

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO**

**Cyro Rei Prato Neto**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA TIG NO AÇO TUBULAR  
AISI 304 POR MEIO DA ANÁLISE DE RELAÇÃO GREY –  
TAGUCHI**

Santa Maria, RS  
2018

**Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da  
Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.**

Prato Neto, Cyro Rei Prato Neto

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA TIG NO AÇO TUBULAR AISI 304  
POR MEIO DA ANÁLISE DE RELAÇÃO GREY - TAGUCHI / Cyro Rei Prato Neto Prato  
Neto.- 2018. 116 p.; 30 cm

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Leoni Pentiado Godoy

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2018

1. Processo de Fabricação 2. Planejamento de Experimentos 3. Soldagem TIG 4.  
Grey Taguchi 5. Qualidade I. Pentiado Godoy, Prof<sup>ª</sup>. Dra. Leoni Pentiado Godoy II. Título.

---

©2018

Todos os direitos reservados a Cyro Rei Prato Neto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só  
poderá ser feita mediante citação da fonte.

Endereço: Rua Dos Andradas, n. 2025, Centro, Uruguaiana, RS. CEP: 97502-360

E-mail: cyroprato@yahoo.com.br

**Cyro Rei Prato Neto**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA TIG NO AÇO TUBULAR AISI 304  
POR MEIO DA ANÁLISE DE RELAÇÃO GREY - TAGUCHI**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, área de concentração em Gerência de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Leoni Pentiado Godoy

Santa Maria, RS  
2018



**Cyro Rei Prato Neto**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA TIG NO AÇO TUBULAR AISI 304  
POR MEIO DA ANÁLISE DE RELAÇÃO GREY - TAGUCHI**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, área de concentração em Gerência de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção.**

**Aprovado em 23 de janeiro de 2018:**

---

**Leoni Pentiado Godoy, Dra. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Edio Polacinski, Dr. (URI - Cerro Largo)** – por parecer

---

**Romário Nogueira Dr. (UFSM)**

---

**Angela Pellegrin Ansuaj, Dra. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2018



## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a meus pais Cyro Rei Prato Filho (in memorian), a minha mãe Lúcia Delgado Claus e as minhas irmãs Juliana Claus Prato e Maria Izabel Claus Prato Bertei.*





## AGRADECIMENTOS

*Para a realização deste trabalho muitas pessoas contribuíram para que a esta pesquisa acontecesse. Agradeço a todos que dispuseram seu tempo e companheirismo em contribuir comigo. Em especial agradeço:*

*- A Deus por me proporcionar saúde para enfrentar os desafios do dia-a-dia, tornando minha vida melhor.*

*- A minha família, Lucia Delgado Claus, Juliana Claus Prato, Maria Izabel Claus Prato Bertei, por sempre estarem ao meu lado incentivando em seguir em frente sempre. Ao meu tio Paulo Lhamby Prato que acreditou na minha nova escolha e também contribuiu para que conseguisse concluir esta etapa.*

*- Ao meu amigo e conselheiro Antonio Maria de Deus Lopes, paciente, amigo que sempre buscou me incentivar a não parar os estudos.*

*- A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Leoni Pentiado Godoy, pela oportunidade de cursar o mestrado proporcionando acrescentar muito aprendizado e conhecimento na área. Agradeço a paciência para nos mostrar o caminho certo na vida acadêmica. Ao Prof. Dr. Romario Nogueira pela paciência no acompanhamento nas noites de laboratório. Ao Prof. Dr. Alexandre Buenas em acreditar na pesquisa e no conhecimento, fornecendo o apoio de um equipamento para tal realização. A prof<sup>a</sup> Angela Durand responsável pelo laboratório de química do CTISM, sempre apoiando e acreditando na pesquisa, fornecendo os reagentes necessários para as análises realizadas.*

*- Ao Centro de Tecnologia, Colégio Técnico Industrial, por sempre estarem aptos a encontrar a solução.*

*- Ao estagiário Geverson Pitaluga, uma amizade que surgiu no laboratório de soldagem.*

*- A secretaria do PPGEP Márcia e Fernando, por sempre estarem dispostos a ajudar. A secretaria administrativa do CTISM Sr. Amauri, agradeço por sempre estar disponível e apto a ajudar no que estivesse ao seu alcance.*

*- A empresa metalmecânica que atua na produção de escapamentos, Luiz Fernando e Alexandre Nascimento, por todo apoio dado a pesquisa em material e processo, acredito que a parceria tem muitos frutos a aparecer.*

*- Aos amigos, Diogo Rodrigues, Gustavo Abbad, Guilherme Malfussi, Eduardo Maronesi, Bernardo Loretto, Joao Paulo Bittencourt, Thiago Jager, André Oliveira, Arthur Espadim, Fernando Ribeiro, Henrique Schemes, Vinicius Schemes, por todo apoio que muitas vezes em um simples gesto teve uma enorme força de incentivo.*

*- As amigas que fiz durante o mestrado, Bruno Mirada Dos Santos, Murilo Sagrillo Pereira, Jovani Patias, Matheus Moro, Juliane De Freitas Batistti, Adriana Gabbi, Wagner Pietrobelli Bueno, Alexandre Ferreira, agradeço a todos pela paciência, os estudos, as risadas, os mates na UFSM, as preocupações, as indiasdas. Lembranças que ficarão na memória.*

*- Ao velho casarão 319, Marcos Romitti e Enrico Camponogara Da Silva por todo apoio e paciência vivenciados nesse período.*

*- Ademais agradeço a todos meus professores desde o eixo básico, fundamental, médio e superior por todo conhecimento passado proporcionando embasamento para o prosseguimento dos estudos.*

*- Meu muito obrigado a todos.*



*“Há caso mais digno, sofrer na mente os dardos e golpes de uma ultrajante fortuna ou tomar armas contra um oceano de calamidades?”*

**Willian Shakespeare**



## RESUMO

# OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA TIG NO AÇO TUBULAR AISI 304 POR MEIO DA ANÁLISE DE RELAÇÃO GREY - TAGUCHI

AUTOR: Cyro Rei Prato Neto  
ORIENTADORA: Leoni Pentiado Godoy

A busca pela otimização de processos na gestão de produção visando a qualidade, se caracteriza pela necessidade de identificar os níveis de fatores que implicam diretamente na tomada de decisão, sendo um fundamento básico para obter um processo satisfatório. No processo de fabricação mecânica, mais especificadamente a soldagem Tungstênio Inert Gas (TIG) com alimentação automatizada comporta-se da mesma maneira. A literatura oportuniza diversas técnicas de otimização, entretanto, algumas delas não proporcionam os níveis de influências que os parâmetros possuem no decorrer do processo executado. Frente a este cenário, este estudo tem por objetivo otimizar o processo de soldagem TIG com auxílio do robô de solda em aço AISI304 com alimentação automática de arame a frio por meio da relação *grey*- Taguchi. A pesquisa é caracterizada como experimental, no qual controla e planeja experimentos na relação de causa efeito. Inicialmente, se utilizou o Planejamento de Experimentos (DOE) aumentando a conformidade dos experimentos, na sequência, a execução da metodologia de Taguchi ao evidenciar a característica mais presente no processo, no seguinte a identificação das outras condições ótimas de processos presentes no processo via Análise Relacional Grey (GRA) e a realização do teste ANOVA constatando a influência das variáveis no processo. Nesse sentido procurou-se identificar o melhor inter-relacionamento entre as variáveis envolvidas na soldagem pelo processo Tig com alimentação automatizada. Os parâmetros de entrada são: Velocidade de soldagem ( $V_s$ ), Corrente média ( $I_m$ ), Frequência de soldagem ( $H_z$ ), e como características de qualidade obtidas pela macrografia: Largura do cordão ( $w$ ), diluição ( $D$ ), penetração ( $P$ ), altura do cordão ( $h$ ) e reforço ( $r$ ). A pesquisa obteve como resultado após a aplicação do método Grey-Taguchi as variáveis que possuem maior representação nas características ótimas de qualidade,  $A_3$ . Corrente Média 80 A,  $B_1$ . Frequência 1Hz e  $C_1$ - Velocidade de soldagem 8mm/s. A corrida de confirmação com as variáveis ótimas encontradas, proporcionou um aumento de quase duas vezes mais nas dimensões das características de qualidade, evidenciando uma possibilidade de automatização do processo no meio fabril para tal material, assim como a abertura de novos estudos com um número maior de variáveis utilizando as condições encontradas como embasamento.

**Palavras-chave:** Processo de Fabricação. Planejamento de Experimentos (DOE). Solda TIG. Grey- Taguchi. Qualidade.



## ABSTRACT

# OPTIMIZATION OF THE TIG WELDING PROCESS IN AISI 304 TUBULAR STEEL BY GRAY - TAGUCHI RELATIONSHIP ANALYSIS

AUTHOR: Cyro Rei Prato Neto  
ADVISOR: Leoni Pentiado Godoy

The search for optimization of processes in production management aiming at quality is characterized by the need to identify the levels of factors that imply the right to decision making, being a basic basis for a satisfactory process. Mechanical fabrication process, more specifically a Tungsten Inert Gas (TIG) welding with automated feeding behaves in the same way. The literature offers several optimization techniques, however, some of them do not provide the levels of influence that the parameters have in the process. Against this background, this study aims to optimize the TIG welding process with the aid of the AISI304 steel welding robot with automatic wire feed through the grey- Taguchi relationship. The research is characterized as experimental, without control which and plans experiments in the cause-effect relationship. Initially, we used Experiment Planning (DOE) to increase the compliance of experiments, in sequence, the implementation of Taguchi methodology when finding a more present characteristic in the process, without following the identification of the other Gray Relational (GRA) conditions and ANOVA test confirming an influence of variables without process. In this sense, we sought to identify the best interrelationship between the variables involved in welding by the Tig process with automated feeding. The input parameters are: Welding speed (Vs), Mean current (Im), Welding frequency (Hz), and quality characteristics obtained by macrography: Cord width (w), dilution (D), penetration (P), cord height (h) and reforestation (r). The results obtained by the Gray-Taguchi method are as follows: A3- Medium Current 80 A, B1- Frequency 1Hz and C1- Welding Speed 8mm/s. The confirmation race as variables, with a variety of results, increased almost twice as much in the dimensions of the quality characteristics, evidencing a possibility of automation of the process not a manufacturing medium for such material, as well as an opening of new studies with a number of variables used as baseline conditions.

**Keywords:** Manufacturing Process. Desing of Experiments (DOE). TIG Weld. Grey-Taguchi. Quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bases de dados vinculadas com as palavras-chave .....	31
Figura 2 – Processo de soldagem simplificado .....	37
Figura 3 – Fatores que interferem no processo de soldagem .....	37
Figura 4 – Processo TIG .....	40
Figura 5 – Características da corrente de soldagem.....	43
Figura 6 – Influência da polaridade no desempenho de processo TIG .....	43
Figura 7 – Velocidade de soldagem x tipo de alimentação do arame.....	44
Figura 8 – Processo TIG com alimentação manual .....	45
Figura 9 – Gráfico de relação da Velocidade de soldagem (vs) x Corrente média (Im) nos defeitos produzidos .....	48
Figura 10 – Características das correntes no processo TIG .....	49
Figura 11 – Comportamento corrente média no processo TIG.....	50
Figura 12 – Análise de Diluição .....	54
Figura 13 – Geometria do cordão de solda TIG.....	56
Figura 14 – Geometria da penetração na soldagem .....	57
Figura 15 – Diretrizes para delineamento de experimento .....	61
Figura 16 – Etapas de processo DOE.....	62
Figura 17 – Passo a passo execução metodologia robusta de Taguchi .....	65
Figura 18 – Diretrizes GRA .....	67
Figura 19 – Diretrizes para a realização da ANOVA em experimentos .....	71
Figura 20 – Passos a passo da metodologia experimental .....	74
Figura 21 – Peças cortadas pós preparo .....	95
Figura 22 – Imagem cordão TIG.....	95
Figura 23 – (D) Corrente x Frequência .....	96
Figura 24 – (D) Velocidade x Frequência.....	96
Figura 25 – (D) Velocidade x Corrente .....	97
Figura 26 – (P) Corrente x Frequência.....	98
Figura 27 – (P) Velocidade x Corrente.....	98
Figura 28 – (P) Velocidade x Frequência .....	99
Figura 29 – (W) Corrente x Frequência .....	100



Figura	30	–	(W)	Velocidade	x
Corrente.....					100
Figura 31 – (W) Frequência x Velocidade.....					101
Figura 32 – (r) Corrente x Velocidade.....					102
Figura 33 – (r) Frequência x Corrente.....					102
Figura 34 – (r) Frequência x Velocidade .....					103
Figura 35 – (h) Frequência x Corrente.....					104
Figura 36 – (h) Corrente x Velocidade.....					104
Figura 37 – (h) Frequência x Velocidade .....					105

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Combinações efetuadas entre as variáveis de pesquisa .....	33
Quadro 2 – Tipos de processo de solda por fusão a arco elétrico .....	38
Quadro 3 – Características dos gases de proteção possíveis de utilização na TIG .....	42
Quadro 4 – Características dos defeitos de soldagem TIG .....	58
Quadro 5 – Composição química do aço AISI 304 (em peso % ) .....	59
Quadro 6 – Composição química do arame consumível ER 308 LSI (%) .....	60
Quadro 7 – Preparação das amostras .....	79



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Total de conteúdo encontrado com as combinação entre as palavras-chave .....	32
Tabela 2 – Parâmetros de entrada e níveis experimentais .....	76
Tabela 3 – Dados experimentais utilizando DOE .....	77
Tabela 4 – Programa CNC utilizado na soldagem .....	80
Tabela 5 – Matriz ortogonal experimental com variáveis saídas analisadas .....	82
Tabela 6 – Estatística descritiva das características de qualidade do processo .....	83
Tabela 7 – Projeto Experimental Taguchi de soldagem TIG alimentado .....	85
Tabela 8 – Respostas $\bar{Y}$ para a soldagem TIG alimentada com os fatores de entrada .....	87
Tabela 9 – Respostas S/Rm na soldagem TIG alimentada .....	88
Tabela 10 – Dados normalizados GRA, métrica HB .....	90
Tabela 11 – Coeficientes Grey para os atributos experimentais e graus de relacionamentos Grade .....	91
Tabela 12 – Resultado dos níveis das variáveis de maiores representações .....	92
Tabela 13 – Análise de Variância Grade .....	93
Tabela 14 – Porcentagem explicativa do modelo encontrado .....	94
Tabela 15 – Resultados da confirmação experimental .....	95



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	Análise de Variância
A-TIG	Soldagem Tig com fluxo ativado
AWS	<i>American Welding Society</i>
CC	Corrente Constante
CFC	Cúbica de Face Centrada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EUA	Estados Unidos da America
FACW	Soldagem arco elétrico com arame tubular/ <i>Fluxed cored arc welding</i>
GRA	Análise Relacional <i>Grey</i>
GTAW	<i>Gas-Shielded Tungsten Arc Welding</i>
HB	Condição Maior Melhor
Icc	Corrente Contínua (A)
If	Corrente Final (A)
IMC	Fabricante de Fontes de Soldagem Nacional
LB	Condição Menor Melhor
LCA	<i>Life Cycle Assesment</i>
MAG	Metal <i>Active</i> Gás
MIG	Metal <i>Inert</i> Gás
NB	Condição de Critérios Não Melhores
PPGEP	Programa de Pós - graduação Em Engenharia de Produção
S/N	Sinal Ruído
TF	Tempo final de processo
TIG	<i>Tungstenio Inert Gas</i>
TS	Tempo de subida (s)
TD	Tempo de descida (s)
Ucc	Tensão da Corrente (V)

UFSM

Universidade Federal de Santa Maria

URI

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
1.1 TEMA E PROBLEMA .....	27
1.2 OBJETIVOS .....	28
<b>1.2.1 Objetivo geral</b> .....	<b>28</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>28</b>
1.3 JUSTIFICATIVA.....	28
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	35
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>36</b>
2.1 Processo de Solda.....	36
<b>2.1.1 Processo de solda Tig</b> .....	<b>40</b>
<b>2.1.2 Processo de solda automatizada</b> .....	<b>44</b>
<b>2.1.3 Qualidade do processo de solda TIG</b> .....	<b>46</b>
2.1.3.1 Parâmetros do processo de solda .....	47
2.1.3.2 Velocidade de Soldagem ( $V_s$ ) .....	47
2.1.3.3 Corrente média ( $I_m$ ).....	48
2.1.3.4 Frequência de Soldagem (Hz).....	51
<b>2.1.4 Características de qualidade do processo de solda TIG</b> .....	<b>52</b>
2.1.4.1 Características de qualidade na diluição .....	53
2.1.4.2 Características de qualidade de largura (w) e altura de cordão (h) na solda TIG ...	55
2.1.4.3 Características de qualidade de penetração na geometria do cordão de solda TIG	56
<b>2.1.5 Características de defeitos de Soldagem</b> .....	<b>57</b>
<b>2.1.6 Aço AISI304 e arame consumível ER 308 LSI – 0,8mm</b> .....	<b>58</b>
2.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE) .....	60
<b>2.2.1 Diretrizes para planejar um experimento</b> .....	<b>61</b>
2.3 MÉTODO ROBUSTO DE TAGUCHI.....	63
2.4 ANÁLISE RELACIONAL <i>GREY</i> (GRA) .....	66
2.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	69
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>73</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....	73
3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	73
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	76
<b>3.3.1 Preparo dos experimentos</b> .....	<b>78</b>
3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	79
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>82</b>
4.1 MATRIZ ORTOGONAL TAGUCHI .....	82
4.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS COLETADOS .....	83
4.3 CARACTERÍSTICAS OTIMIZADAS TAGUCHI .....	84
<b>4.3.1 Características Otimizadas Análise Relacional Grey – GRA</b> .....	<b>89</b>
4.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA .....	93



4.5 EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO .....	94
4.6 CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE DO PROCESSO DILUIÇÃO (D) .....	95
4.6.1 Penetração (P) .....	<b>98</b>
4.6.2 Largura (W) .....	<b>100</b>
4.6.3 Reforço (r).....	<b>102</b>
4.6.4 Altura de solda (h) .....	<b>104</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>107</b>
5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	108
5.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS .....	109
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em virtude do ambiente econômico hostil, para o atual mercado industrial brasileiro metal mecânico, a necessidade por melhorias e aprimoramentos em seus processos, é vista pelos empreendedores como uma renovação diante do momento instável que se vive. Dessa forma, tomadas de decisões são de grande importância nesse período, para que se obtenha vantagem competitiva.

Na conjuntura recente, a busca por determinações de parâmetros ótimos de processo que reflitam na qualidade ideal ou suficiente, está se tornando, cada vez mais, comum a procura por tais determinações. No mesmo sentido, o autor Neuman (2013) entende que é no desenvolvimento do processo de fabricação, que se definem os métodos e parâmetros que serão necessários para utilizar no processo produtivo.

Processos de fabricação mecânica podem ser divididos em conformação plástica quando aplicadas tensões inferiores ao limite de ruptura do material, e processos conformação por usinagem quando aplicada tensões superiores ao limite de ruptura possibilitando a geração de cavaco (FERRARESI, 1970), o autor também ressalta que, processos de união com a utilização de fonte de calor fazem parte de processos mecânicos dentre outros. A utilização de uma fonte de calor para realizar a união de duas ou mais peças, denomina-se soldagem, processo que integra a fabricação industrial (FERRARESI, 1970). O processo de solda pode ser caracterizado com ou sem a presença de arco elétrico, ocorrendo a separação de processos.

A soldagem TIG, procedimento este enquadrado dentro dos processos de união de materiais com a utilização de fonte calor, é um dos vários tipos de solda que pode ser caracterizado, caracterizada com diferencial de processo, a alta qualidade de soldas, pois se obtém uma poça de fusão calma e de fácil aprendizado para utilização do equipamento, também o desgaste do eletrodo de tungstênio é baixo (NAGARAJU, et al. 2015; RIBEIRO, 2012). A qualidade deste processo pode ser observada, analisando-se as soldas através de macrografias utilizadas por esta pesquisa (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Processos mecânicos são identificados por possuírem múltiplas características de qualidade, muitas vezes, carecendo de melhorias de processo. Assim, pode-se concluir que possivelmente possuem correlações, mas, não possuem o mesmo grau de importância entre as mesmas.

Para tal análise de processo, na busca por otimização, são necessárias tomar decisões durante esse desenvolvimento de pesquisa, primeiramente, a organização e planejamento de experimentos ao utilizar-se do *Design of Experiments* (DOE) (ROY, 2010; MONTGOMERY,

2012). Os autores também salientam que, esta metodologia possibilita distinguir fatores influenciáveis no processo, assim como fatores controláveis e não controláveis. Método este que visa auxiliar os experimentos expostos à otimização, pela qual se utiliza a Análise Relacional *Grey* GRA, por meio das condições baseadas no método robusto de Taguchi.

Desenvolvido no pós-segunda guerra por Taguchi, impulsionando a produtividade japonesa, concentrado atenções na qualidade dos produtos fabricados, o método robusto de Taguchi, fundamenta-se nas condições de qualidade do processo e é estruturado em projeto de experimentos, faz uso de matrizes ortogonais na redução do número de fases de testes, ferramenta que possibilita minimizar os efeitos dos fatores não controláveis (ASILTURK; AKKUS, 2011)

Na busca pela otimização do processo de soldagem, a metodologia robusta de Taguchi evidencia suas características de qualidade, mas, com ênfase em uma característica influente no processo, sendo assim, é notável a determinação de um método de análise para encontrar as outras características de qualidade baseado em Taguchi (KHOUALDIA, et al., 2016; KUMAR; RUDRAPATI; KUMAR, 2014; SATHIYA, et al., 2010).

O presente estudo utiliza a Análise Relacional *Grey*, que se dá por meio da metodologia de Taguchi, método este que é muito difundido na busca da otimização de processos, justifica-se o uso dos dados de Taguchi na GRA pois, a análise de sinal ruído (S/N) proporciona a identificação de desempenho de somente uma característica de qualidade, são nestas situações que se executa a otimização multiobjetiva (LIN; YAN, 2014; PARIDA; PAL, 2015; REN; ZHOU; WEI, 2015).

Desta forma, essa pesquisa tem como objetivo otimizar o processo de soldagem TIG com auxílio do robô de solda em aço AISI304, por meio de relação *grey*-Taguchi. Se espera que este estudo alcance a configuração ótima de processo que proporcione melhorias das características de qualidade desejadas.

## 1.1 TEMA E PROBLEMA

O cenário atual industrial brasileiro vem se recuperando da fragilidade econômica que o país enfrenta, no mesmo sentido, buscando a melhoria em seus processos fabris. Produções que possibilitem o menor custo, com a manutenção da qualidade desejada do produto, frente a esse cenário tomadas de decisões são necessárias para o alcance de tais melhorias.

A problemática da pesquisa consiste em buscar a otimização de soldagem TIG em aço tubular AISI304 por meio da análise relacional *grey* baseada na metodologia robusta de Taguchi, com o auxílio do robô de solda, e alimentação automatizada de arame a frio. Dessa forma, o tema central desta dissertação como: Qual a configuração ideal do processo de solda TIG auxiliado por robô de solda, com alimentação automática de arame à frio, no aço AISI304 tubular, que trará a otimização do mesmo?

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Otimizar o processo de soldagem TIG com auxílio do robô de solda em aço AISI304, com alimentação automática de arame a frio por meio da relação *grey*- Taguchi

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral delinearam-se os seguintes objetivos específicos sendo:

- a) realizar estudos sobre o processo Tig com alimentação automatizada;
- b) planejar os experimentos realizados por meio da ferramenta *Design of Experiments* (DOE), visando aumentar o desempenho dos experimentos e o seu planejamento;
- c) determinar os fatores que influenciam no desenvolvimento do processo por meio da Análise Relacional *Grey*, após a aplicação do Modelo Robusto de Taguchi;
- d) realizar experimento de confirmação com as condições ótimas obtidas para o processo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A procura pelo melhor desempenho aliada à plena produtividade são conceitos que impulsionam o desenvolvimento de pesquisas para obtenção de melhorias dentro dos parâmetros desejados de processo. Para a procura por um melhor desempenho são necessárias tomadas de decisões assertivas, que possuem um papel importante neste cenário com o objetivo de melhorar o desempenho dos parâmetros que influenciam diretamente o processo.

Diante deste panorama, existe a necessidade de tomada de decisões eficazes, de modo a se tornarem mais utilizadas, tornando-se permanentes ao auxílio de processos que necessitam de aprimoramentos e melhorias. No mesmo sentido, a procura pela otimização necessita de tomada de decisão, há diversos métodos que trabalham com estas frentes de pesquisa, como por exemplo o *Data Envelopment Analysis* (DEA), *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Design of Experiments* (DOE) entre outros.

A aplicação do DOE em processos de fabricação, especificadamente em processo de soldagem TIG, se deve, pelo controle dos experimentos da pesquisa (GHANI; CHOUDHURY; HASSAN, 2004; MONTGOMERY, 2012). Caracterizado como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão o DOE é uma metodologia de análise de experimentos que busca aumentar a conformidade executada, processo que envolve técnicas que influenciam no estudo da variabilidade durante sua execução (MONTGOMERY, 2012).

A definição para a escolha do método robusto de *Grey* - Taguchi é justificada por otimizar características de desempenho do processo em relação à qualidade, sugeridas pelos autores (DENG, 1989; LIN; YAN, 2014; NALBANT; GO`KKAYA; SUR, 2007; PRASANNA, et al., 2014). Tal metodologia que é relacionado a qualidade nos processos que se executa a pesquisa, pois possibilita identificar as características mais evidentes de qualidade presente no processo estudado.

A escolha do processo de solda TIG com alimentação automatizada de arame, se deve, a uma necessidade industrial de melhorar este processo, que ainda carece de pesquisa em busca de otimizações, pesquisa justificada pela sugestão dada por Ribeiro (2012). Assim segundo o autor, em sua dissertação, sugere replicações do estudo de variabilidade e influência da velocidade de soldagem no processo.

A designação dos equipamentos utilizados, o uso do robô de solda antropomórfico Yaskawa DX100 e fonte de energia IMC V4. 28 se deve a imunização do erro de operador, que possibilita sua ocorrência em processos convencionais (NILO JUNIOR, 2003).

A escolha do aço AISI304 tubular foi determinada por possuir grande utilização no meio industrial mecânico, assim como em permutadores de calor, indústrias têxteis, peças de tubulações (NEOLIDER, 2015). Material que notavelmente demonstra uma complexidade na execução do processo industrial, devido a parametrização inicial que é necessária.

Atributo para a justificativa do tema além do que foi citado, foi realizada uma análise bibliométrica, através da combinação de palavras-chave, pesquisa na qual se destacou o tema abordado, a investigação desenvolveu-se nas principais bases de artigos, por contribuições

acadêmicas que estivessem na mesma linha ou mais próximo possível de acordo com o objetivo do estudo.

