

**Estudo dos Parâmetros de Soldadura MIG/MAG para
Otimização das Propriedades Mecânicas e Geométricas do
Cordão de Solda**

ARTHUR CASARINI

Relatório Final da Dissertação apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em

ENGENHARIA INDUSTRIAL

Novembro de 2019

Estudo dos Parâmetros de Soldadura MIG/MAG para Otimização das Propriedades Mecânicas e Geométricas do Cordão de Solda

ARTHUR CASARINI

Relatório Final da Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
ENGENHARIA INDUSTRIAL

Orientadores do Instituto Politécnico de Bragança:
Prof.º Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro
Prof.º Dr. João Paulo Coelho

Orientadora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná:
Prof.ª Dr.ª Émillyn Ferreira Trevisani Olívio

Novembro de 2019

Dedico este trabalhos aos meus pais que sempre me incentivaram a seguir o meu caminho e me apoiaram em minhas decisões.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus que sempre esteve ao meu lado ouvindo minhas preces. Agradeço imensamente ao meu pai Madio, minha mãe Márcia, ao meu irmão Madio, minha cunhada Fernanda, minha sobrinha Laura e agradecer aos meus outros familiares que foram meus amparos e minhas motivações para concluir esta grande etapa.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por me proporcionar esta oportunidade de continuar parte dos meus estudos no exterior e, agradecer ao Instituto Politécnico de Bragança por me receber com as melhores das intenções.

Sou grato também pelos orientadores que aceitaram percorrer esta jornada ao meu lado, agradeço ao professor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro que, mesmo com seu tempo limitado, proporcionou ajuda e suporte quando necessário, agradeço ao professor João Paulo Coelho por nos auxiliar com seus conhecimentos em eletrotécnica e agradecer a minha orientadora do Brasil professora Émillyn Ferreira Trevisani Olívio por me ajudar mesmo a distância e por ser uma das responsáveis por despertar meu interesse pela área da solda.

Devo agradecer ao IPB pelo seu corpo docente e pelos seus laboratórios que forneceram os equipamentos necessários para a execução deste trabalho. Em específico quero agradecer aos técnicos de laboratório, Jorge Paulo e Abílio Marcelo pelo auxílio na oficina e, em especial, a Luisa Barreira por ajudar na execução os ensaios de tração e permitir a utilização das acomodações do LERM para finalização da tese.

Tenho imensa gratidão aos amigos que fiz neste período e que foram como uma família para mim. Agradeço aos meus amigos da UTFPR-CP, Luiz Miguel Vilche Lopes, Glaucio Kenji Matoba, Jean Hilário e Guilherme Irigoyen que também aceitaram esse desafio de participar do programa de Dupla Diplomação 2018/2019.

Agradeço aos amigos que fiz pelo caminho, Isabelle Correa, Juliana Hermsdorf, Letícia Cena, Isabela Scotta, Allana Neto, Gabriela Mascarenhas, Ricardo Williams e Isabela Urbanetz. Agradeço a amizade que fiz com pessoas de outras instituições do Brasil como, o pessoal do IF do Rio Grande do Sul e a galera do Cefet-RJ que representaram seus Estados fora do Brasil. Agradeço demasiadamente ao Lucas Garcia do Cefet-MG que foi meu parceiro na realização dos experimentos e de alguns ajustes técnicos nos equipamentos. Não posso deixar de agradecer também aos grandes amigos que fiz das UTF's de Medianeira, Campo Mourão, Ponta Grossa e Pato Branco que partilharam de ótimos momentos durante a minha estadia. Por fim, agradeço a malta do Crossfit e ao *coach* Pedro Maia, que foram minha família portuguesa.

Resumo

A soldadura MIG/MAG é um dos processos de fusão a arco elétrico mais utilizados na indústria devido a sua elevada eficiência. A correta seleção dos parâmetros de entrada tem influência direta na qualidade da solda e, com o controle destes parâmetros, é possível reduzir a quantidade de material de adição, melhorar as suas propriedades e, conseqüentemente, aumentar a produtividade do processo. Este trabalho tem como, um dos objetivos, estudar um sistema que permita adicionar dois graus de liberdade à tocha de soldadura através da criação de um mecanismo capaz de variar e controlar o ângulo através de um par de engrenagens sem-fim e um motor de passo elétrico acionado por comandos computacionais. Outro objetivo é selecionar um grupo de parâmetros de soldadura, submetê-los a uma otimização pelo Método de Taguchi e avaliar a influência destes através da Análise de Variância (ANOVA). Um arranjo ortogonal L_9 reuniu três parâmetros (tensão de soldadura, velocidade de soldadura e ângulo da tocha de soldadura) em três níveis, então, com todas as combinações feitas e executadas, foram realizadas análises macrográficas e ensaios experimentais de tração transversal que forneceram, respetivamente, as características geométricas e mecânicas. As razões sinal-ruído permitiram realizar a otimização e a ANOVA permitiu determinar a influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de resposta (largura, reforço, penetração e limite de resistência à tração transversal do cordão de soldadura). A velocidade de soldadura mostrou-se como o parâmetro mais influente para a geometria do cordão de solda, contribuindo 66,36 [%] para a largura, 63,54 [%] para o reforço e 66,94 [%] para a penetração, e o ângulo de ataque da tocha o mais influente para o limite de resistência à tração transversal (41,39 [%]). As combinações ótimas para a largura são 22,4 [V], 300 [mm/min] e 0 [°], para o reforço são 22,4 [V], 400 [mm/min] e 30 [°], para a penetração 23,3 [V], 400 [mm/min] e 0 [°] e, finalmente, para o limite de resistência à tração transversal 24,1 [V], 200 [mm/min] e 15 [°]. Para determinar o desempenho do método, o valor da razão sinal-ruído obtida experimentalmente foi comparado ao valor da razão sinal-ruído ótima teórica utilizando o cálculo do erro relativo, para a largura houve um erro de 0,31 [%], para o reforço 7,57 [%], para a penetração 6,29 [%] e para o limite de resistência à tração transversal 0,88 [%]. Apesar de não ser produzido, o mecanismo demonstrou-se funcional a partir de simulações no *software Solidworks*. O Método de Taguchi mostrou-se adequado para este tipo de problema, oferecendo um bom planeamento de ensaios experimentais e eficaz nos resultados.

Palavras-chave: soldadura MIG/MAG automatizada; otimização; Método Taguchi; ANOVA.

Abstract

Gas metal arc welding is one of the arc fusion processes that is widely used in industry due to its high efficiency. The correct selection of the input parameters has direct influence on the weld quality and, with the control of those parameters, it is possible to reduce the amount of weld material, improve its properties and then increase the productivity of the process. This study intend to add two degrees of freedom to a welding torch with the development of a mechanism capable of variate and control the torch angle with the uso of a worm gear and an electric step motor operated by the computer. Another objective is take a group of weld parameters and submit them to the optimization by the Taguchi Method and check the influence of those through a Variance Analysis (ANOVA). An L₉ orthogonal array gathered three parameters (weld voltage, weld speed and weld torch angle) into three levels, then, with all combinations set and performed, the macrography and the transversal tensile strength test provided, respectively, the geometrical and the mechanical properties. The signal-to-noise ratios enable the optimization and the ANOVA provided the influence of the input parameters on the response parameters (weld width, reinforcement, penetration depth and ultimate transversal tensile strength). The weld speed appeared as the most influent parameter for the weld geometry, contributing 66.36 [%] to width, 63.54 [%] to reinforcement and 66.94 [%] to penetration, and the weld torch angle the most influent to the ultimate transversal tensile strength (41.39%). The optimum levels to the width are 22.4 [V], 300 [mm/min] and 0 [°], to the reinforcement 22.4 [V], 400 [mm/min] and 30 [°], to the penetration 23.3 [V], 400 [mm/min], 0 [°] and, lastly, to the ultimate transversal tensile strength 24.1 [V], 200 [mm/min], 15 [°]. To determine the method performance, the signal to noise ratio value obtained experimentally was compared to the theoretical optimum signal to noise ratio value using the relative error theory. For the width there was an error of 0.31 [%], to the reinforcement 7.57 [%], to the penetration depth 6.29 [%] and for the ultimate transversal tensile strength 0.88 [%]. Although not produced, the mechanism demonstrated its functionality from simulations in Solidworks software. The Taguchi method showed to be suitable for this kind of problem and giving an efficient experiment design and great results.

Keywords: automated GMAW welding; optimization; Taguchi Method; ANOVA.

Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1. PROJETO MECÂNICO	4
2.1.1. METODOLOGIA DO PROJETO.....	4
2.1.2. ANTEPROJETO	5
2.2. MÉTODOS DE TRANSMISSÃO MECÂNICA	6
2.2.1. CORREIAS	6
2.2.2. CORRENTES.....	7
2.2.3. ENGRENAGENS.....	8
2.2.3.1. Engrenagens Sem-fim	9
2.3. PROCESSO DE SOLDADURA	10
2.3.1. PROCESSO DE SOLDADURA MIG/MAG.....	12
2.3.2. VARIÁVEIS DE SOLDADURA MIG/MAG	13
2.3.3. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDADURA NO CORDÃO.....	14
2.3.4. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL NO PROCESSO MIG/MAG	17
2.4. CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDADURA.....	19
2.4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO TRANSVERSAL EM CORDÃO DE SOLDA	19
2.5. ANÁLISE MACROGRÁFICA.....	20
2.6. MÉTODO TAGUCHI	21
2.6.1. RAZÃO SINAL-RUÍDO.....	22
2.7. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	24
CAPÍTULO 3: ANTEPROJETO DO MECANISMO	26
3.1. DESENVOLVIMENTO DO ANTEPROJETO	26
3.2.1. REQUISITOS DO PROJETO	26
3.2.1.1. Ideias iniciais e montagem	27
3.2.2. DIMENSIONAMENTO.....	28
3.2.2.1. Materiais	28
3.2.2.2. Método de Geração e Transmissão de Movimento	28
3.2.2.3. Posição e Elementos de Fixação.....	31

3.3. MONTAGEM FINAL	32
CAPÍTULO 4: PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	34
4.1. METODOLOGIA UTILIZADA	34
4.1.1. DETERMINAÇÃO DO MATERIAL E DO PROCESSO	34
4.1.2. PLANEAMENTO DAS EXPERIÊNCIAS.....	35
4.1.3. PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL	37
4.1.3.1. Desempenho da máquina de controle numérico.....	38
4.1.3.2. Preparação das chapas e dimensionamento dos provetes.....	41
4.1.4. REALIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA	42
4.1.4.1. Obtenção dos provetes e amostras.....	46
4.1.5. TESTE DE TRAÇÃO TRANSVERSAL EM PROVETES DE SOLDADURA ..	50
4.1.6. ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS CORDÕES DE SOLDA	51
4.1.6.1. Medição do perfil do cordão de solda	54
4.1.7. TRATAMENTO DOS DADOS	55
4.2. ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO	57
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1. REFORÇO	58
5.2. LARGURA	60
5.3. PENETRAÇÃO	63
5.4. LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	65
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	70
6.1. CONCLUSÕES.....	70
6.2. TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS	73
ANEXOS	78
ANEXO I – IMAGENS OBTIDAS DURANTE A MACROGRAFIA	78
ANEXO II – DESENHO TÉCNICO DOS COMPONENTES DO MECANISMO	80
ANEXO III – IMAGENS DE MACROGRAFIA DOS ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO ..	85
ANEXO IV – ORÇAMENTO DE COMPRA DE COMPONENTES DO PROJETO DO MECANISMO.....	86
ANEXO V – ORÇAMENTO DE COMPRA DIRETA DE COMPONENTES DO PROJETO DO MECANISMO	87

Lista de Figuras

Figura 1 – Sequência de passos para um projeto [2].	5
Figura 2 – Correia flexível entre eixos de (a) mesma direção de rotação e (b) transmissão cruzada entre eixos de rotação contrária [8].	6
Figura 3 – Esquema ilustrativo de uma corrente de rolos [9].	7
Figura 4 – Engrenagens do tipo (a) cilíndrica de dentes retos, (b) helicoidais, (c) cónicas e (d) sem-fim [3].	8
Figura 5 – Engrenamento simples, consistindo de um sem-fim e uma engrenagem sem-fim [4].	9
Figura 6 – Processo de soldadura MIG/MAG.	12
Figura 7 – Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO ₂ [26].	15
Figura 8 – Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [26].	15
Figura 9 – Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda – alumínio, aerossol, árgon [26].	16
Figura 10 – Efeito da posição longitudinal da tocha na penetração da solda [26].	17
Figura 11 – Transferência de Metal tipo (a) Curto-circuito (Short arc) (b) Globular (c) Aerossol (Spray arc).	18
Figura 12 – Diagrama Tensão × Deformação convencional e real para material dúctil	20
Figura 13 – Distribuições populacionais quando a hipótese nula é (a) verdadeira ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$) e (b) falsa ($\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$) [52].	24
Figura 14 – Indicação do movimento de rotação da tocha (a) sobre o eixo Y e (b) sobre o próprio eixo.	27
Figura 15 – Primeiras montagens do mecanismo de soldadura.	28
Figura 16 – Desenho esquemático do motor de passo Wantai 39BYG215.	29
Figura 17 – Desenho esquemático da (a) engrenagem sem-fim e (b) parafuso sem-fim	30
Figura 18 – Desenho esquemático dos rolamentos 6000-2Z e 6001-2Z.	31
Figura 19 – Representação de elementos de fixação utilizados no mecanismo.	32
Figura 20 – Montagem final do mecanismo de soldadura.	33
Figura 21 – Aparato experimental de controle numérico computadorizado	38
Figura 22 – Aparato experimental com indicação de seus eixos de trabalho.	39
Figura 23 – Fuso de esferas recirculantes laminados com porca flangeada	39

Figura 24 – Sistema para teste de repetibilidade	40
Figura 25 – Testes de cordões de solda.	40
Figura 26 – Dimensões dos provetes em [mm] para teste de tração em solda.	41
Figura 27 - Esboço em <i>Solidworks</i> da chapa a ser usinada.	42
Figura 28 - Chapa de aço preparada para soldadura.....	42
Figura 29 – Chapa de aço posicionada no aparato de soldadura.	43
Figura 30 – Ângulos de tocha utilizados para o estudo.....	44
Figura 31 – Conjunto de soldadura fonte de energia e cilindro de gás.	45
Figura 32 – Cordão de solda topo (0°) realizado na união das chapas.....	45
Figura 33 – Chapas soldadas com todas as combinações do experimento de Taguchi.....	46
Figura 34 – Fresadora CNC para maquinagem das chapas.....	47
Figura 35 – Fixação das chapas de aço no centro de maquinagem CNC.....	47
Figura 36 – Peça final simulada no <i>software Mastercam 2019</i>	48
Figura 37 – Aspecto final das chapas após maquinagem.	48
Figura 38 – Provetes destinados ao ensaio de tração.	49
Figura 39 – Região de retirada das amostras de cordão de solda.	49
Figura 40 – Amostras de cordão de solda para macrografia.	50
Figura 41 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração.....	51
Figura 42 – Máquina de corte Struers Labotom.	52
Figura 43 – Indicação dos cortes realizados nas amostras (a) 1° corte, (b) 2° corte.....	52
Figura 44 – Máquina de embutimento Struers LaboPress-1.	53
Figura 45 – Máquina de polimento Struers LaboPol-25.	53
Figura 46 – Amostras de cordão de solda embutidas.	54
Figura 47 – Macroscópio <i>NewTec IRIS Nomade</i>	54
Figura 48 – Medições realizadas nas amostras de solda.	55
Figura 49 – Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço.....	59
Figura 50 – Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura.	61
Figura 51 – Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.	64
Figura 52 – Gráficos de ensaios de tração relacionando os dois grupos de teste.....	65
Figura 53 – Curva S/N médio de cada parâmetro para o limite de resistência à tração transversal.....	67
Figura 54 – Defeitos de soldadura no provete do ensaio de confirmação.....	68
Figura 55 – Gráfico comparativo entre amostras do ensaio de tração de confirmação.....	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Processos de Soldadura usualmente aplicados à Indústria [11].....	11
Tabela 2 – Expressões para o cálculo da razão sinal-ruído [49].	23
Tabela 3 – Cálculos para análise de variância que compõem a tabela ANOVA [52].	25
Tabela 4 – Características do motor de passo 39BYG215.	29
Tabela 5 – Conjunto de Engrenagem Helicoidal (sentido horário) composto por um parafuso sem-fim e uma engrenagem sem-fim.	30
Tabela 6 – Rolamentos rígidos de esferas FAG de fileira simples vedados com vedações de juntas sem contato bilateral.	31
Tabela 7 – Composição química do aço DIN C20 / SAE 1020.	34
Tabela 8 – Composição química do arame eletrodo AWS A5.18: ER70S-6.	34
Tabela 9 – Parâmetros de estudo e seus níveis atribuídos.	35
Tabela 10 – Matriz Ortogonal L ₉ (3 ⁴) de Taguchi [44].	37
Tabela 11 – Matriz L ₉ de Taguchi com os parâmetros de estudo.	37
Tabela 12 – Matriz ortogonal adaptada para fins de cálculo.	56
Tabela 13 – Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.	58
Tabela 14 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço.	59
Tabela 15 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço.	60
Tabela 16 – Medições, média e razão sinal-ruído para a largura.	60
Tabela 17 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.	61
Tabela 18 – Razão sinal-ruído para a combinação ótima para largura do cordão de solda.	62
Tabela 19 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura.	62
Tabela 20 – Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.	63
Tabela 21 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a penetração.	63
Tabela 22 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração.	64
Tabela 23 – Medições, média e razão sinal-ruído para o limite de resistência à tração transversal.	66
Tabela 24 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o limite de resistência à tração transversal.	67

Tabela 25 – Razão sinal-ruído para a combinação ótima de limite de resistência. 68

Tabela 26 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no limite de
resistência à tração transversal. 69

Nomenclaturas, Símbolos e Acrônimos

$\bar{\eta}_l$ – Razão sinal-ruído média para o nível ótimo;

E_r – Erro relativo

n_A – Número de níveis para o fator A

n_B – Número de níveis para o fator B

n_n – Número de níveis para o n-ésimo fator

s_y^2 – Variância de y;

x_i – Valor encontrado

x_v – Valor de referência

\bar{y} – Média dos dados observados;

$\hat{\eta}$ – Razão sinal-ruído ótima estimada;

η_m – Média total da razão sinal-ruído;

° – Graus

A – Ampere

A – Parâmetro de Tensão

AGMA – *American Gear Manufacturers Association*

ANOVA – Análise de Variância

AWS – *American Welding Society*

B – Parâmetro de Velocidade de Soldadura

C – Parâmetro de Ângulo da Tocha de Soldadura

CAD – *Computer Aided Drawing*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

Cm – Centímetro

CNC – Comando Numérico Computadorizado

dB – Decibel

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

DOE – *Design of Experiments*

DOF – *Degrees of Freedom*

E – Módulo de Elasticidade

FCAW – *Fluxed Core Arc Welding*

GDL – Graus de Liberdade

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*

ISO – *International Standard Organization*

L – Largura

L₉ – Matriz Ortogonal de Taguchi com 9 experimentos de 3 níveis

LBW – *Laser Beam Welding*

LERM – Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais

LMCM – Laboratório de Materiais e Construção Mecânica

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

Min – Minutos

Mm – Milímetros

Ø – Diâmetro

OAC – *OxyAcetylene Welding*

P – Penetração

Pa – Pascal

PAW – *Plasma Arc Welding*

QM – Quadrados Médios

R – Reforço

S/N – Sinal-ruído

SAE – *Society of Automotive Engineers*

SAW – *Submerged Arc Welding*

SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*

SQ – Soma dos Quadrados

V – Volts

ε – Deformação

n – Número de observações;

q – Número de parâmetros avaliados.

y – Dados observados.

Capítulo 1: Introdução

Em pouco menos de meio século, a indústria vem passando por diversas mudanças. O fato da evolução constante da tecnologia e das exigências cada vez maiores de uma sociedade desenvolvida, levou a indústria a se tornar moderna a ponto de suprir toda essas necessidade. No entanto, a industrialização atingiu um nível onde os mínimos detalhes determinam o cenário económico e competitivo.

A inserção de novas tecnologias de automatização, possibilitou que indústrias, como a automóvel, rompesse barreiras e atingisse altos níveis de produção. Parte da linha de produção para a fabricação de um veículo automóvel é composta por um conjunto de robôs responsáveis pela realização de pontos de solda em carrocerias, para um veículo popular, por exemplo, são realizados até 2500 pontos de solda em sua estrutura [1]. Portanto, a partir da definição das necessidades é possível melhorar os níveis de produção com o uso de processos automatizados.

O uso de robôs é capaz de fornecer também mais segurança acerca do processo de soldadura, visto que ao ser realizado por mão de obra humana, o soldador fica exposto a uma série de riscos. Além disso, a solda produzida por um soldador possui um nível diferente daquele realizado por um equipamento automatizado, porém o processo de soldadura ainda é muito difícil de ser controlado em sua totalidade. Logo, ainda é possível encontrar defeitos que, mesmo com baixa frequência, influenciam no desempenho da linha de produção causando pausas, retrabalhos em peças defeituosas e, por consequência, aumentam o custo final do produto. Devido a esta série de fatores que o estudo da soldadura ainda é bem amplo para que haja total entendimento dos efeitos de seus parâmetros sobre o seu resultado final.

1.1. OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES

O objetivo primário deste projeto é utilizar conhecimentos de engenharia para realizar a obtenção da combinação ótima de parâmetros de soldadura que forneçam como resultado o melhor cordão de solda feito sobre a junção tipo topo-topo de chapas de aço através do processo de soldadura MIG/MAG. Parâmetros de resposta como a largura, altura de reforço, penetração e limite de resistência à tração transversal foram estudados em conjunto com os parâmetros de entrada (tensão [V], velocidade de soldadura [mm/min] e ângulo de tocha [°]) com o objetivo de determinar a influência que cada parâmetro de entrada tem sobre os de resposta. Unindo os

resultados da otimização com a análise da influência é possível obter um processo controlado com boa repetibilidade e baixo índice de defeitos.

Um outro objetivo deste trabalho foi o da implementação de um mecanismo que aumentasse o número de graus de liberdade do aparato experimental de soldadura. Para isso, *softwares* CAD auxiliaram na criação do projeto, na montagem final e na verificação dos possíveis movimentos do mesmo.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, uma lista com as referências utilizadas e uma seção de anexos referentes à algumas atividades desenvolvidas no decorrer do trabalho. Nos próximos parágrafos será descrito, de forma muito sucinta, o conteúdo de cada capítulo deste relatório.

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema, expondo um panorama geral sobre como o tema do trabalho pode ser aplicado à indústria, também são apresentadas as motivações e os objetivos, bem como, a organização deste documento.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica ou fundamentação teórica. Nesta seção são apresentados e descritos os conceitos técnico-científicos que compõem o trabalho, ou seja, é nesta seção onde é feito um embasamento teórico sobre a realização de projeto de máquinas, conceitos básicos de soldadura e o método de otimização de Taguchi.

No Capítulo 3 é feita a exposição das atividades práticas acerca do processo de soldadura. Estas atividades são descritas de maneira cronológica, começando pela calibração do aparato experimental, primeiros testes de repetibilidade, testes de soldadura, dimensionamento de provetes para ensaio de tração, fabricação das chapas onde foram realizados os cordões de soldadura para união das mesmas, maquinaria das chapas para extração dos provetes e das amostras de cordão para macrografia, metodologia do ensaio de tração e da análise macrográfica e, por fim, a forma como os dados obtidos foram tratados.

No Capítulo 4 é feito um relato sobre o projeto mecânico cujo objetivo é introduzir um mecanismo ao aparato experimental de maneira que este possua mais graus de liberdade. Sendo assim, são expostos os objetivos, exigências do projeto, materiais utilizados, tipo de transmissão, tipo de motor, rolamentos, rascunhos, primeiras montagens, adaptações e montagem final.

No Capítulo 5 são expostos os resultados do trabalho e a discussão dos mesmos, de forma direta, os resultados da análise macrográfica e dos ensaios de tração são otimizados pelo

uso das razões sinal-ruído, alguns parâmetros exigiram ensaios de confirmação que também foram citados. Os resultados, para melhor entendimento, foram ilustrados por gráficos, figuras e tabelas que, conforme eram citados, eram interpretados.

No Capítulo 6 são realizadas as conclusões sobre os resultados citados no capítulo anterior, aqui é avaliado e verificado o rendimento dos métodos e *softwares* utilizados através da comparação de valores teóricos e experimentais. E, no final, são elencadas algumas sugestões para trabalhos que sejam realizados futuramente com este mesmo âmbito.

Capítulo 2: Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão abordadas teorias que atuarão como base para a melhor compreensão dos temas abordados, para isso, juntamente com os conceitos apresentados, trabalhos e produções realizadas anteriormente serão relacionadas ao estudo de maneira a proporcionar um melhor embasamento.

2.1. PROJETO MECÂNICO

O projeto é o fator mais importante no que se diz respeito ao processo de criação de algum equipamento ou máquina. A partir de um projeto bem feito é possível ter um bom aproveitamento de recursos e serviços envolvidos. Na engenharia, a fase de projeto sempre foi de suma importância pois é a partir desta fase que são geradas as fases subsequentes, ou seja, um processo ou construção proveniente de um projeto bem consolidado terá um bom desempenho pois um é consequência do outro [2].

Em sua definição no ramo da engenharia, projeto é onde são aplicados teoremas, técnicas e métodos para a realização de um dispositivo ou equipamento de tal forma que este esteja possibilitado em desenvolver a função para a qual ele foi criado [2].

Para a área da engenharia mecânica o gerenciamento do projeto é bem vasto, visto que os engenheiros mecânicos estão associados à produção, processamento de energia, fornecimento de meios de produção, ferramentas de transporte e às técnicas de automação. Para isso, deve-se ter um forte conhecimento em mecânica dos sólidos e fluidos, transporte de massa, processos de fabrico, teorias da informação e eletricidade. Tais bases do conhecimento fornecem a capacidade para os engenheiros projetarem desde um simples mancal até centrais de refrigeração industrial e motores de combustão interna [3].

2.1.1. METODOLOGIA DO PROJETO

Um projeto pode assumir diversas dimensões, ele pode variar desde o dimensionamento de um simples componente até a construção de um edifício ou automóvel. Para que um projetista seja capaz de ordenar toda informação pertinente ao projeto, uma metodologia foi criada para organizar essas informações e também como maneira de facilitar o modo como os engenheiros interagem [2].

Tal metodologia estipula uma série de passos que devem ser seguidos para que o projeto possa ser criado, testado e então ter sua viabilidade verificada. Estas etapas podem ser melhor visualizadas na Figura 1.

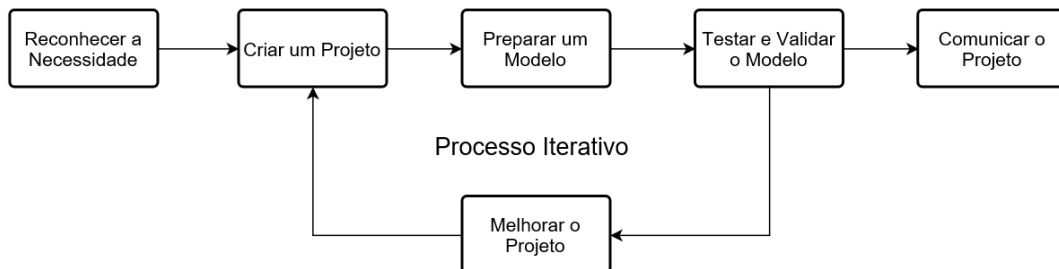


Figura 1 – Sequência de passos para um projeto [2].

