.virginia.edu/understanding-q-q-plots/>>. Acesso em: 25 mai. 2020.

FRENCH, I.E.; BOSWORTH, M.R. **A comparison of pulsed and conventional welding with basic flux cored and metal cored welding wires.** Welding Journal – pg. 197-205. Woodville, South Australia, 1995.

GHAZALI, Farizah A.; MANURUNG, Yupiter H. P.; MOHAMED, Mohamed A.; ALIAS, Siti K.; ABDULLAH, Shahrum. **Effect of process parameters on the mechanical properties and failure behaviour of spot welded low carbon steel.** Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES). Universiti Malaysia Pahang. Volume 8, pg. 1489-1497. Malásia, 2015.

GERDAU. **Aços para construção mecânica GERDAU – 1020.** Disponível em <<https://www.gerdau.com/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/Gerdau%20-%201020.pdf>>. Acesso em 22 out. 2019.

GOMES, Enedina B. **Análise do comportamento da soldagem por curto-circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi.** Universidade Federal de Itajubá – Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2006.

GOMES, José H. F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico.** Universidade Federal de Itajubá – Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2010.

IDRIS, Mohamad N.; ZAHARUDDIN, Mohd F. A.; SHIN Seungmin; RHEE, Sehun. **Estimation of weld bead geometry of gas metal arc welding process using artificial neural network.** Journal Mekanikal. Pg. 23-30. Malásia, 2018.

JOPEMAR. **As aplicações do aço inoxidável martensítico**. Tanque de aço inox. 2016. Disponível em <<http://www.tanquedeacoinox.com.br/as-aplicacoes-do-aco-inoxidavel-martensitico/>>. Acesso em 08 nov. 2019.

KUMAR, C. L.; VANAJA T.; MURTI, K. G. K; PRASAD, V. V. S. H. **Optimization of mig welding process parameters for improving welding strength of steel**. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – volume 50. Dundigal - Hyderabad, 2017.

KUNTZ, Maiquel R. K. **Análise comparativa entre a soldagem com arame sólido e metal cored no processo multipasses**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Trabalho de Conclusão de Curso. Panambi, 2016.

KURTULMUS, Memduh; YUKLER, Ahmet I.; BILICI, Mustafa K.; CATALGOL, Zarif. **Effects of welding current and arc voltage on FCAW weld bead geometry**. International Journal of Research in Engineering and Technology. Volume: 04. Istambul – Turquia, 2015.

KUWAHARA, Eduardo M. S. **Medição da morfologia do cordão de solda através de imagens 3D**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Trabalho de Conclusão de Curso. Cornélio Procópio, 2016.

LUZ, Mauro A.; JÚNIOR, Jaime C. S.; BRANDI, Sérgio D. **Comparação da Taxa e Eficiência de Deposição entre os Consumíveis ER70S-6 e E71T-1C**. Soldagem & Inspeção. Vol. 20. Pg. 2-15. 2014.

MACEDO, Ricardo V. **Recuperação de turbinas hidráulicas danificadas por erosão cavitacional por soldagem com aço inoxidável/cobalto**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira, 2014.

MALVA, Maria M. F. **Análise de Resíduos**. Curso de Especialização em Análise de Dados - Apostila. Escola superior de tecnologia e gestão de Viseu - ESTGV. 2008. Portugal. Disponível m: <<http://www.estgv.ipv.pt/Paginas/Pessoais/malva/Estatistica%20Aplicada/An%3%A1lise%20Res%C3%ADduos.pdf>>. Acesso em: 14 mai. 2020.

MELO, Vinícius S. **Efeito do tipo corrente usada em soldagem GMAW na resistência ao riscamento de depósitos de Fe-Cr-C.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2018.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Física do Arco Elétrico - Soldagem I.** Universidade Federal de Minas Gerais - Apostila. Belo Horizonte, 2012.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V. **Introdução aos processos de soldagem - Soldagem I.** Universidade Federal de Minas Gerais - Apostila. Belo Horizonte, 2000.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V. **Pequeno histórico da soldagem.** Universidade Federal de Minas Gerais - Apostila. Belo Horizonte, 2012.

MONDAL, Ajit; SAHA, Manas K.; HAZRA, Ritesh; DAS, Santanu. **Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens.** Journal Cogent Engineering. Grupo Taylor & Francis. Volume 3. 2016. Disponível em: < <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2016.1143598>>. Acesso em: 11 mai. 2020.

MONTEIRO, Alberto C. **Estudo do comportamento dos aços ferramentas soldados em fadiga.** Universidade Federal do Pará – Dissertação de mestrado. Belém, 2011.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** Rio de Janeiro: LTC Editora, 2012 (5ª Edição).

MOREIRA, Hamilton S. **Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG e da Morfologia do Cordão no Comportamento à Fadiga de Juntas Soldadas de um Eixo Traseiro Veicular.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Dissertação de Mestrado. São Paulo. 2008.