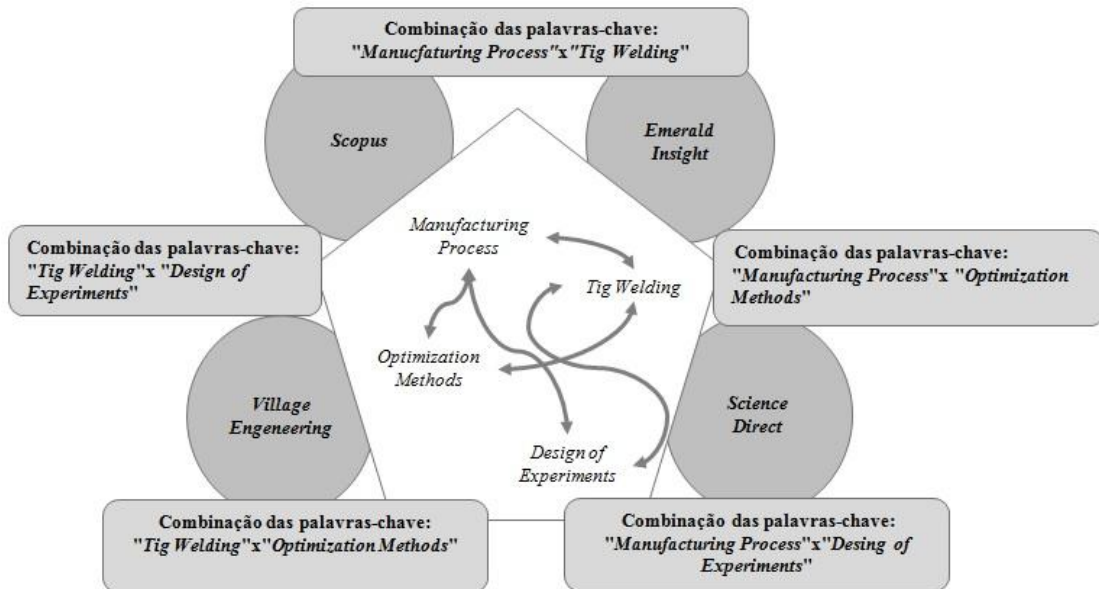
Tais combinações contribuíram para fundamentar que o tema deste trabalho demanda mais pesquisas. O conceito de soldagem TIG é bastante rico nas bases literárias nacionais e internacionais, dado que é um processo utilizado no ramo industrial. Por outro lado, ainda é pouco explorado na produção industrial a utilização do robô de solda no processo de solda TIG com alimentação automática de arame à frio, evidenciando-se ainda essa lacuna, quando associamos a um método de otimização de processo.

Diante disso, realizou-se a pesquisa bibliométrica, a mesma procurou realizar associações entre as palavras-chave tocantes ao tema do estudo, que se sucedeu em bases acadêmicas, logo por sua vez gerou a análise bibliométrica desses resultados, o que pode ser analisado na Figura 1. Assim as bases pesquisadas foram:

- a) *emerald insight*
- b) *scopus*;
- c) *science direct*;
- d) *engineering Village*.

Com realização da pesquisa nas bases acadêmicas possibilitou-se a execução de uma maior quantidade de combinações, mas se procurou estreitar-se ao tema em questão. Destaca-se que, as combinações foram repetidas nas bases que a pesquisa bibliométrica se desenvolveu.

Figura 1 – Bases de dados vinculadas com as palavras-chave



Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

Conforme a Figura 1, fundamentada na base de um pentágono, foram realizadas cinco combinações de maior relevância, as quais serviram para captar o máximo de trabalhos contidos nas bases pesquisadas, pertinentes a este trabalho. A pesquisa bibliométrica, executou-se por meio da combinação entre cinco palavras-chave segundo Figura 1 possibilitou evidenciar que os elementos constituintes do estudo são pouco abordados, caracterizando um amplo campo de pesquisa referente ao tema.

Para a realização das combinações, as palavras-chave foram adequadas no formato de busca, disponibilizadas em pares e executando o comando “*and*” de cada base pesquisada, e utilizando aspas entre os vocábulos. O estudo optou por definir uma pesquisa nos últimos seis anos nas bases literárias, a quantidade de trabalhos coletados pode ser contemplada na Tabela 1.

Tabela 1 – Total de conteúdo encontrado com combinação entre as palavras-chave

Combinações	Artigos Encontrados
<b>P1* x P2**</b>	4
<b>P1 x P3***</b>	165
<b>P1 x P4****</b>	359
<b>P2 x P3</b>	58
<b>P2 x P4</b>	13
<b>Total</b>	599

Manufacturing process\*; Tig Welding \*\*;  
Optimization Methods \*\*\*; Design of Experiments\*\*\*\*

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

Ao analisar a Tabela 1, evidencia-se que na combinação *Manufacturing Process* (P1) x *Design of Experiments* (P4) possui uma ampla literatura que abrange vários estudos nas bases que se desenvolve a pesquisa, mas, observa-se na investigação que, dentre essa literatura, encontra-se 3,62% (13/359) dos trabalhos referentes a “*Tig Welding*”. No decorrer da análise, nota-se que, ao combinar *Tig Welding* (P2) x *Optimization Methods* (P3) com *Manufacturing Process* (P1) e *Optimization Methods* (P3), observa-se que, na análise de otimização TIG com processos de fabricação, aparece com 35,15% (58/165), que se evidencia uma lacuna de pesquisa a qual justifica esse trabalho.

Fundamentando-se na análise bibliométrica, é possível listar alguns trabalhos de maior relevância, que incorporam o tema abordado. Por meio da relação de combinações executadas através das palavras-chave é possível visualizar no Quadro 1, os artigos de maior relevância, o ano de publicação, e os autores.



Quadro 1 –Combinações efetuadas entre as variáveis de pesquisa

Associação	Título	Autores	Ano
P1 x P2	Multi-objective optimization of arc welding parameters - the trade-offs between energy and thermal efficiency	Yan et al.,	2017
	Novel manufacturing process of nanoparticle/Al composite filler metals of tungsten inert gas welding by accumulative roll bonding	Fattahi et al.,	2015
	Stable keyhole welding process with K-TIG	Liu et al.,	2016
P1XP3	Porosity content control of CoCrMo and titanium parts by Taguchi method applied to selective laser melting process parameter	Joguet et al.,	2016
	Optimizing the weld bead characteristics of super austenitic stainless steel (904L) through grey-based Taguchi method.	Sathya et al.,	2010
	A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing	Tang; Mak; Zhao	2016
P1 x P4	Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study	Madan et al.,	2014
	Implementation of Taguchi methodology in optimization of developed jigs and fixtures for production of paddy weeder	Shrivastava e Verma	2016
	Environmental implications of the use of agglomerated 1 cork as thermal 2 insulation in buildings	Sierra- Perez et al.,	2016
P2 x P3	Minimizing Dimensional Variation and Robot Traveling Time in Welding Stations	Carlson et al.,	2014
	Genetic algorithm for optimization of welding variables for height to width ratio and application of ANN for prediction of bead geometry for TIG welding process	Nagesh e Datta	2010
	Application of optimization techniques and the enthalpy method to solve a 3D-inverse problem during a TIG welding process	Gonçalves; Carvalho; Guimarães	2010
P2 x P4	Influence of the welding speed on the distortion of thin stainless steel plates - numerical and experimental investigations in the framework of the food industry machines	Tchoumi; Peyraut; Bolot;	2015
	Optimization of A-TIG welding of duplex stainless steel alloy 2205 based on response surface methodology and experimental validation	Korra; Vasudevan; Balasubramanian	2015
	Development of Activated Flux, Optimization of Welding Parameters and Characterization of Weld Joint for DMR-249A Shipbuilding Steel	Pamnani et al,	2016

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

A obra de Yan, et al. (2017), contribui para a pesquisa através da abordagem, ao otimizar um processo na indústria de transformação, deve-se atentar para os efeitos dos impactos no meio ambiente, como influências da eficiência energéticas no processo de fabricação. No mesmo sentido, Carlson, et al. (2014), afirmam que as tomadas de decisões no processo de produção possuem um potencial de causar impactos sustentáveis com efeitos na produção, com isso, somando maior atenção para tecnologias avançadas em detrimento da minimização dos impactos ambientais ao meio. Nota-se que, os autores utilizaram análise

multicritério, assim como, mais de uma variável de entrada, e a eficiência térmica e consumo energético de processo.

Quando se abordam métodos de otimização, a literatura contribui com diversas e variadas metodologias que se utilizam em casos gerais e específicos, nos estudos de Sathya, et al. (2010), utilizaram a análise relacional *grey* baseada no método de Taguchi, pesquisa está, detém como objetivo principal, otimizar o “pacote” de entrada no processo de soldagem GMAW, considerando as características de saída como largura, altura de cordão e profundidade, ensaios realizados no material AISI 904L, obtendo melhores condições de soldadura, garantindo a qualidade desejada no processo. Outra visão de otimização nota-se na obra de Tang; Mak; Zhao, (2016), ao possibilitar otimizar o processo de fabricação de aditivos para impressões 3D por meio do método *Life Cycle Assesment* (LCA), implementando na fase de projeto, e também, posteriormente, ao comparar o efeito do jateamento de acabamento à fresagem CNC.

Nos estudos de Tchoumi; Peyraut e Bolot (2015), caracteriza-se em determinar distorções, na soldagem TIG no aço inoxidável 316L, utilizado em equipamentos da indústria alimentícia. Os estudos foram baseados na metodologia *Desing of Experiments* (DOE) e, após utiliza-se uma análise de resposta superficial com a intenção de obter a relação entre as variáveis do processo.

A pesquisa de Pamnani, et al. (2017), baseia-se em desenvolver o fluxo ativado A-TIG no aço DMR-249A, na busca pela otimização do processo, para sua obtenção realizou-se a mudança de variáveis no processo de soldagem, assim como sua confirmação em análises micro estruturais e testes de ductilidade e impacto na região da solda.

O restante dos artigos citados no prosseguimento da pesquisa foi utilizado para o enriquecimento do referencial teórico. Foi possível ressaltar a importância do tema por meio da justificativa e análise bibliométrica realizada neste estudo. A relevância do estudo foi notória esperando-se assim, que tal fato enriqueça o presente trabalho.

Justifica-se a presente pesquisa, a partir dos resultados, por deterem uma total capacidade de aplicação nos processos industriais ligados ao tema, em uniformidade na relação com a Engenharia de Produção, pois no ato de otimizar qualquer processo industrial se objetiva produtividade e melhorias no sistema de produção.

#### 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O estudo é composto por cinco capítulos. Ademais, abordaram-se sucintamente os tópicos presentes nesta pesquisa, ressaltando sua importância no trabalho.

No início da pesquisa aborda-se o capítulo 1, no qual contempla contextualização do tema em questão, apresentando o problema de pesquisa, objetivo geral, objetivo específico, justificativa e importância.

Em seu desenvolvimento, no capítulo 2 apresenta-se o referencial teórico, a fim de estruturar e fundamentar a pesquisa com o que a literatura pesquisada oferece de forma consistente. São estas informações que possibilitam a compreensão do tema estudado, e por consequência facilitarão o entendimento.

No seguimento do estudo, o capítulo 3, tem como finalidade, apresentar um relato detalhado sobre a metodologia que será utilizada na execução do presente estudo. Esta explica a forma de coleta dos dados, forma do modelo de compilação dos dados, equipamentos utilizados e métodos

O capítulo 4 fornece informações relacionadas aos resultados encontrados nesta pesquisa. Por fim no capítulo 5, se aborda a conclusão deste estudo aonde se encontram a influência, limitações e propostas para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

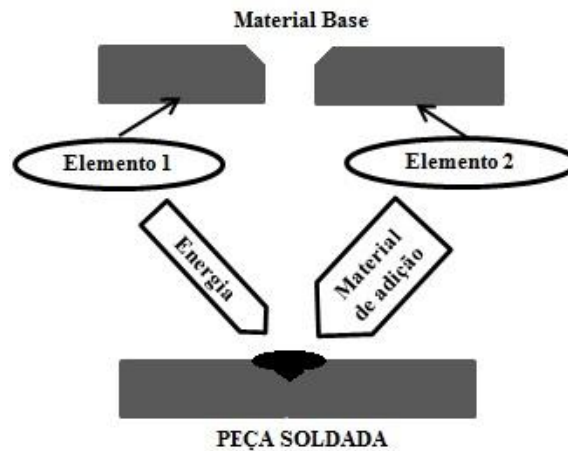
Nesta seção, são apresentadas informações e argumentações com o objetivo de obter um maior conhecimento nos temas referentes à abordagem desta pesquisa, assim como, as restrições que balizam o estudo, as características do processo de soldagem TIG; seguido do embasamento necessário para o entendimento dos parâmetros de processo que servirão para o planejamento de experimentos; por fim, a explicação do método robusto de otimização de Taguchi, e as análise *grey* que serão utilizadas na busca dos parâmetros ótimos de processo, assim como, o teste de ANOVA que possibilitará descobrir qual a maior influência das variáveis no processo de otimização.

### 2.1 PROCESSO DE SOLDA

Caracterizado como processo de fabricação, a solda conceitua-se pela união (coalescência) de duas ou mais peças, transformando-se em uma única peça por meio de fusão, ou sem aquecimento, desde que haja respeitabilidade de condições previstas (AWS, 1993; QUITES, 2011; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Ademais, Bracarense (2000) disserta sobre a existência do processo via fricção, demonstrando a versatilidade do processo.

Conforme Quites (2011), o desenvolvimento do processo supracitado teve seu impulso durante o período da II Guerra Mundial, para auxílio e beneficiamento da indústria aeronáutica e marítima apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido apenas no século XIX. A Figura 2 ilustra simplificada a maneira como ocorre o processo de soldagem.

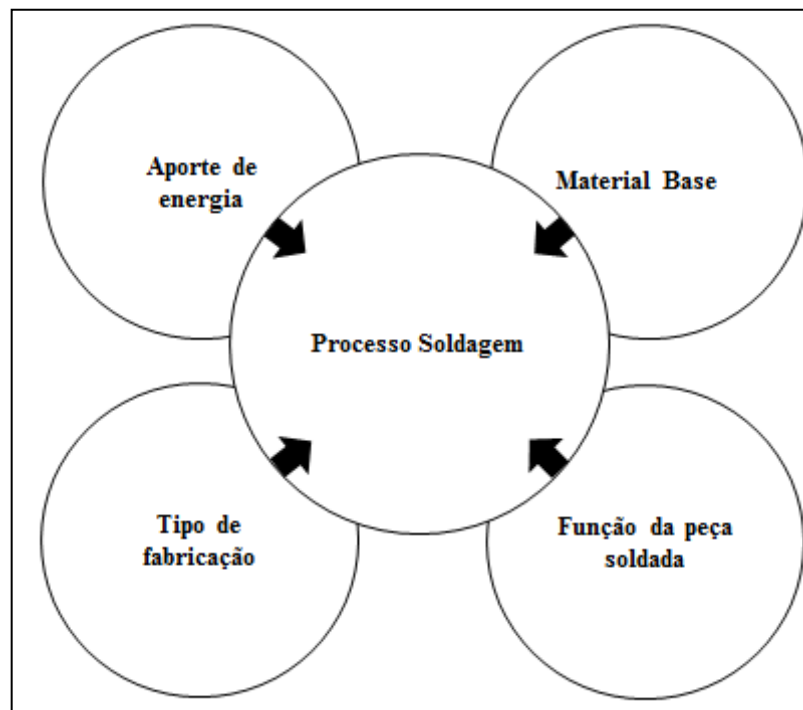
Figura 2 – Processo de soldagem simplificado



Fonte: Adaptado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Na Figura 2, percebe-se que o processo de soldagem envolve dois elementos de base que, por meio do aporte de energia e material de adição, procede a união dos mesmos, resultando em uma única peça. Vale ressaltar que, a dita união depende das variações possíveis de seus influentes. A Figura 3 remete tal informação.

Figura 3 – Fatores que interferem no processo de soldagem



Fonte: Adaptado (BRACARENSE, 2000).

O processo de soldagem possui diferentes variáveis influentes no seu desempenho, desde o tipo material de base, até a própria função posterior da peça a ser soldada. Por exemplo, quanto à função da peça soldada, pode-se necessitar de diferentes características de qualidade (BRACARENSE, 2000; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Wainer, Brandi; Melo (1992) destacam a classificação dos processos de soldagem. Conforme os autores, a solda pode se dar por fusão (a chama, a arco, em banho de escoria, plasma, etc) ou por pressão (a resistência elétrica, a indução, a atrito, etc). Na soldagem por fusão a arco, foco deste estudo, há diferentes tipos de processos e especificações de solda, dependendo desde o tipo de material a ser utilizado na união até consideração da necessidade funcional do produto acabado. O Quadro 2, identifica os tipos de processos de fusão por arco elétrico além de suas vantagens, desvantagens e aplicações.

Quadro 2 – Tipos de processo de solda por fusão a arco elétrico

(continua)

<b>Soldagem com arco</b>			
<b>Processo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Eletrôdo revestido</b>	Baixo custo	Mudança de eletrodo.	Utilizado na fabricação e manutenção.
	Sem grandes ajustes estruturais (posição)	Mão de obra habilidosa.	
	Processo versátil no projeto e execução.		
<b>Arco submerso</b>	Processo Automático	Somente na posição plana ou horizontal	Solda de topo ou ângulo com mais de 1m de comprimento e 5 a 50mm de espessura.
	Alta taxa de deposição	Restrito a aços.	
		Atenção no posicionamento da junta	
<b>TIG</b>	Grande versatilidade manual ou automática, tipo de junta, posição de soldagem.	Custo elevado de consumíveis.	Passo de raiz em aços ligados.
	Soldas com elevadas qualidades.	Mão de obra habilidosa.	Utilizado na união de não ferrosos e inoxidáveis.
	Adaptado para metais ferrosos e não ferrosos.		
<b>MIG gás inerte</b>	Alta qualidade para maioria das ligas	Custo elevado do gás inerte	Em aços inoxidáveis e ligas não ferrosas
	Alta taxa de deposição	Mão de obra habilidosa.	
	Proc. Semi ou totalmente automatizado	Atenção no posicionamento da junta.	
<b>MAG-CO2 com transf. por pulverização</b>	Elevada penetração	Somente posição plana	Somente aços carbonos de baixas ligas.

(conclusão)

	Alta taxa de deposição	Somente em aço de baixa liga com espessura de 6mm	Grandes produções e soldas de boa qualidade
	Baixo custo dos gases	Cuidado com o posicionamento da junta	
<b>MAG-CO2 com transf. Por curto circuito</b>	Todas as posições de soldagem	Somente para aços-carbonos e de baixa liga	Fabricação de equipamentos com chapa fina
	Boa qualidade de solda	Ocorrência de falta de fusão com soldador sem prática	Passe de raiz em chapas grossas
	Baixo custo dos gases		
<b>MIG pulsado</b>	Processo semiautomático/automático	Equipamento complexo	Aço-carbono, inox, e não ferrosos
	Todas as posições de soldagem		
	Aplicado a maioria das ligas e espessuras	Custo moderado	
	Muito boa qualidade de solda		
<b>Soldagem por plasma</b>	Soldagem automática de alta velocidade	Custo elevado do equipamento	Soldagem de metais com espessuras muito fina para MIG e muito grossa para TIG
	Espessura de 0,5 a 6mm	Somente posição plana de soldagem	
	Variedade de metais e ligas	Alinhar juntas usinadas	
<b>Soldagem por eletroescória</b>	Soldagem automática com alta velocidade	Posição vertical de soldagem	Soldagem de chapas grossas de aço
	Alta taxa de deposição	Componentes Estruturais grossos fazer tratamento térmico	
	Usado em aço-carbono e de baixa liga c/ espessuras acima de 50mm	Cuidado na montagem da estrutura	
<b>Soldagem por feixe de elétrons</b>	Elevada penetração	Equipamento com custo elevado	Ligas especiais
	Solda com excelente qualidade	Dimensões das peças limitadas ao tamanho da câmara de vácuo	Uso restrito devido ao tamanho da câmara
	Distorção Mínima	Projeto de câmara de vácuo local	Usinagem de furos
<b>Soldagem por laser</b>	Fonte de energia altamente concentrada em qualquer atmosfera	Equipamento com custo elevado	Uso restrito em espessuras menores que 30mm
		Não pode ser utilizado em superfícies polidas	Usinagem de furos
			Tratamento de modificação superficial de peças

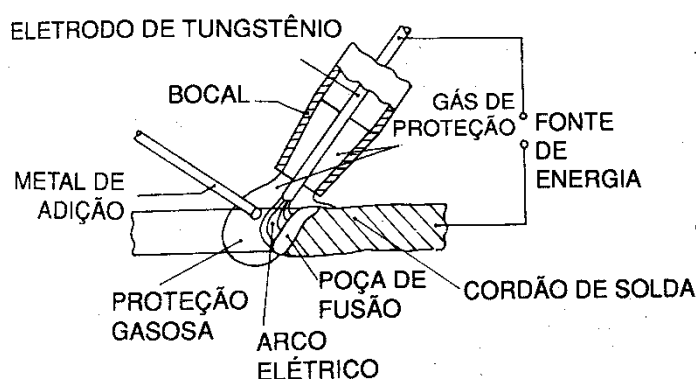
É evidenciada a existência de diversos processos dentro da soldagem. No entanto, a definição do processo adequado se dá pela consideração das variáveis envolvidas. De acordo com o Quadro 2 podem ser citados variáveis como custo, automatização, tempo, operador, posição de soldagem, espessura de material.

Dentre os processos supracitados, optou-se por realizar o estudo considerando o processo de arco TIG com alimentação automática de arame frio. Tal processo utiliza, como fonte de calor, um arco elétrico condicionado entre um eletrodo não consumível de tungstênio, e a peça a soldada (GEARY; MILLER 2013; NAGESH; DATTA, 2010; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). O tópico a seguir aborda o processo de soldagem TIG.

### 2.1.1 Processo de solda Tig

O processo de solda TIG é caracterizado como aquele que estabelece um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio e a peça a ser soldada, estando cada um conectado a um polo diferente TIG (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Conforme ASM (1993) o mesmo surgiu pela necessidade de substituição de rebites na união de peças e conjuntos da indústria aeronáutica, conforme Figura 4.

Figura 4 – Processo TIG



Fonte: Adaptado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

O processo mencionado oferece uma característica de solda limpa, visto que nenhum fluxo é utilizado, diferente do que ocorre em outros processos de fusão. Nesse caso, o gás inerte escolhido para a blindagem bloqueia a entrada de oxigênio no metal de solda,



facilitando a soldagem em diversas as posições (VENKATESAN; MUTHUPANDI; JUSTINE, 2016).

A solda TIG está presente na união de componentes militares aeronáuticos, devido à grande utilização de aços inoxidáveis nos mesmos, com exigências de profundas penetrações (LIN; WU, 2012; TSENG; HSU, 2011; VENKATESAN; MUTHUPANDI; JUSTINE, 2016). No entanto, Morisada; Fujii; Xukunet (2014) evidenciam uma limitação do processo, visto que, apresentam-se dificuldades de soldar seções com maiores espessuras devido à sua penetração característica superficial. Os autores também salientam que o processo necessita ser executado em local coberto ou protegido.

A obtenção da soldabilidade específica, permitida pela Tungstênio Inert Gás está diretamente ligado ao tipo de material a ser soldado, o qual influenciará na escolha do gás inerte adequado. Tal possibilidade proporciona alterações nas respostas de saída do processo em execução.

O arco TIG pode ser influenciado por diversos parâmetros de processo tais como: o comprimento do arco com a variação comportamental da tensão (relacionado com o gás utilizado no processo), o comportamento da tensão com corrente pulsada, a atuação da tensão na potência do arco, as mudanças da tensão referentes à alimentação de arame no arco, entre outras que por sua vez possibilitam a influência nas características de cordão (DELGADO 2000; PATEL; PATEL 2014; RIBEIRO, 2012). No entanto, conforme Sathiya, et al. (2010) as variáveis de saída dependem dos parâmetros adotados na entrada do processo, como velocidade de soldagem, taxa de alimentação de fio e etc. Ademais, quanto a forma de união, o processo TIG pode caracterizar-se como: soldagem TIG por pontos, TIG por corrente pulsada e TIG com arame quente (ELIAS, 2013; GEARY; MILLER, 2013).

Quanto ao eletrodo utilizado durante o processo de soldagem TIG, diz-se que não é consumível e pode chegar a suportar um número de ensaios extenso, visto que, é uma característica do material de tungstênio e de que, o mesmo não sofre alterações de suas propriedades quando exposto ao calor (GEARY; MILLER, 2013; RIBEIRO, 2012). Os autores ainda afirmam que, podem ocorrer melhoras na emissividade do eletrodo, quando adicionado a outros materiais radioativos como lantânio ou tório.

O gás inerte influente na região de proteção de soldagem é, geralmente, representado por: argônio, hélio, hidrogênio ou misturas (NAGESH; DATTA, 2010; PATEL; PATEL, 2014; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Sua utilização, conforme afirmam os autores citados, dependem invariavelmente, do tipo de liga que se pretende soldar além de suas características de soldagem, tais características apontadas conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Características dos gases de proteção possíveis de utilização na TIG

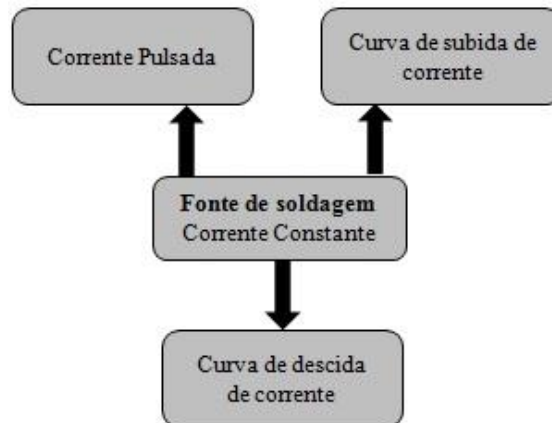
<b>Gases de Proteção Utilizados no processo TIG</b>	
<b>Argônio</b>	<b>Hélio</b>
Baixa tensão do arco	Elevada tensão de arco
Menor penetração	Maior penetração
Apropriado para chapas finas	Apropriado a maiores espessuras
Fácil abertura de arco	Dificuldade na abertura do arco
Arco estável	Arco menos estável

Fonte: Adaptado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Diante das vantagens de utilização do gás Argônio apresentados no Quadro 3 percebe-se o porquê de ser o gás mais utilizado. No entanto, para casos específicos de soldagem como, por exemplo, a união de chapas espessas, indica-se a utilização do gás Hélio, visto que permite uma penetração elevada (MACHADO, 1996). Assim percebe-se que a escolha do gás de proteção depende das condições impostas (físicas e tecnológicas) e das especificações esperadas.

Sendo um processo que possibilita escolher o tipo de corrente constante ou pulsada, por meio da utilização de uma fonte apropriada para tal (QUITES; DUTRA, 1979), os autores ainda afirmam que o arco voltaico gerado pelo processo TIG ocorre porque a emissão termo iônica requer maior tensão para impulsionar um número maior de elétrons à corrente requerida, aumentando o grau de ionização do arco, ocasionando a diminuição da resistência à passagem da corrente e com tendência a reduzir a tensão do arco inserindo particularidades opcionais conforme apresenta a Figura 5. Para o processo, necessita-se de uma fonte que apresente características estáticas tombantes conforme Figura 11 (Corrente Constante),

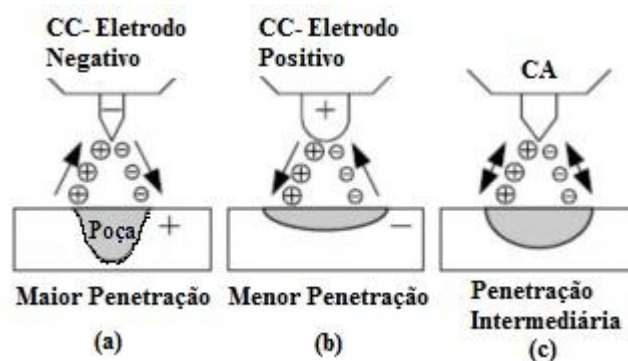
Figura 5 – Características da corrente de soldagem



Fonte: Adaptado (QUITES; DUTRA, 1979).

O processo de soldagem TIG pode apresentar três tipos de polaridade específicos na sua execução, sendo que a tomada de decisão se torna imprescindível, devido à busca por uma qualidade de solda desejada, conforme Figura 6, evidenciando que, a distribuição de calor e a penetração dependem da escolha da polaridade no TIG (KOU, 2002).