Um projeto então provém de uma série de passos que se iniciam a partir da identificação de uma necessidade que consiste numa vaga ideia do problema e, durante o processo, várias tentativas de melhoria do projeto ocorrem através de diversas iterações. A iteração é necessária ao longo do processo, permitindo que se retorne de uma etapa para a anterior de forma repetida até atingir o objetivo da maneira mais econômica e eficiente [4].

2.1.2. ANTEPROJETO

O anteprojeto é uma das fases intermediárias que compõem o processo do projeto como um todo. Nesta etapa o objetivo é a apresentação ou verificação de um mecanismo de transmissão de potência, por exemplo. Desta maneira é preciso explicar o processo utilizado para efetuá-lo até a sua definição final, isto é feito pela exposição do desenho do seu conjunto e da sua lista de componentes Procura-se, também nesta fase, discutir opções técnicas e alguns aspectos relacionados ao projeto [5].

Um anteprojeto fornece total controle acima do que está sendo proposto, pois trabalha-se com o mínimo de definições e detalhamentos antes de partir para a elaboração de projetos complementares. Isso transmite para o projetista, no caso os engenheiros, maior segurança durante o trabalho, sem cometer grandes erros. Portanto o anteprojeto torna-se essencial devido ao seu caráter preventivo ao evitar o surgimento de surpresas durante a execução do projeto [6].

2.2. MÉTODOS DE TRANSMISSÃO MECÂNICA

Em um equipamento ou máquina situam-se diversos componentes onde alguns estão presentes no fluxo de potência entre motor e rodas, por exemplo. De maneira geral, os elementos de transmissão mecânica possuem quatro tipos: correias, correntes, engrenagens e rodas de atrito. Deve ser ressaltado que independentemente do tipo de transmissão a se utilizar, sempre haverá perda de potência entre os componentes, sendo este um fator importante ao projetar tais elementos [7].

2.2.1. CORREIAS

A correia é um dos elementos de transmissão flexíveis cujo emprego é reconhecidamente confiável e eficiente ao se transmitir força. Um dos motivos que se leva a utilizar correias é quando a distância entre dois eixos é tal que é impossível utilizar engrenagens. Neste tipo de transmissão, a correia abraça duas ou mais polias, transmitindo assim a força tangencial por meio do atrito da correia com a polia. Um outro motivo que leva a utilização das mesmas é o fato de utilizá-las entre eixos paralelos de mesma direção de rotação (Figura 2 (a)) ou transmissão cruzada entre eixos de rotação contrária (Figura 2 (b)).

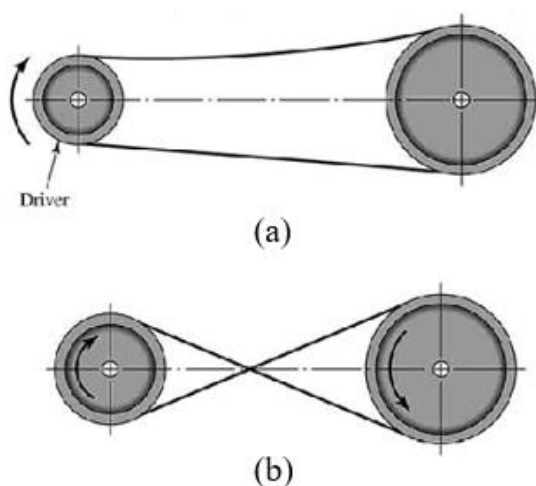


Figura 2 – Correia flexível entre eixos de (a) mesma direção de rotação e (b) transmissão cruzada entre eixos de rotação contrária [8].

Das vantagens desse tipo de transmissão têm-se que as correias não transmitem choques, não apresentam problema de lubrificação, podem servir como elemento de proteção contra

sobrecargas, são econômicas e de fácil desmontagem. Já as desvantagens são o fato de ocuparem grande espaço entre eixos, possuem período curto de manutenção e grau de escorregamento elevado [8].

2.2.2. CORRENTES

As correntes são mais um elemento de transmissão que compõem o grupo das transmissões flexíveis, estas são utilizadas em locais onde a aplicação de elementos como as correias e as engrenagens não é possível. Porém as correntes não possuem a mesma capacidade das correias de trabalhar em transmissão cruzada, por isso no momento de acionar um conjunto de eixos, por exemplo, todas as rodas dentadas devem permanecer no mesmo plano de trabalho [9].

Para cada aplicação há um tipo de corrente que mais se adequa, as correntes são divididas em correntes de rolos (Figura 3), que são as que apresentam maior aplicação prática, correntes de passo alongado, correntes de buchas e correntes de dentes, esta última sendo a menos utilizada [9].

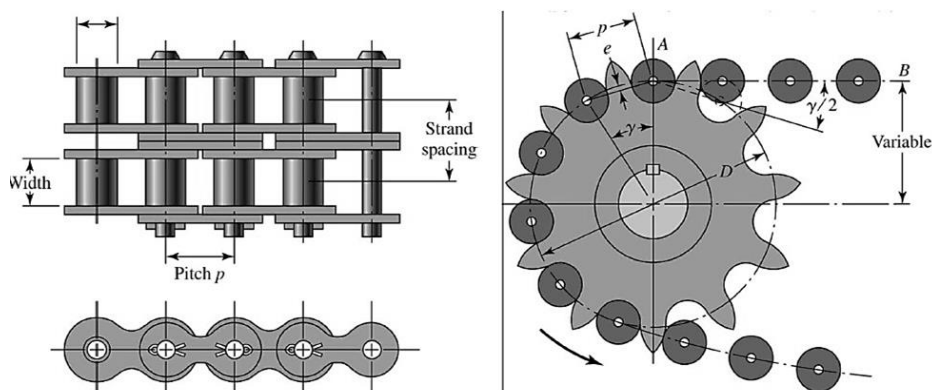


Figura 3 – Esquema ilustrativo de uma corrente de rolos [9].

As vantagens de se utilizar correntes são: a possibilidade de trabalharem com grande distância entre eixos paralelos, transmissão da potência sem escorregamentos, custo intermediário entre as correias e as engrenagens, uma única corrente é capaz de acionar vários eixos e estas transmitem potência a uma razão de velocidade constante. Como desvantagens, apresentam necessidade de lubrificação, funcionamento com alto nível de ruído, exigência de perfeito alinhamento entre pinhão e roda, acionamento de apenas eixos paralelos e vida útil menor que as engrenagens [9].

2.2.3. ENGRENAGENS

Entende-se por engrenagem uma peça de formato cilíndrico, cônico ou reto, dotada de dentes internos ou externos onde as forças transmitidas suprem momentos torcionais a eixos para gerar movimento e transmissão de potência, e criam forças e momentos que afetam o eixo e seus mancais. Existem quatro tipos: as engrenagens retas, helicoidais, cónicas e sem-fim, cada uma apresenta uma geometria e uma relação cinemática específica. Para que não haja divergências na forma e no tamanho dos dentes, estes componentes são todos normalizados de acordo com a *American Gear Manufacturers Association (AGMA)* que publica padrões para o processo de projeto de engrenagens [2, 3].

As engrenagens cilíndricas de dentes retos (Figura 4 (a)) são compostas por dentes paralelos ao eixo de rotação e são utilizadas para transmitir movimento entre eixos paralelos, das engrenagens esta é a mais simples. As engrenagens helicoidais (Figura 4 (b)) possuem funcionamento semelhante às de dentes retos, porém elas apresentam dentes inclinados que são capazes de realizar um melhor engajamento entre as engrenagens, fato este que reduz o nível de ruído durante o trabalho. As engrenagens cónicas (Figura 4 (c)) apresentam dentes em superfícies cónicas, fato este que permite transmitir movimentos em eixos que se interceptam. Já o último tipo, que foi utilizado neste trabalho, é a engrenagem sem-fim (Figura 4 (d)) composta por um par pinhão-coroa sem-fim onde o pinhão sem-fim se assemelha a um parafuso. A direção de rotação da coroa sem-fim depende da rotação do parafuso, estes são mais utilizados para altas razões de velocidade, cerca de três vezes ou mais [3].

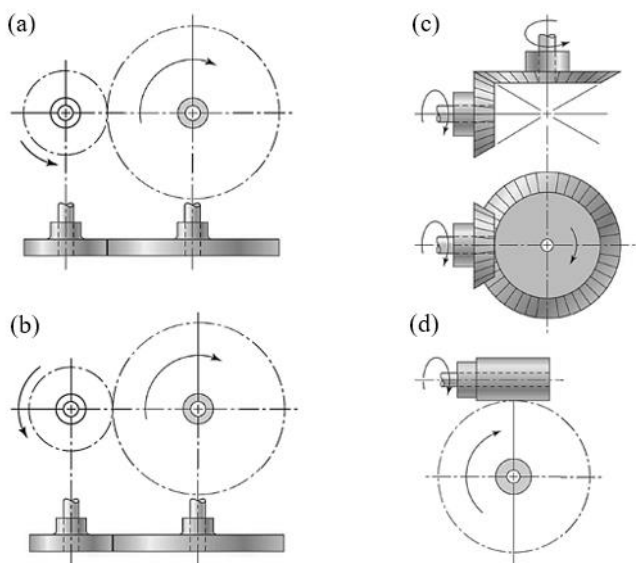


Figura 4 – Engrenagens do tipo (a) cilíndrica de dentes retos, (b) helicoidais, (c) cónicas e (d) sem-fim [3].

2.2.3.1. Engrenagens Sem-fim

Um par de engrenagens sem-fim é composto por um sem-fim, que se assemelha muito a um parafuso, e por uma roda sem-fim ou coroa (Figura 5), análoga a uma porca de parafuso, que são responsáveis por conectar dois eixos perpendiculares que não se interceptam. Sua geometria se diferencia muito dos outros tipos de engrenagem pois este conjunto é uma engrenagem helicoidal, porém, com um ângulo de hélice grande o suficiente para que um único dente se envolva continuamente ao redor da sua circunferência, sendo assim o movimento da coroa sem-fim é proporcional ao passo do sem-fim no qual ela está acoplada [2, 3].



Figura 5 – Engrenamento simples, consistindo de um sem-fim e uma engrenagem sem-fim [4].

A principal vantagem desse método de transmissão de potência sobre os outros disponíveis, é o fato de que os sem-fim são normalmente compostos por apenas um dente (ou rosca) e isso possibilita criar razões de velocidade tão grandes quanto o número de dentes na engrenagem sem-fim. A maioria dos engrenamentos são limitados a razões máximas de 10:1 enquanto os sem-fim são capazes de atingir razões que variam desde 1:1 até 360:1, no entanto é usual encontrar em catálogos conjuntos de engrenagem sem-fim com razões de 3:1 a 100:1 [4].

Outra vantagem do sem-fim é a sua capacidade de autotravamento, isso significa que ele não realizará um movimento de retrocesso, ou seja, o binário aplicado à engrenagem sem-fim não faz o sem-fim rodar. Portanto, o movimento realizado pelo conjunto sem-fim possui

apenas um sentido, do sem-fim para a engrenagem sem-fim, assim esta pode suportar altas cargas.

Apesar de apresentar vantagens interessantes, os sem-fim também possuem alto custo dependendo da configuração utilizada (envolvimento simples ou envolvimento duplo), e também, o conjunto não pode ser trocado de forma independente e sim deve ser trocado aos pares, mais um motivo que justifica seu alto custo [4].

2.3. PROCESSO DE SOLDADURA

A soldadura surgiu como um processo cujo o objetivo é unir dois componentes. Trazendo esse conceito para os dias atuais, este processo difundiu-se totalmente na indústria, pois, grande parte das produções, seja de produtos simples ou complexos, são realizadas em partes e, para atingir o resultado final, estas devem ser unidas de alguma forma. A soldadura compõe um dos três principais métodos de junção ou fixação, porém, ela é considerada como um método permanente, já os processos de fixação mecânica e adesiva podem ser considerados não permanentes [10].

Por ser um procedimento com certa complexidade, a soldadura possui diversas tentativas de definição entre várias literaturas. Cada definição destaca alguma característica da soldadura como a fusão e a continuidade, por exemplo [11].

A *American Welding Society* ou AWS [12] que é a responsável pela formação de normas relacionadas ao assunto, descreve a soldadura como “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”

O procedimento mais difundido em meio industrial, e que será destaque deste trabalho, é o que adota o arco elétrico como principal fonte de calor para realização da soldadura. A AWS, anteriormente citada, organizou todos os processos de soldadura e atribuiu um sistema de siglas para identificar cada um destes. A seguir, na Tabela 1 estão relacionadas as abreviações e algumas características e aplicações dos procedimentos mais utilizados.

Cada processo possui uma característica que difere um do outro e possibilita a utilização da soldadura em diversas situações. Neste trabalho serão discutidas as propriedades e aplicações do processo de soldadura MIG/MAG.

Tabela 1 – Processos de Soldadura usualmente aplicados à Indústria [11].

PROCESSO	NOMENCLATURA	TIPO DE CORRENTE	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldadura a Arco Submerso	SAW – <i>Submerged Arc Welding</i>	Contínua ou alternada	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular.	Soldadura de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldadura com Eléctrodo Revestido	SMAW – <i>Shielded Metal Arc Welding</i>	Contínua ou alternada	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldadura de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldadura em geral.
Soldadura com Arame Tubular	FCAW – <i>Flux-cored Arc Welding</i>	Contínua	Automático ou semiautomático. O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro.	Soldadura de aços carbono, baixa e alta liga com espessura ≥ 1 mm. Soldadura de chapas, tubos, etc.
Soldadura MIG/MAG	GMAW – <i>Gas Metal Arc Welding</i>	Contínua	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arame é sólido.	Soldadura de aço carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldadura de tubos, chapas, etc. Qualquer posição.
Soldadura a Plasma	PAW – <i>Plasma Arc Welding</i>	Contínua	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eléctrodo não consumível de tungstênio. O arco é constituído por um bocal.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1.5 mm. Passes de raiz.
Soldadura TIG	GTAW – <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>	Contínua ou alternada	Manual ou automática. Eléctrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldadura de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldadura de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações.
Soldadura a Gás	OAW – <i>OxyAcetylene Welding</i>		Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldadura manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldadura de chapas finas e tubos de pequenos diâmetros.
Soldadura a Laser	LBW – <i>Laser Beam Welding</i>		Soldadura automática. Não usa, em geral, metal de adição. Laser permite uma elevada concentração de energia.	Soldadura de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva. Indústria automobilística, nuclear e aeroespacial.

2.3.1. PROCESSO DE SOLDADURA MIG/MAG

Conhecida como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), a soldadura MIG/MAG é uma das técnicas de soldadura que apresenta alta facilidade de automatização e versatilidade com os materiais usados para realização do processo.

O processo de soldadura MIG/MAG ou GMAW proporciona a junção de peças metálicas através de um arco elétrico formado entre o eletrodo metálico consumível e a peça trabalhada, este arco é responsável por gerar o aquecimento necessário para que haja a fusão dos metais [11]. O método GMAW é um procedimento semi-automático, visto que há a alimentação do arame eletrodo de forma mecânica e um soldador é responsável por iniciar, movimentar e interromper o processo [3, 4]. A estabilidade do arco elétrico é bem sucedida pela correta seleção da fonte de energia do sistema [15], que pode ser tanto contínua quanto alternada [16], e o mesmo é mantido através da alimentação constante do arame eletrodo.

A denominação MIG/MAG é proveniente do tipo de gases utilizados no processo [17], a soldadura MIG ou *Metal Inert Gas*, como o nome indica, são usados gases inertes, geralmente argon ou uma mistura de argon com hélio, já a soldadura MAG ou *Metal Active Gas* utiliza gases ativos que interagem com a poça de fusão, dentre eles o mais comum é o dióxido de carbono (CO_2) [11]. Na Figura 6 é possível visualizar como ocorre este tipo de soldadura.

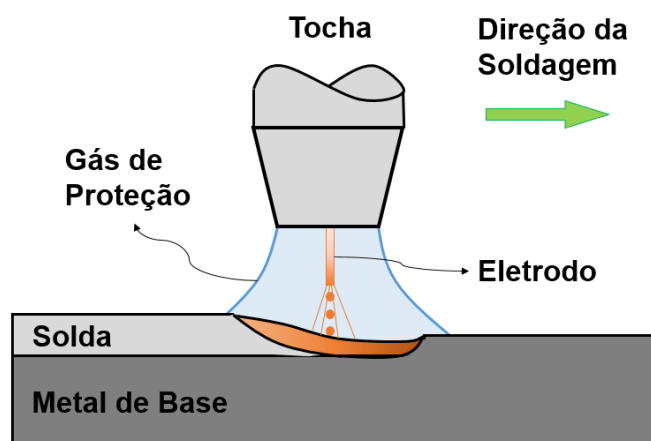


Figura 6 – Processo de soldadura MIG/MAG.

Como todo processo de fabrico, a soldadura MIG/MAG apresenta vantagens e desvantagens. Simonato [18] citando Wainer, Brandi e Mello [19] elencaram as principais vantagens do processo GMAW como “Processo versátil, facilmente adaptado para a soldadura

automática, possibilidade de execução em várias posições, alta produtividade devido à alta velocidade de soldadura, elevada taxa de deposição devido à alta densidade de corrente na ponta do arame, pouca ou nenhuma formação de escória, deposição do metal de solda com baixo teor de hidrogênio, penetração uniforme de raiz e eletrodo alimentado de forma contínua” [20].

Outra vantagem é que o processo MIG/MAG é capaz de ser totalmente robotizado, isso é muito chamativo e utilizado pelo setor industrial pois o alto nível de controle do processo permite obter parâmetros de soldadura em nível constante, bem como obter altas velocidades de soldadura que variam de 8,33 a 16,66 [mm/s] [10, 11, 12].

Para Marques, Modenesi e Bracarense [11] a necessidade de um ajuste rigoroso e a sensibilidade do processo quanto à variação dos parâmetros elétricos de operação são fatores limitantes para a obtenção de características desejadas do cordão de solda. Enquanto Wainer, Brandi e Mello [19] indicam as desvantagens do processo, sendo elas a alta velocidade de resfriamento que aumenta a ocorrência de trincas, grande emissão de raios UV, geração excessiva de respingos, dificuldade em realizar o processo em locais onde o bocal não tem possibilidade de estar próximo do metal de base.

2.3.2. VARIÁVEIS DE SOLDADURA MIG/MAG

Como dito anteriormente, o processo MIG/MAG é composto por uma série de parâmetros e a correta seleção dos mesmos influencia diretamente no resultado que se obtém. Parâmetros como tensão e corrente determinam, respectivamente, a altura e a penetração do cordão de solda, assim como a velocidade de alimentação do arame eletrodo é proporcional à quantidade de metal que é depositado na solda.

Outros parâmetros como extensão do eletrodo (*stick-out*), velocidade de soldadura, posicionamento e deslocamento da tocha, fluxo e tipo de gás, diâmetro do eletrodo também afetam na geometria final do cordão.

De acordo com Corrêa [23] citando Modenesi e Bracarense [24] e Jones *et al* [25], as variáveis ou parâmetros de soldadura a arco elétrico podem ser divididas em quatro grupos:

- Variáveis pré-determinadas: representam o tipo e espessura do metal de base e as propriedades as quais se procura no metal de solda e na região afetada pelo calor;
- Variáveis de fundo: nelas encontram-se informações relacionadas ao processo de soldadura, tipos de equipamentos, técnicas a utilizar na soldadura, projeto da junta a ser soldada, tipo de eletrodo, gás e fluxo aplicado e diâmetro de eletrodo;

- Variáveis primárias: velocidade de soldadura, tipo de corrente e seu respectivo valor e, então, a tensão;
- Variáveis secundárias: posicionamento, deslocamento e ângulo de ataque da tocha e comprimento do eletrodo (*stick-out*).

Portanto cada variável deve ser selecionada de modo que se obtenha o resultado de soldadura esperado, bem como a disponibilidade dos materiais e equipamentos.

2.3.3. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDADURA NO CORDÃO

Como citado anteriormente, a correta seleção das variáveis envolvidas no processo define o resultado final da soldadura, bem como reduzem a probabilidade da ocorrência de alguns tipos de defeitos como, mordeduras, trincas e poros. A vantagem é que tais variáveis podem ser controladas mesmo que separadamente, porém todas estão interligadas de forma que o efeito causado por uma afeta diretamente a atuação da outra [26].

Dos vários parâmetros que possuem maior influência destacam-se a tensão, a corrente, o comprimento e diâmetro do eletrodo, a velocidade de soldadura, a velocidade de alimentação do arame, a proteção gasosa e a inclinação ou posição de ataque da tocha [27].

A corrente de soldadura é um dos principais parâmetros que influencia diretamente nas características geométricas, na taxa de deposição e no modo de transferência metálica, sendo assim sua seleção depende do diâmetro do eletrodo que será utilizado e da espessura da peça que será trabalhada [28].

A corrente é comumente associada com a penetração, ou seja, ela é diretamente proporcional ao quanto metal de solda penetra no metal de base e isso permite estabelecer um certo controle durante o processo [26]. As diferenças em relação à penetração podem ser vistas na Figura 7.

A tensão é a responsável por controlar o comprimento do arco elétrico, assim como a corrente é um dos parâmetros mais influentes na geometria do cordão de solda pois a partir da sua variação é possível modificar tanto a altura quanto o diâmetro do arco. Com o aumento da tensão, haverá um aumento na área em que será aquecida e, conseqüentemente, um aumento na poça de fusão [26].

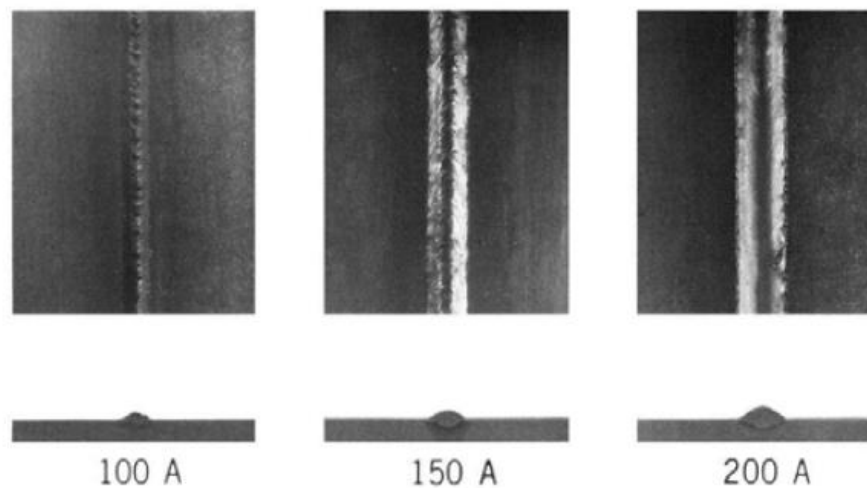


Figura 7 – Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO₂ [26].

Por isso, para altas tensões espera-se a formação de cordões de soldadura mais largos, mais baixos e com menor penetração, como ilustrado na Figura 8. Porém, para cada situação é possível obter um valor ótimo de tensão que é capaz de providenciar uma maior penetração associado a um cordão relativamente mais largo [19].

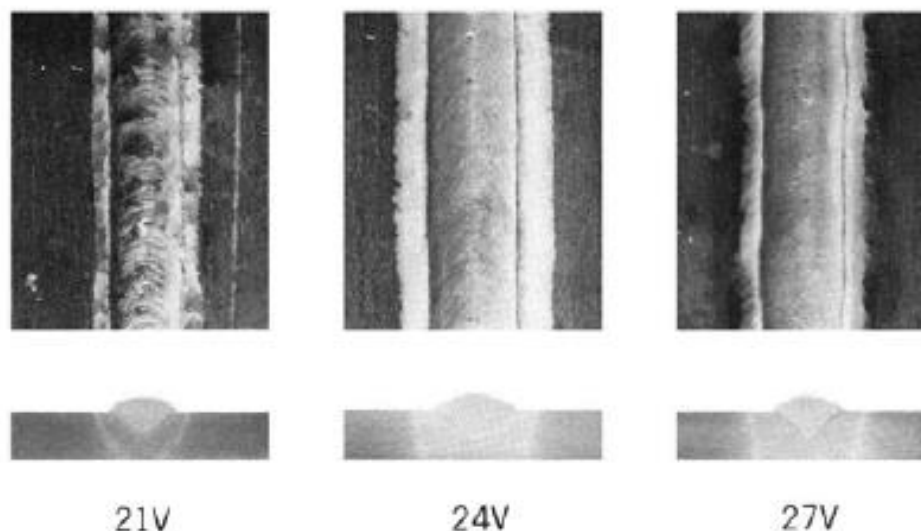


Figura 8 – Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [26].

A velocidade de soldadura ou velocidade de avanço da tocha é um parâmetro que possui influência parecida com o parâmetro de tensão. Dependendo do valor utilizado, obtém-se um cordão de solda com máxima penetração, porém, ao variar os valores de velocidade isso muda

de forma que baixas velocidades geram alta deposição de metal de solda e maior transferência de calor para peça, o que causa um efeito de almofadamento do metal de base e, por consequência, um cordão maior com penetração média. Para valores elevados de velocidade, o processo de fusão não ocorre devidamente a ponto de gerar pouca penetração no metal de base, no entanto, é verificada menor transferência de calor para a peça. A seguir na Figura 9 encontram-se cordões de soldadura para diferentes valores de avanço [11].

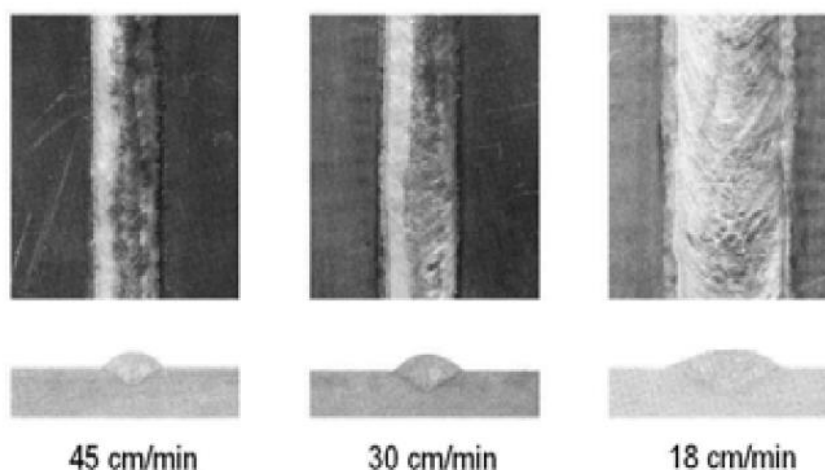


Figura 9 – Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda – alumínio, aerossol, árgon [26].