MOTA, Carlos A. M.; NASCIMENTO, Alexandre S.; GARCIA, Douglas N.; SILVA, Diego A. S.; TEIXEIRA, Felipe R.; FERRARESI, Valtair A. **Revestimento de Níquel Depositado pela Soldagem MIG e MIG com Arame Frio.** Soldagem & Inspeção. Vol. 21, nº 04. São Paulo, 2016.

MUSARDO, Gustavo B. **Análise microestrutural de revestimentos usados no reparo de turbinas hidráulicas danificadas pela cavitação.** Universidade Estadual Paulista – Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira, 2006.

NETO, Cyro R. P. **Otimização do processo de solda TIG no aço tubular AISI 304 por meio da análise de relação Grey-Taguchi.** Universidade Federal de Santa Maria – Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2018.

NOURI, M.; ABDOLLAH-ZADEH, A.; MALEK, F. **Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding.** J. Mater. Sci. Technol. Volume 23, n. 06. Irã, 2007.

PESSOA, Antônio R. P. **Revestimento de ligas de níquel pelo processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito.** Universidade Federal do Ceará – Dissertação de Mestrado. Fortaleza, 2009.

PESSOA, Edson F. **Soldagem de revestimento com ligas de níquel empregando o processo MIG/MAG com duplo arame para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural.** Universidade Federal do Ceará – Tese de Doutorado. Fortaleza, 2014.

PHADKE, M.S. **Quality Engineering Using Robust Design.** Livro, 342 pgs. New Jersey, 1989.

PRABHU, R.; ALWARSAMY, T. **Study and investigations on process parameters for bead geometry during cladding by pulsed MIG welding process.** International Review of Mechanical Engineering. Vol. 8, N. 4. Índia, 2014.

PRASAD, Kondapalli S.; RAO, Chalamalasetti S.; RAO, Damera N. **Study on factors effecting weld pool geometry of pulsed current micro plasma arc welded AISI 304L austenitic stainless steel sheets using statistical approach.** Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 790-799. Índia, 2012.

RIJEZA Metalurgia. **Turbinas hidrelétricas Francis: Revestimentos contra Desgastes.** Estudo de caso. Disponível em <<https://pt.slideshare.net/rijeza/estudo-de-caso-turbinas-de-hidreltricas-francis>>. Acesso em 03 nov. 2019.

RODRIGUES, Lucilene O. **Análise e otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular.** Universidade Federal de Itajubá – Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2005.

RODRIGUES, Sandra C. A. **Modelo de regressão linear e suas aplicações.** Relatório de estágio do mestrado. Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2012.

SANTANA, Ana Luiza B. **Influência da corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame tubular no desgaste abrasivo de revestimentos depositados pelo processo TIG alimentado arame frio.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Trabalho de Conclusão de Curso. Curitiba, 2016.

SANTOS, Aureliano X.; MACIEL, Theophilo M.; SANTANA, Renato A. C. **Avaliação de revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial.** Rev. Bras. Apl. Vac. Vol. 34, N°3, pg. 128-140. Campinas, 2015.

SARNI, Mírian I. J. **Estudo da soldagem GMAW convencional e pulsada de aço estrutural temperado e revenido utilizando eletrodo de alma metálica.** Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Dissertação de Mestrado. Bauru, 2011.

SCHONS, Marcelo R. **Estudo da distorção na soldagem MAG robotizada em chapas de aço DOMEX 700 com espessura de 6,35mm.** Faculdade Horizontina – FAHOR. Trabalho de Conclusão de Curso. Horizontina, 2015.

SILVA, Eduardo M. **Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular utilizando as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente.** Universidade Federal de Itajubá – Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2006.

SILVA, Fábio G. **Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem FCAW com Adição de Arame Frio, Aplicado a Indústria Naval.** Universidade Federal do Pará – Dissertação de Mestrado. Belém, 2010.

SILVA, Gulliver C. **Análise comparativa do cordão de solda gerado pelos processos de soldagem FCAW e SMAW na soldagem de aços de baixo teor de carbono.** Universidade Federal de Juiz de Fora – Trabalho de Conclusão de Curso. Juiz de Fora, 2016.

SIQUEIRA, Eduardo, F.; SILVA, Edson R. **Processo de solda de liga dura.** Universidade de Rio Verde – Trabalho de Conclusão de Curso, 2016.

SIVARAMAN, K.; KULKARNI, D.V.; DE, A. **Pulsed current gas metal arc welding of P91 steels using metal cored wires**. Journal of Materials Processing Technology (229) – pg. 826-833. Índia, 2016.

SOLCI, Arnaldo M. **Soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa**. Apostila. White Martins Gases Industriais S/A, Bauru, 2015.

SOUZA, Claudio I; FERRARESI, Valtair A. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal**. Soldagem & Inspeção – Artigo Técnico. Vol. 18, nº03. São Paulo, 2013.

SPEZIALI, Lucas M. **Análise da influência do pré-aquecimento, gás de proteção e tecimento na diluição e dureza de revestimento de Inconel 625 ao substrato de aço carbono por processo MIG/MAG**. Universidade Federal de Goiás – Trabalho de Conclusão de Curso. Goiânia, 2018.