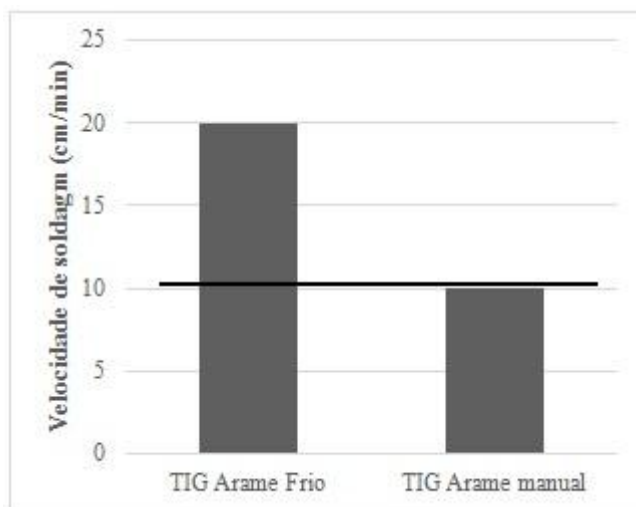
Figura 6 – Influência da polaridade no desempenho de processo TIG



Fonte: Adaptado Kou (2002).

Na alimentação do processo no arco TIG, pode-se utilizar o arame à quente *hot-wire* ou o arame em temperatura ambiente (à frio) (RIBEIRO 2012). O autor expõe que a TIG à frio, proporciona um efeito que impulsiona o aumento na produtividade de execução, visto que, a velocidade de soldagem é relativamente maior, quando comparado a apresentada com arame de TIG convencional (alimentação executada pelo operador) (DELGADO 2000; NAGARAJU, et al. 2015), conforme Figura 7.

Figura 7 – Velocidade de soldagem x tipo de alimentação do arame



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2012)

Nota-se na Figura 7, que a utilização de arame à frio no processo TIG permite uma maior velocidade de soldagem contribuindo no desempenho da solda, quando se faz necessária tal característica em um determinado caso. Diante disso, Talalaev, et al. (2012), sugerem que, quando a prioridade do processo é a velocidade de soldagem, a TIG pode ser executada de maneira automatizada, vindo a contribuir para a maior produtividade. Ante a este cenário, é que existe a motivação para realização deste estudo na busca da otimização do processo de solda TIG com sistema mecanizado.

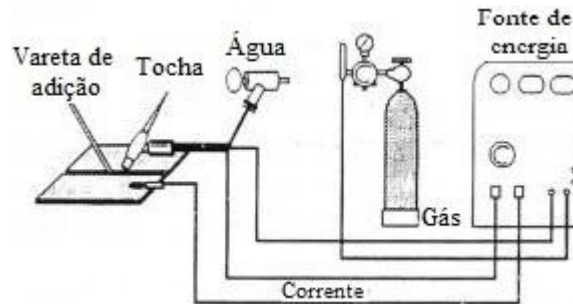
### 2.1.2 Processo de solda automatizada

Os estudos relacionados ao processo de solda automatizada tiveram início em meados da década de 60 (GERKEN,1995; LUCAS 1990). Na soldagem em termos gerais, cada processo possui suas características específicas, muitas vezes deixando de atender as necessidades de qualidade e produtividade ao mesmo tempo. Diante disso os processos de soldagem o MIG/MAG detém uma grande fatia do mercado mundial, visto que possuem um nível de produtividade mais elevado, quando comparado a outros processos de soldagem.

No mesmo sentido, Ribeiro (2000) afirma que o processo de soldagem TIG é caracterizado por gerar uma boa qualidade de solda, com características específicas e dentro dos padrões de qualidade. No entanto, nesse mesmo processo se faz necessária a adição de

material à soldagem, tornando-a muito lenta, e totalmente dependente do soldador conforme se demonstra a Figura 8. A fim de suprir tal lacuna, tem-se a possibilidade do uso de um sistema automático de alimentação (DELGADO, 2000).

Figura 8 – Processo TIG com alimentação manual



Fonte: Adaptado (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009).

Conforme Figura 8, o modelo convencional utilizado na soldagem TIG é composto por uma fonte de energia ligada em duas saídas: polo positivo e negativo, a saída de corrente para tocha, saída do gás, material de adição avulso, tal fato que remete ao modo operacional manual de alimentação.

No processo TIG alimentado, o material de adição sob forma de bobinas, alcança a poça de fusão por meio de um sistema automático de alimentação (DELGADO, 2000; DEITOS FILHO, 2016). Ainda conforme os autores o arco elétrico é aberto entre o eletrodo não consumível e a peça que se pretende realizar a união.

O processo de alimentação automática de arame é dividido em dois tipos (a frio e a quente) e também pode ser aplicado ao processo de soldagem a plasma. Suas conceituações são:

- a) arame à frio – alimentado automaticamente por um equipamento que venha a possuir um tracionador de arame, a denominação “aramé a frio” dada porque o arame é alimentado a temperatura ambiente no processo de soldagem TIG.
- b) arame à quente – no sentido inverso ao arame a frio, a alimentação do arame a quente é quando o arame sofre um pré-aquecimento antes de atingir o arco voltaico, o aquecimento se dá através da passagem de uma corrente elétrica a um trecho de 40mm a 60mm, entre o contato elétrico e o arco voltaico,

possuindo melhor taxa de deposição e alcançando maiores velocidades de soldagem (LAMBERT, GIBSTON, 1990).

No processo TIG alimentado, a velocidade de alimentação está na casa de 0,5 e 5,1 m/min, enquanto a soldagem MIG/MAG obtém velocidade de soldagem de 2,5 a 25m/min (GERKEN, 1995). Embora o primeiro seja mais lento, permite uma qualidade de solda superior.

Delgado (2000); Ribeiro (2012); Deitos Filho (2016) dissertam que não existe transferência metálica na solda TIG, devido ao fato de que a alimentação de material de adição (quando empregada) é dada externamente e mantida entre o eletrodo não consumível e a peça, proporcionando uma tensão constante. Tal fato, relacionado a estabilidade do arco elétrico justifica a qualidade superior da solda resultante.

Quanto à aplicação do TIG alimentado, diz-se que pode ser executada na soldagem de processos específicos (estruturais críticos, soldas criogênicas, tubos de aço carbono) (DELGADO, 2000; TALALAEV, et al., 2012). Vale ressaltar, que há uma aplicação específica de soldagem TIG alimentada automatizada a arame à frio, em tubos inoxidáveis de paredes finas para indústrias de alimentos, apresentando elevadas taxas de deposição.

### **2.1.3 Qualidade do processo de solda TIG**

O processo de solda TIG é considerado de baixa produtividade, visto que remete a uma soldagem lenta, porém com padrões de qualidade de soldas elevados (DELGADO, 2000; NAGESH; DATTA, 2010). Diante disso, evidencia-se a necessidade de condicionar o processo mais próximo do “ótimo” possível, para produções elevadas, mantendo os padrões de qualidade da mesma.

Na soldagem mencionada, existem variáveis que influenciam na qualidade da solda desenvolvida, tais como: equipamento, operador, material empregado, posição de soldagem, definições de parâmetros de solda, sistema de fixação da peça a ser trabalhada.

Quando referentes aos parâmetros de solda, pode-se considerar a velocidade de soldagem ( $V_s$ ), a corrente média ( $I_m$ ) e a frequência (Hz) envolvidos no desenvolvimento dos experimentos.

### 2.1.3.1 Parâmetros do processo de solda

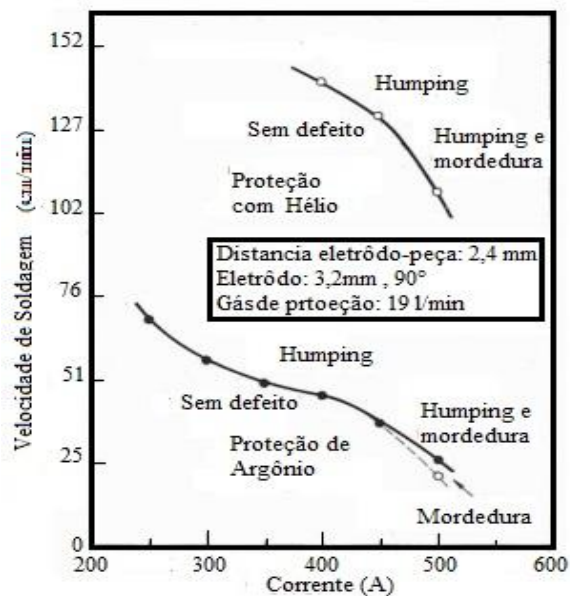
Mencionados anteriormente, os parâmetros (*inputs*) de soldagem definidos no início dos experimentos. São os mesmos que irão definir a melhor qualidade de processo diante do processo de análise de qualidade (CARLSON, et al., 2014; SCHWEDERSKY, et al., 2011).

A soldagem TIG convencional estabelece o controle do operador em sua execução, direcionando propriamente os parâmetros de velocidade de soldagem assim como a taxa de alimentação de material na solda, também ajustando a altura da tocha com eletrodo não consumível em relação a peça (NAGESH; DATTA, 2010). Tais parâmetros que serão referenciados nos tópicos a seguir.

### 2.1.3.2 Velocidade de Soldagem ( $V_s$ )

A velocidade de soldagem presente nesta pesquisa dá-se por meio de auxílio do equipamento robô de solda. Segundo Savage (1979), pioneiro em investigação de alta produtividade no processo TIG, diz-se que, no aumento da velocidade de soldagem corre-se o risco de ultrapassar os limites críticos de processo, ocasionando na deterioração na solda. Entretanto o autor afirma que, quando o processo se desenvolve em correntes menores favorece o aumento da ( $V_s$ ). Com o aumento gradativo da ( $V_s$ ) no processo de soldagem, inversamente decresce a área fundida de material, impactando significativamente a largura e penetração dos cordões (AWS, 1991; RIBEIRO, 2012). A Figura 9, refere-se ao estudo de Schwedersky, et al., (2011), que denota os efeitos de defeitos (*humping*) quando ocorrem utilizações de elevadas correntes e velocidades de soldagem.

Figura 9 – Gráfico de relação da Velocidade de soldagem ( $v_s$ ) x Corrente média ( $I_m$ ) nos defeitos produzidos



Fonte: Adaptado (SCHWEDERSKY et al., 2011).

Conforme os autores Schwedersky, et al., (2011) e Ribeiro (2012), asseguram que, no modo em que a velocidade aumenta, dificulta o crescimento da altura do cordão. Tal fato, remete a um limite de 75cm/min na ( $V_s$ ) para se obter um cordão satisfatório. Segundo Schwedersky, et al. (2011), ao ultrapassar esse limitante de velocidade de soldagem, possibilita ocorrer distorções em suas propriedades de solda. É notável que no aumento da velocidade de soldagem vindo a ultrapassar valores críticos de processo, corre-se o risco de afastamento da qualidade de solda, estando em desalinhamento com os parâmetros iniciais.

### 2.1.3.3 Corrente média ( $I_m$ )

Existem dois tipos de correntes utilizadas no processo de soldagem TIG, tais como: corrente alternada ou corrente contínua com polaridade direta. Conforme se descrevem na Figura 10.



Figura 10 – Características das correntes no processo TIG

Correntes utilizadas no processo TIG	
Corrente Alternada	Utilizada em soldas de alumínio e magnésio. Em materiais que produzem camada de oxido durante a soldagem, possibilitando a oscilação da polaridade entre a peça e o eletrodo, executando a limpeza catódica quebrando os óxidos presentes.
Corrente Contínua	Comunmente utilizada neste proceso. Utilizado em soldagem de cobre e suas ligas, níquel e suas ligas, aço-carbono, aços inoxidáveis, titânio. Eletrodo conectado no polo negativo da fonte e a peça ao polo positivo da fonte. Fluxo de elétrons no sentido eletrodo peça.

Fonte: Adaptado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Na corrente contínua quando se busca uma solda de superfície de revestimento, não há necessidade de penetração (DEITOS FILHO 2016; NILO JUNIOR, 2003). Em função disso, é empregada uma variante da corrente contínua polaridade direta, denominada corrente pulsada.

Para a execução do processo de soldagem TIG corrente pulsada, tem-se como regra, pré-definir o tipo de corrente a ser utilizada. No desenvolvimento do processo ocorre uma oscilação da corrente elétrica, entre corrente de pico e corrente de base, gerando um intervalo de permanência controlado (CARLSON, et al., 2014; DEITOS FILHO 2016).

Ao fazer uso da corrente pulsada, a corrente média ( $I_m$ ) é definida pela média ponderada das correntes de pulso e base, com soma dos tempos de cada estágio, segundo Equação 1 da corrente média.

$$I_m = I_p * t_p + I_b * t_b / t_p + t_b \quad (1)$$

Equivalendo:

$I_m$  = corrente média

$t_p$  = tempo de pico

$I_p$  = corrente de pico

$t_b$  = tempo de base

$I_b$  = corrente de base

Ressalta-se que, na utilização da corrente pulsada, o comportamento da corrente média é caracterizado pelos ciclos bem definidos da corrente de pico e de base. Evidenciando o intervalo de permanência  $t_p$  e  $t_g$  programados no controlador. No mesmo sentido que a corrente média pode ser mensurada, o processo possibilita aferir a potência média, pode calcular-se algebricamente ao utilizar-se a Equação 2 (RIBEIRO, 2012).

$$Pm = \frac{(U_p * I_p * t_p + U_b * I_b * t_b)}{T} \quad (2)$$

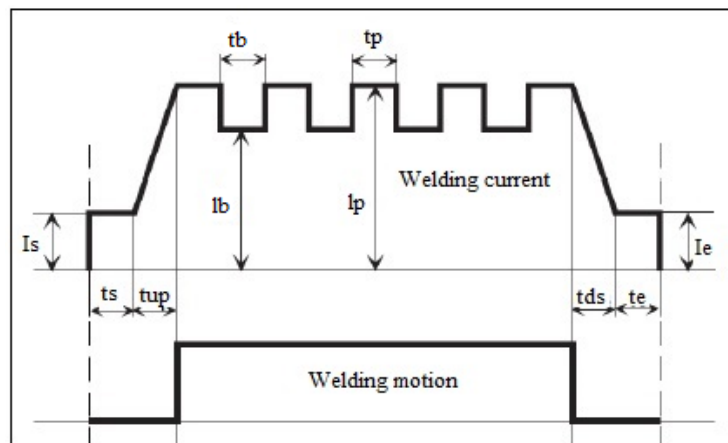
Sendo:

$U_p$  = Tensão de pico

$U_b$  = Tensão de base

A Figura 11 representa graficamente o comportamento da corrente média em relação ao movimento da solda durante o processo de união.

Figura 11 – Comportamento corrente média no processo TIG



Fonte: Adaptado (DEITOS FILHO, 2016).

Conforme Figura 11, evidencia-se o início e o término de processo em sua execução de soldagem. Nota-se que, a abertura de arco ( $I_s$ ) se mantém por um determinado tempo ( $t_s$ ) e gradativamente aumenta até a corrente de pico por certo tempo ( $t_{up}$ ). Ao alcançar término do processo que é inversamente proporcional no desenvolvimento do ciclo tombante, ocorrendo a diminuição gradativa da corrente por um determinado período ( $t_{ds}$ ), por fim ao chegar na

corrente de fechamento de arco ( $I_e$ ), que também se mantém por um determinado espaço de tempo ( $t_e$ ).

Um dos principais motivos de utilização da corrente pulsada no processo de soldagem TIG, é a vantagem de redução do aporte térmico da soldagem de revestimento. Segundo Deitos Filho, (2016) e Ribeiro, (2012), afirmam que possibilita a diminuição da diluição e penetração com esta redução de aporte térmico, diz-se que a corrente média de soldagem na corrente pulsada é inferior àquela convencionalmente utilizada.

Com a possibilidade de variação de aumento da corrente no processo, o autor, Nilo Junior, (2003) afirma que, essas variações possibilitam melhorias diretas na penetração da solda.

#### 2.1.3.4 Frequência de Soldagem (Hz)

Sendo uma variável definida pelo operador, a frequência (Hz) de soldagem varia de acordo com o tipo de corrente que pode ser: corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Uma frequência alta acima de 20 Hz em correntes contínua intensifica o aporte energético ao arco, assim como mantém a estabilidade de formação do arco, no entanto é específico para materiais com espessura superior a 12mm (BRACARENSE, 2000; DELGADO, 2000)

Uma das maiores influentes no nível de frequência no processo TIG são os tipos de correntes requeridas para o processo TIG como por exemplo: a corrente pulsada utilizada para realizar a soldagem, é caracterizada por manter em um período tempo a corrente em patamares baixos durante o processo, conseguindo sustentar o arco constante e uma poça de fusão adequada (RIBEIRO, 2012). O autor também ressaltar que, tal processo necessita de frequências de soldagem baixas que variam de 1Hz a 10 Hz para realizar a solda GTAW

Assim como a ( $V_s$ ), o nível da frequência é definido pelo operador que são previamente ajustados no planejamento experimental adequados para a utilização na pesquisa. A literatura aponta que a determinação da frequência está relacionada com o período (P) que a corrente se mantém constante, define-se que quanto menor o período, maior será a frequência conforme a Equação 3:

$$F = \frac{1}{\frac{P}{1000}} \quad (3)$$

Sendo:

$$P = (T_p + T_b)$$

Processo que é caracterizado por ter a necessidade de possuir equipamentos de soldagem com uma arquitetura de circuitos especialmente fabricados para atingir os parâmetros desejados no estudo (DEITOS FILHO, 2016; RIBEIRO, 2012). No mesmo sentido, somando atenções para o delineamento de pesquisa, aonde se mensuram os equipamentos que serão utilizados.

Segundo Bracarense (2000), quando se define uma frequência de utilização acima de 6 Hz existe a possibilidade de não encontrar uma diferença da temperatura observada no intervalo entre o tempo de pulso e o tempo de base da corrente. O mesmo autor também afirma que a contração da poça de soldagem será similar a contração em corrente não pulsada nestes casos.

Ao utilizar uma frequência na ordem de algumas unidades de kHz, o arco elétrico sofre uma constrição, isto é, eleva-se a potência específica por redução da área ocasionando um aumento da densidade energética (CARY, 1979; NOGUEIRA, 2015). Por consequência deste fato, possibilita-se o alcance de cordões de solda mais estreitos e com maior profundidade, havendo um aumento considerável na rigidez do arco e soldas com maiores velocidades de soldagem.

#### **2.1.4 Características de qualidade do processo de solda TIG**

O processo TIG é caracterizada por possuir altos níveis de qualidade de solda, e com baixos níveis de repetibilidade, isso se deve à habilidade do operador (RIBEIRO, 2012), no mesmo sentido, esta pesquisa visa substituir o operador pelo auxílio do robô de solda, e alcançar condições ótimas de processo ao utilizar tecnologia.

Segundo Rao; Deivanathan, (2014), em sua obra executaram passes de solda em chapas de aços inoxidáveis com diferentes materiais de adição, com a intenção de testar a qualidade das propriedades mecânicas do material, obtendo condições de suportar cargas de rupturas. No mesmo sentido, os autores Kannan; Kumaran; Kumaraswamidhas (2016) executaram testes para autenticar propriedades mecânicas em tubos de alumínio comercial, fazendo uso do material de adição ER 2219, ao avaliar as características de qualidade

mecânicas, submetendo em testes de resistência à compressão e valor da dureza para avaliar a força conjunta ideal.

A geometria do cordão de solda é uma multissaída complexa, por depender de variáveis estabelecidas anteriormente, que variam de cada caso específico (SHARMA; VERMA; ARORA, 2015). Evidencia-se que as características iniciais do cordão de solda são únicas, para os processos como diluição, altura de cordão, reforço, largura penetração porosidade.

Segundo Montgomery (2012), é possível verificar as relações entre respostas e variáveis independentes quando não há uma inter-relação de ambas. O autor destaca que o primeiro passo é encontrar uma aproximação adequada para a pesquisa com o objetivo de apresentar uma resposta de interesse em função dos parâmetros de processo.

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado em corpos de prova de aço AISI 304 tubular, que foram submetidos ao processo de solda TIG com alimentação automatizada. Processo baseado em variação de parâmetros, por meio das condições necessárias elencadas pelo Planejamento de Experimentos executado.

Quando se objetiva a análise dos efeitos, e as características de qualidade de processo de solda é necessário realizar a macrografia das peças que foram submetidas aos testes de experimentos. Em virtude disso, os corpos de prova foram preparados para a realização da análise, sofrendo um lixamento na região de corte com lixas que vão de 120 grãos a 800 grãos. Para identificação das características geométricas do cordão de solda, diz-se que se deve utilizar a solução química denominada Vilella (VANDER VOORT, 1984) cuja composição química é mostrada na Equação 4, para melhor visualização da área soldada.

$$Vilella = 5ml + 2gr \text{ acido pícrico} + 100ml \text{ álcool etílico} \quad (4)$$

Na utilização da solução mencionada, ao realizar o ataque dos corpos de prova se possibilita a mensuração geométrica dos efeitos provindos da variabilidade dos parâmetros considerados para o processo.

#### 2.1.4.1 Características de qualidade na diluição

Nas características de diluição idealiza-se que, o material de adição propriamente dito, e a zona afetada de soldagem possuíssem as mesmas propriedades que, as do metal de base, todavia, entende-se que é impossível este cenário, porque o metal de adição é fundido,

ao mesmo tempo, em que os metais de base são laminados ou forjados (ELIAS, 2013; RAO; DEIVANATHAN, 2014; RIBEIRO, 2012). Tal fato evidencia um desafio para a busca de uma melhor característica de qualidade em função da diluição.

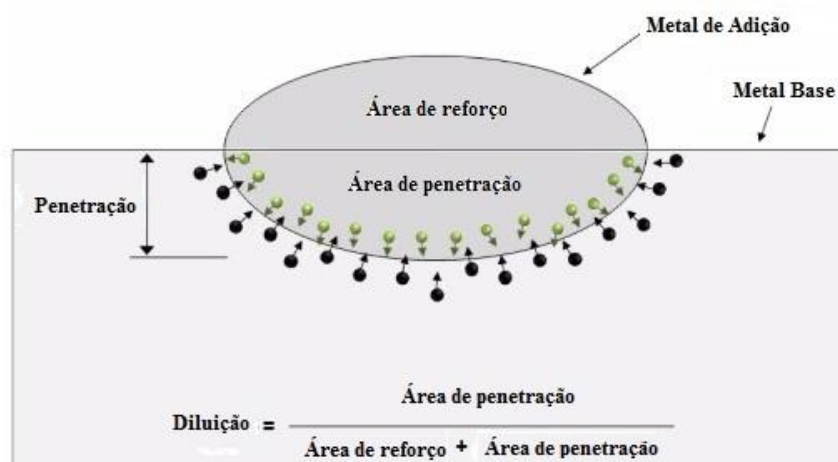
Conceitua-se diluição, como a quantidade em percentual de metal de base que entra na composição dos elementos de base que fazem parte do processo. Característica de qualidade que pode variar de 5% a 100%, quando em processos autógenos sem material de adição (BRACARENSE, 2000).

A soldagem *Gas-Shielded Tungsten Arc Welding* (GTAW) é considerada um processo que pode alcançar percentuais máximos de diluição. Tal fato justifica-se por não depender do material de adição tornando-se uma solda por fusão do próprio material de base, corroborando a isso, a liberdade do operador poder tomar a decisão de fundir a quantidade de material que achar necessário (LAMBERT; GIBSTON, 1990; SHARMA; VERMA; ARORA, 2015).

A medição da diluição no processo de soldagem TIG pode ser realizada de duas formas.

- a) diluição por medição de área: por meio da utilização de Scanner de mesa modelo Scanjeet 300 para facilitar a visualização das imagens que serão compiladas no software *IMAGE j*, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Análise de Diluição



Fonte: Adaptado Elias (2013).

Conforme Figura 12, diz-se que o início das características da área de reforço, é dado na linha de referência da metal base com término na extremidade do reforço. No sentido inverso, a área de penetração possui seu início na extremidade inferior do metal de base, e seu término caracterizado na extremidade de penetração.

- b) O autor Deitos Filho, (2016), contribui que para realizar a análise de diluição por análise química, faz-se necessário utilizar o espectrômetro de energia dispersiva, com objetivo de mensurar o teor de ferro nos cordões de solda realizados nos testes.

Pode-se optar por qual método de mensurar a diluição utilizar, dependendo das condições específicas que se procura obter, para facilitar a escolha do método de análise.

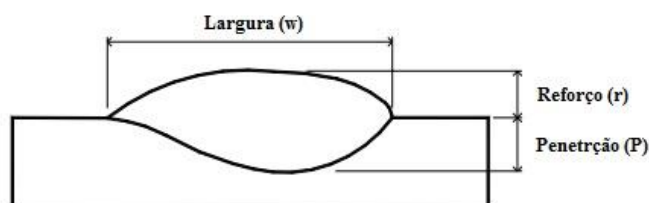
#### 2.1.4.2 Características de qualidade de largura ( $w$ ) e altura de cordão ( $h$ ) na solda TIG

Em detrimento das outras características mencionadas, a largura ( $w$ ), a altura de cordão ( $h$ ) e as suas alterações geométricas, possibilitam ajustes em determinados parâmetros buscando melhorar ou alcançar uma fase “ótima” de processo, segundo os estudos dos autores (KANNAN; KUMARAN; KUMARASWAMIDHAS, 2016; SHARMA; VERMA; ARORA 2015), que avaliaram a influência dos parâmetros iniciais na geometria de solda produzida.

A largura dentro da geometria do cordão detém um papel fundamental nas características de qualidade do cordão de solda TIG, possibilitando um ganho nas propriedades mecânicas do cordão (NAGESH; DATTA, 2010; RAO; DEIVANATHAN, 2014). Os autores também afirmam que quanto maior for a largura presente no cordão, menores serão as chances de vazamento na área soldada devido a ocorrência de um maior caldeamento de material de base com o alimentado.

Na obra de Rao; Deivanathan (2014), os autores submeteram os cordões de solda a testes para avaliar as propriedades mecânicas, identificando funcionalidade mecânica para as geometrias de cordões obtidas. Conforme a Figura 13, é possível localizar a geometria do cordão com suas respectivas posições e distinções.

Figura 13 – Geometria do cordão de solda TIG



Fonte: Adaptado (PESSOA, 2007).

A Figura 13 ilustra a geometria do cordão e suas dimensões resultantes das decisões tomadas pela adequação de parâmetros inicialmente no processo. Tal influência que depende da funcionalidade que irá desenvolver a peça ou conjunto soldado (PESSOA, 2007; RAO; DEIVANATHAN, 2014). Característica da solda que evidencia sua importância a altura do cordão solda, justifica-se que pode atuar como segurança dificultando rupturas de solda, logo a altura ( $h$ ) de solda é dada pela Equação 5:

$$\text{Altura de solda}(h) = \text{reforço}(r) + \text{penetração}(P) \quad (5)$$

Deitos Filho, (2016) contribui em sua análise que, quanto mais elevada for a velocidade de soldagem ( $V_s$ ) menores serão as chances de um reforço ( $r$ ) elevado, justificando esse fato, de haver menos tempo de permanência da tocha na posição de solda, por consequência, menos material depositado. Em virtude disso, a presente pesquisa objetiva o aporte térmico ideal definido pelo pesquisador durante a fase de parametrização, a fim de obter as melhores características de qualidade no processo TIG.