Outro fator que também apresenta influência sobre a geometria final do cordão de solda é o ângulo no qual a tocha está inclinada em relação à vertical e o sentido do movimento (Figura 10). O procedimento de soldadura pode ser realizado com a tocha no sentido puxando, o que gera maior penetração, menos respingos, cordão de solda mais estreito e convexo e arco mais estável. Outra opção é realizar a soldadura empurrando a tocha, com isso o processo apresentará menor penetração, menos respingos e cordão de solda mais plano e largo. Assim como os outros parâmetros, há um grau de inclinação ótimo para obter-se maior penetração, no caso da soldadura no sentido puxando esse valor é de 25° [26].

O diâmetro do arame eletrodo também é outro fator de influência no cordão de solda. Arames de diâmetros grandes tendem a necessitar de uma corrente de operação maior, portanto, obtém-se cordões de alta penetração, devido ao alto nível de corrente, e largos por depositarem maior quantidade de metal de adição [26].

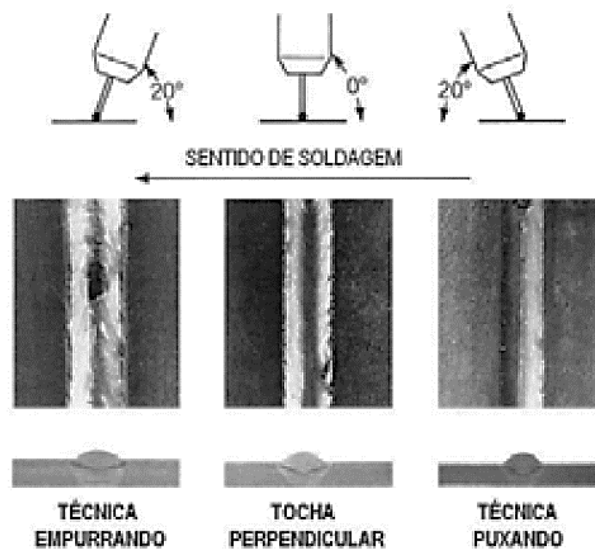


Figura 10 – Efeito da posição longitudinal da tocha na penetração da solda [26].

Conforme Wainer *et al* [19], para um processo de soldadura submetido às mesmas condições de operação, porém, alterando-se apenas o diâmetro do arame eletrodo, os arames de maiores diâmetros fornecerão maior penetração e taxa de deposição. A espessura da peça de base onde será realizada a soldadura também tem certa influência, de maneira que maiores espessuras necessitam arames de maior diâmetro.

O caudal e o tipo de gás de proteção utilizados no procedimento possuem influência direta quando se diz a respeito dos possíveis defeitos acerca do cordão de solda. A função do gás é proteger a região soldada dos gases atmosféricos e assim impedir a formação de óxidos prejudiciais ao resultado final [26].

O gás mais utilizado é o argônio e as suas misturas, devido à grande disponibilidade e baixo potencial de ionização, o argônio fornece um arco mais estável com baixa quantidade de respingos. Em aços carbono são empregadas misturas de argônio e gás carbônico, o CO_2 possibilita boa penetração e altas velocidades de soldadura. Porém, quanto maior a quantidade de CO_2 na mistura gasosa, maior será a corrente de transição da transferência metálica globular para *spray* [29].

2.3.4. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL NO PROCESSO MIG/MAG

A técnica de soldadura MIG/MAG muda a forma com que o metal é transferido da ponta do eletrodo até a poça de fusão a partir da alteração de parâmetros de soldadura como a corrente, diâmetro do arame, tensão, a fonte e o gás de proteção utilizado. A partir da variação de tais

parâmetros é possível obter, atualmente, três formas principais de transferência, por curto circuito (*short arc*), globular e aerossol (*spray arc*) [11].

O primeiro tipo de transferência, encontrado na Figura 11(a), é por curto circuito ou do inglês *short arc*. É comumente utilizada para baixos níveis de parâmetros de soldadura como tensão, corrente e arame elétrodo na faixa de 0,8 mm a 1,2 mm, além disso, é um método bastante versátil por permitir realizar a união de peças de baixa espessura em todas as posições e, também, unir peças de alta espessura na direção vertical e posição sobre cabeça. De acordo com Modenesi [11], Forte e Vaz [26] uma gota é formada na ponta do arame elétrodo, esta gota aumenta seu diâmetro até tocar a poça de fusão e então é rapidamente atraída pela ação da tensão superficial. A transferência apenas ocorre quando há um curto circuito provocado pelo contato do elétrodo com a poça, este ciclo de contato entre metal e poça de fusão ocorre de 2 a 200 vezes por segundo de maneira que o arco é extinguido e reaberto a cada novo ciclo. Uma grande quantidade de respingos pode ocorrer, isso é característica do curto circuito, porém a geração dos respingos pode ser diminuída a partir do ajuste da indutância da fonte e da utilização de parâmetros de soldadura mais adequados. Esta técnica é aplicada quando se procura uma baixa distorção na peça soldada [26].

Quando ocorre um aumento nos níveis de energia utilizados na transferência por curto circuito, o metal começa a ser transportado em forma de gotas, ou seja, este é o segundo tipo de transferência chamado de transferência globular. Neste caso, são formadas gotas na ponta do elétrodo, evidente na Figura 11(b), que variam seu diâmetro em função da corrente, quanto mais energia, menores são as gotas. Este tipo de transporte de metal é caracterizado pelo fato de possuir um comportamento imprevisível com grande quantidade de respingos, além disso as gotas de metal são transferidas pela ação da gravidade, fato que a limita apenas à posição plana [9, 24].

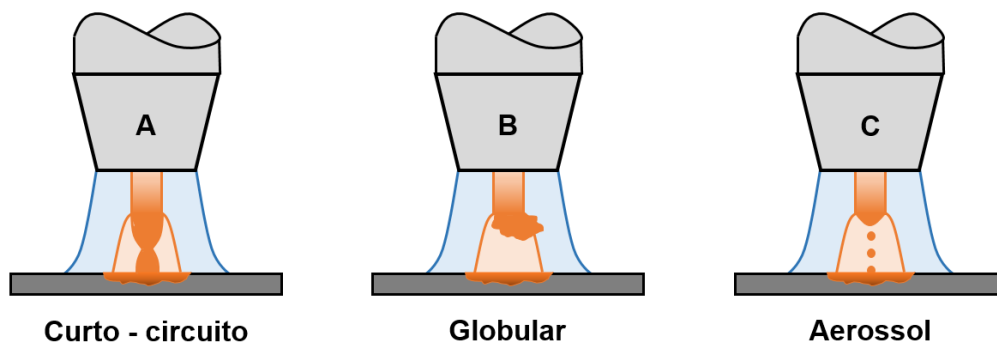


Figura 11 – Transferência de Metal tipo (a) Curto-circuito (Short arc) (b) Globular (c) Aerossol (Spray arc).

Com o aumento contínuo da corrente de soldadura, as gotas de metal tendem a diminuir de forma a possuírem diâmetros muito menores que o elétrodo. Quando os níveis de energia se elevam, os mesmos chegam numa faixa de valores chamada de “corrente de transição” [11]. Ao se atuar nesta faixa de operação o comportamento da transferência muda de globular para aerossol ou *spray*, como ilustrado na Figura 11(c). É característico deste modo as gotas de metal serem bem pequenas e sua quantidade muito elevada o que possibilita alta taxa de deposição. O alto nível de energia permite o transporte das gotículas por forças eletromagnéticas, podendo realizar a soldadura em outras posições, o arco é bem estável com pouca geração de respingos e boa aparência do cordão de solda, porém, isso só é possível ao utilizar uma combinação correta de gases de proteção [9, 24].

2.4. CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDADURA

Como forma de verificar a qualidade da junta soldada, um conjunto de ensaios surgiram para testar tais soldas. Estes ensaios avaliam as propriedades da junta, bem como a qualidade de uma solda, fatores estes que são necessários para qualificar procedimentos de soldadura [30].

Dos ensaios criados, há uma divisão entre ensaios destrutivos, que inviabilizam o uso do material após realizado o teste, e os ensaios não-destrutivos, que não influenciam nas propriedades mecânicas do material, sendo assim, após o teste, ainda é possível utilizar a peça testada [31].

Na categoria dos ensaios destrutivos encontram-se os ensaios de tração, que foi adotado neste trabalho, ensaio de dobramento, dureza, impacto charpy e fadiga [31]. Já no grupo dos não-destrutivos situam-se os ensaios de inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, estanqueidade, raios X, raios Gama e ultrassom [32].

2.4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO TRANSVERSAL EM CORDÃO DE SOLDA

O ensaio de tração transversal em cordão de solda é basicamente composto por um ensaio de tração comum, porém, este é voltado para o teste em solda. Os ensaios de tração, assim como todos os ensaios, são normalizados para que haja uma concordância entre os resultados dos experimentos independentemente de onde eles sejam praticados [33].

Para um ensaio de tração comum, a norma que rege a metodologia do ensaio é a ISO 6892-1 intitulada “Materiais Metálicos – Teste de Tração – Parte 1: Método de Teste à Temperatura Ambiente”. Nesta norma são especificadas todas as etapas do processo que

permite especificar desde o projeto dos provetes de teste até as propriedades mecânicas retiradas dos resultados do ensaio [34].

A execução de um ensaio em uma junta soldada segue os mesmos requisitos propostos pela ISO 6892-1, porém há uma norma justamente para este caso. A ISO 4136 “Testes Destrutivos de Soldas em Materiais Metálicos – Teste de Tração Transversal” apresenta os procedimentos correctos para projetar e obter os provetes nos quais possuem amostras do cordão de solda que serão submetidos ao ensaio de tração, de maneira complementar, a norma ISO 6892-1 auxilia a ISO 4136 quando esta chega em alguma divergência [35].

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga crescente na direção axial do provete até o ponto da sua ruptura. Este é executado por uma máquina universal capaz de realizar diversos tipos de ensaios, como por exemplo, ensaios de tração, compressão, etc [33]. Como resultado, uma curva de Tensão [MPa] \times Deformação [mm/mm] é obtida e, através dela, é possível determinar se o material estudado é dúctil ou frágil e também determinar propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, limite de escoamento, limite de resistência e limite de ruptura [36]. A Figura 12 demonstra um exemplo comum de gráfico Tensão \times Deformação de um material dúctil.

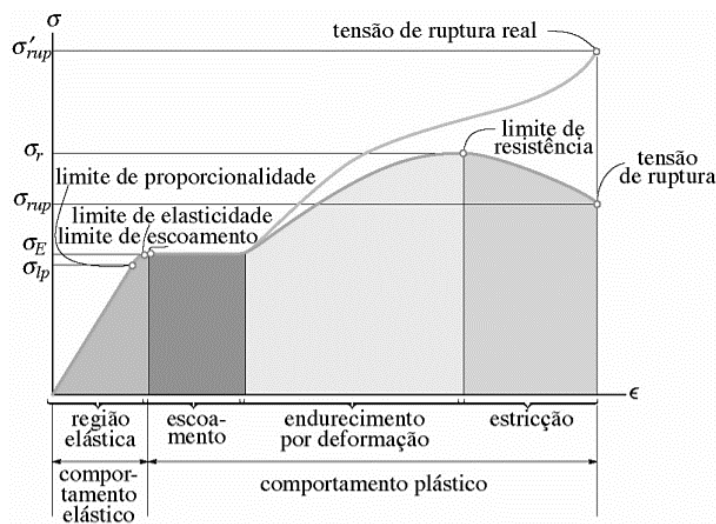


Figura 12 – Diagrama Tensão \times Deformação convencional e real para material dúctil (Aço) (sem escala) [37].

2.5. ANÁLISE MACROGRÁFICA

A macrografia ou análise macrográfica é uma prática usual em meio industrial que permite realizar o controle da qualidade de um produto metalúrgico. Esta faz parte de um conjunto de técnicas que visa relacionar a estrutura do material com suas propriedades físicas,

com o processo de fabrico, com o desempenho de suas funções, etc. Deste conjunto existem dois principais processos, o ensaio de micrografia e o ensaio de macrografia que será aplicado neste trabalho [38].

Numa macrografia, o aspecto de uma superfície é analisado, a olho nu ou com uma ampliação de até 50 vezes, o aspecto de uma superfície após ser devidamente polida e atacada por um reagente químico [38]. Através dela é possível determinar ou ter uma ideia sobre a homogeneidade do material, existência de falhas, impurezas relacionadas ao processo de fabricação, qualidade de soldas [39], profundidade de tratamentos térmico, etc.

A preparação de amostras destinadas ao processo de análise macrográfica necessita da divisão ou partição de amostras, por exemplo ao analisar um cordão de solda. Operações mais severas como torneamento, esmerilhamento, aplainamento entre outras, impõem muitas alterações microestruturais devido ao trabalho mecânico aplicado. Para isso, a solução é utilizar máquinas equipadas com discos de corte abrasivo que eliminam a influência do trabalho mecânico por possuírem sistema de refrigeração que fornece uma amostra com baixa rugosidade da superfície de maneira rápida e segura [38].

Por fim, tais amostras são submetidas ao processo de embutimento onde são embutidas numa resina que enrijece quando aplicada certas condições de temperatura e pressão. O embutimento evita que as amostras danifiquem as lixas d'água e possuam melhor planicidade durante o procedimento de lixamento, este último é finalizado por um polimento seguido de um ataque químico por um reagente responsável por aumentar o contraste entre as fases do metal da superfície analisada [38].

2.6. MÉTODO TAGUCHI

O Método Taguchi foi desenvolvido pelo engenheiro e estatístico japonês Genichi Taguchi (1924-2012), é um método estatístico que, através do uso de matrizes e tabelas conhecidas como arranjos ortogonais, auxilia na tomada de decisões e no projeto das experiências [40]. Uma das motivações para a criação desse método foram os estudos de Ronald Aylmer Fisher na área de planejamento das experiências com o método DOE (*Design of Experiments*) [41].

Os estudos de Taguchi têm sido amplamente utilizados para determinar níveis excelentes de parâmetros de processos, dessa maneira há um aumento na qualidade com a redução nas variações das respostas e melhoria no desempenho médio [40]. A qualidade é uma característica do produto que pode ser afetada de diversas maneiras, desde o armazenamento de

um componente até o transporte do produto final. A partir do reconhecimento destes fatores de interferência, é possível controlá-los afim de otimizar o processo e obter o desempenho ou qualidade esperada de um produto [42].

Autores de diversas literaturas atuais vêm aplicando métodos de planeamento de experiências como o DOE em conjunto com métodos como o de Taguchi e o de Grey com objetivo de identificar fatores interferentes e analisar o comportamento de diferentes processos [43]. As vantagens destes métodos são a realização de um número reduzido de experiências que diminuem o custo envolvido no processo, também não é exigido um grande conhecimento de ferramentas estatísticas e matemática no tratamento dos dados [41].

Neste trabalho, tal metodologia é aplicada no controle do processo de soldadura MIG/MAG em uniões de chapas de aço, de tal modo espera-se obter parâmetros que forneçam os melhores resultados acerca das propriedades mecânicas e geométricas da solda.

As matrizes ortogonais anteriormente citadas possibilitam aos autores de um estudo avaliarem a robustez do projeto do produto em contraste com as perturbações inerentes ao processo e o custo envolvido [44]. Estas matrizes ou arranjos ortogonais (L_n) são designadas de acordo com o número “n” de experiências que devem ser realizadas e as mesmas determinam as variáveis significativas e suas interações, sendo as mais usuais as matrizes L_4 , L_8 , L_9 , L_{12} , L_{16} , L_{18} , L_{27} e L_{32} [45]. Neste trabalho foi escolhida a matriz L_9 para caracterização das experiências visto que esta possibilita trabalhar com três parâmetros e três níveis atribuídos para cada um.

Uma das principais limitações para o Método de Taguchi é o fato de que a otimização poder ser feita apenas para uma característica, se o objetivo for realizar mais de uma otimização, cada uma deve ser feita de maneira separada [40, 42]. Alguns autores sugerem alguns métodos complementares, como o método Grey, quando se procura uma abordagem de otimizações múltiplas [47].

2.6.1. RAZÃO SINAL-RUÍDO

Na metodologia de Taguchi os fatores estudados são separados em dois grupos principais referidos pela estatística tradicional como fatores fixos e aleatórios [48]. Trazendo esse conceito para área da qualidade, eles são renomeados como fatores de controle, impostos pelo operador, e fatores de ruído que são indesejáveis e muitas vezes incontroláveis.

Por basear-se na engenharia da qualidade e no princípio de projeto robusto, Taguchi busca reduzir a variância dos produtos e processos de forma que ocorra a diminuição na

sensibilidade aos ruídos e, por consequência, redução nos defeitos que provocam a inviabilidade ou a rejeição de peças fabricadas [48]. A função sinal-ruído possibilita a quantificação desta sensibilidade de um processo ou produto aos ruídos, a partir do seu resultado, que é expresso em [dB], determina-se a suscetibilidade do produto aos efeitos dos fatores indesejáveis e incontroláveis com relação aos fatores controlados, ou seja, quanto maior o valor da razão sinal-ruído, menor será a sua suscetibilidade a tais fatores [45].

A maneira na qual se obtém o resultado da razão sinal-ruído varia de acordo com a característica que está sendo avaliada, são três possibilidades de resposta: maior melhor, nominal melhor e menor melhor [44, 45]. Na Tabela 2 estão relacionadas as expressões para o cálculo da razão sinal-ruído.

Tabela 2 – Expressões para o cálculo da razão sinal-ruído [49].

Razão Sinal-ruído	Objetivo da Experiência	Características dos Dados	Fórmulas de Razão Sinal-ruído
Maior melhor	Maximizar a resposta	Positivos	$S/N_t = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$
Nominal melhor	Criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído somente em desvios padrão	Positivos, zero ou negativos	$S/N_t = -10 * \log(s_y^2)$
Nominal melhor (padrão)	Criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído em médias e desvios padrão	Não negativos com um “zero absoluto” no qual o desvio padrão é zero quando a média é zero	$S/N_t = 10 * \log(s_y^2)$ Fórmula ajustada: $S/N_t = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2}\right)$
Menor melhor	Minimizar a resposta	Não negativos com valor alvo zero	$S/N_s = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)$

Onde:

\bar{y} – Média dos dados observados;

s_y^2 – Variância de y;

n – Número de observações;

y – Dados observados.

A resposta do tipo nominal melhor (padrão) para a função sinal-ruído é utilizada para analisar ou identificar fatores nos quais a média e o desvio padrão variam de maneira proporcional. Tais fatores são chamados de fatores de escala que podem ajustar a média ou o alvo sem afetar as razões sinal-ruído [49].

Após realizada a otimização dos parâmetros a partir da análise dos resultados das razões sinal-ruído, espera-se a execução de novas experiências baseados nesta combinação ótima e estes fornecerão novos valores de razão sinal-ruído. Para fins de comparação e referência, uma estimativa teórica para a razão sinal-ruído ótima foi desenvolvida e tal valor pode ser obtido a partir da Equação (1).

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (1)$$

Onde:

$\hat{\eta}$ – Razão sinal-ruído ótima estimada;

η_m – Média total da razão sinal-ruído;

$\bar{\eta}_i$ – Razão sinal-ruído média para o nível ótimo;

q – Número de parâmetros avaliados.

2.7. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A ferramenta ANOVA ou análise de variância é um procedimento estatístico desenvolvido por Ronald Aylmer Fisher utilizado para realizar testes de amostras populacionais reduzida ou limitada e, também, obter a importância ou influência de fatores acima de uma determinada variável de resposta [50].

Nesta metodologia é testada a hipótese da igualdade entre a média de duas ou mais populações de estudo. A importância de um ou mais fatores é avaliada, pela ANOVA, através da comparação das médias das variáveis de resposta em diferentes níveis de fator. Para isto, são testadas duas hipóteses (Figura 13), a primeira é a hipótese nula onde se afirma que as médias dos níveis de fator populacionais (μ) são iguais e a segunda, chamada de hipótese alternativa, afirma que pelo menos uma destas médias populacionais é diferente [51].

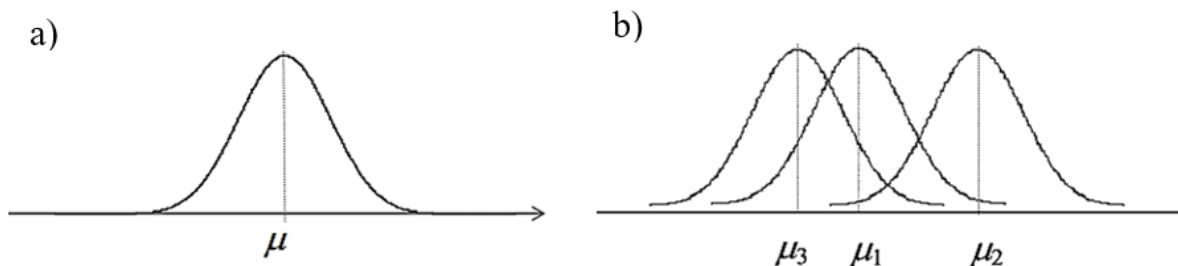


Figura 13 – Distribuições populacionais quando a hipótese nula é (a) verdadeira ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$) e (b) falsa ($\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$) [52].

De maneira geral, uma análise de variância é avaliada a partir de uma tabela ANOVA (Tabela 3) composta por [53]:

- Fonte ou Parâmetros de Entrada;
- Graus de liberdade (*GDL*) das variáveis;
- Soma dos Quadrados (*SQ*): apresentam uma medida de desvio da média e inclui o cálculo do erro na soma total;
- Quadrados Médios (*QM*): razão da soma dos quadrados pelos graus de liberdade;
- Valor *F*: representa uma proporção de médias quadradas em relação à média quadrada do erro;

Tabela 3 – Cálculos para análise de variância que compõem a tabela ANOVA [52].

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Variância (Soma Média dos Quadrados)	Razão F
Entre Grupos	$SS_A = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2$	$k - 1$	$S_b^2 = MS_A = \frac{SS_A}{k - 1}$	$F = \frac{S_b^2}{S_p^2} = \frac{MS_A}{MS_E}$
Dentro dos Grupos Residual	$SS_E = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$	$k(n - 1)$	$S_p^2 = MS_E = \frac{SS_E}{k(n - 1)}$	
Total	$SS_T = n \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{\bar{x}})^2$	$nk - 1$		

O valor-p é uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula. Para determinar se um modelo explica a variação na resposta, o valor-p do modelo deve ser comparado com o seu nível de significância para avaliar a hipótese nula, sendo que, a hipótese nula para o modelo é que o modelo não explica nenhuma variação na resposta.

O nível de significância (denotado como α ou alfa) mais utilizado é o de 0,05 [52]. Um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de concluir que o modelo explica a variação na resposta quando isso não acontece. Portanto duas conclusões podem ser tiradas:

- **Valor-p** $\leq \alpha$ onde o modelo explica a variação na resposta.
- **Valor-p** $> \alpha$ onde não é possível concluir que o modelo explica a variação na resposta.

A fim de obter o nível de contribuição dos parâmetros de entrada em termos percentuais, Ross [48] propõe o cálculo do rácio entre a soma dos quadrados total e a soma dos quadrados para cada fonte de variação.

Capítulo 3: Anteprojeto do Mecanismo

Como parte dos objetivos gerais do trabalho, foi proposta a criação de um mecanismo capaz de fornecer à tocha de soldadura mais dois graus de liberdade. O controle sobre os movimentos da tocha tornam-se importantes pois de acordo com algumas literaturas [54, 55, 56], o ângulo utilizado no processo de soldadura mostrou-se muito influente no resultado final da solda em termos tanto geométricos quanto mecânicos.

Portanto, tomou-se como solução o desenvolvimento de um mecanismo composto por engrenagens associadas a um motor elétrico suscetível à comandos computacionais. Um anteprojeto então foi realizado e todo desenvolvimento auxiliado por *software* CAD. Desta forma, os componentes do mecanismo puderam ser modelados e assembled, bem como, ter a sua cinemática de movimento avaliada.

No entanto, apesar de se aproximar muito ao que se considera o produto final, não foi possível realizar sua fabricação pois os materiais para sua confecção não chegaram dentro do tempo estipulado, impedindo assim a verificação da sua funcionalidade.

3.1. DESENVOLVIMENTO DO ANTEPROJETO

A apresentação das atividades desenvolvidas sobre o anteprojeto será organizada por fases e de acordo com a ordem em que foram realizadas. Primeiro serão abordados os requisitos do projeto e apresentadas as primeiras ideias, seguidos pelo dimensionamento onde são determinados os materiais utilizados, a transmissão e os elementos fixadores, por fim, a montagem final do mecanismo.

3.2.1. REQUISITOS DO PROJETO

Como dito anteriormente, o projeto tem como objetivo acrescentar à tocha de soldadura um maior número de graus de liberdade, neste caso foi criado um mecanismo capaz de realizar a rotação da tocha em torno do eixo Y do aparato experimental indicado na Figura 22, p. 30. Esta atualização no aparato, em conjunto com o sistema de controle já existente, possibilita a seleção do ângulo da tocha pretendido para realizar uma soldadura. Desse modo, não seria necessário um procedimento manual, como, por exemplo, a utilização de um transferidor como ferramenta de apoio, para a alteração do ângulo da tocha antes de cada soldadura.

3.2.1.1. Ideias iniciais e montagem

Inicialmente havia sido discutida a ideia de, ao contrário de realizar apenas o controle acima do movimento rotativo da tocha sobre o eixo Y (Figura 22) da máquina (Figura 14(a)), realizar também o controle do movimento da tocha em torno do seu próprio eixo (Figura 14(b)). O controle da tocha nestes dois sentidos, permitiria a realização de soldas horizontais e soldas verticais no sentido ascendente e descendente.

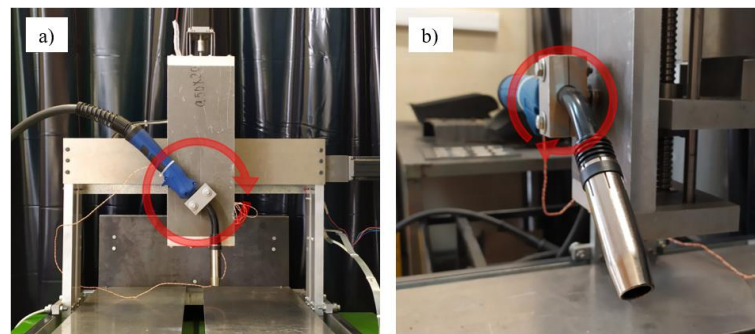


Figura 14 – Indicação do movimento de rotação da tocha (a) sobre o eixo Y e (b) sobre o próprio eixo.

Foram desenhados alguns esboços preliminares, a partir dos quais foram efetuados desenhos de cada elemento e a respetiva montagem (desenho de conjunto) no *software Solidworks 2018* para que fosse possível ter uma melhor manipulação e visualização (Figura 15).

A ideia principal destas primeiras montagens foi adicionar os movimentos à tocha a partir da criação de cubos de alumínio que levariam dentro de si um sistema de transmissão capaz de fornecer o movimento de rotação. Como era necessário acrescentar dois graus de liberdade, dois cubos seriam adicionados visto que cada cubo seria responsável por um movimento distinto. Um simples sistema de transmissão por engrenagem sem-fim possibilitaria a rotação em torno do eixo Y da máquina, como ilustrado na Figura 22. Porém, para que a tocha realizasse o movimento de rotação em torno do próprio eixo (Figura 14(b)), não foi possível obter uma solução para a transmissão desse movimento para a tocha, portanto a ideia de automatizar o movimento de rotação da tocha sobre o próprio eixo foi desconsiderada.