SREERAJ, P.; KANNAN, T.; SUBHASIS, M. **Prediction and optimization of stainless steel cladding deposited by GMAW process using response surface methodology, ANN and PSO**. International Journal of Engineering And Science, v.3, n.5, p.30-41. Índia, 2013.

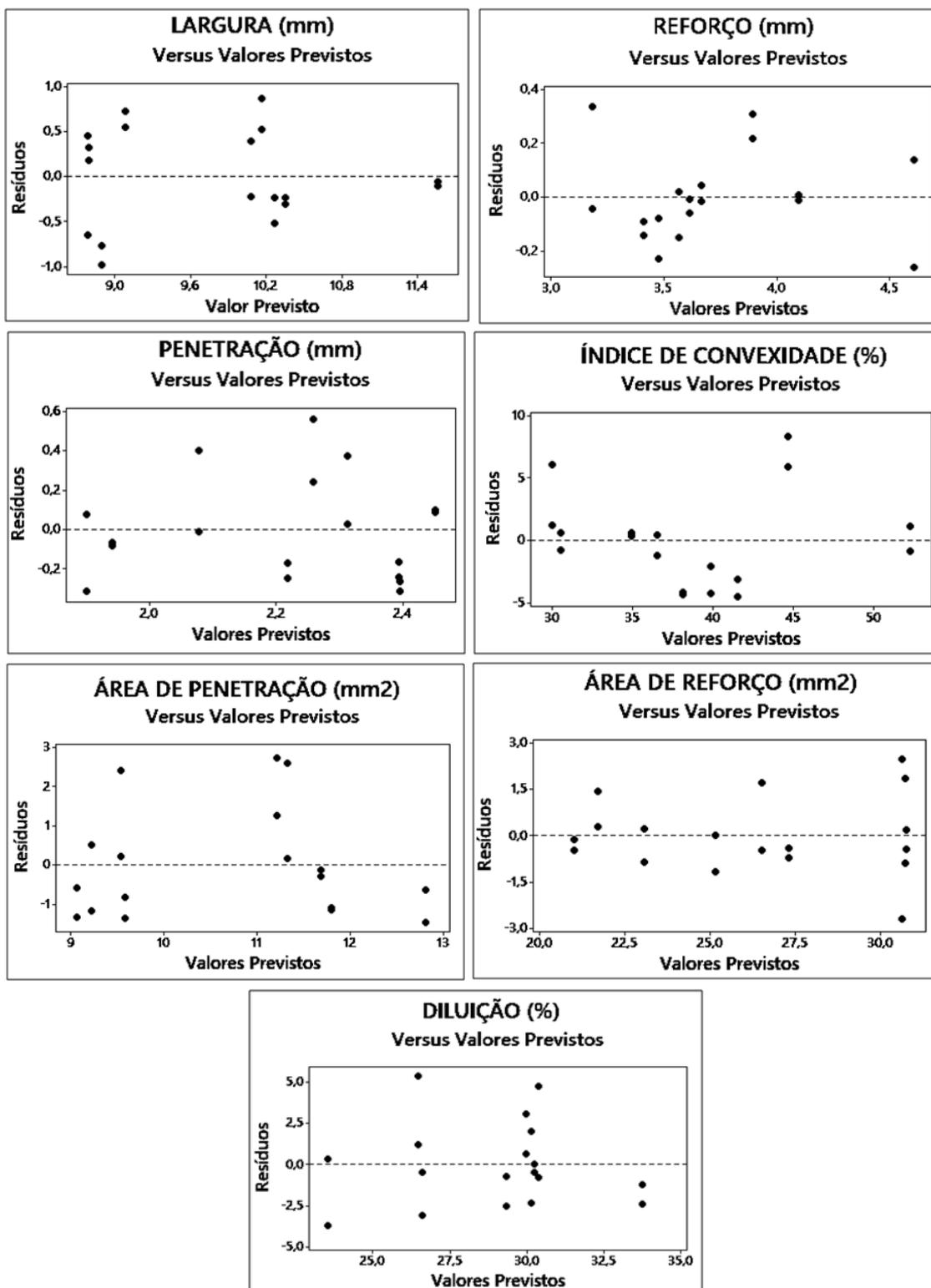
SREERAJ, P.; KANNAN, T.; SUBHASIS, M. **Estimation of optimum dilution in the GMAW process using integrated ANN-GA**. Journal of Engineering, v.2013, 17 pgs. Índia, 2012.

STARLING, C.; MODENESI, P.; BORBA, T. **Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares em Polaridade Negativa**. Soldagem e Inspeção, v.16, p.350-359, 2011.

ZANELLA, Igor G. **Influência da potência de plasma nas características da superfície do aço inoxidável martensítico AISI 420 nitretado a baixa temperatura**. Universidade Federal do Paraná – Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2018.

## ANEXOS

### A) Análise de Resíduos: Resíduos x Valores Previstos



## B) Análise de Resíduos: Resíduos x Ordem de Observação