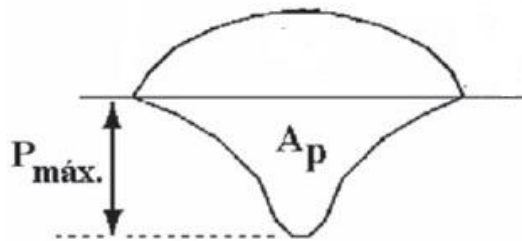
#### 2.1.4.3 Características de qualidade de penetração na geometria do cordão de solda TIG

Pode conceituar-se a característica de penetração sendo o material encontrado abaixo da superfície maior do material de base, quando se utiliza de material de adição (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009). Identificação de qualidade na solda que detém uma maior variabilidade, dependendo do tipo de soldagem, no processo TIG/ *Fluxed cored arc welding* (FACW), nota-se um aumento da percentagem de penetração na região a ser soldada (LERMEN, 2011).



De acordo com Ribeiro, (2012), ao fazer utilização de corrente contínua pulsada, que estabelece a possibilidade de controlar o nível de penetração, fator que é considerado de grande relevância na solda de raiz. Para identificação do nível de penetração de processo TIG, é necessário realizar a análise de macrografia no corpo de solda que está em processo, possibilitando evidenciar a geometria do cordão executado, conforme se apresenta na Figura 14.

Figura 14 – Geometria da penetração na soldagem



Fonte: Adaptado (STARLING; MODENESI; BORBA, 2009)

Onde:

$P_{máx}$  = altura máxima de penetração

$A_p$  = área alcançada pela penetração

As análises de macrografias buscam a melhor visualização da área soldada, evidenciando as características existentes nesta união. Conforme a Figura 14 é notável a altura da penetração assim pode-se mensurar a área atingida pelo nível de penetração na peça em percentagem.

### 2.1.5 Características de defeitos de Soldagem

Pode-se identificar como defeitos, resultados do processo ocasionados por tomadas de decisões no ante a execução, usualmente, ocorrem no metal de base, metal fundido e zonas que são afetadas termicamente. (BRACARENSE, 2000; SCHWEDERSKY, 2011; SHARMA; VERMA; ARORA, 2015).

Pode-se identificar possíveis defeitos como: Descontinuidade, fissuras, porosidade, contato do eletrodo de tungstênio. Alguns possíveis defeitos, analisados que ocorrem no processo TIG, (BRACARENSE, 2000), conforme Quadro 4.

Quadro 4 – Características dos defeitos de soldagem TIG

Falhas	Causas	Solução
<b>Erro de abertura de arco</b>	Metal de base sujo, oleoso Junta estreita Arco muito longo Eletrodo contaminado	Usar produtos químicos apropriados para limpeza, escovar área a ser soldada Diminuir voltagem, articular eletrôdo próximo ao sulco Remover porção contaminada Aproximar suporte de solda ao pequeno arco
<b>Porosidade</b>	Velocidade de soldagem elevada Falta de penetração Óleo na superfície do metal de base; Presença de O <sub>2</sub> no processo de soldagem Coalescência dos poros	Verificar fugas no fluxo de gás e resfriamento. Não soldar enquanto o metal de base estiver molhado Limpar com produto químico adequado, e atenção para os rompimentos.
<b>Eletrôdo contaminado</b>	Contato inicial com o eletrôdo Derretimento de eletrodo e ligas com metal de base Eletrodo tocando a poça de fusão	Para início alta frequência: chapa inoxidável Usar menor corrente Manter eletrodo fora da região da poça de fusão.
<b>Consumo de eletrodo inadequado</b>	Fluxo de gás inadequado Polaridade invertida Eletrodo contaminado Gás de proteção contaminado com O <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> Tamanho de eletrôdo impróprio Oxidação do eletrôdo no resfriamento	Aumentar o fluxo de gás Mudar polaridade Alterar para eletrodo maior Trocar gás de proteção Remover parte contaminada, para reiniciar o processo

Fonte: Adaptado de Bracarense (2000)

Segundo o Quadro 4, que representa as causas dos defeitos que ocorrem com maior frequência provenientes do processo TIG e sua respectiva solução, servem de auxílio para o melhor desenvolvimento do processo.

### 2.1.6 Aço AISI304 e arame consumível ER 308 LSI – 0,8mm

Os aços austeníticos são caracterizados por conter uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), material que possui resistência a corrosão proveniente de uma camada passiva e aderente. Tal material impermeável que se forma na superfície do aço, composto de cromo, somando-se a isso, notáveis propriedades mecânicas, conformabilidade, resistência ao calor assim como resistentes a corrosão em temperaturas elevadas (ROMEIRO, 1997;

SANTOS; ANDRADE; CASTRO, 2009). Em sua composição química possuem níveis de limites de no mínimo 12,0% de cromo e o máximo de 0,08 de carbono, segundo o Quadro 5.

Quadro 5 – Composição química do aço AISI 304 (em peso % )

	<b>C máx.</b>	<b>Mn máx.</b>	<b>P máx.</b>	<b>S máx</b>	<b>Si máx</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>N máx.</b>
AISI 304 %	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	8,00 – 10,50	12,00 – 20,00	0,10

Fonte: Adaptado manual técnico Neolider

O limite de escoamento do material utilizado no estado de recozido é relativamente baixo, cerca de 200 Mpa (MARTINS; PLAUT; PADILHA, 1998). Os autores afirmam que, após receber tratamento térmico, seu limite de escoamento pode alcançar cerca de 1400 Mpa, obtendo um alongamento de 10%. Em vista disso, o aumento depende das características de utilização que o material vai precisar para desempenhar sua funcionalidade.

Tal material é bastante disseminado no mercado, pois possui uma extensa utilização, como na fabricação de válvulas, recipientes farmacêuticos, equipamentos hospitalares, componentes frigoríficos, equipamentos automotivos industriais, peças para indústria têxtil, tubos, indústria petrolífera, etc.

Assim como o material AISI 304 a ser soldado, o arame para este tipo específico de material que será utilizado, também é comumente encontrado no mercado o ER 308 LSI com 0,8mm de diâmetro. Conforme relata o autor Murugan (2006), o fator do número extenso de utilização está associado à boa soldabilidade, considerável resistência à corrosão e à corrosão localizada estando apto a desenvolver eventuais esforços mecânicos.

A escolha do arame consumível no processo TIG, reforça a atenção, tanto para a parte prática, quanto para o meio das pesquisas de desenvolvimento, evidenciando a adequação de solda depositada, respeitando os parâmetros desejados para a geometria de cordão (ELIAS, 2013), conforme sua composição química, segundo consta no Quadro 6.

Quadro 6 – Composição química do arame consumível ER 308 LSI (%)

	<b>C máx.</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>S máx</b>	<b>P max</b>	<b>Si</b>	<b>Mo max</b>	<b>Cu Max.</b>	<b>Mn</b>
Er308.LSI %	0,03	19,5-22,0	9,0-11,0	0,03	0,03	0,65-1,0	0,75	0,75	1,0-2,5

Fonte: Adaptado ESAB (2005).

O arame consumido a frio durante o processo de soldagem, que agrega o elemento de base características como resistência de tração 580 Mpa e um limite de escoamento de 400 Mpa (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009).

## 2.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)

Segundo Takenuchi, (2011), o surgimento do planejamento de experimentos se deve a Ronald A. Fisher, que era responsável pelas análises de dados, e estatística na Estação Agrícola Experimental de *Rothamsted*, Inglaterra. Ao interagir com cientistas de diversas áreas, ele desenvolveu três princípios básicos para o planejamento de experimentos: aleatorização, replicação e blocagem.

A metodologia de análise de experimento *design of experiments* (DOE), busca aumentar a conformidade executada nos experimentos desejados, processo que envolve técnicas que influenciam no estudo da variabilidade durante sua execução (MONTGOMERY, 2012). Em virtude disso, o autor contribui que o planejamento de experimentos é um processo necessário, pois tem capacidade de distinguir fatores influenciáveis no processo, assim como fatores controláveis e não controláveis.

É uma ferramenta na qual auxilia na maximização de informações, a partir da aplicação da metodologia, utilizando o mínimo de recursos, mecanismo que é alcançado por meio de um design fatorial (MONTGOMERY, 2012; ROY, 2010; TAKENUCHI, 2011; ZHU et al., 2015). No mesmo sentido Gunasegaram, et al. (2009) apontam que, o método possibilita mudanças simultâneas de mais de um fator, por possuir uma ênfase estruturada em métodos estatísticos.

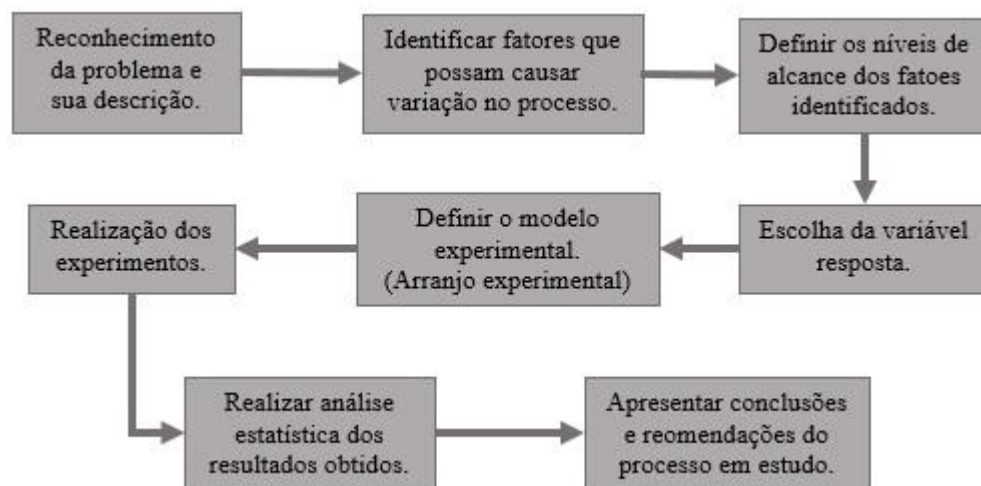
Os autores Choudhury, Rudrapati, Bandyopadhyay (2014), em sua pesquisa utilizaram a metodologia DOE, para realizar a otimização de um processo de soldagem TIG via metodologia de Taguchi, na qual buscou encontrar a melhor condição de processo.

De acordo com o exposto, essa metodologia vem contribuir para a presente pesquisa. Justifica-se isso, à medida que, a metodologia supracitada busca analisar a conformidade e o desempenho dos experimentos.

### 2.2.1 Diretrizes para planejar um experimento

Segundo Montgomery (2012), existe a necessidade de se estabelecer um conjunto de diretrizes, que devem ser obedecidas ao planejar um experimento, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Diretrizes para delineamento de experimento



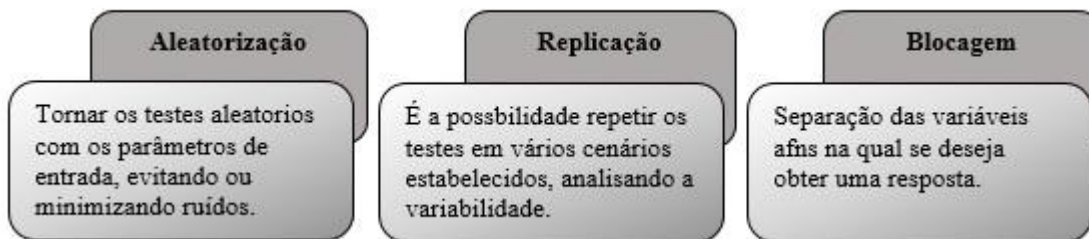
Fonte: Adaptado (MONTGOMERY, 2012).

Segundo os autores Montgomery (2012); Tchoumi; Peyraut; Bolot (2015), afirmam que para respeitar as diretrizes da metodologia DOE, tem-se que atender todos os fatores aceitáveis para a viabilidade de processo, e as variáveis que a literatura oportuniza, por meio do método.

Antes de iniciar a execução dos experimentos, há a necessidade de considerar dados históricos, assim como a aleatorização dos testes, sendo que esta última possibilita garantir a diluição da variável incontrolável no arranjo proposto (MONTGOMERY, 2012). Dessa maneira, possibilita-se reduzir as chances de uma interpretação de resultado errônea. Segundo

Montgomery (2012), pode-se definir três pilares que estruturam e definem como os experimentos devem ser conduzidos, conforme se apresenta na Figura 16.

Figura 16 – Etapas de processo DOE



Fonte: Adaptado (MONTGOMERY, 2012)

Ao finalizar esta fase, inicia-se a fase de compreensão, discussão e análise dos resultados, com o intuito de possibilitar melhorias ao processo estudado (PAIVA, 2012). Os passos posteriores a serem definidos pela pesquisa serão relacionados para estabelecer um modelo que englobe fatores selecionados anteriormente, e seus efeitos por meio de experimentos eficientes.

Tal modelo é uma equação entre os fatores definidos importantes e a resposta, que viabilize especificar as respostas. São definidos os modelos como de primeira ordem ou de ordem superior, quando se tem mais de dois fatores. Nos casos de otimização (MONTGOMERY, 2012) utiliza-se a Equação 6.

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_{12} * x_1 * x_2 + \beta_{11} * x_1^2 + \varepsilon \quad (6)$$

Sendo:

$x_1$  e  $x_2$  Caracterizam a interação entre  $x_1$  e  $x_2$ .

Os fatores encontrados, serão utilizados de maneira uniforme, justifica-se isso por seguir a ordem padrão encontrada pela metodologia DOE. Evidencia-se que, as condições experimentais serão ortogonais por meio do método aplicado balanceados (PAIVA, 2012).

No prosseguimento da utilização do DOE, diz-se que é necessário empregar o arranjo fatorial estatístico que detém características de maior conformidade, encontrado na literatura o

fatorial completo. Artificio que é executado nas fases iniciais, para a separação das variáveis assim como, suas influências no processo, que possibilitam maior integração nas respostas de saída (CHOUDHURY; RUDRAPATI; BANDYOPADHYAY, 2014; PAIVA, 2012; TCHOUMI; PEYRAUT; BOLOT, 2015).

Para Montgomery, (2012), quando se refere a planejamento fatorial completo, se designa  $k$  fatores, para um número mínimo de duas corridas  $2^k$ , sendo que esses fatores vêm a influenciar no processo. O autor também ressalta que, em sua implementação, quando há duas condições para três fatores, no caso é  $2^3 = 8$  combinações de fatores, fatores A, B e C, nos quais se designam os limites de máxima +, e mínima – condição, possibilitando realizar todas as combinações entre os fatores.

Em virtude da identificação das variáveis que possuem maior influência no processo, o método de arranjo fatorial completo, considera-se dentro das adequações para chegar na resposta (MONTGOMERY, 2012; PAIVA, 2012). Na sequência da pesquisa após a identificação das variáveis influentes, seguimento que possibilita o desencadeamento da necessidade de execução da análise relacional *grey-taguchi*.

### 2.3 METODO ROBUSTO DE TAGUCHI

Metodologia desenvolvida por Taguchi, denominada Projeto Robusto, introduziu-se na década de 1950-1960, no Japão, pós-Segunda Guerra Mundial, por consequência disso, ocorreu o aumento da produtividade industrial japonesa, pois careciam de melhorias na qualidade de seus produtos. No qual, o método foi aplicado em vários segmentos industriais, tais como: automotiva, eletrônica, fotográfica, entre outros (GHANI; CHOUDHURY; HASSAN, 2004; TAKENOUCI 2011).

Técnica estruturada em projetos de experimentos, útil na redução do número dos testes, ferramenta que utiliza matrizes ortogonais que possibilitam minimizar os efeitos dos fatores não controláveis. Tal método abordado consiste na diminuição do tempo experimental, aliado na redução de custo para descobrir fatores significantes em um período curto de tempo (ASILTURK; AKKUS, 2011).

Portanto, Genechi Taguchi (1986) afirma que, o método de Taguchi revela que a qualidade de um produto, em termos de perda para a sociedade, é a partir do momento que esse produto chega na sua função de utilização pelos clientes com mau funcionamento, possibilitando o aumento da poluição, elevados custos de manutenção. Tal metodologia destaca os fatores importantes da qualidade, desde o planejamento de um produto,

possibilitando atuar na produção como também na assistência técnica disponibilizada (GHANI; CHOUDHURY, HASSAN 2004).

Metodologia de utilização simples, eficiente e sistemática, a qual possibilita a busca de uma condição ótima de processo. Tal técnica evidencia que, permite minimizar ou maximizar os processos de fabricação, o método é identificado por concentrar-se nas características de qualidade do produto/processo executado na pesquisa (CHOUDHURY; RUDRAPATI; BANDYOPADHYAY, 2014; SATHIYA, et al., 2010).

De acordo com os autores Taguchi; Elsayed; Hsiang, (1990) propõe-se o uso de arranjos ortogonais para formar uma matriz de experimento, na necessidade de encontrar o melhor nível de cada parâmetro. Ao determinar a possibilidade de separar cada parâmetro e sua influência no processo, metodologia esta que é uma das mais utilizadas em otimizações de processos industriais (GHANI; CHOUDHURY, HASSAN 2004).

Após a realização das matrizes ortogonais, que avaliam a influência dos parâmetros na variabilidade das características de qualidade do produto. Taguchi; Elsayed; Hsiang, (1990), propõem a utilização de três análises de características de qualidade, segundo as equações 7, 8 e 9.

Característica nominal melhor:

$$\frac{S}{N} = \log_{10} \frac{y}{S_y^2} \quad (7)$$

Característica menor melhor:

$$\frac{S}{N} = \log_{-10} \frac{1}{n} \left( \sum y^2 \right) \quad (8)$$

Característica maior melhor:

$$\frac{S}{N} = \log_{-10} \frac{1}{n} \left( \sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (9)$$

Onde:

$\bar{y}$  = média dos dados observados

$s_y^2$  = variação de y

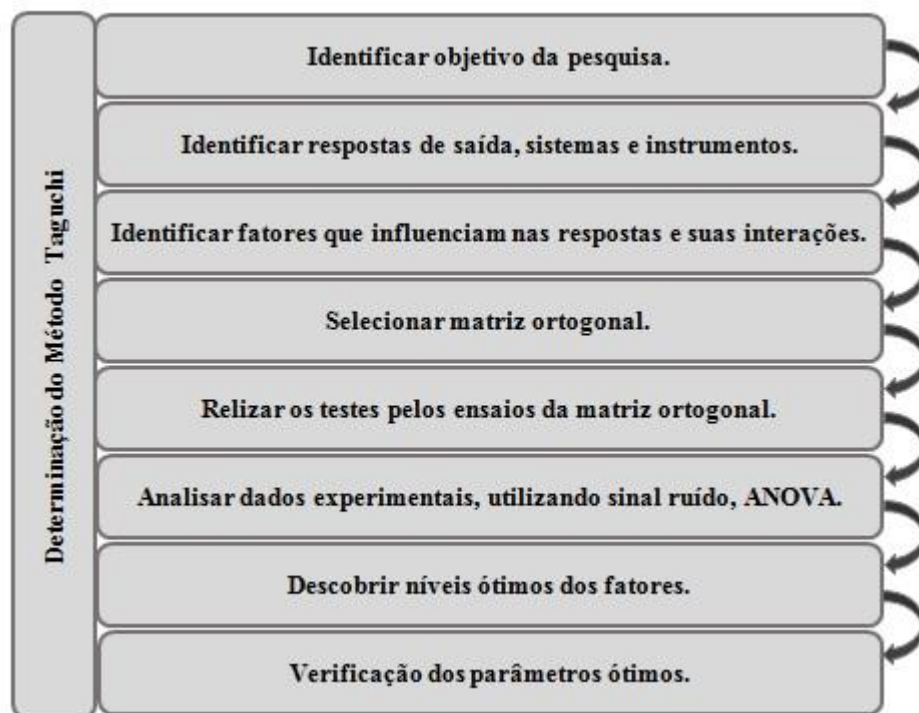
n = número de observações



$y$ = dado observado

Quando utilizada tal metodologia, os autores Taguchi; Elsayed; Hsiang, (1990), apontam a necessidade em respeitar o passo a passo da metodologia referida em sua execução, conforme se apresenta na Figura 17.

Figura 17 – Passo a passo execução metodologia robusta de Taguchi



Fonte: Adaptado (TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990)

Segundo a Figura 18, para se alcançar o objetivo de pesquisa há a necessidade de primeiramente fazer a identificação do mesmo no processo e suas respectivas respostas de saídas, sendo tomadas de decisões pré-execução da metodologia (CHOUDHURY; RUDRAPATI; BANDYOPADHYAY, 2014; SATHYA, et al., 2010; TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990). Os autores afirmam que, ocorrem casos que após seguir os passos da metodologia de Taguchi ainda se encontra a necessidade de identificação das melhores condições de qualidade por meio outros métodos de otimização.

Na pesquisa de Choudhury, Rudrapati e Bandyopadhyay (2014), desenvolveram o estudo com o objetivo da melhoria da carga final de aço inoxidável, aplicados em uma amostra de solda TIG em aço macio, os arranjos executados por meio de um arranjo

ortogonal, fazendo uso de ANOVA, relação sinal ruído e gráfico de efeitos principais, obtendo resultados satisfatórios com a utilização da metodologia supracitada.

As principais etapas do Método Taguchi são: estabelecer as características de qualidade e os parâmetros de projeto necessário para o produto/processo, projetar e nortear os experimentos, analisar os resultados e caracterizar as condições ótimas, executar um teste de confirmação empregando as melhores condições (SENTHILKUMAR; SRINIVASAN, 2010)

Após a realização da metodologia de Taguchi, ocorre a necessidade de encontrar mais de uma característica de qualidade influente nas condições ótimas de processo, para essa resposta, faz-se necessário aplicar a Análise Relacional *Grey* no tema em questão.

## 2.4 ANALISE RELACIONAL *GREY* (GRA)

Sendo executada após a utilização da metodologia robusta de Taguchi, a análise relacional *grey* (GRA), método este que é muito difundido na busca da otimização de processos. Tal fato para utilização, justifica-se devido ao método de Taguchi alcançar uma única amostra de desempenho de condição ótima, justifica-se a isso a análise S/N sinal ruído que proporciona análise de desempenho de somente uma característica de qualidade, são nestas situações que se executa a otimização multiobjetiva GRA (LIN; YAN, 2014; PARIDA; PAL, 2015; REN; ZHOU; WEI, 2015).

Na adoção de um número maior de parâmetros de entradas nos processos, é inevitável conter mais de uma saída resposta nas condições ótimas (KARANDE; GAURI; CHAKRABORTY, 2013; PARIDA; PAL, 2015). Os autores salientam ainda que há conexão da metodologia robusta de Taguchi, com métodos capazes de identificar mais de uma característica de qualidade nas respostas de saída como: teoria da desejabilidade, teoria da utilidade, teoria relacional *grey*, algoritmo genético, entre outros.

Criada por Julong Deng, em 1982, com o propósito de evitar os defeitos inerentes dos modelos convencionais, a teoria *grey*, utiliza métodos estatísticos. Tal teoria que exige apenas uma quantidade limitada de dados, com o objetivo de estimar o desempenho e o comportamento de um sistema incerto (PRAZERES; LEAL JUNIOR; GARCIA, 2010).

Metodologia utilizada para relacionar informações claras (características de saídas) que podem ser mensuradas, com as informações cinzentas que não são bem definidas (KUMAR; RUDRAPATI; KUMAR, 2014). No mesmo sentido, a obra de Parida; Pal, (2015) afirma que, utiliza-se este artifício para determinar o nível de relacionamento entre uma

observação de referência com os dados levantados, possibilitando a ocorrência de um grau de proximidade.

Método multiobjetivo que, em sua execução agregam-se pesos de importância para as características de qualidade no processo. Tal fato, evidencia-se que, não é via de regra que todas as características de qualidade são de mesma importância, justificando-se assim, no qual cada processo analisado possui características específicas (KUMAR; RUDRAPATI; KUMAR, 2014).

Para a execução da análise relacional *grey* deve-se seguir o procedimento algébrico, baseando-se nos resultados experimentais de cada característica de qualidade selecionada na presente pesquisa (KHOUALDIA, et al, 2016; SATHYA et al, 2010), conforme passos expostos na Figura 18.

Figura 18 – Diretrizes GRA



Fonte: Adaptado (DENG, 1989)

No processo de geração relacional normalizam-se as características de qualidade estabelecidas no processo estudado. Em vista disso, tal procedimento é estabelecer valores de 0 a 1, existem três tipos de normalização de dados: conforme a menor melhor *low better* (LB), maior melhor *high better* (HB) possibilitando também não melhores critérios *not better* (NB).

Na pesquisa, a maioria das características de qualidade localiza-se em HB, havendo a porosidade em LB. Segundo Deng (1989), em sua obra, quando é feita a normalização dos resultados melhor será o desempenho, e o melhor resultado normalizado corresponderá a igual a um (DENG, 1989). Para o emprego da normalização HB utiliza-se a adequação dos dados nas métricas conforme Equação 10

$$y_i^* = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (10)$$

Onde o  $y_i^*$  é o dado normalizado depois da execução do processo de geração *GREY*, a variável  $y_i(k)$  é a posição do k-ésima resposta de i-ésima resposta dos experimentos realizados anteriormente,  $\min y_i(k)$  é o menor valor de  $y_i(k)$  de k-ésima resposta e a variável  $\max y_i(k)$  é o maior valor de  $y_i(k)$  de k-ésima respostas. No seguimento da pesquisa, utiliza-se a Equação 11, para a normalização das respostas no caso da LB (DENG, 1989).

$$x_i^*(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (11)$$

Ao desenvolver o cálculo, por meio da Equação 11, possibilita-se a normalização do critério desejado do pesquisador, é o LB evidenciado anteriormente. Na continuidade, do desenvolvimento analítico da metodologia de *grey*, é notável a necessidade de se encontrar o coeficiente relacional, demonstrado pela Equação 12 (DENG, 1989).

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \omega \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \omega \Delta_{max}} \quad (12)$$

Sendo,  $\varepsilon_i$  o coeficiente relacional grey do i-ésimo teste de experimento para k-ésima resposta,  $\Delta_{0i}(k) = ||y_0^*(k) - y_i^*(k)||$ , ou seja, o absoluto da diferença entre  $y_0^*(k)$  e  $y_i^*(k)$ ,  $y_0^*(k)$  sendo a ideal sequência de referência,  $\Delta_{max} = \max_i * \max_k ||y_i^*(k) - y_i^*(k)||$ , é o maior valor de  $\Delta_{0i}$ , e  $\Delta_{min} = \max_i * \max_k ||y_0^*(k) - y_i^*(k)||$  é o menor valor de  $\Delta_{0i}$ , e  $\omega (0 \leq \omega \leq 1)$ , onde é o coeficiente de distinção (SATHIYA; ARAVINDAN; HAQ, 2006)

No progresso de execução do método *grey*, é indispensável mensurar o grau de relação, que é calculado pela média dos coeficientes relacionais *grey* de cada experimento no processo, conforme Equação 13.

$$\tau(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i(k) \quad (13)$$

Onde, “k” na equação 13 é o número total de respostas. Ao encontrar um grau relacional *grey* alto, corresponde a uma intensa relação entre a sequência dada e de referência. A sequência de referência,  $y_0^*(k)$ , equivale a melhor sequência de processo. Sendo assim, quanto maior o grau relacional *grey* significa que a combinação de parâmetros se encontra mais próximo da condição ótima (SATHYA et. al., 2010).

## 2.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

O método de *Grey-Taguchi* possibilita revelar de maneira aplicada, a relação entre os parâmetros estabelecidos de projeto e seu resultado de atuação, sendo uma ferramenta voltada para a identificação de condições “ótimas” qualidade (LIPIN; GOVINDAN, 2013). Tal evidência ainda é constatada pelos autores no seguimento do processo de otimização, ocorrendo a necessidade de análise da significância da influência dos parâmetros nas respostas de saídas atribuídas a características de qualidade, com isso, é realizada a análise de variância.