Assim, seguiu-se apenas com a ideia de automatizar o aparato em um grau de liberdade, no caso o movimento da tocha em torno do eixo Y de deslocamento do aparato. Nas etapas seguintes serão expostas as demais decisões sobre o projeto.

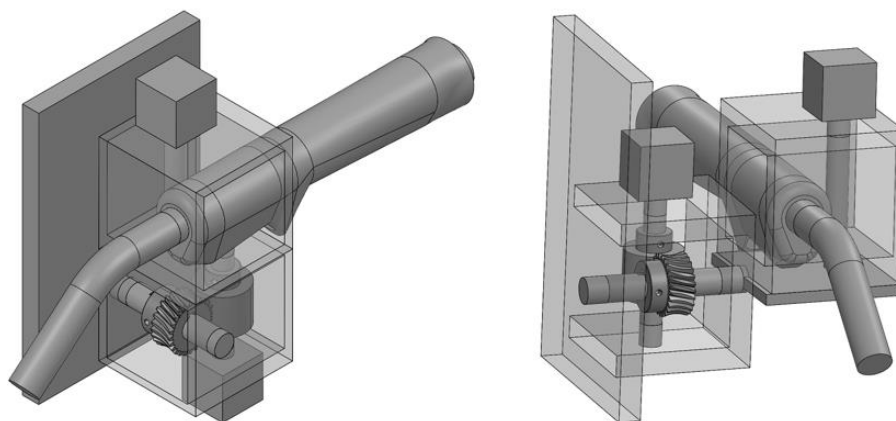


Figura 15 – Primeiras montagens do mecanismo de soldadura.

3.2.2. DIMENSIONAMENTO

Para realizar o dimensionamento do mecanismo, foi necessário estabelecer quais seriam os componentes que iriam integrar todo o equipamento, com isso, foi possível determinar o tamanho físico e o peso total do sistema que seria acoplado ao aparato experimental.

3.2.2.1. Materiais

Seguindo a mesma filosofia do aparato experimental como um todo, optou-se por desenvolver um mecanismo que possua alta resistência e peso relativamente baixo. Para isso, decidiu-se utilizar uma liga de alumínio como o material que compõe a estrutura principal, visto que este possui as características necessárias para a execução do projeto. As ligas de alumínio são fornecidas em barras com perfil de 60 [mm] × 10 [mm] sendo necessário apenas 1 [m] de barra para fabricar o cubo e ainda reservar o restante para algumas peças extras.

Os eixos inseridos no mecanismo foram realizados através da maquinagem de varões de aço, devido à sua versatilidade e disponibilidade no armazém do Laboratório de Tecnologia Mecânica. Já os componentes menores, como elementos de transmissão, fixação, parafusos e porcas não tiveram tanta importância na seleção do material que eram feitos, pois serão adquiridos comercialmente e são fornecidos de acordo com sistemas normalizados.

3.2.2.2. Método de Geração e Transmissão de Movimento

O mecanismo apenas permite realizar o movimento de rotação a partir da inserção de um componente capaz de gerar o binário necessário movimentar a tocha. Este binário será

transmitido para o mecanismo por meio de elementos de transmissão de movimento como engrenagens, por exemplo.

O movimento de rotação no sistema é efetuado a partir de motores de passo, similares aos que já estão instalados no aparato experimental, porém, devido ao tamanho reduzido do mecanismo e ao baixo peso da tocha de soldadura, foi aplicado um motor de passo de menor potência. O motor selecionado tem um binário de 2100 [g.cm] e é da marca Wantai Motor esquematizado na Figura 16. As características do motor estão apresentadas na Tabela 4.

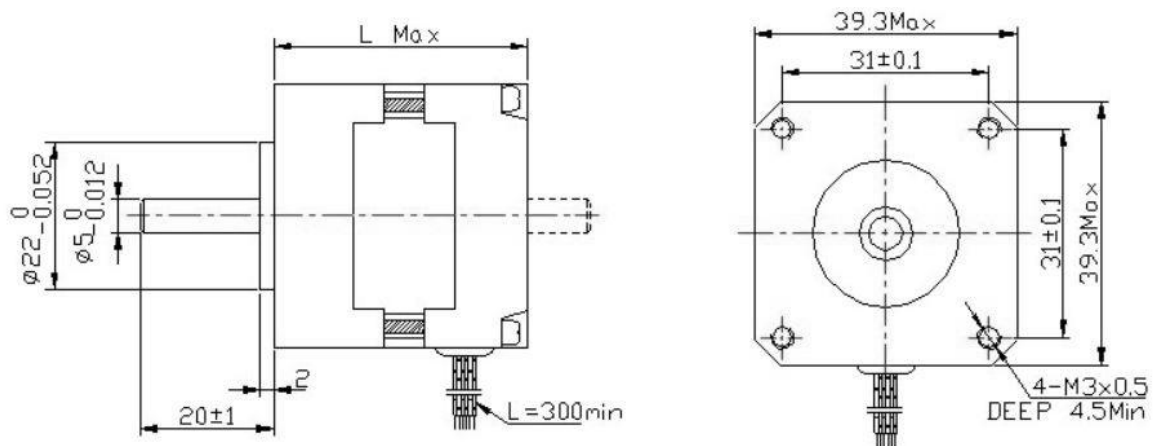


Figura 16 – Desenho esquemático do motor de passo Wantai 39BYG215.

Tabela 4 – Características do motor de passo 39BYG215.

Característica	39BYG215
Ângulo de Passo	1,8°
Comprimento do Motor [mm]	34
Voltagem [V]	12
Corrente [A]	0.4
Binário [g.cm]	2100
Peso [g]	180

Este motor de passo fornece o movimento que será transmitido para o mecanismo através de um conjunto de engrenagens sem-fim, foi estipulado um valor de binário de 5 [N.m], então, selecionou-se um par de engrenagens que seja capaz de transmitir este binário para o eixo do mecanismo e assim, realizar a rotação. Foi utilizado um engrenamento sem-fim, pois apresenta pouca vibração durante seu funcionamento, possui uma alta gama de razões de velocidade e também porque é compacto. Desta forma, o mecanismo possuirá tamanho e peso reduzidos, mantendo a sua eficiência. Após consulta de catálogos de fornecedores de engrenagens, foram selecionadas engrenagens da marca Norelem que estão esquematizadas na

Figura 17. Na Tabela 5 são apresentadas as características geométricas e cinemáticas das engrenagens selecionadas.

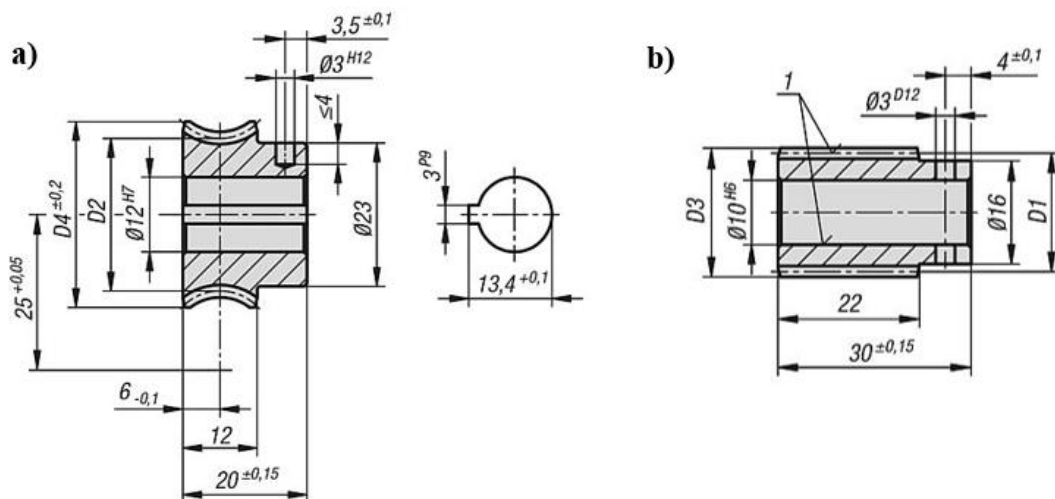


Figura 17 – Desenho esquemático da (a) engrenagem sem-fim e (b) parafuso sem-fim .

Tabela 5 – Conjunto de Engrenagem Helicoidal (sentido horário) composto por um parafuso sem-fim e uma engrenagem sem-fim.

Características	Parafuso Sem-Fim	Engrenagem
Referência	22500-251005	22500-252005
Relação de Transmissão	-	5:1
Ângulo de Inclinação	19° 15	19° 15
Distância entre Eixos [mm]	25	25
Módulo	1,5	1,5
Z1	4	-
D1 [mm]	18,2	-
D3 [mm]	21,2	-
Z2	-	20
D2 [mm]	-	-
D4 [mm]	-	34,8
Binário de Saída [N.m]	9,7	9,7

Para permitir o livre movimento do cubo em torno do eixo principal, foram adicionados rolamentos entre o cubo e o eixo. Estes são responsáveis por realizar o apoio do cubo sobre o eixo que sustenta o mecanismo de maneira a que o movimento rotativo seja realizado apenas pelo cubo enquanto o eixo permanece fixo. Por isso, foram selecionados rolamentos Norelem (Figura 18) e cujas características geométricas e dinâmicas estão indicadas na Tabela 6.

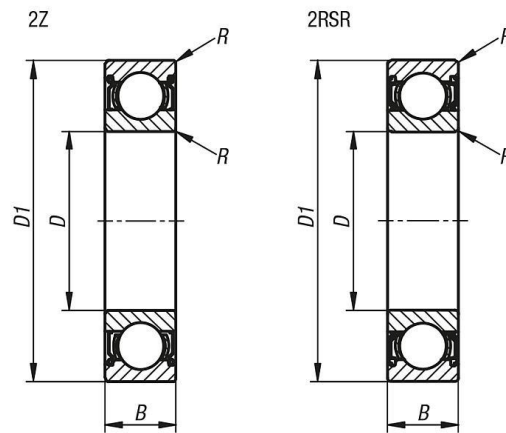


Figura 18 – Desenho esquemático dos rolamentos 6000-2Z e 6001-2Z.

Tabela 6 – Rolamentos rígidos de esferas FAG de fileira simples vedados com vedações de juntas sem contato bilateral.

Características	Rolamento 6000-2Z	Rolamento 6001-2Z
Referência	23800-101002608	23800-101202808
Carga Estática [N]	1960	2360
Carga Dinâmica [N]	4550	5100
Ø Externo [mm]	26	28
Ø Interno [mm]	10	12
Espessura [mm]	8	8
Rotação Limite [RPM]	28000	26000

3.2.2.3. Posição e Elementos de Fixação

Por conveniência, o mecanismo foi projetado para ser fixado na ponte da estrutura da máquina, que é o local onde está fixo o suporte atual da tocha, dessa maneira, simplifica o processo de adaptação ao aparato experimental. Como já existe um componente que suporta a tocha, seria importante adaptá-lo para fixar a tocha ao novo mecanismo nesta posição. Para isso, foi necessário adaptar um perfil U (Anexo II) para efetuar a fixação da tocha ao mecanismo afim de efetuar o movimento de rotação.

Todos os componentes foram projetados com a tolerância adequada para permitir a montagem de todo os elementos mecânicos. Porém, ainda foi necessário inserir os componentes de fixação responsáveis por manter a estrutura do mecanismo rígida, dentre eles estão os parafusos, veios roscados, porcas, anilhas e anéis elásticos ou freios (Figura 19).



Figura 19 – Representação de elementos de fixação utilizados no mecanismo.

3.3. MONTAGEM FINAL

As dimensões finais do protótipo foram definidas a partir dos seus requisitos. Assim, a partir do peso da tocha e a distância previsível do motor, determinou-se o binário necessário. A partir desse valor de binário foram selecionadas as engrenagens (sem-fim e roda de coroa) que transmitirão o movimento de rotação à tocha. Como as dimensões das engrenagens são definidas pelo fabricante, todos os outros componentes do mecanismo foram adaptados e escolhidos de modo a suportá-las.

Com base no *software Solidworks 2018*, foi possível criar um desenho de conjuntos (*assembly*) e verificar se haveria algum tipo de interferência ou erro de montagem. Na Figura 20 é possível visualizar a montagem final do protótipo feita no *software*, nesta montagem foram inseridos os modelos da tocha de soldadura, do motor de passo, dos rolamentos, placas de alumínio, eixos, engrenagens e parafusos. O *software* ainda permitiu criar relações geométricas entre cada componente e, também, inserir uma fonte de rotação de forma a verificar se o protótipo realizaria os movimentos para os quais foi projetado.

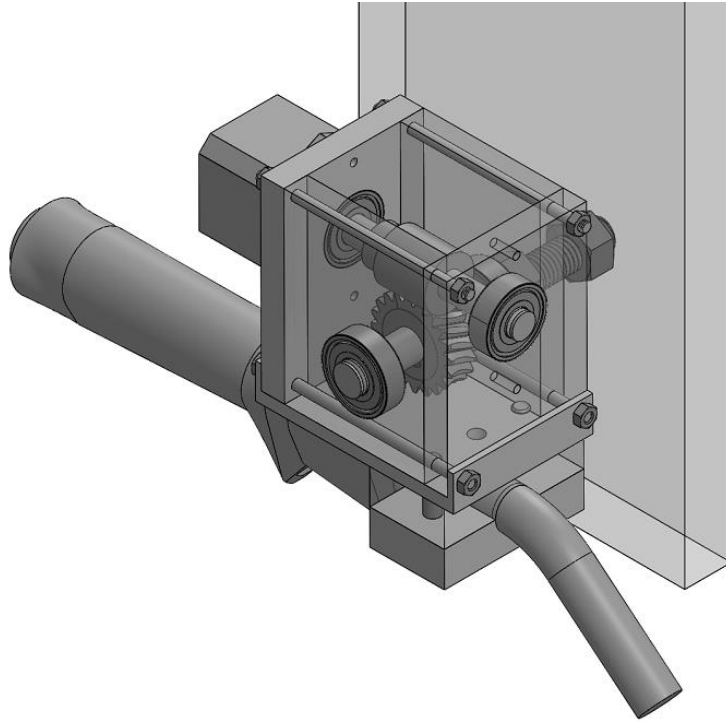


Figura 20 – Montagem final do mecanismo de soldadura.

Capítulo 4: Procedimentos Experimentais

As atividades práticas deste trabalho foram desenvolvidas durante o ano letivo de 2018/2019. Durante este período, as experiências foram executadas nas dependências do Instituto Politécnico de Bragança Campus Santa Apolónia, mais precisamente na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) nos Laboratórios de Tecnologia Mecânica, de Materiais de Construção Mecânica (LMCM) e de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM). Tais atividades foram orientadas pelo Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro, Professor Doutor João Gonçalves Coelho, bem como, com o apoio dos técnicos dos laboratórios anteriormente citados.

4.1. METODOLOGIA UTILIZADA

Nesta etapa, serão apresentados os procedimentos e as decisões tomadas para a realização das experiências e atividades desenvolvidas no trabalho, desde o planeamento até os resultados finais.

4.1.1. DETERMINAÇÃO DO MATERIAL E DO PROCESSO

O material selecionado como metal base foi um aço carbono de baixa liga DIN C20, ou também conhecido como aço SAE 1020, cuja composição química encontra-se na Tabela 7. Para o metal de adição foi utilizado um arame eletrodo AWS A5.18 ER 70S-6 constituído de aço e revestido em cobre, a sua composição química está indicada na Tabela 8.

Os aços e suas ligas ainda são amplamente utilizados devido à sua alta versatilidade e boas propriedades mecânicas, o fato de também possuir boa soldabilidade justificou a sua utilização neste trabalho.

Tabela 7 – Composição química do aço DIN C20 / SAE 1020.

C	Mn	P máx.	S máx.
0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0,04	0,05

Tabela 8 – Composição química do arame eletrodo AWS A5.18: ER70S-6.

C	Mn	Si	P	S
0,073%	0,97%	0,51%	0,009%	0,013%

4.1.2. PLANEAMENTO DAS EXPERIÊNCIAS

Para realizar uma experiência que forneça bons resultados é necessário utilizar uma metodologia com bom embasamento. Portanto, para planejar os experimentos foi utilizado o método de Taguchi ou método das matrizes ortogonais. O propósito da metodologia de Taguchi é obter resultados a partir da redução no número de experimentos e, conseqüentemente, redução dos recursos e do tempo necessários para chegar em tais resultados.

A finalidade foi realizar a otimização de parâmetros como penetração, largura, reforço e limite de resistência de juntas soldadas com o recurso a um aparato que possibilita a utilização da soldadura MIG/MAG de maneira automática. As chapas de aço DIN C20 possuíam espessura de 3 mm com metal de adição AWS A5.18 ER 70S-6 em forma de arame de diâmetro Ø0,8 mm. Procurou-se através de um processo de otimização, determinar uma geometria de cordão de solda cujo reforço ficaria próximo de 0 mm, alcançar um valor de penetração e largura com a dimensão semelhante à da espessura da chapa, ou seja, neste caso de 3 mm e um limite de resistência transversal máximo.

Nos testes de soldadura MIG/MAG os parâmetros de velocidade de alimentação do arame e a distância do bocal até o metal base não foram incluídos no estudo, porém, ambos tiveram que ser tratados de maneiras diferentes em cada experiência. A velocidade de alimentação do arame teve de ser adaptada para cada combinação que era colocada em teste, caso contrário, verificou-se falta ou excesso de metal de adição no processo de soldadura. Já a distância do bocal até a peça base teve um valor de acordo com a inclinação da tocha que era utilizada no teste, para os testes com inclinação de 0° (topo) era mantida uma distância de aproximadamente 10 mm enquanto que para os testes de inclinação 15° e 30° essa distância era mantida a aproximadamente 5 mm.

Os parâmetros de entrada selecionados para o estudo foram a tensão, a velocidade de soldadura e o ângulo de ataque da solda, onde, para cada um, foram atribuídos três níveis como indica a Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de estudo e seus níveis atribuídos.

Níveis	Parâmetros		
	Tensão [V]	Velocidade de Soldadura [mm/min]	Ângulo da Tocha [°]
Nível 1	22.4	200	0
Nível 2	23.3	300	15
Nível 3	24.1	400	30

Durante os experimentos de teste, constatou-se que níveis de velocidade de soldadura próximos a 500 mm/min geravam cordões de solda com grande reforço, porém, com baixa penetração, largura e fusão entre metal de base e adição, neste caso optou-se por reduzir o nível de velocidade máximo para 400 mm/min.

Afim de definir a matriz ortogonal que melhor se adequa ao estudo, é necessário realizar o cálculo dos graus de liberdade (GDL), ou *degrees of freedom* (DOF), que os parâmetros possuem. Isso pode ser feito a partir da Equação (2) a seguir.

$$GDL = (n_A - 1) + (n_B - 1) + \dots + (n_n - 1) \quad (2)$$

Onde:

GDL – Graus de Liberdade

n_A – Número de níveis para o fator A

n_B – Número de níveis para o fator B

n_n – Número de níveis para o n-ésimo fator

Para três parâmetros selecionados e sendo que, cada um possui três níveis atribuídos, utilizou-se a Equação 2.

$$GDL = 3 * (3 - 1) = 6$$

Foram obtidos seis graus de liberdade para o estudo. A metodologia de Taguchi possui várias matrizes ortogonais, para seis graus de liberdade poderia ser utilizada a matriz L_8 , no entanto a matriz L_8 trabalha apenas com dois níveis e, por isso, foi utilizada a matriz ortogonal L_9 , apresentada na Tabela 10, visto que foram atribuídos três níveis para cada parâmetro.

A partir da matriz L_9 foi possível organizar nove combinações de parâmetros que posteriormente foram testados. Para realizar um tratamento estatístico satisfatório, as nove combinações passaram por dois testes cada uma, ou seja, no total foram realizados 18 experimentos. Na Tabela 11 os parâmetros e os seus respectivos níveis de estudo foram introduzidos na matriz L_9 .

Tabela 10 – Matriz Ortogonal L₉ (3⁴) de Taguchi [44].

Nº	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
	a	b	a	a
			b	b ²
GRUPO	1	2		

Tabela 11 – Matriz L₉ de Taguchi com os parâmetros de estudo.

Nº do Ensaio	Tensão [V]	Velocidade de Soldadura [mm/min]	Ângulo da tocha [°]
1	22.4	200	0
2	22.4	300	15
3	22.4	400	30
4	23.3	200	15
5	23.3	300	30
6	23.3	400	0
7	24.1	200	30
8	24.1	300	0
9	24.1	400	15

4.1.3. PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL

Esta etapa do trabalho visa descrever as atividades e etapas realizadas para a obtenção de provetes e amostras extraídos a partir de chapas de aço que foram unidas pelo procedimento de soldadura MIG/MAG. Como tal, este tópico abordará os testes preliminares realizados para a verificação e calibração da máquina de controle numérico onde foram efetuadas as soldaduras, a preparação das chapas de aço, a metodologia utilizada para a soldadura dos cordões e, por fim, como foram extraídos os provetes destinados ao ensaio de tração e as amostras que, posteriormente, foram submetidas a análise macrográfica.

4.1.3.1. Desempenho da máquina de controle numérico

Para realizar os procedimentos de soldadura, um aparato de controle numérico foi utilizado. Tal aparato, apresentado na Figura 21, foi previamente projetado e construído por alunos do Instituto Politécnico de Bragança [57]. Este equipamento tem, contudo, algumas limitações, bem como, algumas falhas de fabrico e montagem que se tentaram corrigir ou minimizar os seus efeitos nos resultados obtidos nos experimentos.

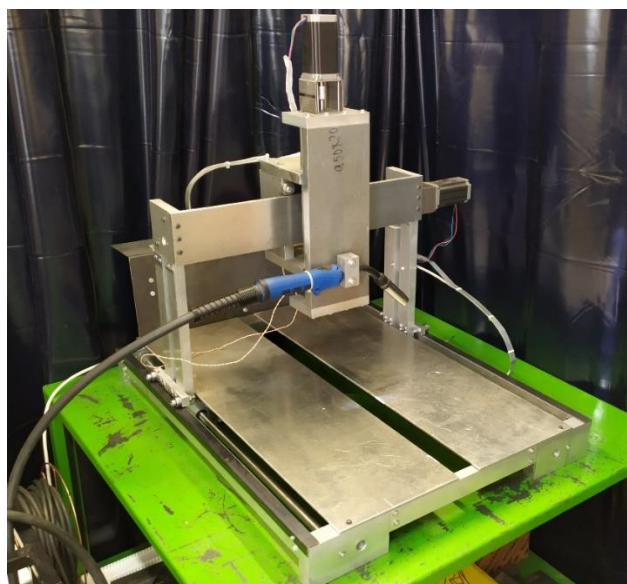


Figura 21 – Aparato experimental de controle numérico computadorizado

Até a execução do trabalho atual, esta máquina realizou um pequeno número de trabalhos de soldadura. Portanto, para atingir os resultados adequados foi necessário verificar se a mesma se encontrava em bom estado de funcionamento, ou seja, foram efetuados vários testes preliminares para determinar possíveis falhas que necessitem de alguma intervenção, bem como, verificar a repetibilidade dos movimentos efetuados pelo equipamento.

Assim, foram executados códigos numéricos para averiguar o comportamento do equipamento e seus componentes. Itens como rolamentos e eixos guia foram devidamente lubrificados para melhorar os movimentos de translação. Durante esses testes iniciais, observou-se que a eixo roscado, responsável pelo movimento no eixo X (Figura 22), não estava desempenhando o deslocamento de forma proporcional à rotação do motor de passo.

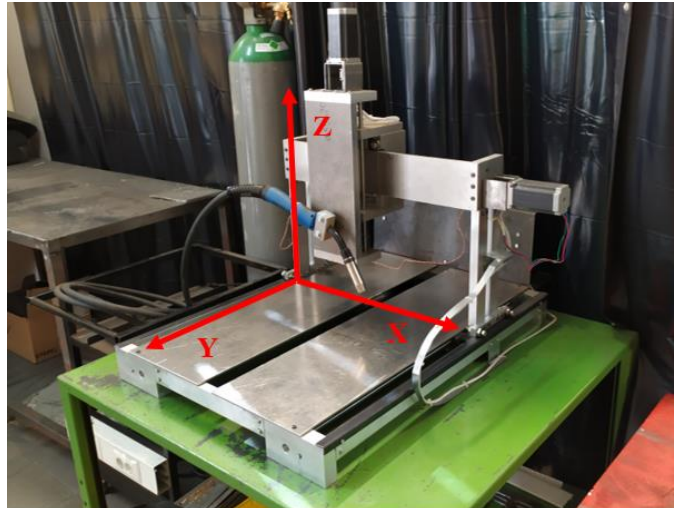


Figura 22 – Aparato experimental com indicação de seus eixos de trabalho.

Para corrigir esse problema, foi desmontado o referido eixo e constatou-se que o fuso de esferas (Figura 23) responsável por realizar o deslocamento do bloco de alumínio que atua como suporte para a tocha de soldadura estava trabalhando com um número muito reduzido de esferas. Para contornar essa limitação, foram introduzidos o número adequado de esferas definidos pelo fabricante. Estas, são responsáveis pela transmissão do movimento do eixo roscado para o fuso e, por consequência, influenciam diretamente no deslocamento da tocha.



Figura 23 – Fuso de esferas recirculantes laminados com porca flangeada

Após realizar tais intervenções, o equipamento demonstrou um comportamento constante sem apresentar falhas na execução dos comandos. Porém, ainda foi necessário testar a repetibilidade dos movimentos da máquina. Para isso, foi fixada uma caneta marcadora no bocal da tocha de soldadura através de abraçadeiras e uma folha de papel foi colocada na base onde são realizadas as soldas. Este sistema imita o procedimento de soldadura realizado pela máquina e o toque da ponta da caneta na folha de papel indica a trajetória executada pela tocha, como pode ser visto na Figura 24.



Figura 24 – Sistema para teste de repetibilidade

Após estes testes preliminares, foram realizados testes de soldadura também com o intuito de verificar a sinergia entre o aparato experimental e a máquina de soldadura MIG/MAG. Nesse sentido, foram realizados diversos cordões de solda com combinações de parâmetros semelhantes aos utilizados no estudo, tal como se pode verificar na Figura 25.



Figura 25 – Testes de cordões de solda.

Alguns cordões apresentam incorreções pois alguns parâmetros ainda não haviam sido testados e foram ajustados no decorrer dos testes para que nos cordões de teste real, tais erros não reapareceram nos ensaios experimentais finais.

4.1.3.2. Preparação das chapas e dimensionamento dos provetes

Como dito anteriormente, as soldas foram realizadas em chapas de aço DIN C20. Estas chapas foram obtidas a partir de grandes placas em aço armazenadas no Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTiG.

Para definir as dimensões das chapas de aço, alguns fatores deveriam ser considerados. Primeiro foi verificado o espaço máximo em que se poderia fixar a chapa dentro do centro de maquinagem CNC e as dimensões normalizadas dos provetes. Posteriormente, foram considerados os pontos de fixação onde seriam colocados os parafusos responsáveis por manter a chapa fixa no suporte de madeira e evitar a vibração durante a maquinagem e, por fim, o diâmetro e a trajetória da ferramenta que realizou a maquinagem da chapa.