Assim como o DOE, a Análise de Variância (ANOVA) também foi desenvolvida pelo pesquisador Ronald Fisher (1930), com objetivo de desenvolver pesquisas no meio agrícola utilizando artifícios de ferramentas estatísticas (TAKENOUCHI, 2011). Com características de ser um estudo de interpretação dos dados experimentais, que busca a influência dos parâmetros na variabilidade das características de qualidade do processo (DELGADO, 2000; NILO JUNIOR, 2003).

Método este, que requer como especificações que as k populações possuam a mesma variância, estando dentro da condição de homocedasticidade, assim como a variável de interesse esteja distribuída em todas as populações.

Tal metodologia permite adequação de um modelo matemático, por meio de um teste de hipóteses, para a obtenção dos valores de “F”. Por consequência disso, ao aceitar o valor de “F” pode-se determinar a probabilidade de erro ao aceitar a hipótese  $P_{value}$ , este índice é alcançado através da distribuição de “F” a um nível de significância estabelecido pelo pesquisador (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978). No presente trabalho é acima de 95% nível de significância. Para a realização da análise de variância, torna-se indispensável a utilização das Equações (COHEN; COHEN, 1988).

a) Cálculo do grau de liberdade:

$$\text{De tratamento:} \quad k - 1 \quad (14)$$

$$\text{Residual:} \quad k (r - 1) \quad (15)$$

$$\text{Do total:} \quad (k * r) - 1 \quad (16)$$

b) Equação do fator de correção:

c= fator de correção

$$c = \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (17)$$

c) Soma dos quadrados total SQT:

$$SQT = \sum y^2 - C = SQT_r + SQR \quad (18)$$

d) Soma dos quadrados de tratamento:

$$SQT_r = \frac{\sum T_i^2}{r} - C \quad (19)$$

e) Equação da soma dos quadrados dos resíduos:

$$SQR = SQT - SQT_r \quad (20)$$

e) Quadrado médio da variância dos tratamentos (QMTr):

$$QMTr = \frac{SQT_r}{k - 1} \quad (21)$$

f) Equação do quadrado médio variâncias dos resíduos (QMR):

$$QMR = \frac{SQR}{k (r - 1)} \quad (22)$$

g) Equação para calcular o valor do teste F ( $F_c$ ):

$$F_c = \frac{QMTr}{QMR} \quad (23)$$

A execução desta pesquisa é baseada em experimento que, por sua vez, a repetição de análises é de modo comum (NILO JUNIOR, 2003), o autor ainda ressalta que, mediante a

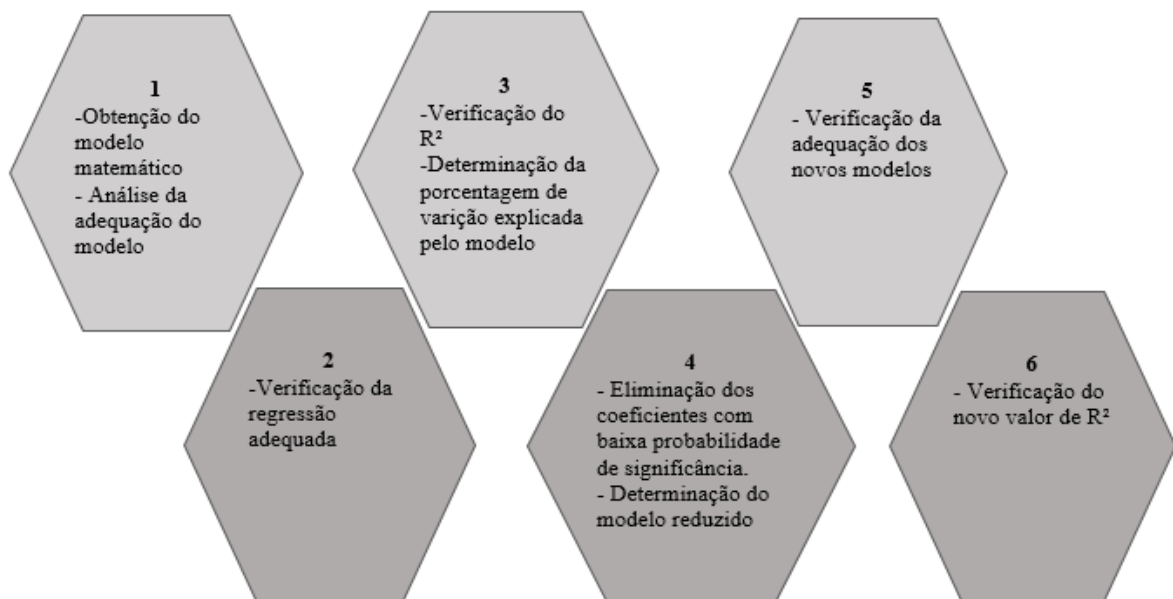
esta proposta, a ANOVA possibilita uma classificação de experimentos de tamanhos diferentes. Evidenciando uma repetição das equações citadas, e modifica-se a equação da soma dos quadrados (COHEN; COHEN, 1988). Segue a Equação 24.

$$SQT_r = \frac{T_1^2}{r_1} + \frac{T_2^2}{r_2} + \dots + \frac{T_k^2}{r_k} - C \quad (24)$$

A execução da análise é possibilitada por *softwares* computacionais específicos, separando as variáveis para análise, onde os valores de P são gerados automaticamente. Utiliza-se a estatística “F” de Snedecor, com o objetivo de testar as hipóteses, para concluir que existe uma média diferente da outra, no entanto, para verificar quais valores de média que diferem, faz uso de outro teste de comparação de médias (COHEN; COHEN, 1988).

Na análise computacional, o software possibilita chegar nos valores de  $P_{value}$ , determinação de  $R^2$  no qual indica efetivamente a porcentagem que explica o modelo determinado, e realiza o ajuste através do modelo matemático completo, ocorrendo a eliminação de fatores e interações não significativas, vindo a oportunizar um  $R_2$  maior. De maneira resumida, a Figura 19, busca trazer passos para realizar a análise de variância, durante o experimento.

Figura 19 – Diretrizes para a realização da ANOVA em experimentos



Fonte: Adaptado (COHEN; COHEN, 1988).

Após adequação junto as diretrizes da análise de variância, determina-se a mensuração da equação de regressão linear de primeira ordem ou superior, e uma ideia global da influência dos parâmetros na variabilidade das respostas de saída no plano de execução de experimentos (MONTGOMERY, 2012).



### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

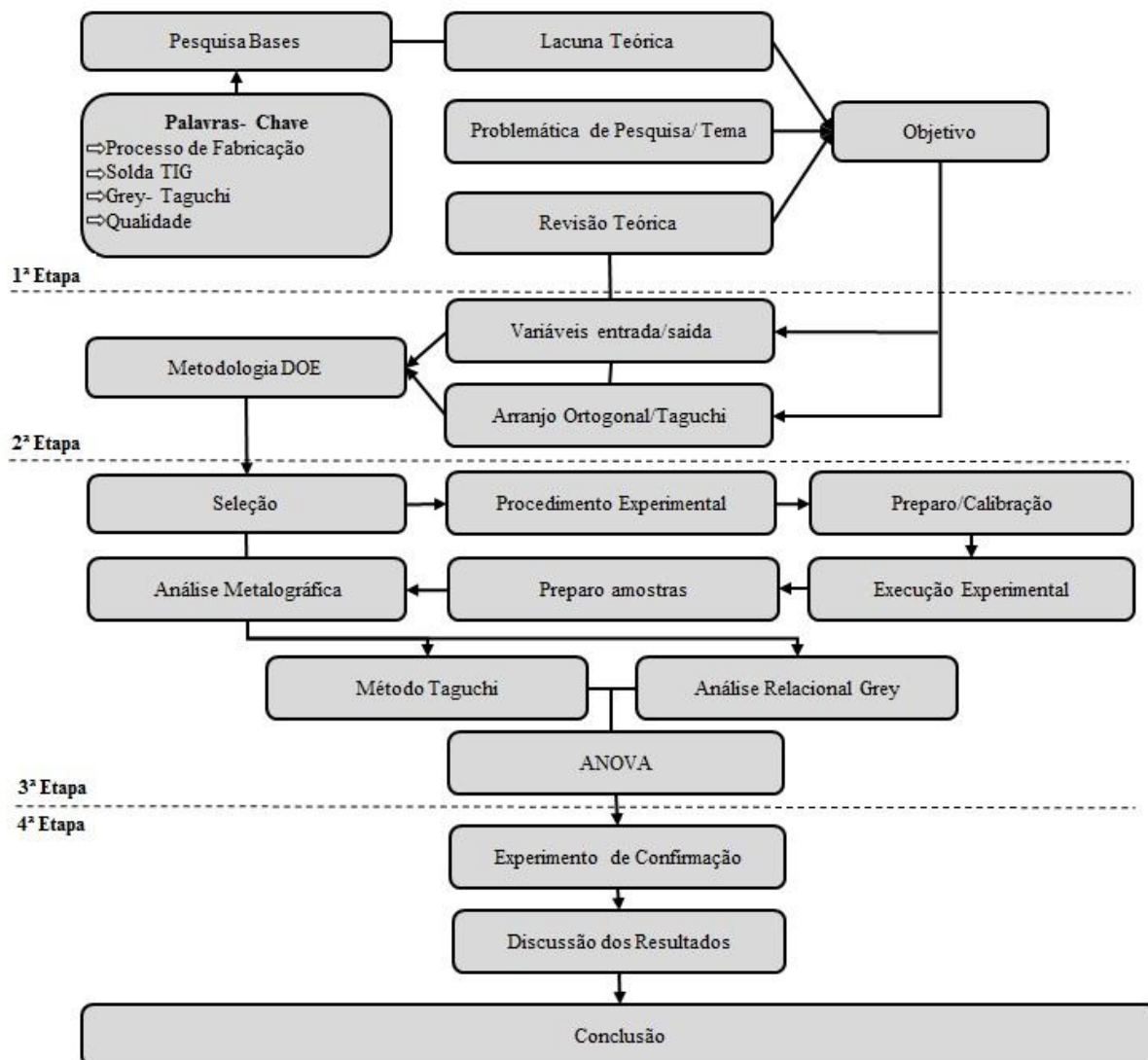
A presente pesquisa tem como objetivo otimizar o processo de soldagem TIG com auxílio do robô de solda em aço AISI304, por meio da relação *grey*- Taguchi. Em virtude disso, para o alcance das melhores condições a pesquisa que contém sua essência na sua execução o processo experimental que será planejado e desenvolvido.

Segundo Marconi Lakatos (2003), pesquisas caracterizadas como experimentais baseiam-se na relação do tipo causa efeito, os autores ainda ressaltam que, no desenvolvimento dos projetos experimentais se incluem os seguintes fatores: grupos de controle, seleção de amostras, técnicas probabilísticas, variáveis independentes e o controle dos fatores pertinentes, assim como o ambiente que será desenvolvido os experimentos no qual podem ser desenvolvidos tanto "em campo", quanto em laboratório onde o ambiente é controlado.

#### 3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL

Na busca pela otimização no processo de solda Tungsten Inert Gas (TIG), processo que será executado por meio de um robô de solda Motoman MA1400, para se alcançar a otimização do processo se faz necessário planejar alguns passos a serem seguidos, os quais estão demonstrados na Figura 20.

Figura 20 – Passos a passo da metodologia experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Conforme os procedimentos descritos na Figura 20, a pesquisa é subdividida em quatro etapas, sendo na primeira etapa o delineamento das palavras-chave para executar a busca nas principais bases científicas, o estudo é realizado em artigos relacionados com o tema abordado, no mesmo sentido são observados os métodos de otimizações de processos e produtos e, também a pesquisa sobre o desenvolvimento do método de *Grey-Taguchi* nos processos industriais. Na mesma etapa, evidencia-se a lacuna teórica, por meio de consultas em trabalhos publicados, revelando uma área de pesquisa, assim como, define-se a problemática de pesquisa que incorporada do referencial teórico reforçam o embasamento do objetivo geral da pesquisa.

Na segunda etapa da pesquisa são selecionadas, as variáveis de entradas (*inputs*) e as variáveis de saída (*outputs*), também, os níveis que envolvem a sua execução e a adequação a matriz ortogonal por meio dos arranjos ortogonais que satisfazem todas as combinações pertinentes a relação entre as variáveis. Após definir a matriz ortogonal apropriada para as condições de entrada e níveis de experimentos, torna-se necessário a utilização da metodologia DOE, no qual possibilita a execução do planejamento de experimental do processo estudado. Vale ressaltar que é na segunda etapa aonde ocorre a preparação das amostras experimentais, possibilitando padronizar os corpos de prova para que não ocorram fugas numéricas de respostas e manter um processo padrão de pesquisa.

Na terceira etapa, é onde se realiza a corrida experimental, porém para concretizar tal fato, primeiramente são selecionados níveis que os *input's* serão submetidos, em consequência é realizado o procedimento experimental no qual são verificados os equipamentos que serão necessários para a execução experimental. Obedecendo a metodologia DOE, é realizado o preparo dos corpos de prova obedecendo a critérios de padronização experimental necessário para a homogeneidade dos resultados. Ainda nesta etapa, é realizada a análise metalográfica que possibilitará evidenciar o nível das características de qualidade no processo determinadas na pesquisa como *output's* ressaltando os dados contidos na pesquisa.

Para finalizar a terceira etapa do estudo, é realizado a apreciação estatística na busca da otimização das características de qualidade contidas no processo, aplicados os procedimentos da metodologia robusta de Taguchi com o objetivo de encontrar as maiores melhores características dentro do método S/N (sinal/ruído), ao mesmo tempo a utilização da análise relacional *Grey* também buscando evidenciar outras características que a metodologia de Taguchi não alcançou. Por fim desta etapa, realiza-se o teste ANOVA com o objetivo de analisar o nível de influência que as variáveis possuem no processo, resalta-se que para compilação dos dados auferidos pela pesquisa, serão utilizados os *softwares Microsoft Office Excel, Statistica e Minitab*.

Ademais, com a apreciação estatística dos dados concluída inicia-se a quarta etapa na qual, realiza-se o experimento de confirmação com as melhores características de qualidade alcançadas por meio das metodologias empregadas no estudo. Fazendo parte desta etapa são expostos os resultados provenientes do estudo, assim como, a discussão destes no decorrer da pesquisa, posteriormente ao final dos métodos experimentais é caracterizada a conclusão da pesquisa.

### 3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para o alcance das melhores características de qualidade presentes no processo é necessário a utilização de metodologias experimentais, as quais possibilitam testar os níveis exercidos pelas variáveis em sua execução, um dos instrumentos presentes na pesquisa é a fundamentação em bases literárias, trabalhos relacionados a área de soldagem. Tal definição de parâmetros também é definida com a necessidade existente que a empresa parceira possui para o processo designado, para isso realizou-se algumas conversas com o gestor de produção e o responsável da área de soldagem. Também, é na fase de pré-testes que se estabelecem os níveis de utilização das variáveis que executam o processo no procedimento experimental.

Posteriormente, o delineamento experimental e níveis de utilização das variáveis são definidos nesta pesquisa: Corrente média ( $I_m$ ) (60,70,80) (A), Frequência de Soldagem (Hz) (1,3,5) (B) e Velocidade de Soldagem (Vs) composta por níveis de (8,12,16) mm/s (C), conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada e níveis experimentais

Fator	Variável	Nível		
		Mínimo	Médio	Máximo
		1	2	3
A	Corrente média (A)	60	70	80
B	Frequência (Hz)	1	3	5
C	Velocidade de Soldagem (mm/s)	8	12	16

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Em consequência a seleção das variáveis observadas anteriormente, é necessário a utilização da matriz DOE de Taguchi  $3^3$  (três variáveis dispostas em três níveis), o que possibilita satisfazer a total interação experimental das variáveis. Diante disso, ao obedecer às regras do planejamento experimental definidas pelo *Design Of Experiments*, é possível estimar o nivelamento das corridas experimentais conforme Tabela 3.

Salienta-se que, em virtude do impedimento estrutural interno experimental de possibilitar a variação da distância do bocal da tocha até a junta a ser soldada, definiu-se como

velocidade de alimentação de 1,5 mm/s. Tal fato justifica a afirmação de que a influência da velocidade de alimentação não interferiria na poça de fusão caso a distância do bico não fosse alterada durante o processo (DELGADO, 2000; NOGUEIRA, 2015). Também durante o planejamento experimental se definiu como parâmetros fixos para a realização da solda a utilização de:  $U_{cc} = 10 \text{ V}$ ;  $I_{cc} = 30 \text{ A}$ ;  $I_f = 10 \text{ A}$ ;  $T_F = 3 \text{ s}$ ;  $T_S = 0,3 \text{ s}$ ;  $T_D = 0,2 \text{ s}$

Tabela 3 – Dados experimentais utilizando DOE

Experimentos	A	B	C	Diluição (%)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Altura do cordão (mm)
1	1	1	1					
2	1	1	2					
3	1	1	3					
4	1	2	1					
5	1	2	2					
6	1	2	3					
7	1	3	1					
8	1	3	2					
9	1	3	3					
10	2	1	1					
11	2	1	2					
12	2	1	3					
13	2	2	1					
14	2	2	2					
15	2	2	3					
16	2	3	1					
17	2	3	2					
18	2	3	3					
19	3	1	1					
20	3	1	2					
21	3	1	3					
22	3	2	1					
23	3	2	2					
24	3	2	3					
25	3	3	1					
26	3	3	2					
27	3	3	3					

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Como características de qualidade (*output's*), serão considerados: largura do cordão, diluição, penetração, reforço e altura do cordão. Os experimentos fundamentam-se nos estudos de: Nalbant; Gokkaya; Sur, (2007); Prasanna, et al., (2014); Ghosh; Pal; Nandi, (2016)

Segundo a pesquisa de Nalbant; Gokkaya; Sur (2007), em sua obra utilizaram a metodologia de Taguchi para identificar parâmetros de corte ótimos para rugosidade

superficial no torneamento, na qual se usou as matrizes ortogonais com o adendo da relação sinal-ruído e análise de variância para o estudo das características de desempenho do processo de torneamento no aço AISI 1030, experimento caracterizado por possuir três parâmetros de entrada. Assim como a pesquisa dos autores citados, este trabalho também é composto por três parâmetros iniciais de processo em busca de condições ótimas de processo.

O estudo de Prasanna, et al., (2014), evidenciou os efeitos da contribuição de ajustes ótimos da máquina nos parâmetros do processo de perfuração menor em uma placa de Ti-6Al-4V de 0,4 mm, pesquisa que conteve três parâmetros de entrada no seu experimento desenvolvido, ainda os autores evidenciam que se utilizou a análise relacional *Grey* para identificar as condições ótimas de processo, o estudo alcançou como resultado a influência que a velocidade do fuso e a pressão do ar têm o impacto mais significativo na precisão dimensional do furo . As demais considerações, como análises de variâncias e números de corridas da máquina, por exemplo, terão suas definições por meio da metodologia de Planejamento de Experimentos (DOE).

### **3.3.1 Preparo dos experimentos**

A necessidade da padronização experimental é vigente para que não ocorram interpretações diferentes dos dados coletados, assim como, ao padronizar os corpos de prova possibilita-se uma melhor condição de automatização de processos com a utilização do robô de solda para executar as corridas experimentais.

Para facilitar o entendimento do passo a passo no preparo das amostras, esta pesquisa dividiu o processo em fases de preparo, contendo informações necessárias para sua replicação futura, conforme Quadro 7.

Quadro 7 – Preparação das amostras

<b>1ª Fase</b>	<b>Corte e dimensionamento:</b> Cortou-se 60 peças realizado com máquina policorte de bancada. Comprimento aproximado: 60 mm cada peça
<b>2ª Fase</b>	<b>Torneamento:</b> Faceamento das extremidades dos tubos para o comprimento de 56 mm em 30 peças e lixamento interno com objetivo de facilitar o encaixe da peça superior.
<b>3ª Fase</b>	<b>Expansão de diâmetro:</b> Aumento de um dos diâmetros das extremidades do tubo no comprimento dos 25 mm para possibilitar a solda sobreposta.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos para o levantamento dos dados deste estudo foram executados em um Robô de solda Motoman Yaskawa DX100 MH6, que possui seis eixos de alta velocidade que requer um espaço de instalação mínimo. Tal fato, que possibilitará aumentar a produtividade do processo de soldagem TIG caracterizado por possuir um modelo convencional de operação industrial.

No sentido da utilização do robô de solda, se oportuniza a obtenção de uma maior repetitividade de processo, alcançando a padronização de resultados finais de processo obtidos na solda TIG com alimentação mecanizada à frio. O robô de solda Motoman é caracterizado por possuir um envolvente de trabalho mais amplo em sua classe, com pequeno raio de interferência, para a realização do processo com o auxílio é evidenciado o suporte para o eletrodo TIG adaptado no eixo do robô, além de ser alimentado por uma fonte IMC SAP V4.28 específica para o processo TIG.

Os procedimentos experimentais executados pelo robô de solda mencionado anteriormente são conhecidos por serem executados via comando CNC (Comando numérico computadorizado). Tal processo é composto por pontos de marcação na peça aonde se deseja realizar o processo, assim um conjunto de coordenadas que referenciam o equipamento na execução formando um programa, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Programa CNC utilizado na soldagem

Dados iniciais	Programa CNC	Coordenadas NC
/JOB	//INST	C0000=-37236,21079,-30625,-283,34287,-54534
//NAME: TUBOONE	///DATE 2017/11/16 17:50	C00001=-14499,21079,-30625,-283,34287,-54534
//POS	///ATTR SC,RW	C00002=-10906,20717,-30625,-283,34287,-54534
///NPOS 11,0,0,0,0,0	///GROUP1 RB1	C00003=-6220,28901,-18506,-283,34287,-36193
///TOOL 17	PROGNC	C00004=6036,29769,-16715,-283,34287,-10273
///POSTYPE PULSE	MOVL C00000 V=30 PL=0	C00005=12855,18907,-32783,-283,34287,16435
///PULSE	MOVL C00001 V=30 PL=0	C00006=10292,10181,-44153,-283,34287,35095
	MOVC C00002 V=30 PL=0	C00007=-3953,6651,-48650,-283,34287,66565
	MOVC C00003 V=8 PL=0	C00008=-10189,13483,-40397,-283,34287,84905
	MOVC C00004 V=8 PL=0	C00009=-10759,22045,-28907,-283,34287,101565
	MOVC C00005 V=8 PL=0	C00010=-34092,22045,-28907,-283,34287,101565
	MOVC C00006 V=8 PL=0	
	MOVC C00007 V=8 PL=0	
	MOVC C00008 V=8 PL=0	
	MOVC C00009 V=8 PL=0	
	MOVL C00010 V=30 PL=0	
	END	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

No avanço da execução dos procedimentos experimentais de programação, faz-se necessário a verificação de utilização do equipamento e análise do desenvolvimento do mesmo durante o processo, mensurando. Inicialmente para a realização do procedimento experimental, referenciou-se o ponto de partida do robô com um número de ferramenta “tool 17” aonde contém as coordenadas iniciais para a realização dos movimentos a partir do ponto zero, durante a execução do programa utilizaram-se os comandos de movimento linear (MOVL) aonde o braço do robô desloca-se em linha reta, também foi utilizado o comando de movimento circular (MOVC) onde o braço do robô desloca-se em movimento circular, devidamente com as coordenadas referenciadas. Tais comandos de movimentos, são executados com as velocidades pré-fixadas no programa na unidade de mm/s, aonde consta no programa a velocidade de entrada e saída 30 mm/s mantendo-se para todos os experimentos, contudo durante a execução da soldagem foram fixadas as velocidades de utilização definidas no planejamento experimental.

Conforme a Tabela 4 após a execução do processo, o programa possibilita o adendo de melhorias na fase de planejamento experimental (CARLSON et. al., 2014; ZHUN et al., 2015). Para o alcance da execução experimental de soldagem, foi acoplado uma tocha



convencional TIG ao braço do robô de solda, por meio de um dispositivo de espera da tocha parafusado na extremidade do braço rotacional do robô.

Na visão prática, para a realização dos testes, há a necessidade de execução do preparo das peças corpos de prova, assim como a utilização de dispositivos para a melhor fixação e apoio da peça, com o objetivo de conseguir se manter dentro dos padrões de qualidade de soldagem.

Após a realização dos testes, alcançou-se o processo de mensuração das características de qualidade, para essa execução se faz necessário seguir um protocolo de preparo para identificação das condições como: corte transversal ao aporte soldado, lixamento da parte soldada, aplicação do reagente de ataque ácido Vilella e Marble, logo a utilização do Scanner scanjet 300 para macrografia, e compilar as imagens com as devidas escalas.

Por conseguinte, ao desenvolver todos os processos metodológicos a pesquisa parte para a análise dos dados obtidos durante o processo demonstrado, no objetivo pelos resultados esperados.

## 4 RESULTADOS

Com o objetivo de manter a coerência da pesquisa, nesta seção serão apresentados os resultados provenientes do desenvolvimento da metodologia e análise dos dados levantados. Com o objetivo de apresentar uma resposta dinâmica frente a otimização do processo de soldagem TIG por meio da Análise Relacional *Grey-Taguchi* e para uma melhor compreensão, este capítulo foi dividido em 6 linhas de raciocínio conforme as características de qualidade analisadas.

### 4.1 MATRIZ ORTOGONAL TAGUCHI

Após a execução do planejamento experimental e o delineamento dos limitantes da pesquisa nos procedimentos experimentais desenvolveu-se o arranjo ortogonal de Taguchi. Ao relacionar a quantidade de variáveis de entrada com os níveis de condições que as mesmas foram submetidas durante as corridas experimentais, conforme Tabela 5, encontrou-se o número de corridas para o experimento. Salienta-se que a compilação da matriz foi realizada por meio do software MINITAB 17® (versão DEMO).

Tabela 5 – Matriz ortogonais experimental, com variáveis saídas analisada

(continua)

Experimentos	A	B	C	Diluição (%)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Altura do cordão (mm)
1	1	1	1	18%	0,536	6,364	1,364	1,900
2	1	1	2	9%	0,292	4,896	0,771	1,063
3	1	1	3	0%	0,000	2,391	1,688	1,688
4	1	2	1	0%	0,000	3,306	1,139	1,139
5	1	2	2	2%	0,075	2,514	0,958	1,033
6	1	2	3	3%	0,252	3,456	1,749	2,001
7	1	3	1	22%	0,884	6,952	1,197	2,081
8	1	3	2	59%	0,889	4,639	0,000	0,889
9	1	3	3	61%	1,240	4,766	0,000	1,240
10	2	1	1	8%	0,394	5,795	1,575	1,969
11	2	1	2	44%	1,254	4,387	0,000	1,254
12	2	1	3	74%	2,104	7,213	0,000	2,104
13	2	2	1	0%	0,000	5,847	0,932	0,932
14	2	2	2	2%	0,227	2,469	0,741	0,968
15	2	2	3	0%	0,000	2,695	0,972	0,972
16	2	3	1	69%	1,522	5,827	0,000	1,522
17	2	3	2	15%	0,584	3,208	1,220	1,804

(conclusão)

18	2	3	3	4%	0,250	3,281	1,260	1,510
19	3	1	1	45%	1,528	6,639	0,944	2,472
20	3	1	2	13%	0,421	4,401	1,198	1,619
21	3	1	3	36%	0,774	4,653	0,000	0,774
22	3	2	1	8%	0,312	3,896	1,479	1,791
23	3	2	2	23%	0,573	1,515	0,413	0,986
24	3	2	3	0%	0,000	1,515	0,413	0,413
25	3	3	1	71%	2,960	6,883	0,326	3,286
26	3	3	2	52%	1,687	5,935	0,000	1,687
27	3	3	3	6%	0,250	2,417	0,556	0,806

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com o delineamento e planejamento de pesquisa concluído, foram executados os procedimentos experimentais no laboratório de soldagem específico para o processo. Após a realização dos experimentos realizou-se a inspeção e coleta dos dados, conforme Tabela 5, no laboratório de metalografia, por meio da utilização dos reagentes específicos para uma melhor visualização do cordão de solda no material utilizado no software *ImageJ*.

#### 4.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS COLETADOS

Inerente à importância da pesquisa está a organização dos dados coletados, assim como, a possibilidade de melhor identificação e interpretação pela estatística descritiva (COHEN; COHEN, 1988). Para melhor visualização da representatividade dos dados obtidos no processo TIG alimentado, foi necessária uma análise estatística descritiva inicialmente, conforme a Tabela 6, realizada por meio do software MINITAB 17® (versão DEMO)

Tabela 6 – Estatística descritiva das características de qualidade do processo

Variável	N	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var.	Mínimo	Q1	Q3	Máximo
Diluição (mm <sup>2</sup> )	27	0,238	0,257	0,066	107,830	0,000	0,021	0,447	0,744
Penetração (mm)	27	0,704	0,742	0,550	105,350	0,000	0,227	1,240	2,960
Largura (mm)	27	4,365	1,734	3,007	39,730	1,515	2,695	5,847	7,213
Reforço (mm)	27	0,774	0,589	0,347	76,150	0,000	0,000	1,220	1,749
Altura (mm)	27	1,478	0,623	0,388	42,170	0,413	0,972	1,900	3,286

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A análise descritiva dos dados levantados torna-se necessária para uma melhor visualização do cenário da pesquisa. Com posse de tal informação, possibilita-se a melhor adequação as metodologias que servirão de base para aplicações em estudos futuros (MONTGOMERY, 2012). No seguimento do estudo, por meio dos dados analisados, aplicou-se a metodologia de otimização *Grey-Taguchi*, na busca das melhores características de qualidade presentes no processo de soldagem TIG alimentado.

#### 4.3 CARACTERÍSTICAS OTIMIZADAS TAGUCHI

Nesta seção, é apresentada a aplicação da metodologia robusta de Taguchi no projeto de experimentos realizados na soldagem TIG alimentada em busca das melhores características de qualidade. Para o desenvolvimento das corridas experimentais, foi utilizada a metodologia de arranjos fatoriais, proposta por Taguchi (1986), onde os fatores e seus respectivos níveis foram submetidos em todas as condições propostas por tal arranjo, construindo uma matriz ortogonal, mencionados anteriormente.

Com a utilização do arranjo ortogonal proposto por Taguchi, foi possível constatar as médias das respostas obtidas por meio das corridas experimentais, assim como a possibilidade de aplicar a metodologia de otimização proposta por tal sistemática. A pesquisa fez uso da razão sinal ruído para *maior melhor* ( $S/R_m$ ) conforme a Equação 10, que direciona o estudo para a condição quanto maiores as características de qualidade melhores serão para os resultados.

Segundo os autores Choudhury, Rudrapati e Bandyopadhyay (2014); Sathya, et al., (2010), a metodologia robusta de Taguchi exerce um papel fundamental frente a construção da matriz ortogonal satisfazendo o relacionamento dos fatores em todo os seus níveis, no entanto, tal método carece em evidenciar com maiores precisões mais de uma característica de qualidade, mesmo tendo capacidade analítica para tal. Os fatores e níveis estão mostrados na Tabela 2, mencionados anteriormente. Frente a este cenário, o estudo aplicou a Análise Relacional *Grey*, na busca de uma possibilidade de evidenciar outras características de qualidade que a metodologia de Taguchi não iria possibilitar.

Conforme a Tabela 7, é possível analisar o projeto do experimento para a soldagem TIG alimentada. As colunas (A, B e C) são os fatores de controle, assim como as interações que a metodologia proporciona entre os fatores (AB, AC e BC), relacionando fatores de corrente média, frequência e velocidade de soldagem, expostos nos seus três níveis de trabalho.

Também é possível observar que cada linha experimental representa um conjunto de combinações para cada fator em seus níveis estabelecidos, proporcionando a satisfação de todas as condições possíveis em cada fator. As duas últimas colunas apresentam a média das respostas obtidas das características de saída e a razão sinal/ruído na condição de *maior é melhor* ( $S/R_m$ ) para o processo experimental de soldagem TIG alimentada, tendo seus resultados obtidos por meio da Equação 10.

Tabela 7 – Projeto Experimental Taguchi de soldagem TIG alimentado

Experimentos	A	B	C	AB	AC	BC	Médias Y	Razão S/Rm
1	1	1	1	1	1	1	2,06812	-8,61897
2	1	1	2	2	1	2	1,42146	-14,82319
3	1	1	3	3	2	3	1,15340	0,00000
4	1	2	1	1	2	3	1,11680	0,00000
5	1	2	2	1	3	2	0,91924	-29,01019
6	1	2	3	2	3	1	1,49789	-23,12780
7	1	3	1	3	1	1	2,26700	-6,57129
8	1	3	2	2	1	2	1,40170	0,00000
9	1	3	3	1	2	3	1,57024	0,00000
10	2	1	1	2	2	3	1,96212	-15,39570
11	2	1	2	3	3	2	1,46662	0,00000
12	2	1	3	3	3	1	2,43312	0,00000
13	2	2	1	1	1	1	1,54220	0,00000
14	2	2	2	2	1	2	0,88522	-26,56786
15	2	2	3	3	2	3	0,92780	0,00000
16	2	3	1	1	2	3	1,91229	0,00000
17	2	3	2	1	3	2	1,39327	-9,84572
18	2	3	3	2	3	1	1,26838	-20,89463
19	3	1	1	3	1	1	2,40608	-1,29215
20	3	1	2	2	1	2	1,55313	-11,40480
21	3	1	3	1	2	3	1,31278	0,00000
22	3	2	1	2	2	3	1,51208	-15,00949
23	3	2	2	3	3	2	0,74340	-7,67547
24	3	2	3	3	3	1	0,46820	0,00000
25	3	3	1	1	1	1	2,83365	-3,65603
26	3	3	2	2	2	2	1,96604	0,00000
27	3	3	3	3	3	3	0,81780	-17,76299

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os dados coletados para a realização do cálculo da média das respostas foram obtidos por meio das características de qualidade de saída do experimento, através da Equação 25.

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i/n \quad (25)$$

Sendo:

$Y_i$  = valor da amostra

n = número de repetições

Para este estudo onde se busca a otimização das características de qualidade presentes no processo de soldagem TIG alimentado, frente as variáveis de saída, foi definido que se utilizaria a condição de aumento presente no método de Taguchi, no qual a razão sinal/ruído para *maior melhor* calculada conforme a Equação 10. Tal procedimento matemático foi realizado pelo software *Microsoft Office Excel*.

Conforme o desenvolvimento da metodologia, primeiramente, os resultados deste estudo abordam as respostas  $\bar{Y}$  para os fatores principais (A, B e C) e suas interações (AB, AC e BC). Os resultados são provindos da diferença absoluta  $\Delta$ , entre os três níveis que os experimentos de solda foram submetidos para cada fator. Sendo assim, os efeitos são obtidos da seguinte forma:

$$A_1 = (2,06812 + 1,42146 + 1,15340 + 1,11680 + 0,91924 + 1,49789 + 2,26700 + 1,40170 + 1,57024) / 9 = 1,48373$$

$$A_2 = (1,96212 + 1,46662 + 2,43312 + 1,54220 + 0,88522 + 0,92780 + 1,91229 + 1,39327 + 1,26838) / 9 = 1,47188$$

$$A_3 = (2,40608 + 1,55313 + 1,31278 + 1,51208 + 0,74340 + 0,46820 + 2,83365 + 1,96604 + 0,81780) / 9 = 1,51257$$

Para melhor visualização das respostas  $\bar{Y}$ , calculou-se a diferença absoluta na intenção de verificar as maiores e melhores condições que se apresentam nas corridas experimentais, segundo Tabela 8.

Tabela 8 – Respostas  $\bar{Y}$  para a soldagem TIG alimentada com os fatores de entrada

	A	B	C	AB	AC	BC
Nível1	1,48373	1,75298	1,91625	1,62984	1,81984	1,86496
Nível2	1,47188	1,06809	1,30556	1,49645	1,49262	1,30556
Nível3	1,51257	1,71449	1,27218	1,40927	1,22310	1,36503
$\Delta$	1,44304	1,10659	1,94964	1,71702	2,08935	1,80549

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

No desenvolvimento dos experimentos, com a utilização da metodologia robusta de Taguchi, definiu-se a utilização dos conceitos de desempenho quanto *maior é melhor* devido ao enquadramento de melhoramento dos dados analisados frente a sua utilização na prática. Segundo a metodologia de Taguchi, a ordem dos fatores de fortes para fracos é dada por:

$$C_1, BC_1, AC_1, B_1, AB_1, A_3$$

Tais fatores correspondem à Velocidade de soldagem 8 mm/s; Frequência 1 (Hz) e Corrente média 80 A. A média geral é 1,51185.

De acordo com a literatura faz-se necessário calcular o valor esperado, haja vista que, para que se desenvolva tal operação, deve considerar os três primeiros fatores fortes constatados por meio da diferença absoluta. Após a definição dos três primeiros fatores é calculado o valor esperado, conforme Equação 26:

$$\begin{aligned}
 VE &= \text{média} + [(C_1 - \text{média}) + (BC_1 - \text{média}) + (AC_1 - \text{média})] \quad (26) \\
 &= 1,51185 + [(1,91625 - 1,51185) + (1,86496 - 1,51185) + (1,81984 - 1,51185)] \\
 &= 2,577 \%
 \end{aligned}$$

Foi verificado que o valor ótimo esperado para a combinação  $C_1, BC_1, AC_1$  das respostas  $\bar{Y}$  é 2,577%. Se identificou que quando o processo de experimentos for conduzido com esta combinação, é possível que a rejeição média se mantenha próxima a 2,577%. Com a obtenção deste valor é recomendável, para pesquisas futuras, que se mantenham os níveis dos fatores que correspondam a combinação encontrada para possibilitar comparações futuras com outros métodos.

Ao prosseguir no desenvolvimento da metodologia robusta de Taguchi, faz-se necessário encontrar a melhor combinação como resposta na utilização da formulação de razão sinal/ruído na condição de *maior é melhor*, para os fatores principais (A, B e C); assim como a interação entre eles (AB, AC e BC), apresentadas na Tabela 9, ressalta-se respectivamente que nos três níveis também se apresentam os resultados com o cálculo da diferença absoluta  $\Delta$  entre os níveis.

Tabela 9 – Respostas S/Rm na soldagem TIG alimentada

	A	B	C	AB	AC	BC
Nível1	-9,69746	<u>-5,72609</u>	<u>-6,52563</u>	-5,68121	-8,10381	-7,12898
Nível2	-7,27039	-11,26564	-11,03636	-14,13594	<u>-3,37835</u>	-11,03636
Nível3	<u>-6,82057</u>	-6,52563	-6,86505	<u>-3,70021</u>	-12,03520	<u>-5,35202</u>
$\Delta$	4,39350	0,98607	2,35432	16,1169	-0,55303	12,81332

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Segundo a Tabela 9, é possível afirmar respeitando a condição da *maior é melhor* apresentada pela Equação 10, sendo a ordem dos fatores de forte para fraco segue respectivamente.

$$A_3, B_1, C_1, AC_2, AB_3, BC_3$$

É possível identificar os principais fatores como os mais fortes sendo Corrente média 80 (A), Frequência 1 (Hz) e Velocidade de soldagem 8 (mm/s), seguindo a ordem dos resultados correspondentes. A média geral obtida pela razão S/R<sub>m</sub> é -7,83912. Com objetivo de satisfazer todas as condições exigidas pelos níveis e números de fatores com a utilização do método de Taguchi é indispensável o teste de interação entre os fatores (TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990).

Para se aproximar de uma estimativa de resposta fez-se necessário calcular o valor esperado considerando os três principais fatores encontrados na razão sina/ruído, definidos pela condição de resposta que se quer chegar, conforme a Equação 26.

$$VE = média + [(A_3 - média) + (B_1 - média) + (C_1 - média)] \quad (26)$$



$$\begin{aligned}
 &= -7,83912 + [(-6,82057 + 7,83912) + (- 5,72609 + 7,83912) + (- 6,52563 + 7,83912)] \\
 &= 3,39405
 \end{aligned}$$

Avaliando a condição de desempenho *maior é melhor* a proposta por Genechi Taguchi (1986), o valor ótimo esperado da razão sinal/ruído da combinação ( $A_3$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ) é de 3,39405. A combinação encontrada detém os fatores em seus níveis ótimos podendo, assim, maximizar as repostas de valor de  $S/R_m$  (ANSUJ, 2000).

A partir da execução da metodologia robusta de Taguchi de sinal ruído na condição de *maior é melhor*, aplicado nos dados experimentais da soldagem TIG alimentada, é possível afirmar que os fatores que possuem maior representatividade no processo experimental são:  $A_3$  – Corrente Média 80 A;  $B_1$  – Frequência 1 Hz e  $C_1$  – Velocidade de Soldagem 8 mm/s. Por se tratar de uma otimização multi-objetiva, a metodologia de Taguchi sinal ruído não consegue suprir com precisão alcance das melhores características de qualidade dentro do processo (GHOSH; PAL; NANDI, 2016; REN; ZHOU; WEI, 2015; SATHIYA, et al., 2010).

Para o alcance ou confirmação dos fatores e níveis que possuem maior representação no processo experimental, se definiu a utilização do método de Análise Relacional Grey GRA, que possibilita encontrar ou confirmar os fatores com maior representatividade nas características de qualidade do processo de otimização multi-objetivo.

#### **4.3.1 Características Otimizadas Análise Relacional Grey – GRA**

Este estudo é caracterizado como uma pesquisa de otimização multi-objetiva. Devido a esta informação é necessário a adequação de um método que possibilite com maior precisão o alcance dos fatores e seus níveis respectivos, e que apresente maior importância nas características de qualidade. Após a aplicação da metodologia de Taguchi sinal ruído, que possui característica de conseguir identificar apenas um fator com maior precisão de representação das características de qualidade presentes no processo, se fez necessário a adequação da GRA no andamento do estudo.

Segundo Deng (1989), a Análise Relacional Grey, possui capacidade de alcançar maiores precisões das variáveis que compõe um processo otimização multiobjetivo. Frente a este cenário, e contemplando todas as condições para a execução do método GRA, se aplicou neste estudo sua utilização.

Inicialmente, a partir dos dados coletados, se adequou as diretrizes de procedimentos do método para a utilização da Equação 11, no qual as características de qualidade da

pesquisa passam a serem normalizadas dentro das métricas de utilização *high better* HB, conforme Tabela 10. Vale ressaltar que o desenvolvimento analítico dos cálculos GRA foi realizado com auxílio do software *Microsoft Office Excel*.

Tabela 10 – Dados normalizados GRA, métrica HB

Nº.	Diluição (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Altura (mm)
1	0,23719	0,18108	0,85100	0,77987	0,51758
2	0,11454	0,09865	0,59337	0,44082	0,22624
3	0,00000	0,00000	0,15374	0,96512	0,44379
4	0,00000	0,00000	0,31432	0,65123	0,25270
5	0,02178	0,02534	0,17532	0,54774	0,21580
6	0,04224	0,08514	0,34065	1,00000	0,55273
7	0,29680	0,29865	0,95419	0,68439	0,58058
8	0,79439	0,30034	0,54826	0,00000	0,16568
9	0,81279	0,41892	0,57055	0,00000	0,28785
10	0,10422	0,13311	0,75114	0,90051	0,54159
11	0,58837	0,42365	0,50404	0,00000	0,29273
12	1,00000	0,71081	1,00000	0,00000	0,58858
13	0,00000	0,00000	0,76027	0,53288	0,18065
14	0,02834	0,07669	0,16743	0,42367	0,19318
15	0,00000	0,00000	0,20709	0,55575	0,19457
16	0,92730	0,51419	0,75676	0,00000	0,38601
17	0,20190	0,19730	0,29712	0,69754	0,48416
18	0,05496	0,08446	0,30993	0,72041	0,38183
19	0,60086	0,51622	0,89926	0,53974	0,71667
20	0,17012	0,14223	0,50649	0,68496	0,41977
21	0,48740	0,26149	0,55072	0,00000	0,12565
22	0,11064	0,10541	0,41787	0,84563	0,47964
23	0,30889	0,19358	0,00000	0,23613	0,19944
24	0,00000	0,00000	0,00000	0,23613	0,00000
25	0,95788	1,00000	0,94208	0,18639	1,00000
26	0,69997	0,56993	0,77571	0,00000	0,44344
27	0,08058	0,08446	0,15830	0,31790	0,13679

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Após obtenção da normalização dos dados, conforme Tabela 10, foi realizado o segundo passo no desenvolvimento do método GRA, sendo o cálculo do coeficiente relacional *grey*. Para este procedimento, inicialmente, realizou-se cálculo da diferença absoluta  $\Delta$ , que corresponde à diferença do valor  $\| 1 - (y \text{ normalizado}) \|$ , a adequação do valor 1 corresponde ao valor ótimo de saída. Posteriormente a realização da diferença absoluta efetuou-se o cálculo dos coeficientes relacionais por meio da Equação 13. Vale destacar que o coeficiente de distinção adotado foi no valor de  $\omega = 0,5$ ; ( $0 \leq \omega \leq 1$ ), evitando assim um direcionamento ponderado para as respostas, destaca-se que é um valor comumente utilizado (REN; ZHOU; WEI, 2015).

Tabela 11 – Coeficientes Grey para os atributos experimentais e graus de relacionamentos Grade

Nº.	Diluição (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Altura (mm)	Coefficiente Grade	Rank
1	0,39594	0,37910	0,77042	0,69432	0,50895	0,54975	6
2	0,36089	0,35680	0,55149	0,47206	0,39254	0,42676	19
3	0,33333	0,33333	0,37140	0,93479	0,47339	0,48925	11
4	0,33333	0,33333	0,42170	0,58909	0,40087	0,41566	21
5	0,33825	0,33906	0,37745	0,52507	0,38935	0,39383	22
6	0,34299	0,35339	0,43127	1,00000	0,52783	0,53110	9
7	0,41556	0,41620	0,91608	0,61304	0,54382	0,58094	4
8	0,70860	0,41678	0,52535	0,33333	0,37472	0,47176	13
9	0,72757	0,46250	0,53795	0,33333	0,41249	0,49477	10
10	0,35822	0,36579	0,66768	0,83405	0,52170	0,54949	7
11	0,54847	0,46453	0,50203	0,33333	0,41416	0,45250	16
12	1,00000	0,63356	1,00000	0,33333	0,54860	0,70310	2
13	0,33333	0,33333	0,67592	0,51700	0,37897	0,44771	17
14	0,33975	0,35129	0,37521	0,46454	0,38261	0,38268	25
15	0,33333	0,33333	0,38672	0,52952	0,38302	0,39319	23
16	0,87306	0,50720	0,67273	0,33333	0,44884	0,56703	5
17	0,38518	0,38382	0,41567	0,62309	0,49220	0,45999	15
18	0,34601	0,35322	0,42014	0,64136	0,44716	0,44158	18
19	0,55609	0,50824	0,83231	0,52069	0,63830	0,61113	3
20	0,37597	0,36825	0,50327	0,61347	0,46286	0,46477	14
21	0,49378	0,40371	0,52671	0,33333	0,36381	0,42427	20
22	0,35988	0,35853	0,46205	0,76409	0,49002	0,48691	12
23	0,41978	0,38273	0,33333	0,39561	0,38445	0,38318	24
24	0,33333	0,33333	0,33333	0,39561	0,33333	0,34579	27
25	0,92231	1,00000	0,89619	0,38063	1,00000	0,83983	1
26	0,62498	0,537595	0,690332	0,333333	0,473233	0,53189	8
27	0,35226	0,353222	0,372662	0,422975	0,366782	0,37358	26

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A partir da obtenção dos coeficientes relacionais *Grey* para cada variável de saída, foi executado o cálculo do coeficiente *Grade* no qual evidencia o grau de relacionamento presente em cada série realizada; para execução de tal procedimento matemático se utilizou a Equação 14. Conforme a Tabela 11, também é possível estabelecer um ranqueamento para os valores obtidos com o cálculo do grau de relacionamento, sendo os primeiros mais próximos de 1, devido a condição ótima *GRA maior é melhor*.

Para evidenciar quais variáveis que possuem maior representação nas características de qualidade presentes no processo, foi necessário realizar a diferença absoluta  $\Delta$ , entre os resultados do grau de relacionamento dos níveis das características de entrada, presentes no número séries executadas. Seu desenvolvimento analítico conforme:

$$A_1=(0,54975 + 0,42676 + 0,48925 + 0,41566 + 0,39383 + 0,53110 + 0,58094 + 0,47176 + 0,49477) / 9 = 0,48376$$

$$A_2=(0,54949 + 0,45250 + 0,70310 + 0,44771 + 0,38268 + 0,39319 + 0,56703 + 0,45999 + 0,44158) / 9 = 0,48859$$

$$A_3=(0,61113 + 0,46477 + 0,42427 + 0,48691 + 0,38318 + 0,34579 + 0,83983 + 0,53189 + 0,37358) / 9 = 0,49570$$

Após o desenvolvimento analítico para obtenção da diferença absoluta, dentro dos níveis que cada variável foi submetida, foram identificadas as variáveis que possuem maiores representações nas características de qualidade, segundo Tabela 12.

Tabela 12 – Resultado dos níveis das variáveis de maiores representações

	A	B	C
Nível1	0,48376	0,51900	0,54962
Nível2	0,48859	0,25208	0,44082
Nível3	0,49570	0,42959	0,46629
$\Delta$	0,47664	0,16267	0,35749

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

É possível afirmar que, após o desenvolvimento do método de Análise Relacional *Grey*, o estudo identificou as melhores condições de entrada que direcionam a execução do processo para as melhores características de qualidade. Como resultado do desenvolvimento da GRA se obteve:

$$A_3, B_1, C_1,$$

Foi verificado que as variáveis encontradas pelo método GRA direcionam o experimento para as melhores condições de qualidade, convergem para as variáveis que a metodologia robusta de Taguchi razão sinal ruído possibilitou encontrar. Por consequência, possibilitando o aumento da confiança para o desenvolvimento do experimento de confirmação, voltado para as melhores características de qualidade.

Ao passo do desenvolvimento da pesquisa, após o encontro das melhores condições de entrada no processo experimental, foi realizado o teste ANOVA para identificar a influência e significância das variáveis de entrada no processo. Conforme Ren, Zhou e WEI,

(2015), ao utilizar o método GRA é possível realizar o teste ANOVA nos dados encontrados pelo Coeficiente *Grade*, devido ao fato de reunir os valores de todas as respostas relacionadas às condições das expostas às corridas experimentais.

#### 4.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA

Posteriormente a realização da metodologia *Grey-Taguchi* na pesquisa, foi realizado o teste ANOVA com o intuito de analisar a influência e significância das variáveis no processo experimental de otimização de solda TIG alimentada. Para análise do teste ANOVA o estudo considerou 95% de confiança e  $p \leq 0,05$ . Ressalta-se que os cálculos foram realizados por meio da utilização dos softwares *MINITAB 17®* (versão DEMO).

Conforme a Tabela 13, no qual apresenta os valores do teste ANOVA, é possível identificar os graus de liberdade do teste, soma dos quadrados, média quadrática, valor de F, valores de P e significância das variáveis expostas ao teste. Valores provenientes do teste a partir dos dados do coeficiente *Grade* (GHOSH; PAL; NANDI, 2016).

Tabela 13 – Análise de Variância *Grade*

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor F	Valor P	Significativo (Sim/Não)
<b>A</b>	2	0,032987	0,021756	22,92	0,00041	Sim
<b>B</b>	2	0,052879	0,026440	28,77	0,00034	Sim
<b>C</b>	2	0,037749	0,023874	25,98	0,00046	Sim
<b>ERRO</b>	16	0,014704	0,000919			
<b>TOTAL</b>	22	0,140277				

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Segundo a Tabela 13, é possível verificar que, as variáveis submetidas ao teste ANOVA mostraram-se significativas e influentes no processo de soldagem TIG, sendo a variável B (Frequência) com maior significância no processo de soldagem TIG alimentada. Ao mesmo tempo no teste ANOVA foi realizada a identificação da porcentagem que explica o modelo, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Porcentagem explicativa do modelo encontrado

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (aj)	R <sup>2</sup> (pred)
0,0303154	86,67%	81,67%	71,23%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

É possível identificar por meio da Tabela 14 que a porcentagem que explica o modelo encontra-se com 86,67% de significância, isto se deve aos ajustes realizados. O pressuposto referente às retiradas das observações influentes foi atendido, considerando três desvios padrões [+ , -]. Equação reduzida do Coeficiente Grade:

$$CG = 0,01249A_3 + 0,02171 B_1 + 0,06481 C_1 \quad (28)$$

Após a identificação dos experimentos que possuem maior representação e significância no processo experimental, foi possível dar início a corrida de confirmação dos dados, com o intuito de confirmar as condições das variáveis evidenciadas pelos métodos utilizados.

#### 4.5 EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO

A partir do desenvolvimento analítico por meio da metodologia *Grey-Taguchi*, ANOVA identificou-se as variáveis que possuem maior representação e significância no desenvolvimento do processo, direcionando para as melhores características de qualidade. Dessa forma, foi realizada a corrida de confirmação experimental e análise metalográfica nos corpos de prova provenientes segundo as variáveis  $A_3$ ,  $B_1$  e  $C_1$ .

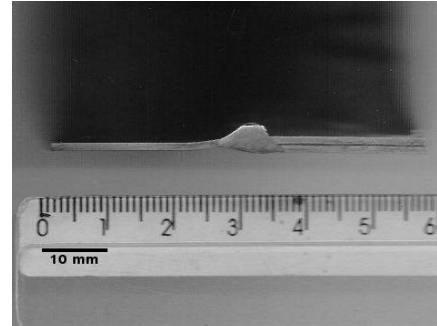
Também se realizou a corrida de confirmação devido ao fato de existir uma carência de matéria prima suficiente no qual impediu a repetição das 27 corridas, no entanto, possibilitou-se evidenciar a otimização do processo de soldagem TIG alimentado, conforme as Figuras 21 e 22. Características metalográficas obtidas pelo software *IMAGEJ*.

Figura 21 – Peças cortadas pós ataque



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 22 – Imagem cordão TIG



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com o conhecimento das características de qualidade, foi mensurada a corrida de confirmação conforme a Figura 22. Após tal processo, é possível afirmar no estudo que os resultados alcançados serviram para aproximar-se das características ótimas de processo, conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados da confirmação experimental

<b>Cordão</b>	<b>Diluição</b>	<b>Penetração</b>	<b>Reforço</b>	<b>Largura</b>	<b>Altura</b>
<b>1</b>	46%	2,45	0,88	6,3	3,33

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Conforme Tabela 15, após todo o procedimento experimental e analítico, possibilitou-se evidenciar a melhoria nos resultados alcançados da pesquisa. Tal fato aponta para uma otimização nos resultados do cordão de solda TIG, direcionando o processo de produção para melhores indicadores produtivos e adaptação no setor de soldagem industrial de tubos.