O dimensionamento (dimensões e geometria) dos provetes para realizar testes de tração transversal nos cordões de solda foi efetuado de acordo com as normas ISO 4136:2012, para testes destrutivos de solda em materiais metálicos, e a ISO 6892-1:2009, para testes de tração em materiais metálicos. As dimensões e a geometria do provete encontram-se representados na Figura 26.

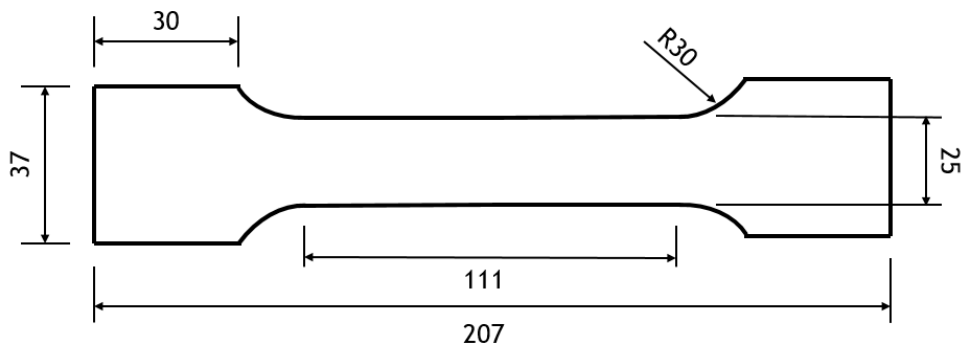


Figura 26 – Dimensões dos provetes em [mm] para teste de tração em solda.

Sendo assim, foi possível realizar um desenho no *software Solidworks 2018* da chapa considerando todos os fatores. Tal desenho permitiu também definir a disposição e a quantidade de provetes que poderiam ser retirados de cada chapa. Como mostra a Figura 27, foi possível extrair seis provetes, totalizando em três chapas para realizar o estudo, visto que serão feitos 18 testes.

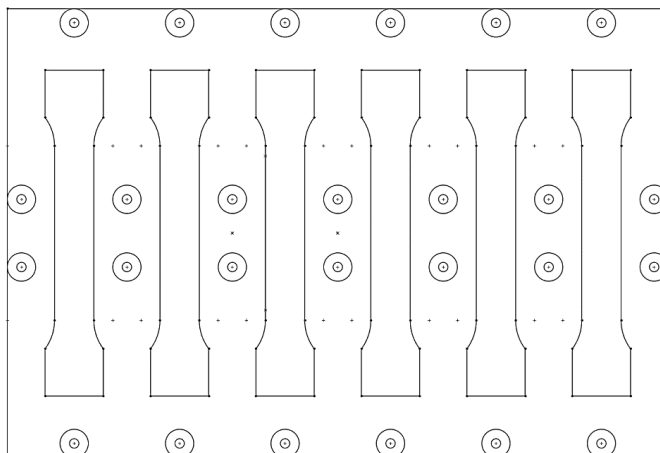


Figura 27 - Esboço em *Solidworks* da chapa a ser usinada.

A chapa ficou definida com dimensão de 285 [mm] de largura e 420 [mm] de comprimento e 3 [mm]. As placas de aço foram cortadas nas dimensões desejadas utilizando uma guilhotina e, assim, após efetuadas as adequadas marcações, cada chapa foi furada nos pontos determinados para cada parafuso, como ilustra a Figura 28.



Figura 28 - Chapa de aço preparada para soldadura.

4.1.4. REALIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

Um dos objetivos deste trabalho é estudar a influência dos parâmetros de soldadura no limite de resistência da junta soldada. Portanto, para executar os cordões de solda, as chapas de aço foram cortadas ao meio da sua largura na direção do seu comprimento. Desta forma, os

cordões de solda poderiam ser realizados sem interrupções e sem a necessidade de ajustar o posicionamento das chapas no início de cada soldadura.

O corte das chapas foi feito através de uma guilhotina, dessa maneira, foram geradas duas metades a partir de cada chapa e ambas foram fixadas na base do aparato. Estas chapas, por possuírem espessura de 3 mm, podem ser consideradas de baixa espessura e não necessitam da execução de chanfros no local da união entre elas.

Como a Figura 29 mostra, as duas metades foram fixadas por grampos cujo objetivo era reduzir os efeitos de distorção produzidos pela geração excessiva de calor. Em níveis de tensão mais altos e velocidades mais baixas, é possível que o metal de adição e o metal de base sejam fundidos a ponto de escorrerem para a parte inferior da junta, esta eventualidade pode danificar o suporte onde as chapas estão fixadas. Para evitar este problema, as chapas foram suspensas através da inserção de perfis tubulares de secção quadrada sob as chapas, com isso, caso seja verificada a ocorrência de excesso de fusão, a superfície de alumínio que atua como suporte não seria danificada.



Figura 29 – Chapa de aço posicionada no aparato de soldadura.

Com a ajuda de um transferidor, a tocha de soldadura pôde ser ajustada nos ângulos de 0° , 15° e 30° em relação à linha vertical normal ao plano da solda, de acordo com a Figura 30. Porém, quando o aparato era configurado para realizar as soldas de inclinação 15° e 30° , o mesmo não possuía amplitude suficiente para se aproximar do material base onde a soldadura seria realizada, esse foi mais um motivo pelo qual as chapas foram suspensas. Além disso, o fato de realizar a regulação da tocha através de uma ferramenta totalmente analógica como o transferidor, pode originar um erro no ângulo de trabalho pois, durante a soldadura, a tocha pode-se mover e alterar a sua posição angular. Por isso, o controle motorizado e automático

deste movimento, traria maior precisão e repetibilidade do posicionamento angular da tocha. Esta foi uma das motivações para a criação do protótipo que foi discutido no Capítulo 3.

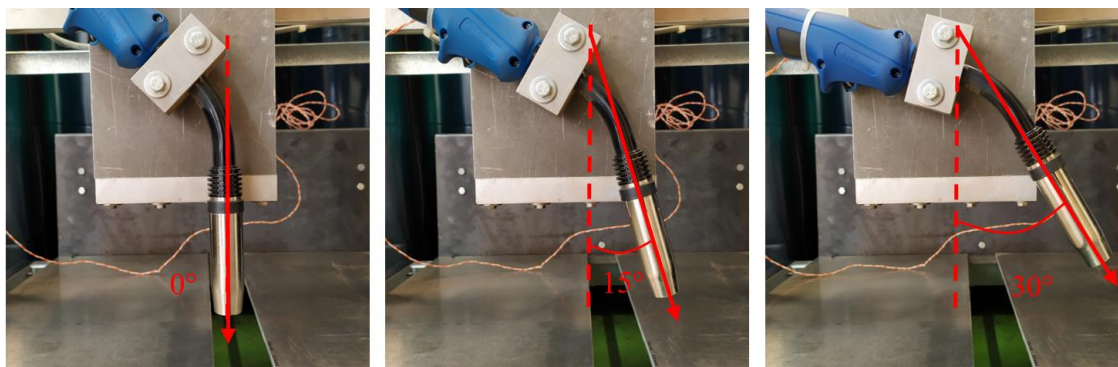


Figura 30 – Ângulos de tocha utilizados para o estudo.

Para que a soldadura fosse realizada, o aparato experimental trabalhou em conjunto com uma máquina de soldadura MIG Modular (Figura 31), composta por uma fonte de energia, um alimentador de arame eletrodo e um cilindro de gás de proteção com mistura de argônio (Ar) e gás carbônico (CO₂). A fonte de energia permitiu alterar os níveis de tensão aplicados ao processo e, para cada nível de tensão, uma velocidade de alimentação de arame eletrodo era selecionada afim de garantir que a soldadura ocorresse sem excesso ou falta de metal de adição. Já o gás de proteção foi responsável por gerar uma atmosfera protetora na região da solda que evitou a contaminação pelo ar atmosférico composto por nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e vapor de água (H₂O).

Com o *setup* pronto, cada chapa foi unida a partir de três cordões de solda onde cada um utilizava um dos conjuntos de parâmetros determinados pela matriz ortogonal de Taguchi. A soldadura foi realizada utilizando o aparato experimental em conjunto com a máquina de soldadura. Na Figura 32 é possível visualizar um dos três cordões gerados a partir da soldadura a 0°.

Depois de produzir todos os nove cordões de solda, de acordo com a matriz de experimentos, foram obtidos três uniões de chapas pelo processo de soldadura, como mostra a Figura 33.



Figura 31 – Conjunto de soldadura fonte de energia e cilindro de gás.

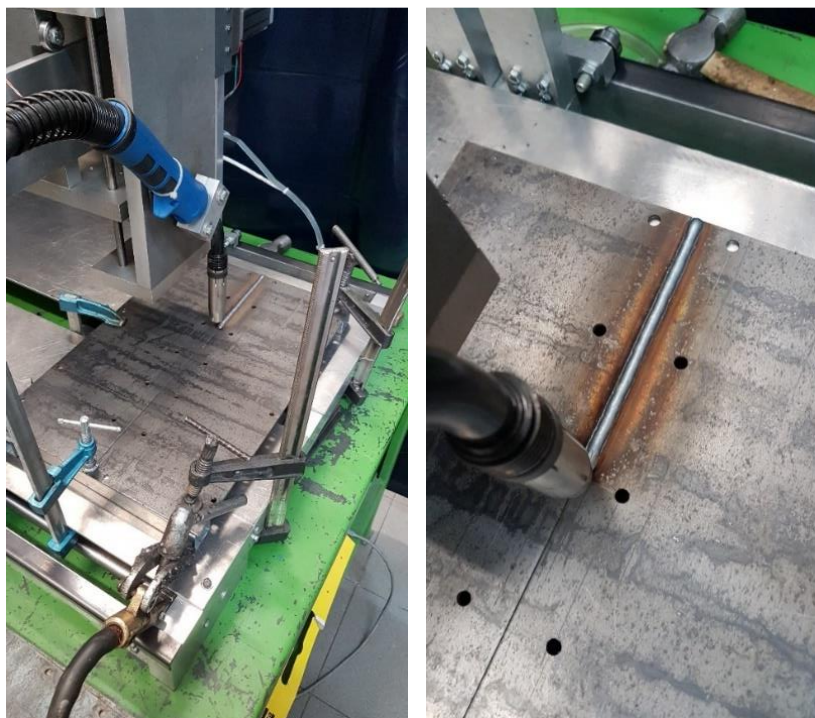


Figura 32 – Cordão de solda topo (0°) realizado na união das chapas.



Figura 33 – Chapas soldadas com todas as combinações do experimento de Taguchi.

4.1.4.1. Obtenção dos provetes e amostras

Para determinar as características mecânicas do cordão de solda na direção transversal, foi necessário produzir os provetes de tração com a geometria e dimensões apresentados da Figura 26. Por outro lado, para avaliar a geometria do cordão de solda é, também, necessário retirar algumas amostras para efetuar uma análise macrográfica.

As chapas que foram previamente unidas, forneceram um total de 18 provetes para realizar os ensaios de tração transversal no cordão de solda e 18 amostras dos mesmos cordões para realizar as análises macrográfica.

A obtenção dos provetes foi efetuada na fresadora CNC DMC 63V (Figura 34), que possui um conjunto de ferramentas capazes de realizar peças que exigem mais etapas de maquinagem e necessitam de maior precisão.

Os furos feitos previamente, garantiram a imobilização das chapas de aço no suporte de madeira (Figura 35) que é fixado na prensa de apertos do centro de maquinagem CNC. Foram utilizados 26 parafusos de Ø6 mm de haste e Ø18 mm de cabeça que evitaram excesso de vibração no processo e atenuaram os efeitos de distorção térmica provocado pela soldadura.



Figura 34 – Fresadora CNC para maquinagem das chapas.



Figura 35 – Fixação das chapas de aço no centro de maquinagem CNC

A maquinagem das chapas foi efetuada no centro de maquinagem e a ferramenta utilizada foi uma fresa de $\text{Ø}12$ mm, a trajetória dessa ferramenta foi realizada considerando algumas folgas no deslocamento para evitar possíveis colisões com os parafusos de fixação e também evitar o contato da ferramenta com o cordão de solda. Este cuidado deveu-se ao facto de se saber que a dureza do metal de base e do metal de adição serem diferentes, o que obrigaria a parâmetros de maquinagem diferentes para maximizar a vida útil da ferramenta de corte.

Antes de realizar a maquinagem, gerou-se uma simulação com o *software Mastercam 2019* que permitiu visualizar o estado final da peça, como mostra a Figura 36.

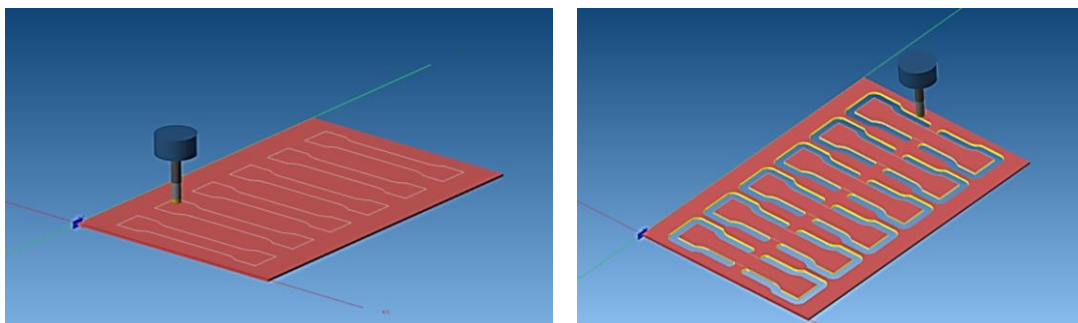


Figura 36 – Peça final simulada no *software Mastercam 2019*.

Com a simulação pronta, os parâmetros corretos de maquinagem foram seleccionados, baseado no material a ser maquinado e na ferramenta fresadora a ser utilizada. Desta forma, as três chapas foram maquinadas, como pode ser visto na Figura 37.



Figura 37 – Aspecto final das chapas após maquinagem.

Os provetes foram, com auxílio de a uma rebarbadora, destacados das chapas, o excesso de metal foi desbastado a ponto dos provetes possuírem a dimensão final de acordo com a norma. A norma EN ISO 4136:2012 exige que, para o provete estar apto ao ensaio de tração, este deve ter o seu reforço totalmente extraído e a sua espessura apresentar um valor constante

ao longo da peça. Sendo assim, todos os provetes foram obtidos nas dimensões normalizadas e prontos para serem submetidos ao ensaio de tração (Figura 38).



Figura 38 – Provetes destinados ao ensaio de tração.

Aproveitando parte do cordão de solda realizado para unir as duas metades da chapa, ainda foi possível retirar amostras para realizar uma inspeção macrográfica, ou seja, amostras que fornecessem informações acerca do perfil geométrico do cordão e possíveis defeitos.

Nas chapas de aço foram realizados três cordões de solda e a partir de cada cordão foram obtidos dois provetes, portanto o cordão de solda remanescente na região entre a dupla de provetes pôde ser aproveitado como amostra de macrografia, como mostra a Figura 39.

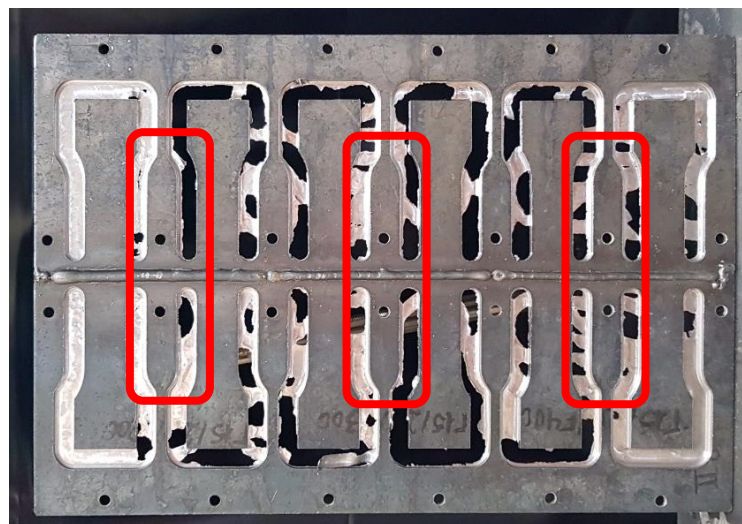


Figura 39 – Região de retirada das amostras de cordão de solda.

Da mesma forma que os provetes, as amostras foram retiradas por rebarbadoras. Sendo assim, foram obtidas nove amostras (Figura 40) que foram, posteriormente, cortadas e polidas para a inspeção macrográfica.



Figura 40 – Amostras de cordão de solda para macrografia.

4.1.5. TESTE DE TRAÇÃO TRANSVERSAL EM PROVETES DE SOLDADURA

Os testes de tração foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) do Instituto Politécnico de Bragança de acordo com a norma EN ISO 4136:2012 de ensaio de tração transversal para solda em materiais metálicos e a norma EN ISO 6892-1:2009 para configuração e realização de ensaios de tração em materiais metálicos à temperatura ambiente.

Para provetes de juntas soldadas, os testes de tração, segundo a norma, fornecem como resultado apenas o limite de resistência da junta e o local onde ocorre a fratura no provete. Portanto, não foram realizadas as marcações que indicam o comprimento inicial útil do provete afim de obter o percentual de alongamento após a ruptura. Antes de cada teste foram aferidas apenas as medidas de largura dos provetes para o cálculo de suas respectivas áreas de seção transversal que possibilitaram a obtenção da resistência à tração aplicada ao material.

A realização dos ensaios ocorreu através do uso da máquina universal de ensaios INSTRON 4485 (Figura 41) que realiza ensaios de tração e compressão, esta máquina tem capacidade de exercer até 200 [kN] de força. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 2,54 [mm/min].

Os 18 provetes foram ensaiados na máquina de tração até à sua ruptura. Na Figura 41 é possível visualizar o resultado de um dos ensaios onde a ruptura ocorreu fora do cordão de solda. Após cada ensaio, os dados foram registrados pelo sistema de aquisição da máquina e, posteriormente, exportados para o *Microsoft Excel* 2016 onde puderam ser tratados e, por fim, introduzidos no *software MATLAB* que gerou os gráficos Tensão [MPa] x Deformação [mm/mm] para cada ensaio.



Figura 41 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração.

4.1.6. ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS CORDÕES DE SOLDA

Amostras dos cordões de solda foram obtidas, como citado na seção 3.1.4.1, porém, tais amostras ainda não possibilitam a visualização do perfil do cordão de solda, para isso as mesmas devem ser submetidas a etapas de preparação para serem posteriormente estudadas.

Tais preparações foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM) onde é possível realizar todos os processos de preparação metalográfica e, posteriormente, observação das amostras preparadas.

O processo de preparação inicia-se a partir do corte das amostras de cordão de solda em amostras menores que possuem tamanho adequado para o processo de embutimento. Assim, a máquina de corte de mesa com disco abrasivo (Figura 42) possibilitou a realização dos cortes para retirar o excesso de metal e, também, realizar os cortes perpendiculares à solda de forma que cada amostra gerou duas pequenas amostras do mesmo cordão de solda (Figura 43). A vantagem de se utilizar esse equipamento é que o processo de corte é refrigerado por um jato de água e, assim, não ocorre a geração de calor que pode interferir na estrutura do material.



Figura 42 – Máquina de corte Struers Labotom.

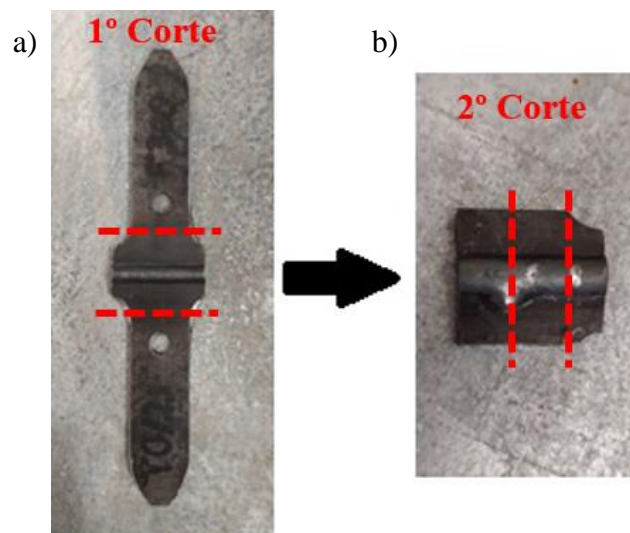


Figura 43 – Indicação dos cortes realizados nas amostras (a) 1º corte, (b) 2º corte.

Depois dos cortes executados, as amostras foram submetidas ao processo de embutimento. Neste procedimento, foram colocadas duas amostras do cordão de solda no pistão da máquina de embutimento (Figura 44) e recobertas por pó de resina de baquelite. Durante 10 [min] as amostras permaneceram a 180 [°C] sob uma força de 30 [kN], de seguida, procedeu-se ao arrefecimento com água corrente durante, aproximadamente, 5 [min].



Figura 44 – Máquina de embutimento Struers LaboPress-1.

O passo seguinte foi levar as amostras embutidas para serem submetidas ao processo de polimento com lixa, esse procedimento foi realizado por uma máquina rotativa (Figura 45) para efetuar o polimento das amostras. Para isso, foram utilizadas lixas de água de granulometria 180, 240, 320, 500, 600, 800, 1000 e 1200. O procedimento consiste em polir as amostras com lixas de menor para maior granulometria. Por fim, uma solução de suspensão de sílica coloidal para polimento fino permitiu obter uma superfície com muito baixa rugosidade, utilizando partículas com uma dimensão de 0,06 [μm] em solução aquosa.



Figura 45 – Máquina de polimento Struers LaboPol-25.

Após terminado o polimento, as superfícies das amostras foram lavadas em água corrente e, posteriormente, imersas em uma solução de Nital (HNO_3) 7% durante 30 [s]. Para remover o reagente químico, as amostras foram novamente lavadas e sua superfície foi seca por

meio de um equipamento gerador de corrente de ar quente. O especto final das amostras encontra-se na Figura 46.



Figura 46 – Amostras de cordão de solda embutidas.

4.1.6.1. Medição do perfil do cordão de solda

Depois da preparação das amostras, efetuou-se a medição dos parâmetros geométricos dos cordões de solda. Para o efeito, utilizou-se o macroscópio IRIS (Figura 47) que contém uma camara digital que permite a captação, com elevada resolução, da junta soldada ampliada até 50 vezes. Essas imagens são, posteriormente, tratadas com o *software NewTec IRIS*.



Figura 47 – Macroscópio *NewTec IRIS Nomade*.

Cada amostra foi posicionada de maneira a que fosse possível obter a imagem de um perfil de cada vez, visto que em cada amostra embutida contém duas amostras de cordão de solda. Assim, a aquisição das imagens feita pelo *software* IRIS foi exportada para o *software* ImageJ. Este segundo *software* é capaz de realizar a medição dos parâmetros geométricos da solda através da conversão do comprimento entre pixels da imagem em distância. Para isto, apenas é necessário informar o programa a escala da medição a partir de alguma medida conhecida na imagem, para o efeito foi utilizada uma régua calibrada.

Sendo assim, os parâmetros de reforço (R), penetração (P) e largura (L) puderam ser medidos, a Figura 48 mostra uma das imagens na qual foi realizada a medição.

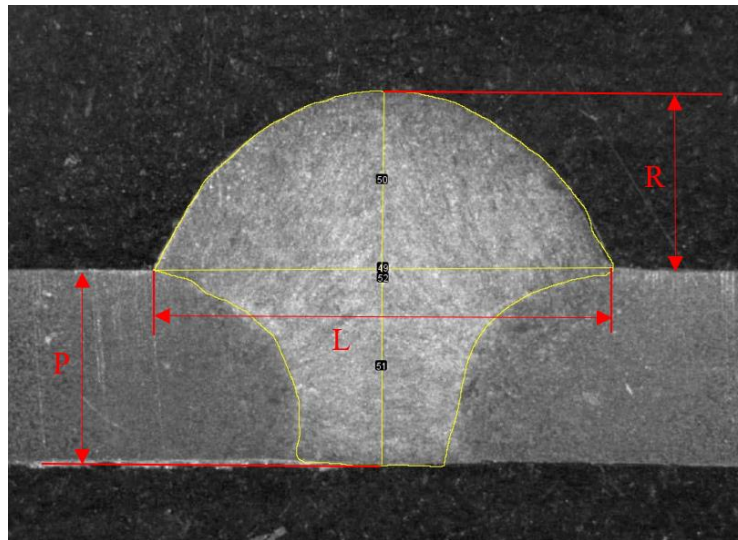


Figura 48 – Medições realizadas nas amostras de solda.

4.1.7. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados obtidos nos processos anteriormente citados foram tratados da maneira a serem usados pelo método de Taguchi. A matriz L_9 utiliza nove experimentos, porém, para aumentar o rigor estatístico do estudo, realizou-se o mesmo conjunto de experimentos mais de uma vez, portanto, foram realizados um total de 18 experimentos. Como o método sugere, para cada combinação experimental é calculada a sua respectiva razão sinal-ruído que leva em conta o objetivo pelo qual a otimização está sendo feita.

Para o reforço, esperava-se que a sua altura fosse a mínima possível de maneira que o mesmo estivesse no nível da superfície da chapa, portanto a expressão “menor melhor” foi aplicada a este caso. Os parâmetros de largura e penetração utilizaram a expressão “nominal

melhor” pois ambos possuem uma resposta alvo, ou seja, espera-se que ambos possuam 3 [mm] que é a mesma dimensão da espessura da chapa a ser soldada. Por fim, para o limite de resistência à tração o objetivo era obter o cordão de solda que possui maior resistência, logo, a expressão “maior melhor” é a mais adequada.

Como haviam nove combinações de três parâmetros em três níveis criados a partir da matriz L_9 , os parâmetros foram substituídos por letras de A a C, os níveis de 1 a 3 (Tabela 12) e, então, nove valores de sinal-ruído foram obtidos para cada combinação. Destes nove, foram calculados os valores médios de sinal-ruído associados a cada parâmetro em seus respectivos níveis. Tais cálculos de sinal-ruído médio foram realizados pelo *software Microsoft Excel 2016*, que, posteriormente, também realizou a plotagem destes valores. No gráfico, aquele que apresenta o maior valor de sinal-ruído também possui o melhor desempenho no processo, logo, estes formam a combinação ótima para atingir a característica estudada.

Tabela 12 – Matriz ortogonal adaptada para fins de cálculo.

Nº do Ensaio	Matriz Ortogonal L_9		
1	A1	B1	C1
2	A1	B2	C2
3	A1	B3	C3
4	A2	B1	C2
5	A2	B2	C3
6	A2	B3	C1
7	A3	B1	C3
8	A3	B2	C1
9	A3	B3	C2

Para verificar a influência dos parâmetros de entrada acima dos parâmetros de saída, empregou-se o modelo linear geral de análise de variância (ANOVA). Tal modelo foi executado através do *software Minitab 17* que realizou a ANOVA para cada parâmetro de resposta baseado na matriz de entrada composta pelos parâmetros de soldadura.

A partir dos resultados gerados por estes métodos citados, foi possível determinar a influência dos parâmetros no resultado final da solda e, também, estabelecer a combinação ótima destes parâmetros para se obter o melhor reforço, penetração, largura e limite de resistência.

4.2. ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO

Como foi dito no Capítulo 2, após realizadas as experiências de Taguchi, obtém-se uma combinação ótima de parâmetros que fornecem um procedimento de soldadura com menor interferência de ruído e, logo, com melhor desempenho. Contudo, a partir da solução da Equação 1, é possível indicar uma estimativa da razão sinal-ruído para a combinação ótima definida pelo método de Taguchi e esta estimativa pode ser comparada com os resultados dos ensaios realizados previamente. Uma boa ferramenta de comparação entre estes valores é por meio do cálculo do erro relativo (Equação (3)) expresso a seguir.

$$E_r = \frac{(x_i - x_v)}{x_v} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

E_r – Erro relativo

x_i – Valor encontrado

x_v – Valor de referência

Com a obtenção destas combinações ótimas, podem ocorrer dois cenários. No primeiro, pode ocorrer que a combinação ótima seja uma nova combinação que exigirá ter seu desempenho testado posteriormente ou, no segundo cenário, pode acontecer de a combinação ótima ser uma das combinações já existentes que foram geradas pelo método de Taguchi, desta maneira, não é necessário realizar um ensaio de confirmação pois a combinação ótima já foi testada.

Capítulo 5: Resultados e Discussões

Esta seção do trabalho tem como intuito apresentar os resultados obtidos através dos métodos e atividades desenvolvidos no Capítulo 3 e 4. Os resultados serão apresentados em forma de tabelas e gráficos explicativos que corroboram os fatos discutidos no decorrer da seção. Para melhor organização, este capítulo está separado de acordo com os parâmetros estudados: reforço, largura, penetração e limite de resistência à tração.

5.1. REFORÇO

Os valores das medições realizadas para o reforço do cordão de solda encontram-se na Tabela 13, onde foram apresentadas as duas medições classificadas como Amostra 1 e Amostra 2, respectivamente. Também foi introduzida a média entre as medições e a razão sinal-ruído para cada uma.

Tabela 13 – Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.

Nº do Ensaio	Amostra 1 [mm]	Amostra 2 [mm]	Média [mm]	S/N [dB]
1	2,394	2,383	2,389	-7,562528
2	2,753	2,764	2,759	-8,813477
3	1,707	1,714	1,711	-4,66248
4	2,905	2,903	2,904	-9,259933
5	2,168	2,605	2,387	-7,591482
6	2,057	1,991	2,024	-6,125365
7	2,791	2,376	2,584	-8,272095
8	2,202	2,229	2,216	-6,909596
9	2,247	2,093	2,170	-6,734659

Em relação ao reforço, espera-se que a maior razão sinal-ruído pertença ao ensaio no qual o reforço possui a altura mais próxima de zero, portanto, o ensaio número três foi o que apresentou maior razão sinal ruído e, como esperado, a menor média de altura de reforço dentre os outros ensaios, mais precisamente 1,711 [mm].

A partir dos valores de razão sinal-ruído foram calculadas as médias do sinal-ruído para parâmetro de entrada e níveis atribuídos. Os resultados estão apresentados na Tabela 14 e podem ser melhor visualizados pelo gráfico da Figura 49.

Tabela 14 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço.

Fator	S/N Média [dB]
A1	-7,012828
A2	-7,658927
A3	-7,30545
B1	-8,364852
B2	-7,771519
B3	-5,840835
C1	-6,86583
C2	-8,269356
C3	-6,842019

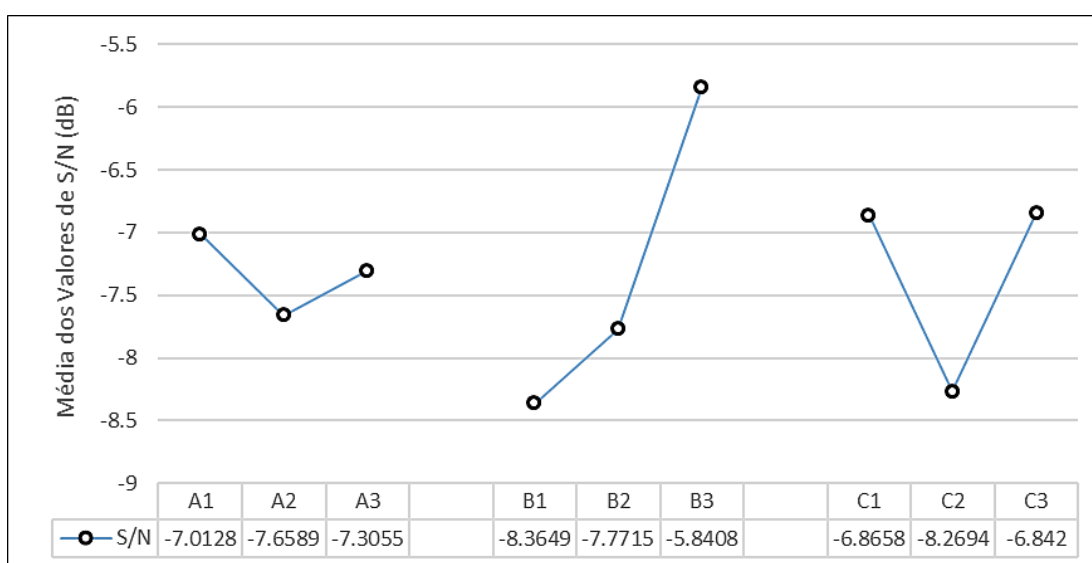


Figura 49 – Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço.

As razões sinal-ruído com valores mais elevados representam os parâmetros e os níveis com melhor desempenho, ou seja, a seleção dos maiores valores de S/N do gráfico fornecerá a situação ótima ou combinação ótima. Para o caso do reforço, a combinação ótima é A1B3C3. Isso corresponde, em termos de soldadura, que o menor reforço pode ser obtido se a soldadura for realizada com tensão de 22,4 [V], velocidade de 400 [mm/min] e ângulo de 30 [°].

O resultado da otimização foi satisfatório pois a combinação que o método determinou como sendo ótima para o reforço da soldadura, coincidiu com uma das combinações que foram previamente determinadas pelo próprio método, portanto, não é necessário realizar um experimento de confirmação relativamente ao reforço de soldadura pois a combinação ótima está contida na matriz L_9 definida para a realização dos ensaios experimentais.

De acordo com os cálculos, a razão sinal-ruído para a combinação ótima é de -4,66 [dB] e a estimativa teórica da razão sinal-ruído é -5,04 [dB]. Sendo assim, o valor de erro relativo ao comparar o valor da razão sinal-ruído de teste com a estimativa teórica foi de 7,56 [%].

Na Tabela 15, é possível verificar a influência da tensão [V], da velocidade de soldadura [mm/min] e ângulo de ataque da tocha [°] obtida pela análise de variância para o reforço.

Tabela 15 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
A	2	0,038	0,0189	0,71	0,584	3,45
B	2	0,697	0,3485	13,13	0,071	63,54
C	2	0,309	0,1545	5,82	0,147	28,17
Erro	2	0,053	0,0265			4,84
Total	8	1,097				100,00

De acordo com a tabela ANOVA, o parâmetro de entrada que mais influenciou na dimensão do reforço do cordão de solda foi a velocidade de soldadura [mm/min] contribuindo com 63,54 [%], seguido pelo ângulo da tocha [°] com 28,17 [%] e da tensão [V] com 3,45 [%].

5.2. LARGURA

Os valores das medições realizadas para a largura do cordão de solda encontram-se na Tabela 16, onde foram apresentadas as duas medições classificadas como Amostra 1 e Amostra 2, respetivamente. Também foi introduzida a média entre as medições e a razão sinal-ruído para cada uma.

Tabela 16 – Medições, média e razão sinal-ruído para a largura.

Nº do Ensaio	Amostra 1 [mm]	Amostra 2 [mm]	Média [mm]	S/N [dB]
1	6,291	6,188	6,240	25,76386
2	5,741	5,717	5,729	38,41638
3	4,358	4,209	4,284	22,55687
4	7,501	7,398	7,450	25,76386
5	5,323	5,198	5,261	24,0824
6	5,093	5,234	5,164	23,03622
7	7,205	6,939	7,072	17,52297
8	6,200	6,148	6,174	31,70053
9	5,415	6,445	5,930	5,763855

Comparando os resultados das razões sinal-ruído para a largura, é possível observar que o ensaio que gerou maior valor de razão sinal-ruído foi o ensaio de número 2, porém, a resposta

alvo para este estudo era de que a largura atingisse um valor próximo ou igual a 3 [mm]. O ensaio que forneceu a resposta mais próxima do objetivo foi o ensaio de número 3, no entanto, o seu valor de razão sinal-ruído não foi o melhor e isso se deve ao fato da variação existente entre o resultado da aferição da Amostra 1 e da Amostra 2. O ensaio número 2 apresentou maior sinal-ruído pois apresentou diferença de 0,024 [mm] entre as aferições, enquanto, o ensaio número 3 apresentou diferença de 0,149 [mm].

A partir dos valores de razão sinal-ruído foram calculadas as médias do sinal-ruído para parâmetro de entrada e níveis atribuídos. Os resultados estão apresentados na Tabela 17 e podem ser melhor visualizados pelo gráfico da Figura 50.

Tabela 17 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.

Fator	S/N Médio
A1	28,912
A2	24,294
A3	18,329
B1	23,017
B2	31,400
B3	17,119
C1	26,834
C2	23,315
C3	21,387

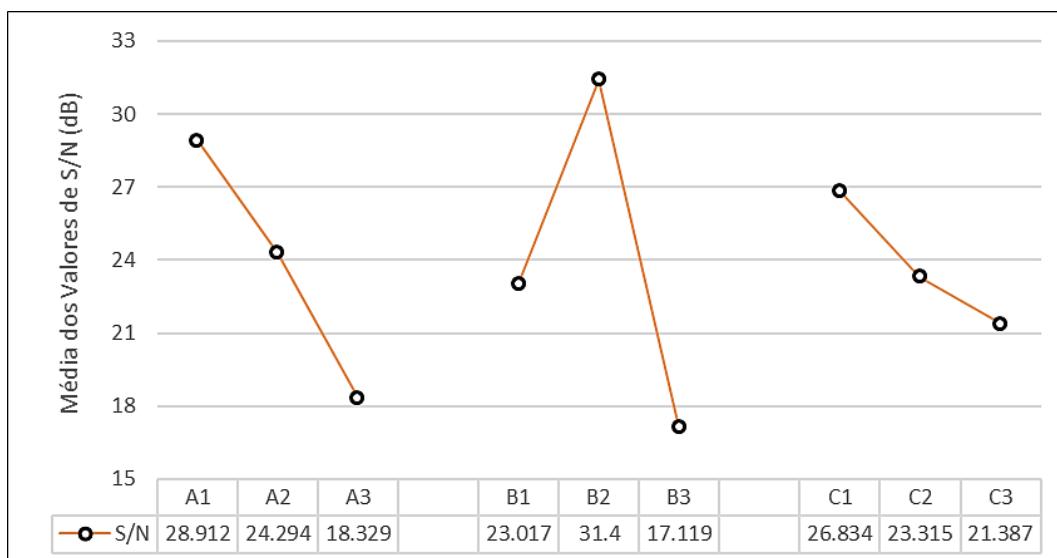


Figura 50 – Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura.

As razões sinal-ruído com valores mais elevados representam os parâmetros e os níveis com melhor desempenho, ou seja, a seleção dos maiores valores de S/N do gráfico fornecerá a

situação ótima ou combinação ótima. Para o caso da largura, a combinação ótima é A1B2C1. Isso corresponde, em termos de soldadura, que a largura que mais se aproxima, ou que atinge a dimensão de 3 [mm], pode ser obtida se a soldadura for realizada com tensão de 22,4 [V], velocidade de 300 [mm/min] e ângulo de 0 [°].

A largura foi um dos casos onde a combinação ótima é uma combinação nova não testada anteriormente, portanto, é necessário realizar de um experimento de confirmação para que seja confirmado o desempenho desta combinação. Novas amostras de cordão de solda foram submetidas ao processo de preparação metalográfica no Laboratório de Materiais e Construção Mecânica utilizando a nova combinação ótima, estas seguiram a mesma metodologia utilizada nos ensaios anteriores. Os resultados da análise macrográfica para o parâmetro de largura estão listados na Tabela 18.

Tabela 18 – Razão sinal-ruído para a combinação ótima para largura do cordão de solda.

Largura	Amostra 1 [mm]	Amostra 2 [mm]	Média [mm]	S/N Ótimo [dB]
	5,551	5,53	5,5405	39,57621402

A estimativa teórica da razão sinal-ruído é de 39,45 [dB] enquanto a razão sinal-ruído da combinação ótima do teste de confirmação é de 39,57 [dB], o que retorna um valor de erro relativo de 0,31 [%].

Na Tabela 19 é possível verificar a influência da tensão [V], da velocidade de soldadura [mm/min] e ângulo de ataque da tocha [°] obtida pela análise de variância para a largura.

Tabela 19 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
A	2	1,431	0,7153	24,93	0,039	18,94
B	2	5,013	2,5067	87,35	0,011	66,36
C	2	1,054	0,5268	18,36	0,052	13,94
Erro	2	0,057	0,0287			0,76
Total	8	7,555				100,00

De acordo com a tabela ANOVA, o parâmetro de entrada que mais influenciou na dimensão da largura do cordão de solda foi a velocidade de soldadura [mm/min] contribuindo com 66,36 [%], seguido pela tensão [V] com 18,94 [%] e o ângulo da tocha [°] com 13,94 [%].

5.3. PENETRAÇÃO

Os valores das medições realizadas para a penetração do cordão de solda encontram-se na Tabela 20, onde foram apresentadas as duas medições classificadas como Amostra 1 e Amostra 2, respetivamente, também foram introduzidas a média entre as medições e a razão sinal-ruído para cada uma.

Tabela 20 – Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.

Nº do Ensaio	Amostra 1 [mm]	Amostra 2 [mm]	Média [mm]	S/N [dB]
1	1,981	1,775	1,878	19,74326
2	1,839	1,540	1,690	16,50718
3	1,531	1,328	1,430	19,87068
4	3,024	3,000	3,012	38,41638
5	1,476	1,032	1,254	13,07294
6	1,444	1,438	1,441	50,45757
7	3,074	2,951	3,013	24,2225
8	1,981	1,910	1,946	28,99543
9	1,668	1,634	1,651	35,39102

Para os resultados de penetração, deparou-se com a mesma situação dos resultados para a largura. Neste caso, o ensaio que apresentou maior razão sinal-ruído foi o ensaio número 6, mas o ensaio que mais se aproximou da resposta alvo de 3 [mm] foi o ensaio número 4. Comparando as variações das amostras é possível justificar a discrepância entre as razões sinal-ruído, o ensaio 6 apresentou uma diferença entre amostras de 0,006 [mm], já o ensaio 4 apontou uma diferença de 0,024 [mm].

A partir dos valores de razão sinal-ruído foram calculadas as médias do sinal-ruído para parâmetro de entrada e níveis atribuídos. Os resultados estão apresentados na Tabela 21 e podem ser melhor visualizados pelo gráfico da Figura 51.

Tabela 21 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a penetração.

Fator	S/N Médio
A1	18,707
A2	33,982
A3	29,536
B1	27,461
B2	19,525
B3	35,240
C1	33,065
C2	30,105
C3	19,055

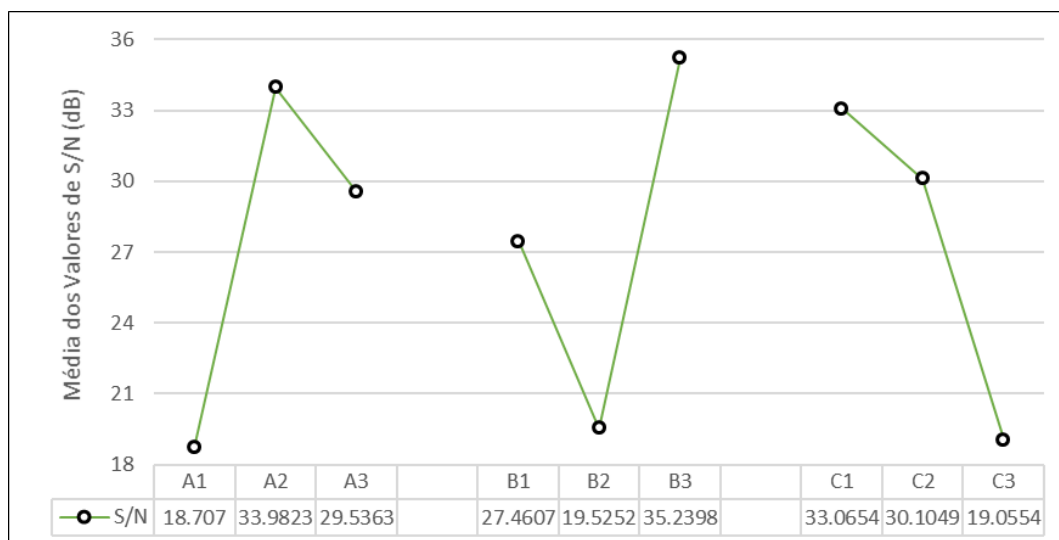


Figura 51 – Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.

As razões sinal-ruído com valores mais elevados representam os parâmetros e os níveis com melhor desempenho, ou seja, a seleção dos maiores valores de S/N do gráfico fornecerá a situação ótima ou combinação ótima. Para o caso da penetração, a combinação ótima é A2B3C1. Isso corresponde, em termos de soldadura, que a penetração que mais se aproxima, ou que atinge a dimensão de 3 [mm], pode ser obtida se a soldadura for realizada com tensão de 23,3 [V], velocidade de 400 [mm/min] e ângulo de 0 [°].

A penetração foi mais um caso onde a combinação ótima já havia sido testada, portanto o valor da razão sinal-ruído ótima foi de 50,46 [dB] e o valor da razão sinal-ruído teórica foi de 47,47 [dB], isso fornece um valor de erro relativo de 6,29 [%].

Na Tabela 22 é possível verificar a influência da tensão [V], da velocidade de soldadura [mm/min] e ângulo de ataque da tocha [°] obtida pela análise de variância para a penetração

Tabela 22 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
A	2	0,435	0,2176	0,87	0,534	12,70
B	2	2,294	1,1471	4,61	0,178	66,94
C	2	0,200	0,1001	0,4	0,713	5,84
Erro	2	0,498	0,2490			14,53
Total	8	3,427				100,00

De acordo com a tabela ANOVA, o parâmetro de entrada que mais influenciou na dimensão da penetração do cordão de solda foi a velocidade de soldadura [mm/min] contribuindo com 66,94 [%], seguido pela tensão [V] com 12,7 [%] e o ângulo da tocha [°] com 5,84 [%].

5.4. LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Da mesma forma como foram tratadas as medições da geometria do perfil de cordão de solda, os ensaios de tração foram realizados duas vezes para cada combinação de parâmetros e isso possibilitou o cálculo de um valor médio entre os dois ensaios. A Figura 52 apresenta os gráficos de Tensão [MPa] x Deformação [mm/mm] que relaciona os ensaios do primeiro conjunto (curva contínua) com os seus respectivos ensaios do segundo conjunto (curva a traço interrompido).

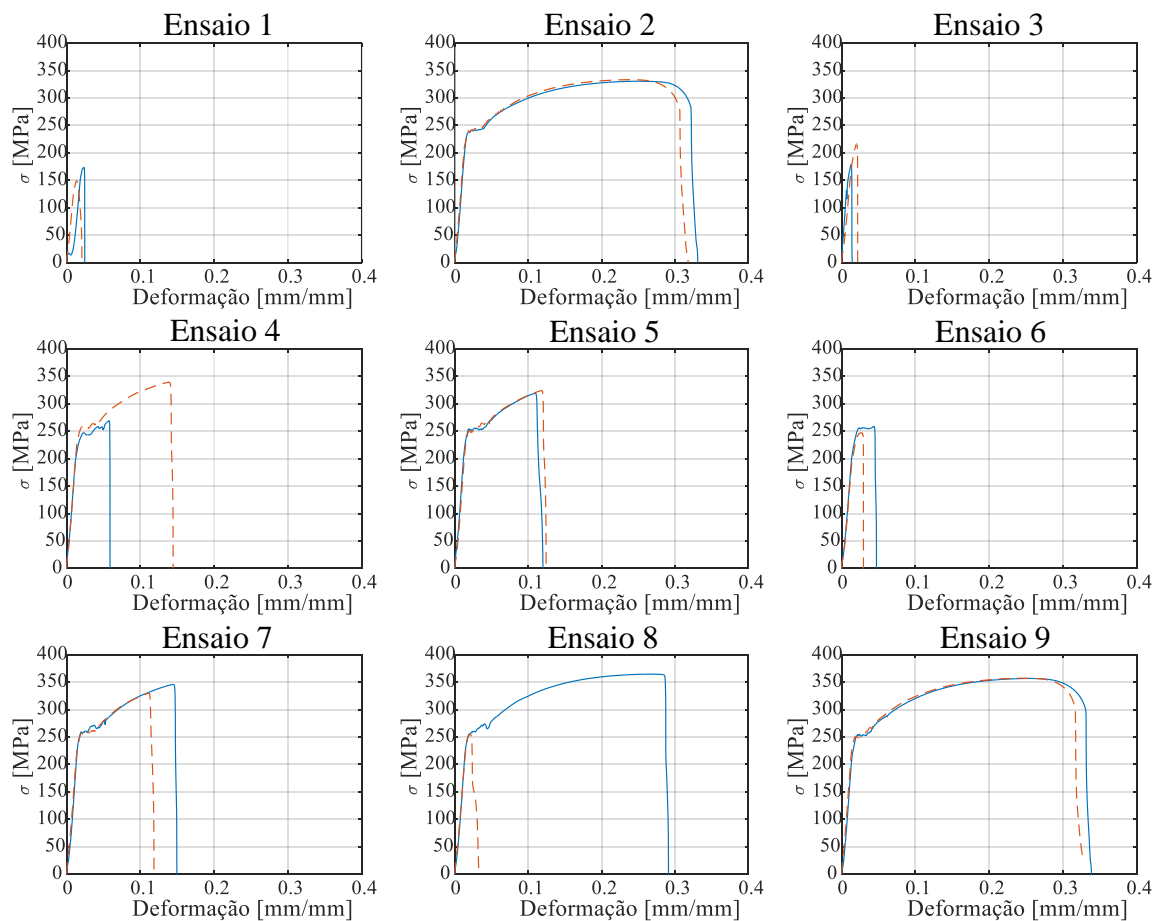


Figura 52 – Gráficos de ensaios de tração relacionando os dois grupos de teste.

A maioria dos ensaios apresentaram curvas com comportamentos semelhantes, porém, dois pares de amostras depois de testadas tiveram curvas de resultados diferentes. Uma justificativa para que essas diferenças tenham ocorrido poderá ser devido à presença de algum defeito de soldadura, podendo ter ocorrido alguma inclusão ou falta de fusão no material de base ou presença de poros. Também poderá ser o fato de existir um ligeiro desalinhamento entre as chapas de aço provocado pela distorção do metal proveniente da transferência de calor

excessivo do processo de soldadura. Tanto os defeitos de soldadura quanto o desalinhamento das chapas, geram os chamados pontos concentradores de tensão que, para o ensaio de tração, são de extrema influência pois estes concentradores fragilizam e determinam a região que sofrerá a ruptura.

Destes ensaios foram obtidos os valores máximos de tensão, estes valores representam a tensão transversal máxima que a junta soldada suportou. Sendo assim, tais valores foram apresentados na Tabela 23, onde também foram introduzidos a média e a razão sinal-ruído para os limites de resistência à tração transversal da solda.

Tabela 23 – Medições, média e razão sinal-ruído para o limite de resistência à tração transversal.

Nº do Ensaio	Amostra 1 [MPa]	Amostra 2 [MPa]	Média [MPa]	S/N [dB]
1	364,7	255,1	309,8	49,4133
2	319,0	324,0	321,5	50,1431
3	173,6	149,8	161,7	44,1052
4	356,5	357,0	356,7	51,0469
5	178,7	216,4	197,5	45,7939
6	258,7	247,0	252,8	48,0491
7	330,5	333,4	332,0	50,4218
8	345,5	329,7	337,6	50,5608
9	269,1	339,3	304,2	49,4895

Com relação ao limite de resistência à tração transversal, espera-se que a maior razão sinal-ruído pertença ao ensaio no qual o limite de resistência possui a maior magnitude, portanto, o ensaio número quatro foi o que apresentou maior razão sinal ruído e, como esperado, corresponde ao maior valor de limite de resistência à tração transversal média, mais precisamente 356,7 [MPa].

A partir dos valores de razão sinal-ruído foram calculadas as médias do sinal-ruído para parâmetro de entrada e níveis atribuídos. Os resultados estão apresentados na Tabela 24 e podem ser melhor visualizados pelo gráfico da Figura 53.

As razões sinal-ruído com valores mais elevados representam os parâmetros e os níveis com melhor desempenho, ou seja, a seleção dos maiores valores de S/N do gráfico fornecerá a situação ótima ou combinação ótima. Para o caso do limite de resistência à tração transversal, a combinação ótima é A3B1C2. Isso corresponde, em termos de soldadura, que o maior limite de resistência à tração transversal, pode ser obtido se a soldadura for realizada com tensão de 24,1 [V], velocidade de 200 [mm/min] e ângulo de 15 [°]. Para este caso, a combinação ótima não se encontra entre as combinações testadas, como tal, será necessário realizar um ensaio de

confirmação para verificar o seu desempenho. Foram utilizadas duas amostras sendo estas dois provetes usinados no Laboratório de Tecnologia Mecânica que seguiram a mesma metodologia dos provetes anteriormente testados.

Tabela 24 – Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o limite de resistência à tração transversal.

Fator	S/N Médio
A1	47,887
A2	48,297
A3	50,157
B1	50,294
B2	48,833
B3	47,215
C1	49,341
C2	50,226
C3	46,774

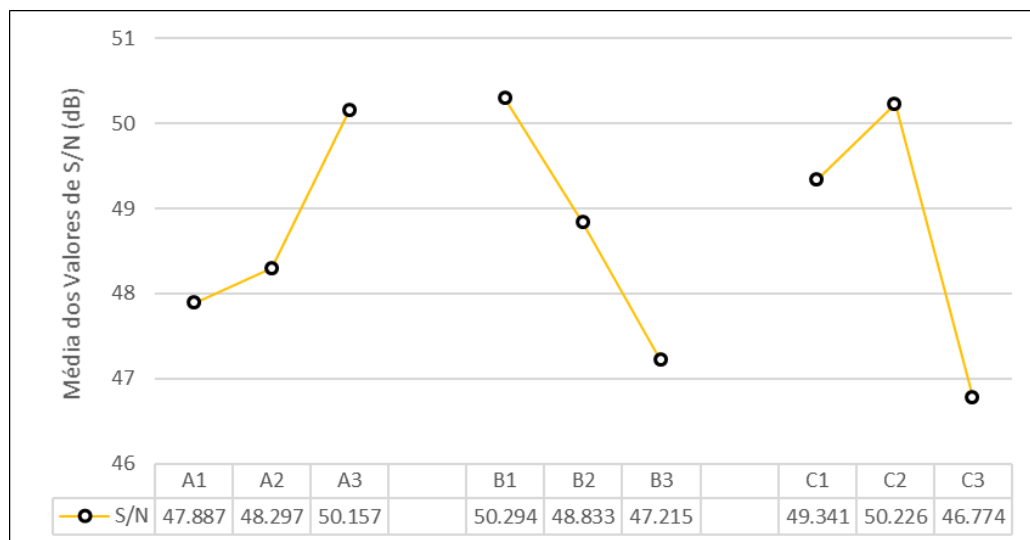


Figura 53 – Curva S/N médio de cada parâmetro para o limite de resistência à tração transversal.