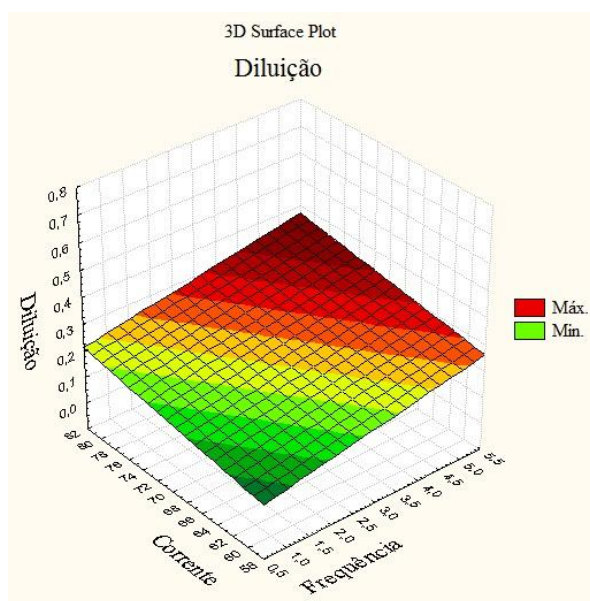
#### 4.6 CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE DO PROCESSO DILUIÇÃO (D)

A diluição no processo de solda TIG no material AISI 304 tubular tem papel fundamental na mensuração da qualidade de solda. Tal característica consiste na coalescência entre as áreas de reforço e penetração nos materiais envolvidos no processo de soldagem. A

diluição possui como característica principal a porcentagem de mensuração que pode variar de 5% a 100% de coalescência de material (BRACARENSE, 2000).

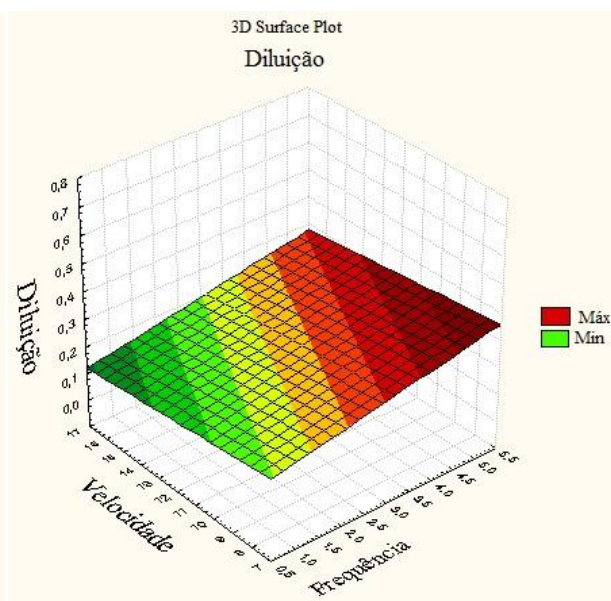
O comportamento da característica de diluição demonstrou-se de modo linear, conforme a Figura 23, Figura 24 e Figura 25. Evidenciando uma relação paralela com as variáveis definidas no planejamento experimental.

Figura 23 – (D) Corrente x Frequência



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

Figura 24 – (D) Velocidade x Frequência



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

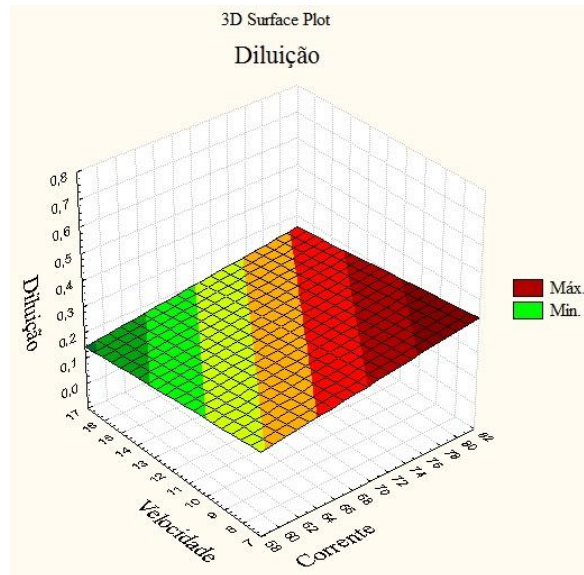
Conforme a Figura 23, o aumento da diluição no material soldado depende particularmente da elevação das variáveis de corrente e frequência, alcançando níveis satisfatórios de coalescência dos materiais de base junto do elemento de adição. Segundo Nogueira (2015), quando os níveis de corrente e frequência estão elevados é possível um aporte energético maior no desenvolvimento do cordão de solda, aumentando as chances de uma diluição satisfatória. Tal efeito é evidenciado nos resultados deste estudo. O autor Elias (2013) afirma que a diluição se comporta de modo satisfatório em altas unidades de frequência mesmo quando se pode condicionar o processo com uma corrente menor.

Na busca de um desempenho melhor de soldagem, resultante em uma melhor diluição, é indispensável não evidenciar a convergência de variáveis e seus níveis respectivos que proporcionam tal aspecto. Sendo uma variável de extrema influência no processo, a



velocidade de soldagem é fundamental para o aparecimento de uma diluição satisfatória. Conforme Figura 24 e Figura 25.

Figura 25 – (D) Velocidade x Corrente



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

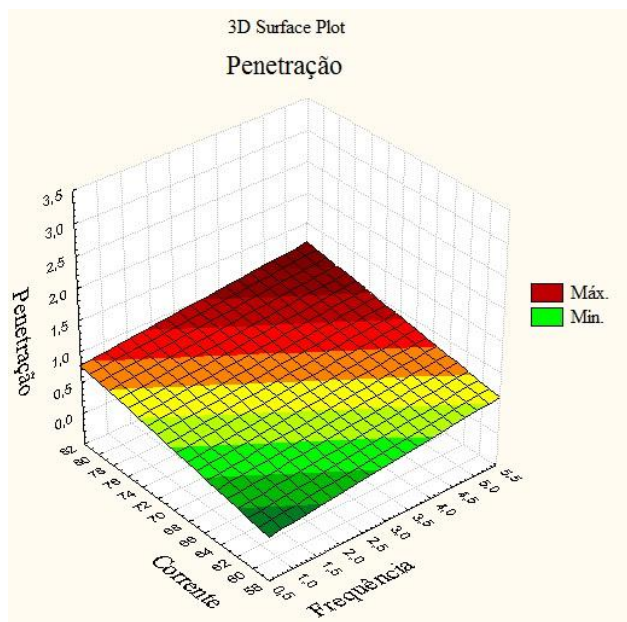
Ao analisar o comportamento da diluição relacionada à velocidade de soldagem, conforme a Figura 24 e 25, no processo de solda TIG alimentado, o estudo alcançou níveis representativos de diluição com velocidades. Possuindo um aspecto inverso a corrente e frequência, a velocidade influencia diretamente no processo, evidenciando que dentro da menor condição de velocidade obteve-se melhor desempenho de diluição. O autor Ribeiro, (2012) reitera que o processo TIG alimentado é caracterizado por possuir menores velocidades, facilitando o impacto do aporte energético ao cordão executado.

Diante do exposto, por meio das Figuras 23, 24 e 25, é evidente que as variáveis desempenham uma função linear frente às condições que foram submetidas ao analisar a característica de Diluição. Ressalta-se que a corrida de confirmação obteve um valor de 46% de diluição, considerado satisfatório, pois se aproxima aos 50% destinados a porcentagem de medida dos materiais de base, evidenciando assim uma diluição ótima de processo.

#### 4.6.1 Penetração (P)

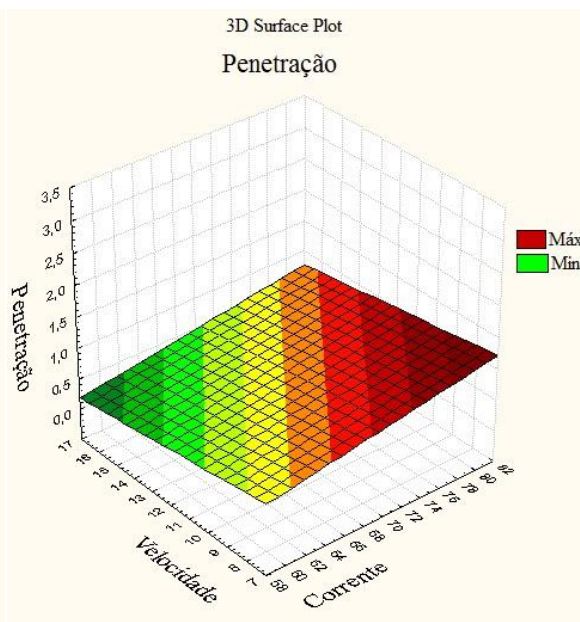
Sendo identificada como uma das variáveis que fazem parte do cálculo para diluição, a penetração possui uma atividade fundamental para o cordão de solda em modo geral, possuindo características que podem classificar a peça produzida apta ou não para determinadas funcionalidades. Para um melhor entendimento dos resultados voltados para a penetração, este estudo dividiu seu comportamento em relação às variáveis de entrada em três figuras. Conforme Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

Figura 26 – (P) Corrente x Frequência



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

Figura 27 – (P) Velocidade x Corrente



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

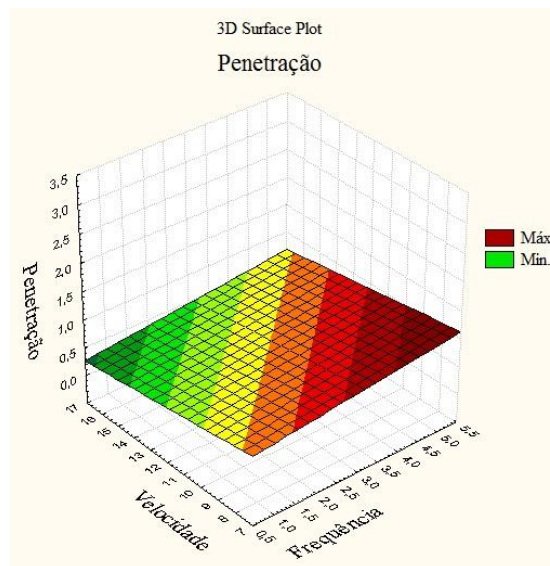
O comportamento da característica de penetração é identificado como linear, em concordância com o aspecto de diluição no processo, conforme as Figuras 26 e Figura 27. Da mesma maneira possuindo uma alta dependência do aporte energético para atingir melhores níveis de penetração com maiores indicadores de Frequência e Corrente (RAO; DEIVANATHAN, 2014; RIBEIRO, 2012). Os maiores níveis de penetração neste estudo, ocorrem quando a Frequência e Corrente estão em seus níveis mais elevados.

Os autores Modenesi, Marques e Bracarense (2009), afirmam que os níveis de corrente e frequência dependem das características do material a ser soldado, evitando

desperdícios experimentais. Em convergência com os autores, este estudo realizou a etapa de planejamento experimental que definiu quais os níveis das variáveis que implicariam em uma solda regular para análise e, como consequência, poder buscar uma otimização.

No caminho inverso à frequência e corrente, a variável de velocidade de soldagem desempenha um papel importante na penetração, possuindo um rigor para seu nível de especificação na solda TIG, conforme Figura 27 e Figura 28.

Figura 28 – (P) Velocidade x Frequência



Fonte: Adaptado ( software *Statistica7*)

A característica de penetração frente a variável de velocidade se define como: quanto menor a velocidade de soldagem maior serão as chances de se obter índices altos de penetração no processo. Tal afirmação vai ao encontro com a literatura, no qual afirma que no processo TIG baixas velocidades proporcionam melhores qualidades de cordão de solda, com propriedades mecânicas (KANNAN; KUMARAN; KUMARASWAMIDHAS, 2016; RIBEIRO, 2012). Segundo Lermen, (2011), a possibilidade de aumento de velocidade de soldagem é proveniente de um processo híbrido de TIG, no qual também se pode esperar melhores penetrações com maiores velocidades.

Ao analisar a característica de penetração frente as variáveis de entrada frequência, corrente e velocidade, é evidenciado na pesquisa que o comportamento da reta é linear. A

corrida de confirmação constatou neste estudo a mensuração de 2,45 mm, sendo considerado de extrema relevância positiva, pois, o máximo alcançado seriam 3mm ultrapassando os materiais de base na solda.

#### 4.6.2 Largura (W)

O processo TIG convencional é caracterizado por ser um dos melhores voltados para a qualidade dos cordões de solda no âmbito dos processos de soldagem, nesse aspecto possuindo uma identidade satisfatória frente as características de qualidade. Sendo a largura (w) uma delas, no qual desempenha uma função fundamental frente aos esforços de utilização da peça produzida. Para melhor visualizar o comportamento da Largura, a pesquisa dividiu em três figuras para melhor entendimento. Conforme Figura 29, Figura 30 e Figura 31.

Figura 29 – (W) Corrente x Frequência

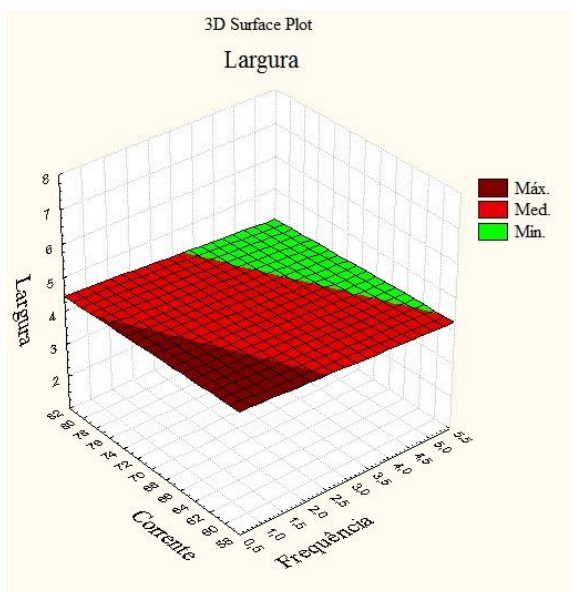
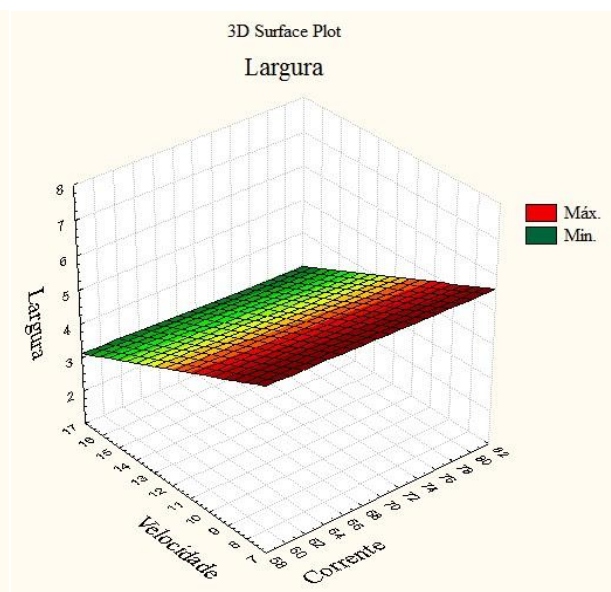


Figura 30 – (W) Velocidade x Corrente



Fonte: Adaptado ( software *Statistica7*)

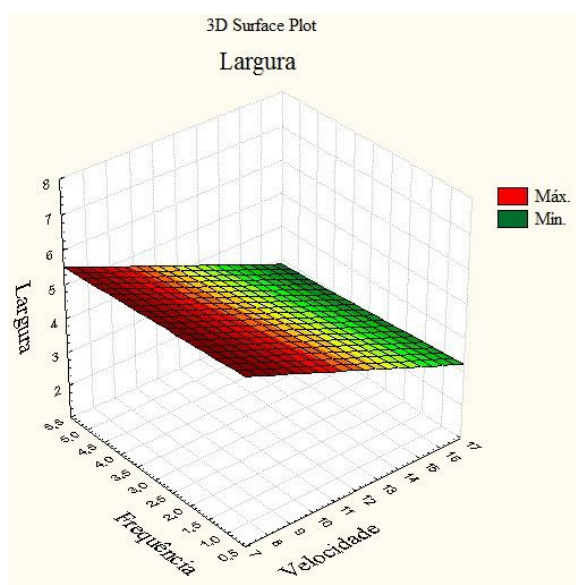
Fonte: Adaptado ( software *Statistica7*)

O aporte energético é um fator importante na formação da largura, sendo o fator que estabelece uma constante na construção da largura dentro dos maiores níveis, no entanto, neste estudo o material era de espessura 1,5mm devido ao fato adequou-se dentro dos

menores níveis de corrente e soldagem, que competem a esta especificação, evitando a ruptura do material com maior caldeamento, conforme se pode analisar a Figura 29.

O resultado vai à convergência ao estudo de Deitos Filho (2016), no qual afirma que quanto maior a especificação dos níveis de aporte térmico, de acordo com as características de espessura do metal de base, maiores serão as possibilidades de uma largura satisfatória. O autor também afirma que quanto maior a velocidade de soldagem menor será a possibilidade de formação de uma largura satisfatória, pois impede o caldeamento dos materiais no cordão e diminui o aporte térmico.

Figura 31 – (W) Freqüência x Velocidade



Fonte: Adaptado ( software *Statistica7*)

Conforme as Figuras 30 e Figura 31, a importância da velocidade no processo de formação da largura é substancial para tal execução. Neste estudo é evidenciado que quanto maior o indicador de velocidade menor é a largura presente no cordão de solda TIG, pois evita um aporte energético direto na área de soldagem, diminuindo o caldeamento. Tal evidência vai ao encontro da literatura existente Deitos Filho, (2016); Shanmugam; Murugan, (2006); Sharma; Verma; Arora (2015).

Na obra de Shanmugam; Murugan (2006), observou-se o comportamento da largura até seu ponto mínimo onde com o acréscimo de velocidade de soldagem este ponto passou a inverter.



No desenvolvimento da análise da característica de largura (W) no processo de TIG alimentado auxiliado por robô de solda, é evidenciado o estudo da influência da velocidade em tal processo, sendo fator determinante para a formação da mesma. A largura possui um papel importante na utilização específica das peças, detendo poderes de resistência a esforços, assim como possibilidade de estanqueidade. O resultado na corrida de confirmação de largura obteve 6,3 mm, considerado satisfatório para as corridas executadas.

#### 4.6.3 Reforço (r)

A característica de reforço no cordão de solda sumariamente é identificada como uma característica que quanto maior a área de reforço maior quantidade de material a cima do material de base, podendo exercer funções mecânicas de proteção. Para melhor analisar o comportamento do Reforço nas corridas experimentais, o estudo dividiu em três figuras para facilitar o entendimento do comportamento desta característica de qualidade no processo. Conforme Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Figura 32 – (r) Corrente x Velocidade

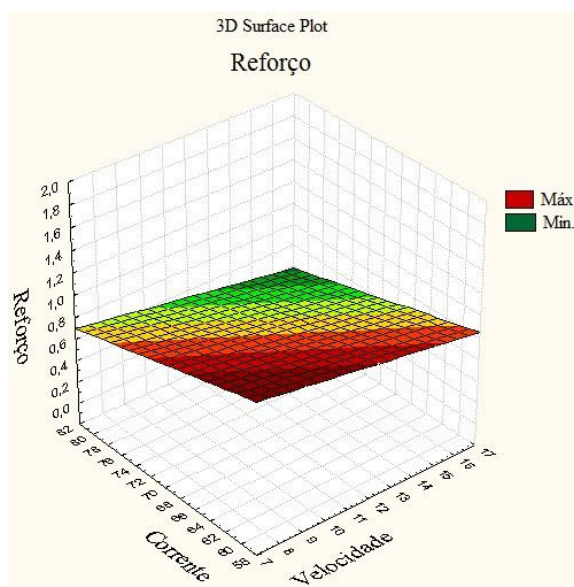
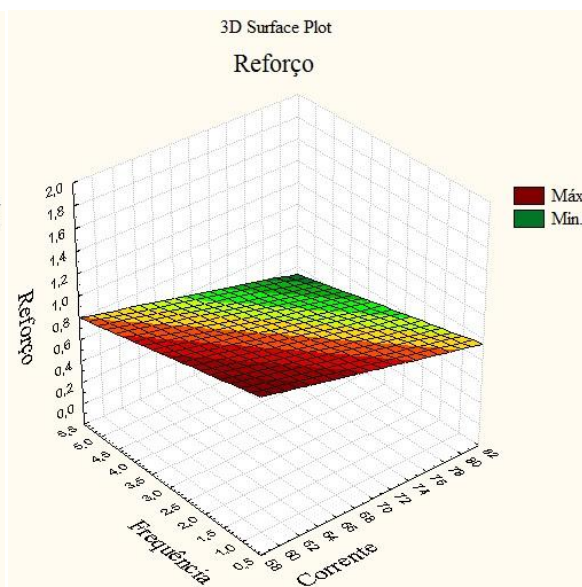


Figura 33 – (r) Frequência x Corrente



Fonte: Adaptado ( software *Statistica7*)

Fonte: Adaptado ( software *Statistica7*)

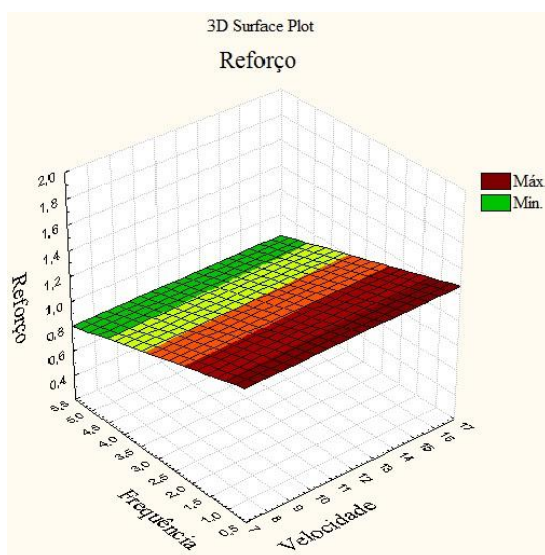
Ao analisar a Figura 32 e Figura 33 o estudo evidencia que o aumento do aporte energético diminui a formação de uma superfície de reforço mais elevada, justificando-se isso ao aquecimento do material durante esse aporte energético maior. Segundo Nogueira (2015),

para aumentar a altura de reforço é necessário maiores velocidades de soldagem com correntes menores e frequência de nível elevado. Uma altura de reforço maior para esta pesquisa não é considerada satisfatória se ocorrer sozinha, pois não alteraria as outras características de qualidade presentes no estudo.

O autor Deitos Filho (2016), afirma que as variáveis que mais influenciam na formação da característica de reforço é a taxa de alimentação juntamente com a velocidade de soldagem. Nesta pesquisa a taxa de alimentação é fixa em 1,5mm/s, provocando uma estabilidade na apresentação do reforço de soldagem. Sendo a velocidade de soldagem uma variável que influencia no comportamento do reforço, conforme a Figura 34.

Localizando-se no sentido inverso, a largura, a característica de reforço obedece inversamente às condições de largura, quanto maior a largura menor será a possibilidade de reforço no cordão de solda, devido ao fato de maior coalescência de material na zona afetada (GHOSH; PAL; NANDI, 2016; NOGUEIRA, 2015). Vale ressaltar também que a velocidade de soldagem é um fator importante para sua formação, conforme Figura 34.

Figura 34 – Frequência x Velocidade



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

Conforme Figura 34, é evidenciado no estudo que quanto maior a velocidade de soldagem maior será a formação de reforço, devido ao fato que a possibilidade de

caldeamento do material vem a diminuir, aumentando a altura do reforço na superfície. O comportamento do reforço na corrida de confirmação do experimento obteve 0,88mm de reforço, sendo considerado satisfatório no processo experimental.

#### 4.6.4 Altura de solda (h)

Considerada uma das principais características de qualidade relacionadas ao cordão de solda Tig, afirmação que é justificada pela união de duas dimensões, a penetração e o reforço, que contemplam a altura de solda; variável fundamental para evidenciar um cordão de qualidade satisfatória por meio do processo de metalografia.

Com o intuito de analisar o comportamento da altura de solda, assim como, quais as variáveis que possuem maiores influências no cordão de solda, este estudo definiu em três figuras o relacionamento dos fatores de entrada com a característica de qualidade, conforme a Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

Figura 35 – (h) Frequência x Corrente

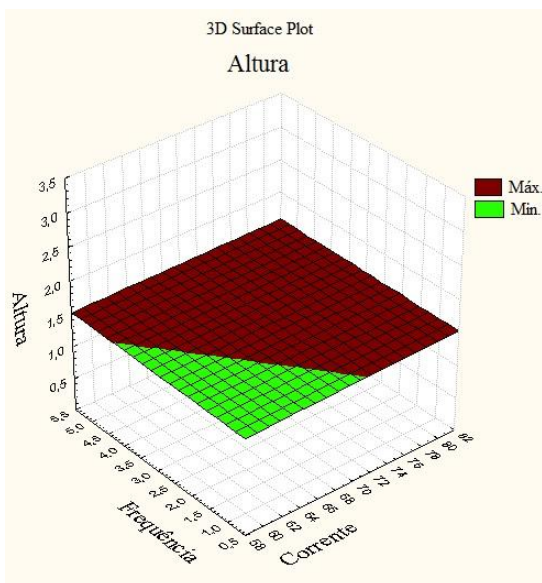
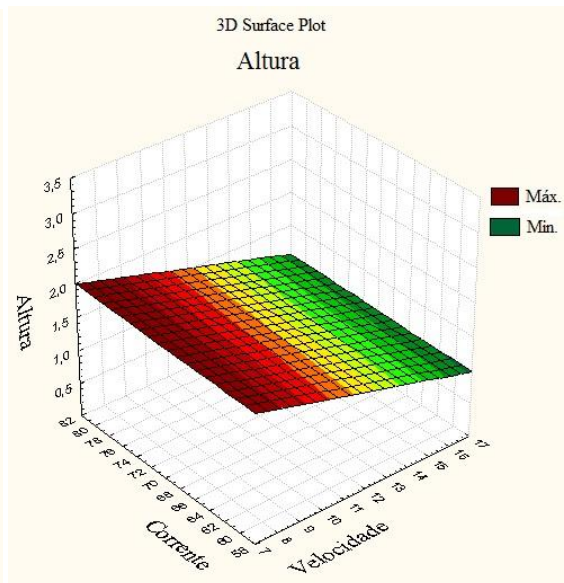


Figura 36 – (h) Corrente x Velocidade



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

Fonte: Adaptado software *Statistica7*)

Segundo a Figura 35, é evidenciado na pesquisa que quanto menor a frequência e corrente, menor será a altura. O crescimento da altura ocorre quando o aporte de energia

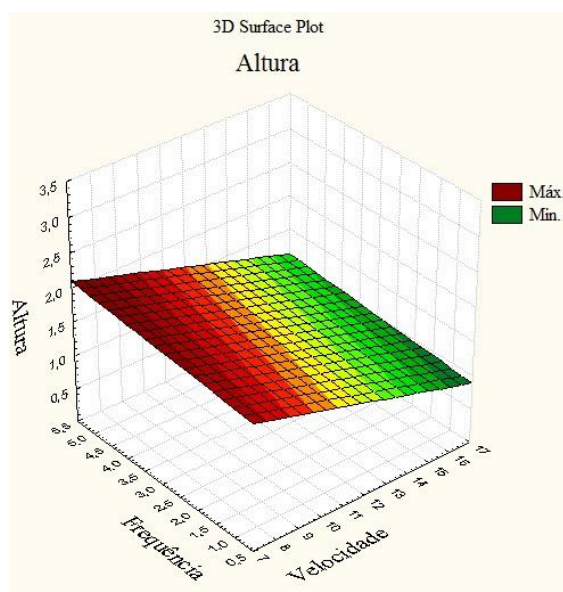


aumenta, proporcionando uma reta linear ao processo. Segundo Nagesh Datta (2010), o aporte de energia no processo de soldagem TIG é fundamental para o aumento da largura por conduzir um caldeamento satisfatório, possibilitando uma menor altura de soldagem e maior largura.

A pesquisa converge para os dados levantados na literatura, porque possui índices satisfatórios, largura e penetração, aonde ocorre o caldeamento do material de base junto com o material de adição, proporcionando uma altura menor de cordão de solda. Segundo Delgado (2000), a altura do cordão é influenciada também pela posição de soldagem na qual se desenvolve a pesquisa. A posição utilizada neste estudo foi a horizontal, realizando todos os experimentos e as corridas experimentais.

O comportamento linear da altura de solda é notável frente as condições de frequência e velocidade, conforme Figura 36 e Figura 37.

Figura 37 – (h) Frequência x Velocidade



Fonte: Adaptado (software *Statistica7*)

Conforme a Figura 36 e Figura 37, é notável que o aumento da velocidade não interfere na altura do cordão de solda, no entanto, o aumento da frequência é uma variável que tem papel importante na influência da altura de solda, aonde maior o aporte energético maior é o caldeamento e inserção de material de adição no cordão. Tal fato possibilita um aumento

na altura de solda. Salienta-se ainda que neste estudo fixou-se a taxa de alimentação em 1,5mm/s à frio. Os resultados provenientes da altura de solda desta pesquisa convergem para os estudos que constam na literatura dos autores Nagesh, Datta (2010); Ribeiro (2012); Deitos Filho, (2016).

O autor Ribeiro (2012), ressalta que com uma taxa de alimentação bem definida de acordo com o planejamento experimental se aumentam as possibilidades de se obter uma altura de cordão de solda satisfatória. O autor também afirma que com índices maiores de velocidades de soldagem a altura possui uma tendência a diminuir.

O comportamento da altura de solda na corrida de confirmação obteve como resultado 3,33mm considerado um índice satisfatório por exercer o dobro da dimensão da espessura do tubo, possibilitando garantir futuros esforços que a peça pode ser exigida.

## 5. CONCLUSÃO

A principal contribuição do estudo foi encontrar a otimização para o processo de soldagem TIG alimentado no aço tubular AISI 304 auxiliado por robô de solda, identificando quais os níveis das variáveis de entrada que possuem maiores influências nas características de qualidade do processo. Sendo assim, direcionando para uma sistemática de processo, que pode auxiliar em uma automatização industrial na soldagem TIG alimentada.

As variáveis de entrada corrente média, frequência e velocidade de soldagem foram definidas com base na literatura e na utilização da metodologia DOE, que possibilitou a realização de um planejamento experimental, no qual mensurou limitantes experimentais para a realização da soldagem, em busca das melhores características de qualidade. Para a realização das corridas experimentais as variáveis foram submetidas ao arranjo fatorial da matriz ortogonal de Taguchi, que definiu as 27 corridas experimentais, ao passo que este estudo possui 3 variáveis de entrada em 3 níveis submetidos.

A luz dos resultados desta pesquisa, se evidenciou a corrida experimental de otimização que possui maior representação nas melhores características de qualidade do processo de soldagem TIG alimentando em aço tubular 304 A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub> e C<sub>1</sub>. Tal possibilidade foi alcançada pela utilização do método *Grey-Taguchi* sendo que, primeiramente, utilizou-se metodologia robusta de Taguchi razão sinal ruído na condição de maior melhor na qual foi encontrada a condição A<sub>3</sub> - Corrente Média 80 A, com maior representação nas características de qualidade do processo. Após utilizou-se a GRA, que possibilitou a identificação e confirmação das variáveis encontradas pela metodologia de Taguchi, sendo B<sub>1</sub>. Frequência 1 Hz e C<sub>1</sub>. Velocidade de soldagem 8 mm/s.

Diante da análise dos corpos de prova, é notável a influência direta das variáveis de entrada nas características de qualidade presentes na pesquisa. O aporte de energia com maiores níveis de frequência e corrente média no material aço AISI 304 tubular possibilitou uma melhor coalescência dos materiais de base com o alimentado, no entanto em menores velocidades de soldagem se pode provocar rupturas em alguns corpos de prova, devido ao excesso de calor em uma espessura de 1,5mm.

A confirmação experimental foi realizada de acordo com os níveis das variáveis encontradas na utilização da metodologia *Grey-Taguchi*, possibilitando alcançar o resultado frente as características de qualidade como 46% de diluição, 2,45 mm penetração, 6,3mm largura, 0,88mm reforço e 3,33mm altura. O comportamento das características e qualidade

frente à corrida de otimização foi considerado satisfatório, pois alcançou números consideráveis como resultados.

A característica de qualidade diluição possuía média de 24% nos cordões de solda Tig alimentado auxiliado por robô, com a otimização do processo passou para 46%. No caso da penetração que detinha média de 0,7mm no processo, com a otimização obteve 2,45mm de resultado. Na soldagem sobreposta tubular, é importante ter um nível próximo do limite do processo na diluição, devido ao fato de garantir uma solda mais próxima das melhores qualidades de união de materiais. Diluição que engloba a área de reforço e a área de penetração, sendo considerado satisfatório ao aproximar-se da área total da penetração como foi encontrado neste estudo.

A característica de largura apresentava uma média de 4,3mm no processo experimental, com o aporte da otimização alcançou 6,3mm na confirmação experimental considerada satisfatória dentro do nível das variáveis estudadas, possibilitando garantias de segurança que o cordão de solda possa sofrer quando a peça for utilizada. No entanto, o reforço não obteve uma diferença com maior significância, pois detinha 0,77mm de média no processo e passou para 0,88 mm na confirmação experimental, característica que possui maior dependência da variação da distância do eletrodo peça no qual não se variou neste estudo. A característica de altura que possuía 1,47mm de média no processo passou a deter 3,33mm na confirmação por meio da metodologia utilizada.

Conclui-se que, a utilização da análise relacional *Grey-Taguchi* pode ser aplicada em processos que buscam maiores e melhores condições de qualidade, buscando identificar quais as variáveis que possuem maiores representações nas características de qualidade. A contribuição prática neste estudo é evidenciada pelo alcance das melhores características de qualidade presentes no processo e na possibilidade de automatizar o mesmo frente uma fixação das variáveis, garantindo uma maior repetitividade de peças e padronização, colaborando para melhorar os aspectos da gestão produtiva.

## 5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No âmbito das limitações presentes no desenvolvimento experimental, o estudo teve que limitar-se a não utilizar um número maior de variáveis de entrada por não possuir recursos e material suficiente para execução da pesquisa. Frente a isso podendo abordar a solda TIG alimentada de maneira mais abrangente.

## 5.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

A soldagem TIG apresenta inúmeras características de aplicações e funcionalidades importantes para o desenvolvimento do processo, para o fortalecimento da pesquisa na área é imprescindível o prosseguimento da pesquisa como:

- a) Aplicar outras metodologias com os dados coletados, para comparar as corridas de confirmação na tentativa de aproximar-se a uma maior precisão nos resultados, aproximando-se cada vez mais da gestão dos processos.
- b) Realizar o desenvolvimento experimental com o aporte de um número maior de variáveis, com o objetivo de abranger um número maior de fatores que influenciam no experimento.
- c) Repetir as corridas experimentais e realizar um teste de esforços nos corpos de prova e alcançar a otimização destas variáveis com a utilização do método Grey-Taguchi, na busca das melhores características de qualidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSUJ, A. P. **Melhoramento da qualidade de um processo de produção contínua utilizando técnicas estatísticas e os métodos de Taguchi**. 2000, 128f. 2000. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria
- ASILTÜRK, I.; AKKUŞ, H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. **Measurement**, v. 44, n. 9, p. 1697-1704, 2011.
- ASM, AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook**, 9ª edição, Ohio, p.195. vol.6 ASM, Welding, Brazing and Soldering, 1993.
- AWS, AMERICAN WELDING SOCIETY - **Welding handbook**, 8ª edição, Miami, vol. 2. p. 479, Welding processes, 1991.
- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S.: **Statistics for experimenters**. New Jersey. Wiley Interscience, 1978.
- BRACARENSE, A. Q.; **Processo de Soldagem TIG – GTAW**, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de pós graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Maio 2000. Disponível em:  
<file:///K:/Disserta%C3%A7%C3%A3o/Artigos%20relacionados/Base%20de%20dados/Disserta%C3%A7%C3%B5es/BRACARENSE.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2017.
- BURGARDT, P.; HEIPLE, R.; **Interaction between Impurities and Welding Variables in Determining GTA Weld Shape**. In: 66th AWS Annual Meeting, Las Vegas - Nevada, p. 150-155, 1985.
- CARLSON, J. S.; SPENSIERI, D.; WÄRMEFJORD, K.; SEGEBORN, J.; SÖDERBERG, R.; Minimizing dimensional variation and robot traveling time in welding stations. **Procedia CIRP**, vol. 23, p. 77-82, 2014.
- CARY, H. B. **Modern welding technology**. Prentice-Hall, 1979.
- CHOUDHURY, N.; RUDRAPATI, R.; BANDYOPADHYAY, A. ; Design optimization of Process Parameters for TIG Welding based on Taguchi Method, **International Journal of Current Engineering and Technology**, Special Issue-2, February, 2014.
- COHEN, Y.; COHEN, J. Y. **Analysis of variance. Statistics and Data with R: an applied approach through examples**, p. 463-509, 1988
- DEITOS FILHO, A. M.; **Influência Das Variáveis DO Processo DE Soldagem Tig Alimentado Duplo Arame Quente Na Diluição E Morfologia De Cordões DE Solda De Inconel 625 Depositados Em Um Aço AISI/SAE 4130**, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Programa De Pós Graduação Em Engenharia Mecânica E De Materiais – PPGEM, Curitiba, 2016.

DELGADO, L. C. **Estudo E Desenvolvimento Do Processo TIG Com Alimentação Automática Do Arame**. Dissertação De Mestrado Em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

DENG, J., Introduction to grey system theory. **Journal of Grey Systems**, 1, 1-24, 1989.

DIAS, A. O.; **Análise da Influência dos Parâmetros de Pulsação na Soldagem do Aço Inoxidável AISI 304 Através do Arame Tubular AWS E316LT1-4**. Universidade Federal De Itajubá Instituto De Engenharia Mecânica, Programa De Pós-graduação Em Engenharia Mecânica, Itajubá, 2009

ELIAS, M. S.; **Avaliação Metalúrgica Da Soldagem De Revestimento Inox Austenítico Sobre Aço SAE 4130**, Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Dissertação de Mestrado. CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ MARÇO – 2013.

FATTAHI, M.; AGHAEI, V. N., DABIRI, A. R., AMIRKHANLOU, S., AKHAVAN, S.; FATTAHI, Y.; Novel manufacturing process of nanoparticle/Al composite filler metals of tungsten inert gas welding by accumulative roll bonding. **Materials Science and Engineering: A**, vol. 648, p. 47-50, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.053>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

FBTS – **Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem**: Inspetor de Soldagem – Volume, 2ª Edição, 1984.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, vol.1. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

GEARY, D.; MILLER R.; **Soldagem**, tradução: Carlos Lange Bassani, Irionson Antonio Bassani 2ª ed., Bookman, Porto Alegre 2013

GERKEN, J. M.; **Gas Tungsten Arc Welding**, The Lincoln Electric Company, p. 1-21, 1995.

GHANI, J. A.; CHOUDHURY, I. A.; HASSAN, H. H.; Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, **Journal of Materials Processing Technology** 145, p. 84–92, 2004.

GHOSH, N.; PAL, P. K.; NANDI, G. Parametric optimization of MIG welding on 316L austenitic stainless steel by grey-based taguchi method. **Procedia Technology**, v. 25, p. 1038-1048, 2016.

GONÇALVES, C. V.; CARVALHO, S. R.; GUIMARÃES, G.; Application of optimization techniques and the enthalpy method to solve a 3D-inverse problem during a TIG welding process. **Applied Thermal Engineering**, vol. 30, n. 16, p. 2396-2402, 2010.

JOGUET, D.; COSTIL, S.; LIAO, H.; DANLOS, Y; Porosity content control of CoCrMo and titanium parts by Taguchi method applied to selective laser melting process parameter. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, n. 1, p. 20-30, 2016.

KANNAN, S.; KUMARAN, S. S.; KUMARASWAMIDHAS, L. A.; An investigation on compression strength analysis of commercial aluminium tube to aluminium 2025 tube plate by using TIG welding process. **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 666, p. 131-143, 2016.

KARANDE, P.; GAURI, S. K.; CHAKRABORTY, S.; Applications of utility concept and desirability function for materials selection, **Mater. Des.**, vol.45, p.349–358, 2013.  
DOI:10.1016/j.matdes.2012.08.067

KATHERASAN, D.; ELIAS, V. J.; SATHIYA, P.; HAQ, A. N ; Modeling and optimization of flux cored arc welding by genetic algorithm and simulated annealing algorithm, **Multidiscipline Modeling in Materials and Structures**, vol. 9, No. 3, p. 307-326, 2013.

KHOUALDIA, T.; HADJADJ, A. E.; BOUACHA, K.; ABDESLAM, D. O.; Multi-objective optimization of ANN fault diagnosis model for rotating machinery using grey rational analysis in Taguchi method, **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, p.1-12, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-9278-9

KORRA, N. N.; VASUDEVAN, M.; BALASUBRAMANIAN, K. R.; Multi-objective optimization of activated tungsten inert gas welding of duplex stainless steel using response surface methodology, **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, vol.77, p. 67-87; 2015.

KOU, S.; **Welding metallurgy** , 2ª edição, John Wiley & Sons , Inc. all rights reserved, 2002

KUMAR,N; RUDRAPATI, R.; KUMAR, P. P.; Multi-objective optimization in through lases transmission welding of thermoplastics using grey-based taguchi method, **Procedia Materials Science**, vol. 5, p. 2178-2187, 2014.

LAMBERT J. A., GIBSTON P.F.; **Hot-Wire GTAW for nuclear Repairs**. Welding Journal Setembro, p.45-52, 1990.

LERMEN, R. T.; **Influência da Velocidade de Soldagem sobre as Geometrias dos Cordões de Solda Realizados Através dos Processos de Soldagem FACW e Soldagem Híbrida (TIG/FACW)**, Semana internacional das Engenharias das FAHOR, Faculdade Horizontina, 2011. Disponível em:  
<[http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011\\_Influencia\\_Velocidade\\_Soldagem%20Hibrida.pdf](http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011_Influencia_Velocidade_Soldagem%20Hibrida.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2017.

LIN, H.L.; WU, T.M.; Effects of activating flux on weld bead geometry of Inconel 718 alloy TIG welds. **Materials Manufacturing Process** n. 27 vol.12, p. 1457–1461, 2012.  
DOI:10.1080/10426914.2012.677914

LIN, H.-L.; YAN, J.-C.; Optimization of weld bead geometry in the activated GMA welding process via a grey-based Taguchi method; **Journal of Mechanical Science and Technology** n. 28 vol., 8 p. 3249~3254, 2014. DOI 10.1007/s12206-014-0735-9

LIPIN, K.; GOVINDAN, P.; A review on multi-objective optimization of drilling parameters using Taguchi methods. A K G E C; **Journal of Technology**, vol.4, nº.1, p. 11-21, 2013.

LIU, Z.; FANG, Y.; CUI, S.; LUO, Z.; WEIDONG LIU, ZHIYI LIU, QU JIANG, SONG YI ; Stable keyhole welding process with K-TIG, **Journal of Materials Processing Technology** vol. 238, p. 65–72, 2016.

LUCAS, W.; **Tig and Plasma Welding**, 1ª edição , Cambridge, England , Abington Publishing, p. 3-25, 1990.



MACHADO, I.G.; **Soldagem e Técnicas Conexas: processos**. Editado pelo autor. Porto Alegre, 1996.

MADAN, J.; MANI, M.; LEE, J. H.; LYONS, K. W.; Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. **Journal of Cleaner Production**, vol. 105, p. 157-170, 2015.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M.; **Fundamentos de metodologia científica**, 5ª ed, São Paulo, Atlas 2003

MARTINS, L. F. M.; PLAUT, R. L.; PADILHA, A. F.; Effect of carbon on the cold-worked state and annealing behavior of two 18wt%Cr-8wt%Ni austenitic stainless steels. **ISIJ International**, vol.38, p. 572- 579, 1998. DOI:10.2355/isijinternational.38.572

MINITAB. **Suporte ao Minitab® 17**. Disponível em: <<http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/anova-statistics/what-is-the-variance-covariance-matrix/>>. Acesso em: 2 dez. 2016.

MODENESI, J. P.; MARQUES, V. P.; BRACARENSE, Q. A.; **Soldagem, Fundamentos e Tecnologia**, 3ª edição, Belo Horizonte, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; **Design and analysis of experiments**. 8. ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

MORAES, A. B.; JACOBI, L. F.; ZANINI, R. R.; **Série Naturais & Exatas**, 2ª ed., Santa Maria: UFSM , CCNE, Departamento de Estatística, Núcleo de Estatística Aplicada, , p.152, 2011.

MORISADA, Y.; FUJII, H.; XUKUNET, N.; Development of simplified active flux tungsten inert gas welding for deep penetration. **Materials Design** vol.54, p. 526–530, 2014. DOI:10.1016/j.matdes.2013.08.081

NAGARAJU, S.; VASANTHARAJA, P.; CHANDRASEKHAR, N.; VASUDEVAN, M.; JAYAKUMAR, T.; Optimization of welding process parameters for 9Cr-1Mo steel using RSM and GA. **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 31, n. 3, p. 319-327, 2016.

NAGESH, D.S.; DATTA, G. L.; Genetic algorithm for optimization of welding variables for height to width ratio and application of ANN for prediction of bead geometry for TIG welding process, **Applied Soft Computing**, Elsevier vol.10, p.897–907, 2010.

NALBANT, M.; GOÇKAYA, H.; SUR, G.; Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning, **Materials and Design** vol.28, p.1379–1385, 2007.

NEOLIDER. **Catálogo conexões de aço carbono e aço inox 2015**; Disponível em: <<http://www.neolidertubos.com.br/catalogo.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

NEUMANN, C. **Gestão de Sistemas de Produção e Operações: Produtividades, lucratividade e competitividade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

NILO JÚNIOR, L. P.; **Otimização de um Processo De Solda MIG/MAG para aplicação na Indústria Automobilística Através da Utilização da Técnica do Projeto e análise de**

**Experimentos**, Itajubá: UNIFEI, 2003. 111p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá).

NOGUEIRA, R. M. U. **Variabilidade do cordão de solda nos processos de soldagem MIG/MAG e arame tubular**. UFSC, 2015, Tese. (Doutorado em Projeto e Fabricação)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

PAIVA, E. J. **Erro Quadrático Médio Multivariado na otimização do torneamento do aço ABNT 52100 endurecido**. 2012. Itajubá, 194 p., Tese (Doutorado em Projeto e Fabricação) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2012.

PAMNANI, R.; VASUDEVAN, M.; JAYAKUMAR, T.; VASANTHARAJA, P.; Development of Activated Flux, Optimization of Welding Parameters and Characterization of Weld Joint for DMR-249A Shipbuilding Steel. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, vol. 70, n. 1, p. 49-57, 2017.

PARIDA, B.; PAL, S.; Fuzzy assisted grey Taguchi approach for optimization of multiple weld quality properties in friction stir welding process; **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 20, n.º.1, p. 35- 41, 2015. DOI: 10.1179/1362171814Y.0000000251

PATEL, A. B.; PATEL, P. S.; The Effect of Activating Flux in Tig Welding, **International Journal of Computational Engineering Research** vol. 4, n.º1, p. 65-70, 2014.

PATIL, V. M.; Multi response simulation and optimization of gas tungsten arc welding, **Applied Mathematical Modelling** p. 1–14, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2016.10.033>>. Acesso em: 22 dez. 2016.

PESSOA, C. P. E.; **Estudo Da Variação Da Porosidade Ao Longo Do Cordão Em Soldas Subaquáticas Molhadas**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte Escola de Engenharia da UFMG, 2007.

PRASANNA, J.; KARUNAMOORTHY, L.; RAMAN, M. V.; PRASHANTH, S.; CHORDIA, D. R.; Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti–6Al–4V using Taguchi and grey relational analysis. **Measurement**, vol. 48, p. 346-354, 2014.

PRAZERES, T. F.; LEAL JUNIOR, I. C.; GARCIA, P. A. A.; Análise Relacional Grey e Método de Análise Hierárquica: Um estudo comparativo aplicado ao caso de movimentação e armazenagem de material siderúrgico, VII SEGeT – **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**. 2010.

QUITES, A. M.; **Definição de Soldagem, solda, soldagem conceitos, definição, AWS, coalescência, solubilização, diluição, descontinuidade**, 15 de fevereiro 2011. Disponível em: <[www.soldasoft.com.br](http://www.soldasoft.com.br)>. Acesso em: 12 jan. 2017.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C.; **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**, Livro EDEME 1979.

RAMOS, P. A. B.; **Tensões e distorções resultantes da soldagem**. Instituto Federal Campus Taguatinga, 2015. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/10816924/>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

RAO, A. V.; DEIVANATHAN, R.; Experimental Investigation for Welding Aspects of Stainless Steel 310 for the Process of TIG Welding, **Procedia Engineering** vol.97, p. 902 – 908, 2014.

REN, J.; ZHOU, J.; WEI, J.; Optimization of Cutter Geometric Parameters in End Milling of Titanium Alloy Using the Grey-Taguchi Method, **Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering**, February vol.1, 2015. DOI: 10.1155/2014/721093

RIBEIRO, J. C. B.; **Análise de técnicas para soldagem a TIG automatizada**, dissertação, Programa de pós graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

ROMEIRO, S. B. B.; **Química na siderurgia**, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Área de Educação Química do Instituto de Química da UFRGS; Porto Alegre, 1997.

ROY, R. K. **A primer on the Taguchi method**. New York: Van Nostrand Reinhold, 2010.

ROY, R. K. **Design of Experiments Using the Taguchi Approach**, Wiley, New York, NY 2001.

SANTOS, T. F. A.; ANDRADE, M., S.; CASTRO, A. L. R.; Efeito da taxa de aquecimento na reversão da martensita induzida por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304; **Metalurgia e Materiais**, Ouro Preto, vol.62(1): 53-58, jan. mar. 2009.. Disponível em: <<http://unicamp.sibi.usp.br/bitstream/handle/SBURI/26367/S0370-44672009000100008.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S; NOORUL HAQ, A.; “Optimization for friction welding parameters with multiple performance characteristics”, **Int. J. Mech. Mater. & Des.**, Vol. 3, p. 309-18, 2006.

SATHIYA, P; ARAVINDAN, P.; JEYAPPAUL, R; AJITH, M., P.; NOORUL H. A.; Optimizing the weld bead characteristics of super austenitic stainless steel (904L) through grey-based Taguchi method. **Multidiscipline Modeling in Materials and Structures**, Vol. 6 Iss: 2, p.206 – 213, 2010.

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C.; OKUYAMAI, M. P.; SILVA, R. H. G.; Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos, **Soldagem e Inspeção**. vol.16 n°.4, São Paulo Oct./Dec. 2011.

SENTHILKUMAR, K.; SRINIVASAN, P. S. S.; Application of Taguchi method for the optimization of system parameters of centrifugal evaporative air cooler. **Journal of Thermal Science**, vol. 19, n°. 5, p. 473-479, 2010.

SHANMUGAM, R.; MURUGAN, N.; Effect of gas tungsten arc welding process variables on dilution and bead geometry of Stellite 6 hardfaced valve seat rings. **Surface engineering**, vol. 22, n°. 5, p. 375-383, 2006.

SHARMA, A.; VERMA, K. D.; ARORA, N.; A scheme of comprehensive assessment of weld bead geometry, **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, Springer, 09 de Julho, 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-7452-0

SHRIVASTAVA, A.; VERMA, A.; Implementation of Taguchi methodology in optimization of developed jigs and fixtures for production of paddy weeder. **Paddy and Water Environment**, p. 1-9, 2016.

SIERRA-PÉREZ, J.; BOSCHMONART-RIVES, J.; DIAS, A. C.; GABARRELL, X.; Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings. **Journal of Cleaner Production**, vol. 126, p. 97-107, 2016

SPROESSER, G.; SCHENKER, S.; PITTNER, A.; BORNDÖRFER, R.; RETHMEIER, M.; CHANG, Y.; FINKBEINER, M.; Sustainable welding process selection based on weight space partitions, **Procedia CIRP** vol.40, p. 127 – 132; 2016.

STARLING, M. D. C.; MODENESI, J. P.; BORBA, D. M. T. **Caracterização do cordão na soldagem FCAW com um arame tubular rutílico, Soldagem e inspeção.** (Impresso.) vol.14 nº.4, São Paulo Outubro./Dezembro. 2009

TAGUCHI, G.; ‘**Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes**’; New York, Kraus International Publications, 1986.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. C; **Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção.** Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1990.

TAKENOUCHI, M. M.; **Optimization of the Machining Process of the Superalloy NIMONIC 80A using the Taguchi Method.** 54 f. Trabalho de Graduação (Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

TALALAEV, R.; VEINTHAF, R.; LAANSOO, A.; SARKANS, M.; Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products, **Estonian Journal of Engineering**, vol.18, 3, 243-250, 2012. DOI: 10.3176/eng.2012.3.09

TANG, Y.; MAK, K.; ZHAO Y. F.; A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing; **Journal of Cleaner Production**, Vol. 137, Pages 1560–1572, November 2016.

TCHOUMI, T.; PEYRAUT, F.; BOLOT, R.; Influence of the welding speed on the distortion of thin stainless steel plates – numerical and experimental investigations in the framework of the food industry machines, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 229, p. 216–229, March 2015.

TREVISAN, R. E.; SCHWEMMER, D.D.; OLSON, D.L.; The fundamentals of weld metal pore formation. **Welding: Theory and Practice**, Chapter 3, p. 79, 1990.

TSENG, K. H.; HSU, C. Y.; Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds. **Journal Materials Process Technology** vol. 211, nº.3, p.503–512, 2011. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.003

VANDER VOORT, G. F.; “**Metallography – Principles and Practice**”., McGraw-Hill Book Co, New York, 752p., 1984.

VENKATESAN, G.; MUTHUPANDI, V.; JUSTINE J.; Activated TIG welding of AISI 304L using mono- and tri-component fluxes, **International Journal Advanced Manufacturing Technology Springer**, 14 June 2016. DOI: 10.1007/s00170-016-9002-9

VILARINHO, L.; SCOTTI, A.; **Um Algoritmo Não-linear para Controle Sinérgico de Equipamentos para Soldagem MIG Pulsada do Alumínio**, INFOSOLDA, Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/downloads.asp?arvoreID=61&ConteudoDescID=12#>>. Acesso em 10/01/2017

WAINER, E; BRANDI, D. S.; MELLO D. H. F.; **Soldagem - Processos e metalurgia**. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, Ltda, 1992.

WEI, Y.; HUA, Z.; ZHI-GANG, J; HON, K. K. B.; Multi-objective optimization of arc welding parameters - the trade-offs between energy and thermal efficiency, **Journal of Cleaner Production** Vol. 140, nº 3, p. 1842–1849. January 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.171.

WEMAN, K. **Welding Processes Handbook**. Cambridge (UK): Woodhead Publishing Limited, 2012.

YAN, W.; ZHANG, H.; JIANG, Z. G.; HON, K. K. B.; Multi-objective optimization of arc welding parameters: the trade-offs between energy and thermal efficiency. **Journal of Cleaner Production**, vol. 140, p. 1842-1849, 2017.

YANG, D. X.; LI, X.Y.; HE, D.Y.; NIE, Z. R.; HUANG, H.; Optimization of weld bead geometry in laser welding with filler wire process using Taguchi's approach. **Opt Laser Technol** vol. 44, nº.7, p.2020–2025, 2012.

ZHU N. Z.; DHOKIA V.; NASSEHI A.; NEWMAN S. **Investigation of part distortions as a result of hybrid manufacturing**, Robotics and Computer -I ntegrated Manufacturing Elsevier 2015