Estes novos provetes foram testados e um deles apresentou comportamento ideal ao ser submetido ao ensaio de tração, porém, o outro provete sofreu uma fratura frágil na região da soldadura durante o ensaio, como mostra a Figura 54. O fato da ocorrência da fratura precoce deveu-se à presença de defeitos na soldadura, dentre eles a presença de poros e a falta de fusão do processo. Estes defeitos influenciaram na ruptura do provete, tendo-se verificado o rompimento de um do lado do provete que continha esses defeitos, enquanto o restante da área

de ensaio ainda se manteve resistente ao esforço de tração. Os resultados do ensaio de confirmação encontram-se na Tabela 25 e gráfico comparativo entre as amostras na Figura 55.



Figura 54 – Defeitos de soldadura no provete do ensaio de confirmação.

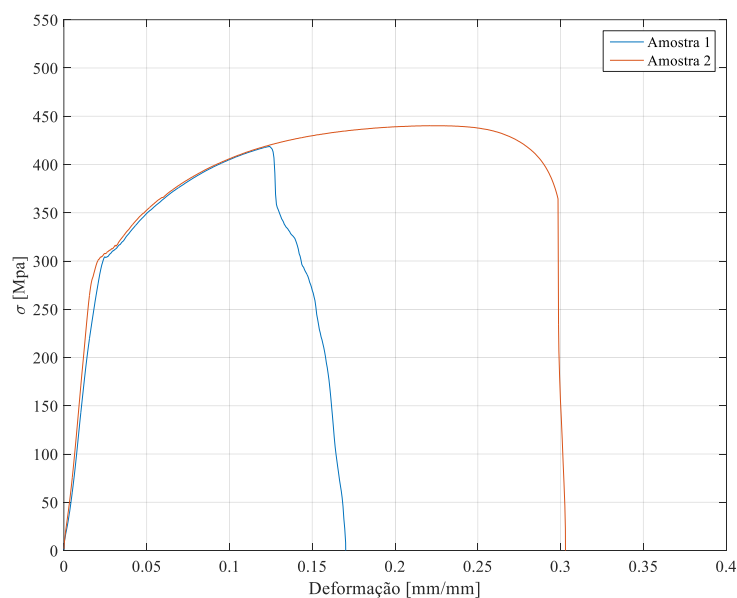


Figura 55 – Gráfico comparativo entre amostras do ensaio de tração de confirmação.

Tabela 25 – Razão sinal-ruído para a combinação ótima de limite de resistência.

Limite de Resistência	Amostra 1 [MPa]	Amostra 2 [MPa]	Média [MPa]	S/N Ótimo [dB]
	418,7	440,3	429,5	52,6507

Apesar do comportamento não ideal da Amostra 1, a mesma demonstrou elevado limite de resistência à ruptura quando comparada aos ensaios realizados anteriormente e, através da interpretação visual, o gráfico desta se equipara ao da Amostra 2 e a sua tendência seria obter

valores semelhantes caso não ocorresse a ruptura precoce devido aos defeitos de soldadura anteriormente referidos.

O valor obtido da razão sinal-ruído para o ensaio de confirmação foi de 52,65 [dB], enquanto a estimativa teórica retornou um valor de 53,11 [dB], ao compará-los, é obtido um valor de erro relativo de 0,88 [%].

Na Tabela 26 é possível verificar a influência da tensão [V], da velocidade de soldadura [mm/min] e ângulo de ataque da tocha [°] obtida pela análise de variância para a penetração

Tabela 26 – Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no limite de resistência à tração transversal.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
A	2	6740	3369,8	4,50	0,182	18,57
B	2	13044	6521,8	8,70	0,103	35,93
C	2	15027	7513,3	10,03	0,091	41,39
Erro	2	1499	749,3			4,13
Total	8	36308				100,00

De acordo com a tabela ANOVA, o parâmetro de entrada que mais influenciou no limite de resistência à tração transversal do cordão de solda foi o ângulo da tocha [°] contribuindo com 41,39 [%], seguido pela velocidade de soldadura [mm/min] com 35,93 [%] e tensão [V] com 18,56 [%].

Capítulo 6: Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a criação de um mecanismo capaz de fornecer ao aparato experimental utilizado mais um grau de liberdade no que se diz respeito à movimentação da tocha de soldadura e a seleção da sua posição angular. Outro principal objetivo foi a otimização dos parâmetros de soldadura MIG/MAG e verificar quais são os mais influentes nas propriedades mecânicas, na resistência à tração transversal, e nas propriedades geométricas (reforço, largura e penetração) do cordão de solda.

A finalidade do projeto foi a adição de dois graus de liberdade à tocha. A solução proposta baseia-se no desenvolvimento de um mecanismo com um par de engrenagens sem-fim acoplado a um motor elétrico controlado por computador. Fez-se um estudo preliminar ou anteprojeto e o dimensionamento com o auxílio de *software* de CAD. Nesse estudo foi possível desenhar todos os elementos do mecanismo até sua montagem, foi, também, possível avaliar toda a cinemática de movimento do mecanismo projetado. Contudo, não foi possível fabricar o mecanismo devido à impossibilidade de obter os materiais necessários em tempo útil para conclusão deste trabalho, impedindo que se fizesse a verificação e validação do funcionamento do mecanismo.

Para a otimização, foi aplicado o método de Taguchi para realizar o planejamento dos experimentos, bem como, a otimização dos parâmetros através do cálculo das razões sinal-ruído e, a influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de resposta, foram obtidas pelo uso da Análise de Variância ou ANOVA.

O Método Taguchi provou ser uma boa ferramenta quando é necessário realizar uma otimização de parâmetros para diferentes objetivos. Com o adequado planejamento experimental é possível determinar a combinação ótima de parâmetros e respectivos níveis, com um número relativamente baixo de ensaios experimentais, poupando tempo e custos de material.

A Análise de Variância possibilitou determinar a influência dos parâmetros de soldadura na resistência à tração das juntas soldadas, bem como, na qualidade na geometria dos cordões de soldadura. Apesar da baixa amostragem utilizada neste trabalho, os métodos se mostraram relevantes e seus resultados bem condizentes.

A combinação ótima que proporcionou a minimização da altura do reforço [mm] foi a um nível de tensão de 22,4 [V], velocidade de soldadura de 400 [mm/min] e ângulo da tocha de 30 [°], combinação esta que gerou uma razão sinal-ruído de -4,66 [dB]. Não foi necessária a realização de experimentos de confirmação, porém, para fins de comparação, sua razão sinal-ruído ótima teórica estimada foi de -5,04 [dB] e o erro relativo entre elas foi de 7,57 [%]. A Análise de Variância mostrou que o parâmetro de soldadura mais influente para o reforço foi a velocidade de soldadura contribuindo 63,54 [%], seguida pelo ângulo da tocha com 28,17 [%] e a tensão com 3,45 [%].

Para a largura do cordão, a combinação ótima que forneceu o melhor desempenho foi a tensão de 22,4 [V], velocidade de soldadura de 300 [mm/min] e ângulo da tocha de 0 [°], o valor da razão sinal-ruído para a combinação ótima foi de 39,57 [dB], fato que tornou necessária a execução de ensaios de confirmação, enquanto a razão sinal-ruído ótima teórica foi de 39,45 [dB], gerando um erro relativo de 0,31 [%]. A tabela ANOVA determinou que o parâmetro mais influente sobre a largura foi a velocidade de soldadura com 66,36 [%] de contribuição, seguida pela tensão com 18,94 [%] e o ângulo da tocha com 13,94 [%].

A penetração do cordão de soldadura foi otimizada a partir da aplicação da combinação que equivale a tensão de 23,3 [V], velocidade de soldadura de 400 [mm/min] e ângulo da tocha de 0 [°], esta combinação ótima desempenhou um valor de razão sinal-ruído de 50,45 [dB] e a estimativa de razão sinal-ruído ótima teórica de 47,47 [dB], cujo erro relativo resultou em 6,29 [%]. Pela Análise de Variância foi concluído que o parâmetro mais influente sobre a penetração foi a velocidade de soldadura com 66,94 [%], seguida pela tensão com 12,7 [%] e o ângulo da tocha com 5,84 [%].

A combinação ótima que maximizou o limite de resistência à tração transversal do cordão de solda foi composta pelo nível de tensão de 24,1 [V], velocidade de soldadura de 200 [mm/min] e ângulo de tocha de 15 [°]. Foi necessário realizar um ensaio de confirmação para esta combinação e com a qual se obteve um valor de limite de resistência média de, aproximadamente, 430 MPa. O que em termos de razão sinal-ruído corresponde a um valor de 52,65 [dB] e uma estimativa de razão sinal-ruído ótima teórica de 53,12 [dB] cujo erro relativo entre elas foi de 0,88 [%]. De acordo com a ANOVA o parâmetro mais influente para o limite de resistência à tração transversal foi o ângulo da tocha com 41,39 [%] de contribuição, seguido pela velocidade de soldadura com 35,93 [%] e a tensão com 18,57 [%].

6.2. TRABALHOS FUTUROS

O trabalho aborda a utilização de um equipamento experimental que permite a execução de processos de soldadura, como sugestão, esse equipamento permite a inserção de atualizações acerca dos seus graus de liberdade. Uma destas atualizações seria o projeto proposto neste trabalho, apesar de não ter sido concluído, este fica disponível para que no futuro seja implementado. Além disso, é sugerida uma calibração mais aprofundada sobre os componentes que realizam os movimentos da máquina para que não haja perdas de deslocamento. Outro mecanismo que se mostrou imprescindível para a realização das soldas seria a criação de um gabarito capaz de reter todos os graus de liberdade das chapas a serem soldadas, pois estas quando estão solicitadas as altas temperaturas do processo, tendem a gerar distorções.

Para os processos de soldadura, seria possível adaptar a máquina para receber novos processos de soldadura, por exemplo a soldadura TIG. Além disso, testar o procedimento de soldadura em outras posições, por exemplo, posição plana e suas variações puxando ou empurrando, soldadura horizontal, soldadura vertical ascendente e descendente ou até a soldadura multipasses. Modificar, também, os tipos de juntas, neste caso trocar as juntas topo-a-topo por juntas T por exemplo ou, até mesmo, trocar a soldadura de juntas pelo estudo em soldas de revestimento sobre chapas e variar a espessura das chapas utilizadas.

É possível também alterar os materiais aplicados no estudo, neste trabalho foi utilizado o aço, porém, atualmente estão sendo realizados diversos estudos com ligas de alumínio. Portanto, seria viável a alteração dos metais de base e de adição, além do fato de ser possível estudar novas propriedades do material através de análises micrográficas e de ensaios que não foram realizados neste trabalho como a medição da micro-dureza, por exemplo.

O método de otimização de Taguchi mostrou um bom desempenho, porém, é sugerido que nos próximos trabalhos possam ser aplicados métodos diferentes para serem realizados em conjunto, como é o caso do método Grey-Taguchi que permite fazer a correlação múltipla entre as variáveis. Além disso, para aumentar a acuidade dos resultados obtidos, sugere-se um aumento na amostragem utilizada nos ensaios, pois duas amostras se mostraram aceitáveis para um estudo preliminar, contudo, para se alcançar uma adequada validade estatística sugere-se a utilização, mínima, de três amostras.

Referências

- [1] “Soldagem Robotizada na Industria Automobilística”, *Roboterin*, 2018. [Online]. Available at: <http://roboerin.com.br/soldagem-robotizada-na-industria-automobilistica/>. [Acessado: 25-out-2019].
- [2] M. F. Spotts e T. E. Shoup, *Design of Machine Elements*, 7 Ed. Prentice Hall Internacional Editions, 1998.
- [3] R. G. Budynas e J. K. Nisbett, *Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica*, 8 Ed. New York: Bookman, 2011.
- [4] R. L. Norton, *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada*, 4 Ed. Massachusetts: Bookman, 2013.
- [5] A. M. G. Completo e F. J. M. Q. Melo, *Introdução ao Projeto Mecânico*, 2ª Ed. Porto: Booki, 2019.
- [6] “O que é anteprojeto?”, 2014. [Online]. Available at: https://www.mapadaobra.com.br/negocios/o-que-e-anteprojeto/?doing_wp_cron=1572275339.0702610015869140625000. [Acessado: 28-out-2019].
- [7] J. C. de S. Francisco, “Aula 1 - Tipos de Transmissão”. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, p. 25, 2017.
- [8] J. C. de S. Francisco, “Aula 2 - Transmissão por Correias”. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, p. 28, 2017.
- [9] J. C. de S. Francisco, “Aula 3 - Transmissão por Correntes”. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, p. 10, 2017.
- [10] S. Kalpakjian e S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 5 ed. New Jersey, 2014.
- [11] P. V. Marques, P. J. Modenesi, e A. Q. Bracarense, *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, 3 ed. Editora UFMG, 2011.
- [12] “American Welding Society”, *LIA Today*. 2004.

- [13] I. S. Kim, J. S. Son, e P. K. D. V. Yarlagadda, “A study on the quality improvement of robotic GMA welding process”, in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2003, vol. 19, n° 6, p. 567–572.
- [14] J. E. Pinto-Lopera, J. M. S. T. Motta, e S. C. A. Alfaro, “Real-time measurement of width and height of weld beads in GMAW processes”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, n° 9, set. 2016.
- [15] J. Carlos Dutra, “MIG/MAG-Transferência Metálica por Curto-Circuito-Fontes de Soldagem versus Gases do Arco (GMAW-Short Circuit Metal Transfer-Welding Power Sources versus Gases of the Arc)”.
- [16] H. C. Miranda e V. A. Ferraresi, “Proposta de Controle Automático da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG”, *Anais do III Seminário do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, 1999.
- [17] J. F. O. Santos e L. Quintino, *Processos de Soldadura*. Instituto de Soldadura e Qualidade, 1998.
- [18] G. Simonato, “Otimização de soldagem robotizada em ligas de alumínio com modo de transferência Pulsado e CMT + P através do método Taguchi”, Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- [19] E. Wainer, S. D. Brandi, e F. D. H. Mello, *Soldagem: Processos e Metalurgia*, 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 1992.
- [20] A. E. Izeda, A. Pascoal, G. Simonato, N. Mineiro, J. Gonçalves, e J. E. Ribeiro, “Optimization of Robotized Welding in Aluminum Alloys with Pulsed Transfer Mode Using the Taguchi Method”, *Proceedings*, vol. 2, n° 8, p. 426, jun. 2018.
- [21] A. – A. do Brasil, *Manual de Soldagem*. São Paulo, 1993.
- [22] H. Biloni, T. Pérez, M. Saggese, M. S.-A. A. Argentino, B. Aires, e U. 1981, “Manual de Soldadura de Alumínio”, Buenos Aires, Argentina, 1981.
- [23] J. B. C. Corrêa, “Modelação Numérica de Processos de Soldadura MIG em Ligas de Alumínio Al 6082-T6”, Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [24] P. J. Modenesi e A. Q. Bracarense, “Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais”. Belo Horizonte, p. 172, 2012.
- [25] S. B. Jones, “An Approach to Procedure Selection in Arc Welding”, *Welding Journal*, p.

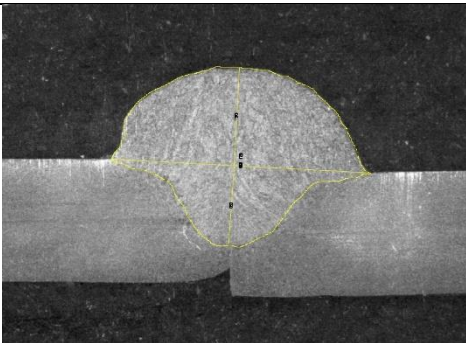
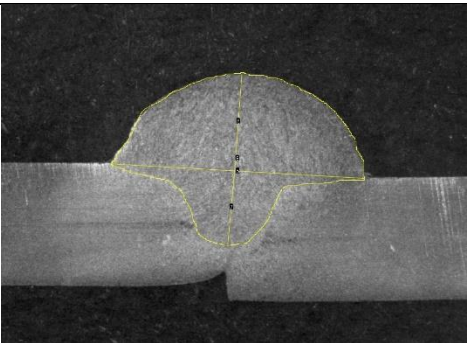
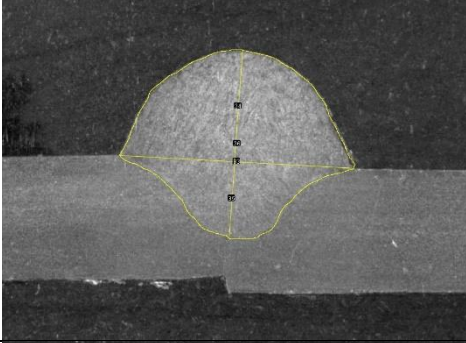
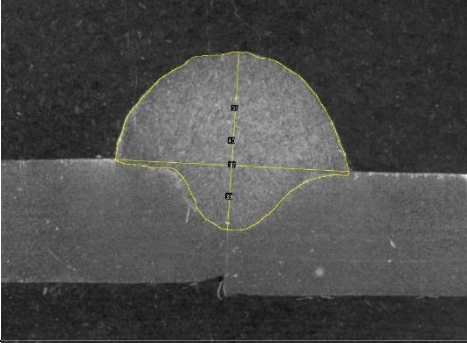
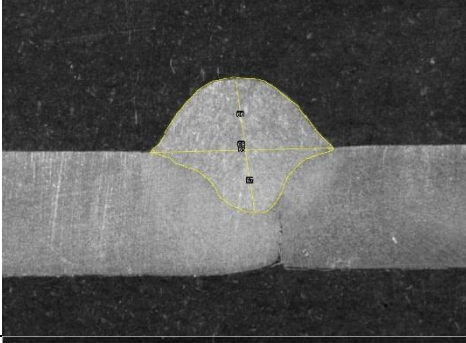
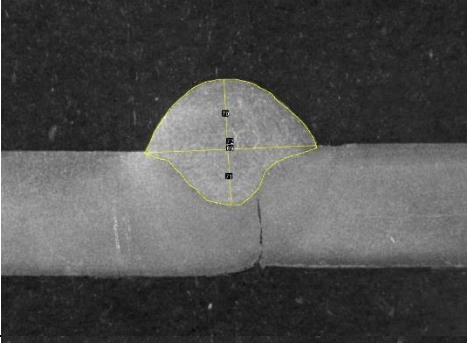
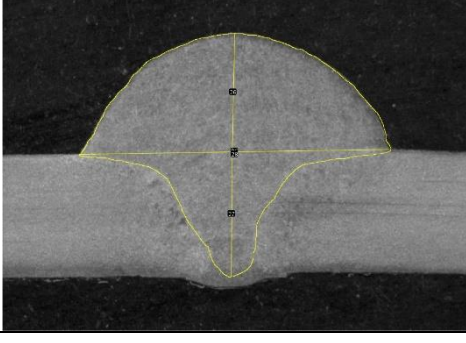
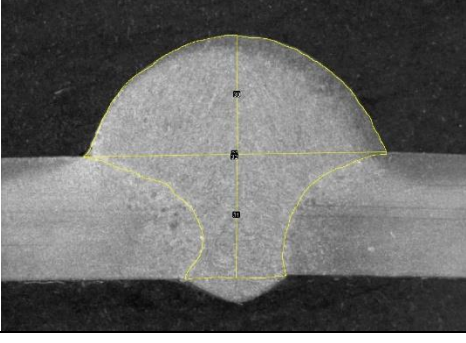
- 19–31, 1977.
- [26] ESAB, C. Fortes, e C. T. Vaz, “Soldagem MIG / MAG”, *Soldagem MIG/MAG*, p. 135, 2005.
- [27] S. V. Sapakal e M. T. Telsang, “Parametric Optimization of MIG Welding using Taguchi Design Method”, *Internation Journal of Advanced Engeneering Research and Studies*, p. 28–30, 2012.
- [28] L. P. N. Junior, “Otimização De Um Processo De Solda Mig/Mag Para Aplicação Na Indústria Automobilística Através Da Utilização Da Técnica Do Projeto E Análise De Experimentos”, *Med Sci (Paris)*, vol. 25, nº 12, p. 1155–1158, 2009.
- [29] J. H. NIXON e J. NORRISH, “Determination of pulsed MIG process parameters. Synergic MIG Supplement”, in *Welding & Metal Fabrication*, 1992.
- [30] É. F. T. Olívio, “Aula 9 - Ensaios em Juntas Soldadas”. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, p. 40, 2016.
- [31] ASM, “Ensaios Destrutivos em Juntas Soldadas”. American Society of Materials, p. 2, 2007.
- [32] N. L. B. Castro, C. R. Ferreira, D. U. Leite, K. U. Lima, e M. E. L. Vieira, “Ensaios para Determinação de Resistência em Juntas Soldadas”, Belo Horizonte, p. 57–67, dez-2017.
- [33] J. C. Hilário, “Aulas Práticas de Ensaios Destrutivos”, Cornélio Procópio, 2017.
- [34] “Metallic Materials - Tensile Testing - Part 1: Method of Test at Room Temperature (ISO 6892-1:2009)”, vol. 1, nº 112. European Committee for Standardization, p. 65, 2010.
- [35] “Destructive Tests on Welds in Metallic Materials - Transverse Tensile Test (ISO 4136:2012)”. European Committee for Standardization, p. 18, 2012.
- [36] S. S. de O. Buffoni, “Propriedades Mecânicas dos Materiais”. Universidade Federal Fluminense, p. 6.
- [37] R. C. Hibbeler, *Resistência dos Materiais*, 3º Ed. Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000.
- [38] R. A. Rohde, “Metalografia Preparação de Amostras: Uma Abordagem Prática”, Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, 2010.

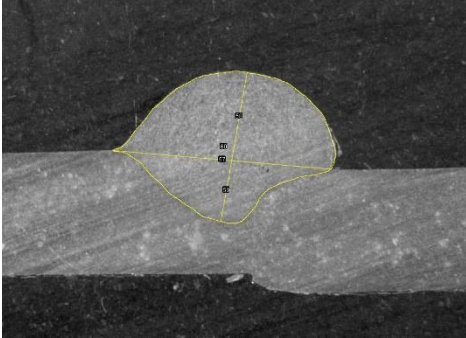
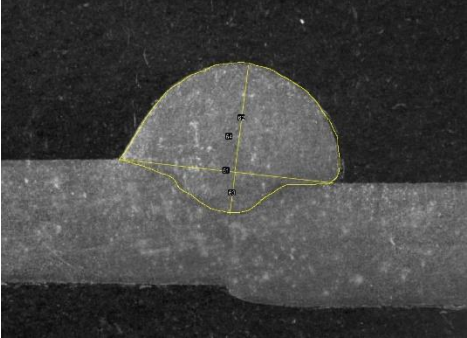
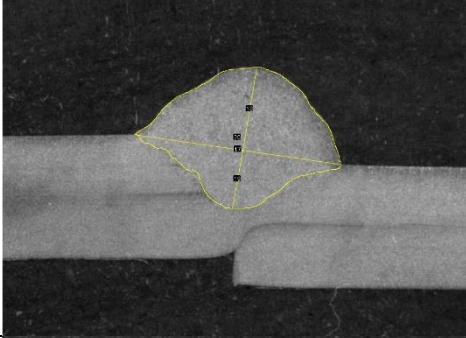
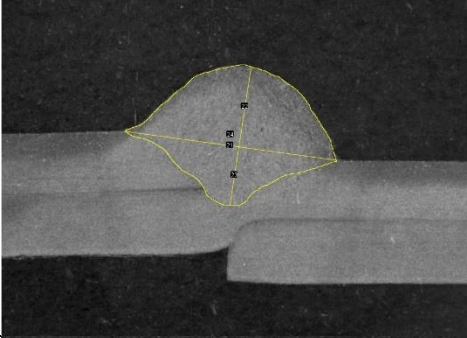
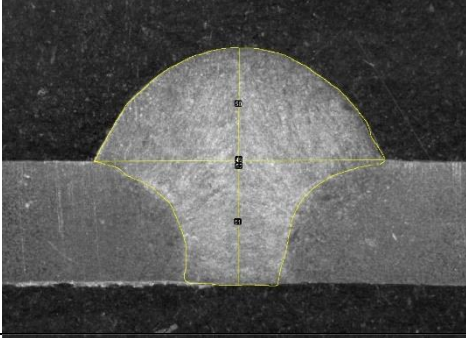
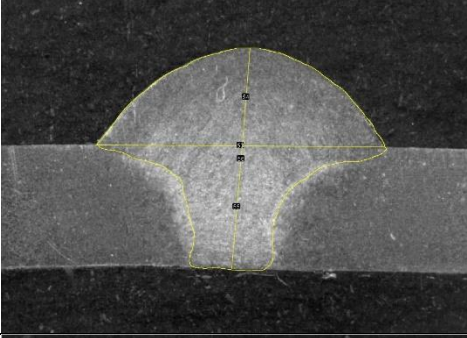
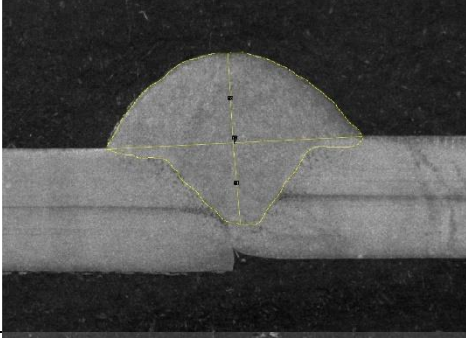
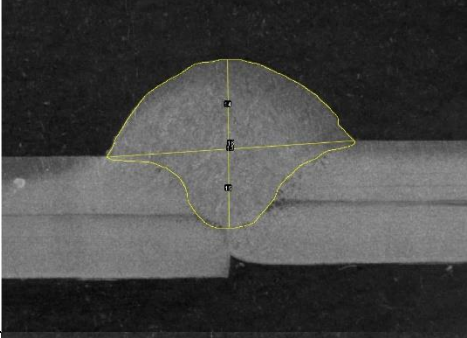
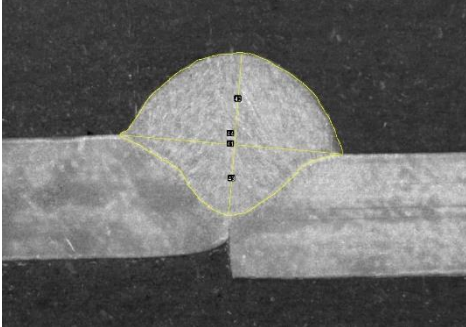
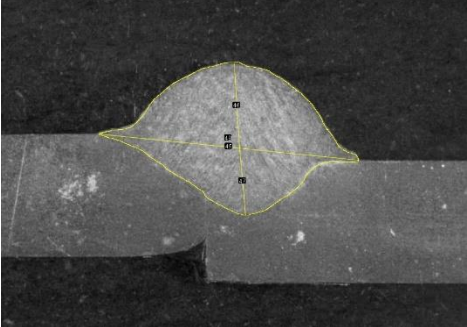
- [39] C. L. M. Da Silva e A. Scotti, “The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, nº 3, p. 366–372, fev. 2006.
- [40] G. Sun, J. Fang, X. Tian, G. Li, e Q. Li, “Discrete robust optimization algorithm based on Taguchi method for structural crashworthiness design”, *Elsevier*, vol. 42, nº 9, p. 4482–4492, 2015.
- [41] V. A. M. Cecílio, “Testes de Soldadura MIG Standard e CMT Pulsado Robotizada em Liga de Alumínio 6082-T6 para Otimização de Penetração , Largura de Cordão e Reforço”, Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- [42] A. Pascoal, A. E. Izeda, V. Cecilio, N. Mineiro, J. Gonçalves, e J. E. Ribeiro, “Robotic Welding Tests MIG Standard and CMT+P in Aluminum Alloy 6082-T6 for Optimization of Penetration, Cord Width and Reinforcement”, *Proceedings*, vol. 2, nº 8, p. 425, jun. 2018.
- [43] N. Garg, A. Kumar, e S. Maji, “Parametric sensitivity analysis of factors affecting sound insulation of double glazing using Taguchi method”, *Elsevier*, vol. 74, nº 12, p. 1406–1413, 2013.
- [44] Taguchi.G e S. Konishi, “Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graphs: Tools for quality engineering”, *Dearbom, American supplier institute*, 1987.
- [45] C. D. Pimenta, M. B. Silva, R. B. Ribeiro, e F. A. E. Claro, “Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização”, *gepros.feb.unesp.br*, p. 97–108, 2012.
- [46] R. K. Roy, *Design of experiments using the Taguchi approach*. 2001.
- [47] S. Pal, S. K. Malviya, S. K. Pal, e A. K. Samantaray, “Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, nº 11–12, p. 1250–1260, out. 2009.
- [48] J. P. Ross, “Taguchi Techniques for Quality Engineering”. New York, 1998.
- [49] “O que é razão sinal-ruído em um experimento de Taguchi?”, *Minitab Support*, 2018. [Online]. Available at: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/what-is-the-signal-to->

- noise-ratio/. [Acessado: 01-out-2019].
- [50] G. Sur, M. Nalbant, H. Gö Kkaya, e G. Sur, “Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning”, 2007.
- [51] “O que é ANOVA?”, *Minitab Support*, 2018. [Online]. Available at: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>. [Acessado: 19-nov-2019].
- [52] “Tabela Análise de Variância de Análise de Variabilidade”, *Minitab Support*, 2019. [Online]. Available at: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-variability/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/#contribution>. [Acessado: 22-nov-2019].
- [53] H. M. Wadsworth, “Handbook of Statistical Methods for Scientists and Engineers”. 1998.
- [54] Y. Chen, S. Chen, e L. Li, “Effects of heat input on microstructure and mechanical property of Al/Ti joints by rectangular spot laser welding-brazing method”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, n° 3–4, p. 265–272, set. 2009.
- [55] K. Pal e S. K. Pal, “Study of weld joint strength using sensor signals for various torch angles in pulsed MIG welding”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 3, n° 1, p. 55–65, 2010.
- [56] S. Parvez, M. Abid, D. H. Nash, H. Fawad, e A. Galloway, “Effect of torch angle on arc properties and weld pool shape in stationary GTAW”, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 139, n° 9, p. 1268–1277, 2013.
- [57] J. C. Veiga, “Desenvolvimento de uma Máquina de Controlo Numérico para Soldadura Automática”, Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- [58] J. E. Ribeiro, “Caracterização experimental e numérica de campos de tensões residuais provocadas por processos de fabrico”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.

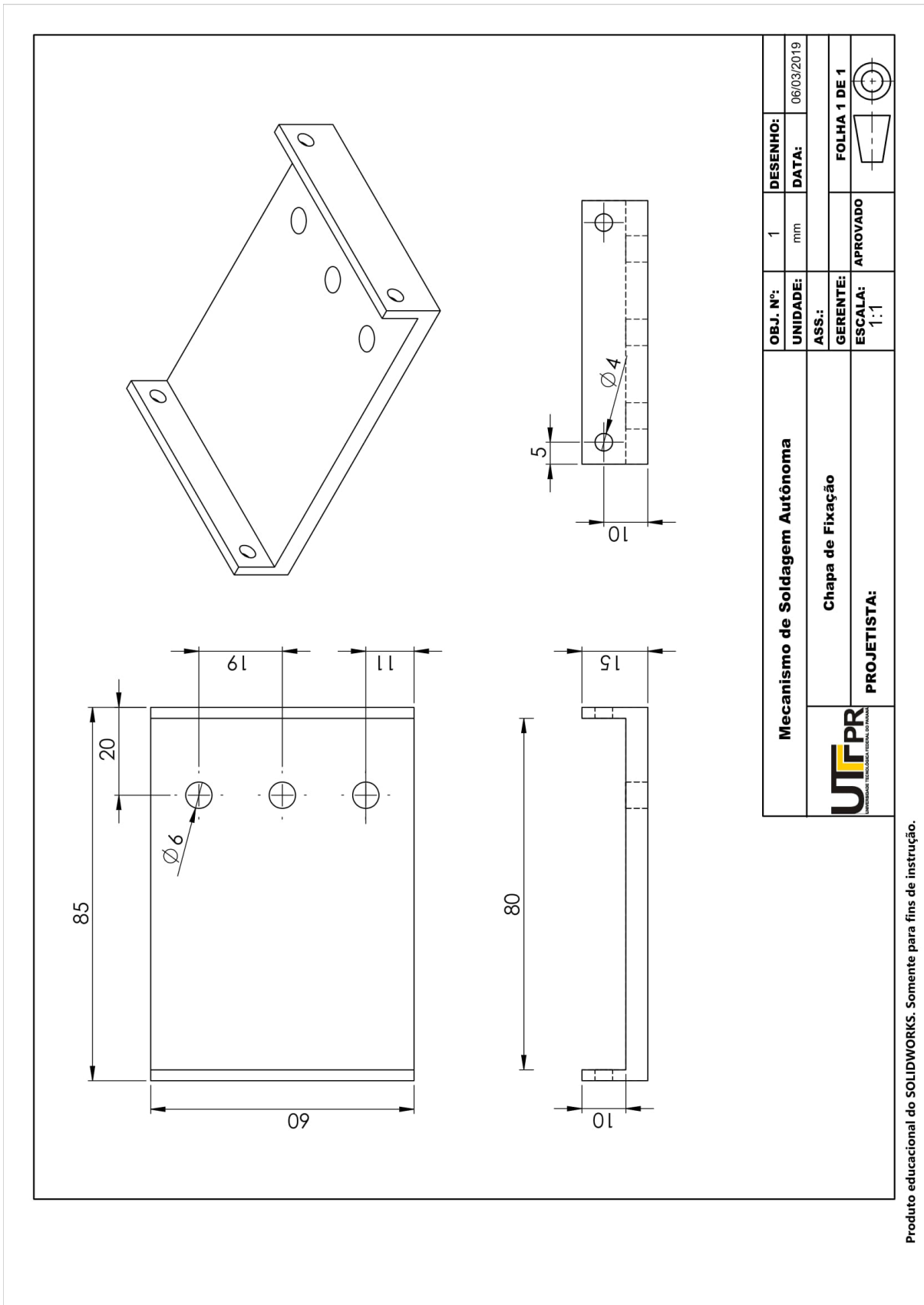
Anexos

ANEXO I – IMAGENS OBTIDAS DURANTE A MACROGRAFIA

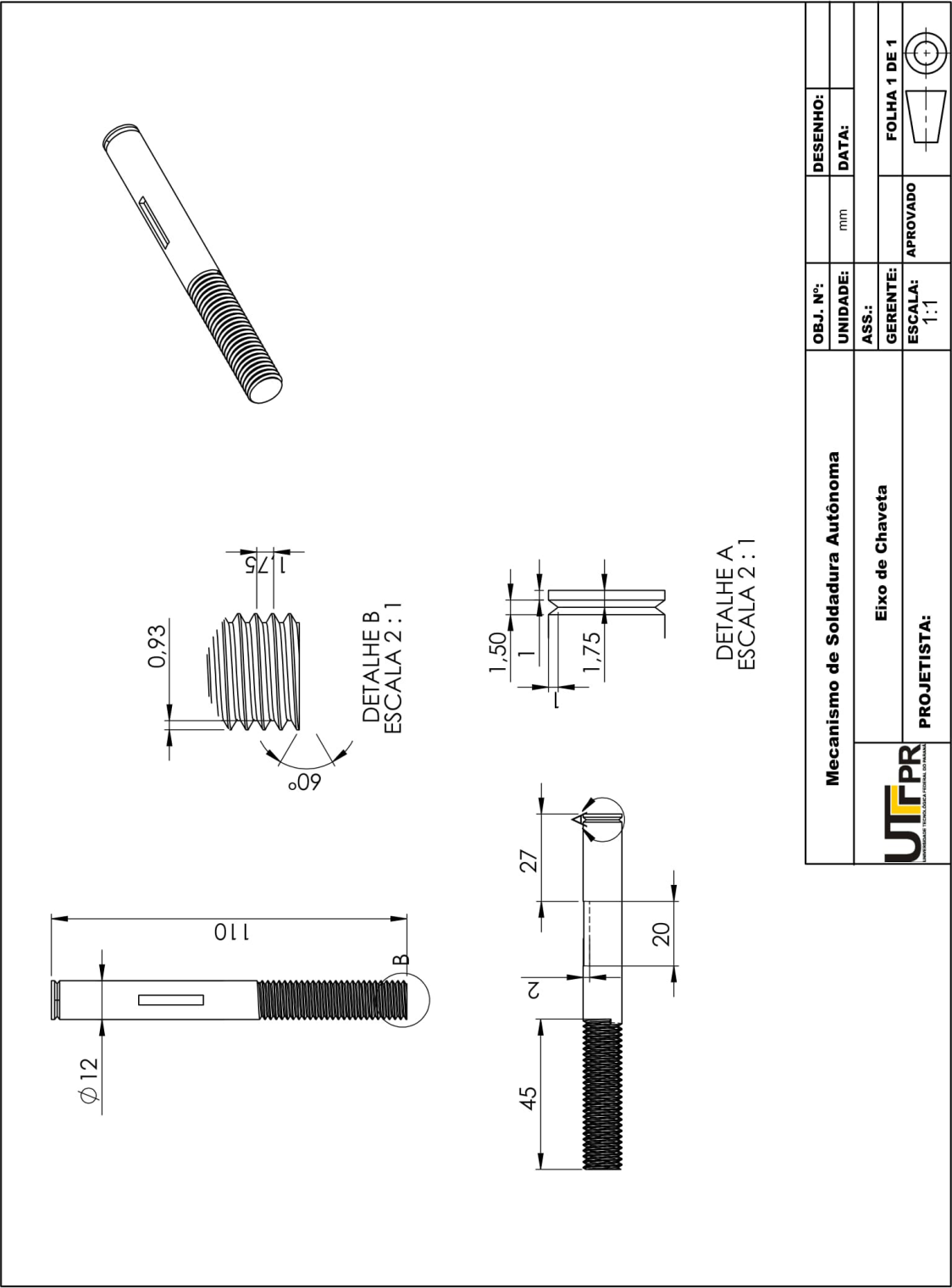
N° do Ensaio	Imagem do Cordão de Solda	
	Amostra 1	Amostra 2
1		
2		
3		
4		



5		
6		
7		
8		
9		

ANEXO II – DESENHO TÉCNICO DOS COMPONENTES DO MECANISMO

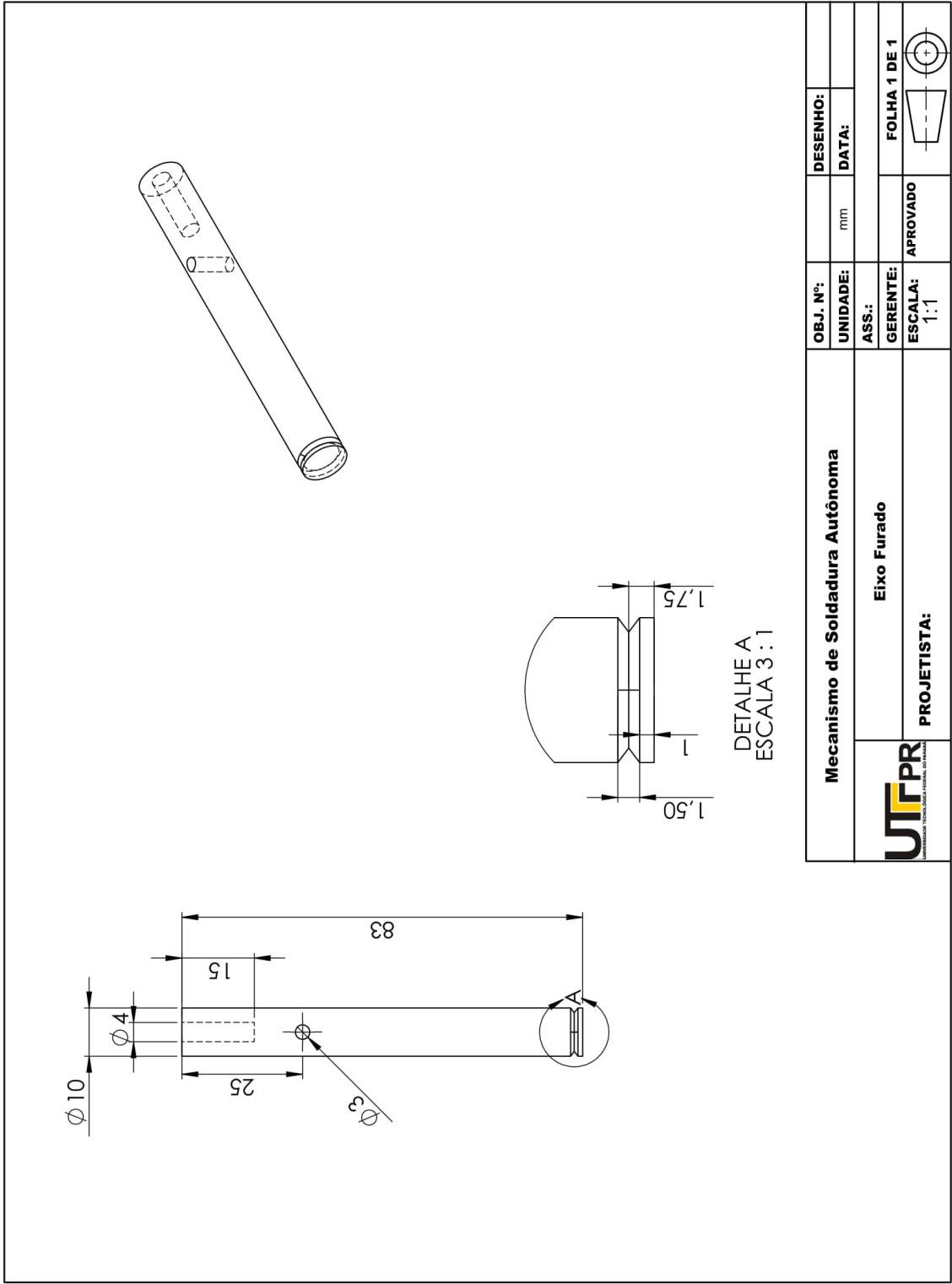


Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.



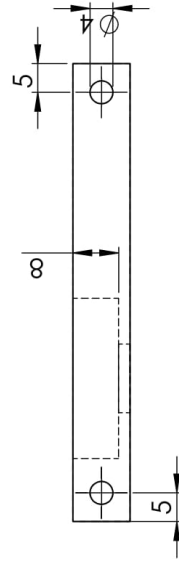
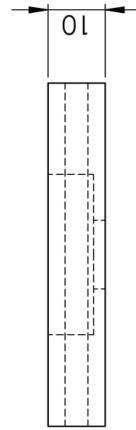
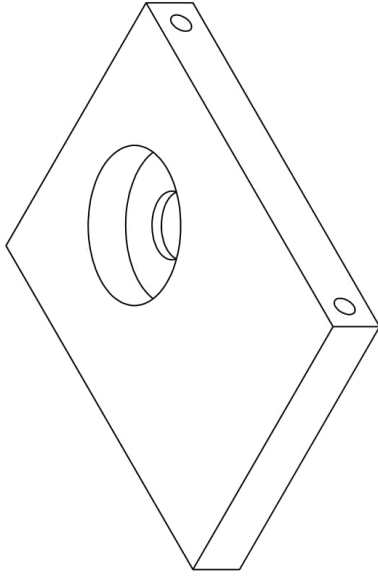
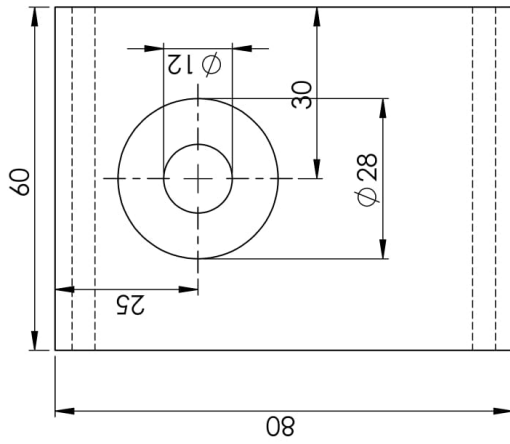
Mecanismo de Soldadura Autônoma 	OBJ. N.º: mm	DESENHO: DATA:
	ASS.: GERENTE: ESCALA: 1:1	APROVADO 
PROJETISTA:	FOLHA 1 DE 1	

Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.



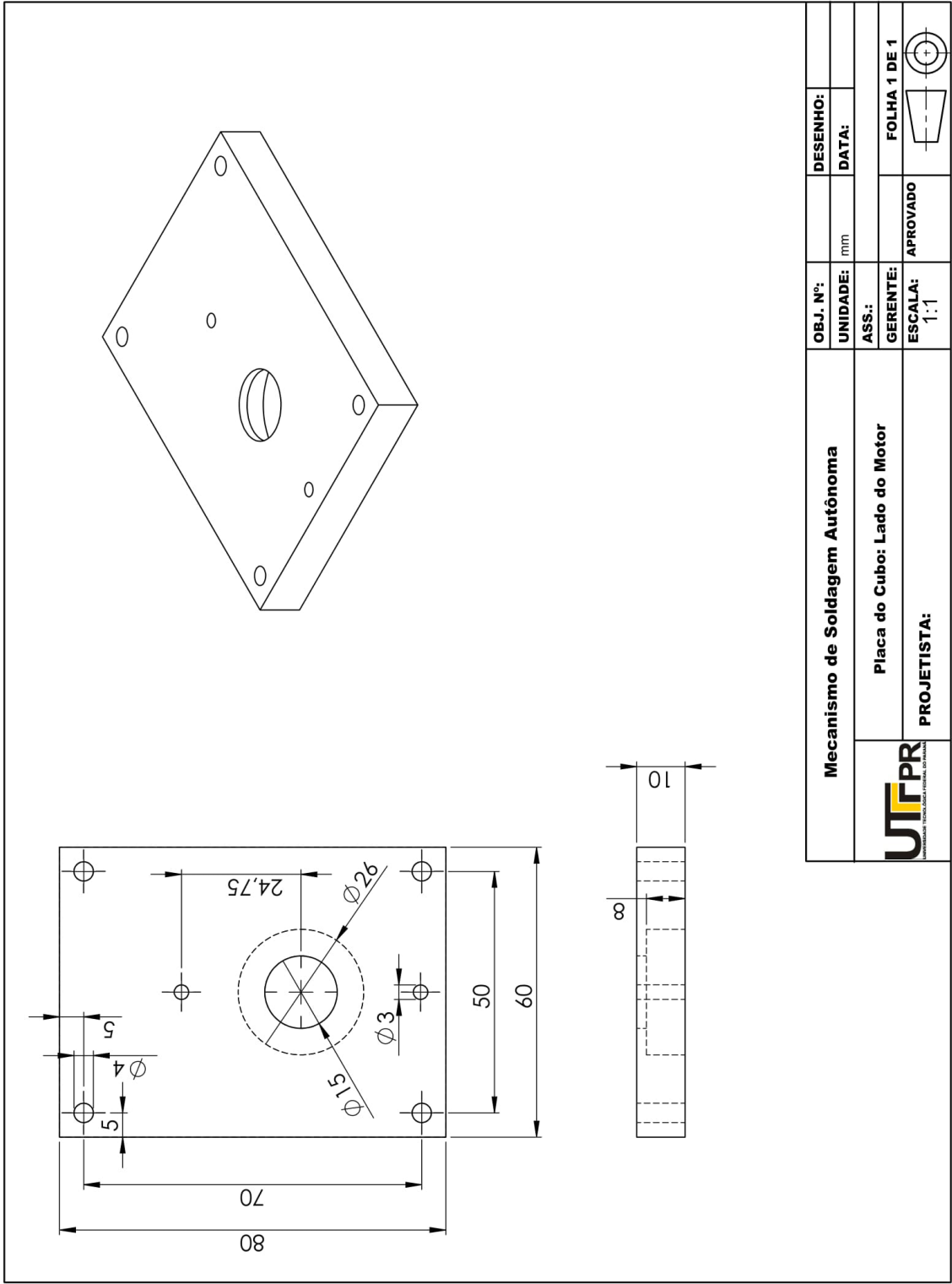
Mecanismo de Soldadura Autônoma		OBJ. N°:	DESENHO:
		UNIDADE: mm	DATA:
		ASS.:	
		GERENTE:	FOLHA 1 DE 1
		ESCALA: 1:1	
PROJETISTA:		APROVADO	
Eixo Furado			

Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.



	Mecanismo de Soldadura Autônoma		OBJ. N°:	DESENHO:
	Placa do Cubo Engrenagem		UNIDADE: mm	DATA:
PROJETISTA:		ASS.:	GERENTE:	FOLHA 1 DE 1
		ESCALA: 1:1	APROVADO	

Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.

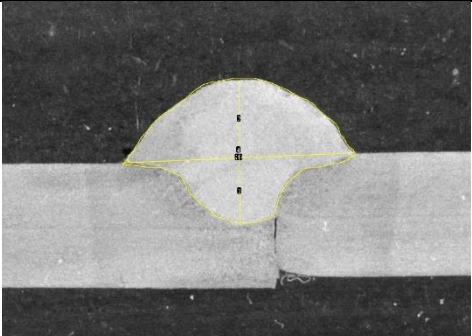
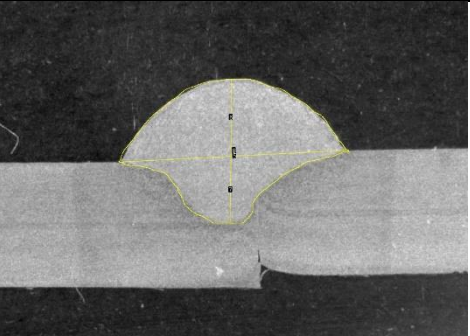


Mecanismo de Soldagem Autônoma		OBJ. N.º:	DESENHO:
		UNIDADE: mm	DATA:
		ASS.:	
Placa do Cubo: Lado do Motor		GERENTE:	FOLHA 1 DE 1
PROJETISTA:		ESCALA: 1:1	APROVADO

Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.

C:\Users\arthur\Desktop\Mecanismo de Soldagem\Versão Final\

ANEXO III – IMAGENS DE MACROGRAFIA DOS ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO

N° do Ensaio	Imagem do Cordão de Solda	
	Amostra 1	Amostra 2
Confirmação		

ANEXO IV – ORÇAMENTO DE COMPRA DE COMPONENTES DO PROJETO DO MECANISMO

Fornecedor		Produto		
Norelem Telefone +49 (0) 71 45/206-44 até 45 · Fax +49 (0) 71 45/206-83 Norelem Ibérica S.L. c/ Osona, 2 08820 El Prat de Llobregat (Barcelona)	Descrição Conjunto de Engrenagem Helicoidal (sentido horário) composto por um parafuso sem-fim e uma engrenagem	Características	Parafuso Sem-Fim	Engrenagem
		Referência	22500-251005	22500-252005
		Torque de Saída	9,7 N.m	9,7 N.m
		Módulo	1.5	1.5
		Distância entre Eixos	25 mm	25 mm
		Relação de Transmissão	-----	5:1
		Quantidade	1 peça	1 peça
		Preço	31,13 € / peça	23,95 € / peça
		Total	31.13 €	23.95 €
E-mail de Contato		Produto		
Manuela Korb manuela.korb@norelem.de Telefone: +49 7145/206-47	Descrição Rolamentos rígidos de esferas FAG de fileira simples. Ambos os rolamentos são da versão 2Z, isso indica que ambos são vedados com vedações de juntas sem contato bilateral.	Características	Rolamento 6000-2Z	Rolamento 6001-2Z
		Referência	23800-101002608	23800-101202808
Carga Estática		1960 N	2360 N	
Carga Dinâmica		4550 N	5100 N	
Ø Externo		26 mm	28 mm	
Ø Interno		10 mm	12 mm	
Espessura		8 mm	8 mm	
Rotação Limite		28000 RPM	26000 RPM	
Quantidade		2 peças	2 peças	
Preço	4,55 € / peça	4,98 € / peça		
Total	9.10 €	9.96 €		
Valor Total do Pedido (NORELEM)		74.14 €		
Fornecedor		Produto		
FMS Metais Telefone: +351 226 198 530 Telemóvel: +351 966 124 635 Fax: +351 226 198 537 Rua António da Silva Marinho, 6, 4100-063, Porto	Descrição Barra feita de alumínio que a partir das dimensões disponibilizadas será utilizada na construção da estrutura do mecanismo.	Características	Barra de Alumínio	
		Largura	60 mm	
		Espessura	10 mm	
		Comprimento	1000 mm	
		Peso	1,620 kg/m	
		Quantidade	1 barra	
		Preço	Realizar cotação com fornecedor	
E-mail de Contato		* OBS: a quantidade de um metro de comprimento é suficiente para a fabricação, porém alguns fornecedores atribuem um comprimento mínimo para vendas, comprimento este que pode ser de seis metros. Se for este o caso, a compra será realizada da mesma maneira.		
fmsgeral@fms.pt				

ANEXO V – ORÇAMENTO DE COMPRA DIRETA DE COMPONENTES DO PROJETO DO MECANISMO

Fornecedor			Produto		
AKI de Bragança Rua Coronel Teófilo de Morais, 12, 5300-427 Bragança Tel: 273 093 020 Horário de funcionamento: Seg. a Dom. das 09:00h às 20:00h			Características	Varão Roscado M4	Parafuso Sext. Int. M6
			Referência	1024076	3225040
			Material	Aço	Aço
			Comprimento	1000 mm	30 mm
			Acabamento	Galvanizado	Zincado
			Diâmetro	4 mm	6 mm
			Quantidade	1 peça	8 peças
			Preço	€ 0.39	€ 1.99
Características	Porca Sextavada M4	Porca Sextavada M12			
Referência	3226971	3228586			
Material	Aço	Aço			
Comprimento	-----	-----			
Acabamento	Zincado	Zincado			
Diâmetro	4 mm	12 mm			
Quantidade	100 peças	4 peças			
Preço	€ 1.99	€ 1.99			