

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDADURA  
GMAW UTILIZANDO O MÉTODO TAGUCHI COM A  
ANÁLISE RELACIONAL DE GREY**

**CAIO RESENDE DE LACERDA**

**Nº 46721**

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

Para obtenção do grau de Mestre em  
**ENGENHARIA INDUSTRIAL**

**BRAGANÇA, JUNHO DE 2021**

# **OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDADURA GMAW UTILIZANDO O MÉTODO TAGUCHI COM A ANÁLISE RELACIONAL DE GREY**

**CAIO RESENDE DE LACERDA**

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

Para obtenção do grau de Mestre em  
**ENGENHARIA INDUSTRIAL**

Orientador do Instituto Politécnico de Bragança:

**Prof.º Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro**

Orientadora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais:

**Prof.ª Doutora Ivanilza Felizardo**

**BRAGANÇA, JUNHO DE 2021**

# Agradecimentos

---

Primeiramente, agradeço à minha família que é a base de tudo que sou e o que tenho de mais importante em minha vida. Ao meu pai, Lacerda, que sempre me motivou e acreditou em mim, que esteve sempre do meu lado para tudo que eu quisesse e que, infelizmente, durante esta jornada passou a me acompanhar do céu, mas que sempre está comigo, no meu coração, me dando forças a cada dia para continuar na luta da vida. À minha mãe, Mara, que sempre fez e faz de tudo para mim, me dá apoio, amor e carinho que me faz querer fazer tudo por e para ela. Aos meus irmãos, Pedro e Raphael, que são a minha fonte de inspiração e que sempre me apoiam e incentivam. Amo todos vocês.

A Deus, por todas as coisas que ele me proporciona e por ser luz em minha vida.

Aos orientadores, João Ribeiro do IPB e Ivanilza Felizardo do CEFET-MG por todo o apoio dado, pelo suporte na realização do trabalho, pelas dicas, dedicação e por terem confiado em mim.

Aos técnicos dos laboratórios, Abílio Marcelo, Jorge Paulo, Luísa Barreira, João Rocha e Jorge Santos, por toda a ajuda dada que, sem eles, este trabalho não seria possível de realizar. Aos colegas Lucas Garcia, Ronaldo, Arthur e aos amigos Alessandro e Caio por terem me ajudado de alguma forma neste estudo.

Agradeço, também, a todos meus familiares e amigos (do Brasil e de Bragança) que seria impossível listar todos aqui (um abraço especial aos amigos do Clube do Filme), mas que foram extremamente importantes nesta jornada, sendo figuras de companheirismo e estando ao lado nos bons e maus momentos para que a vida fosse sempre mais leve e descontraída.

Por fim e não menos importante, agradeço ao IPB pelo acolhimento e pela oportunidade que foi dada e ao CEFET/MG, principalmente o departamento de relações internacionais, que com seus esforços e dedicação, possibilitaram a realização deste intercâmbio e que sempre foram muito solícitos a todas as necessidades que tive, tornando todo o caminho mais fácil.

A todos um abraço e meu enorme agradecimento!

## RESUMO

A soldadura apresenta-se como um dos processos de união de materiais mais versáteis e eficientes que existem na indústria, podendo ser utilizado em uma vasta gama de materiais, espessuras e aplicações. A correta seleção dos parâmetros de soldadura é primordial na qualidade do cordão final, garantindo a maior eficiência do processo. O objetivo deste presente trabalho é otimizar os parâmetros de soldadura para uma determinada qualidade final do processo. Os parâmetros considerados para esta análise foram a tensão, velocidade de soldadura e o ângulo da tocha. As características de qualidade a controlar são a penetração, a largura, o reforço do cordão de solda e o limite de resistência à tração. Para esta otimização foram utilizados dois métodos. O método Taguchi para a definição das matrizes ortogonais que possibilitam o estudo dos fatores selecionados com um número reduzido de experimentos. Para este trabalho, foi criada uma matriz do tipo L9, com os três parâmetros com três níveis para cada. O outro método utilizado foi a análise relacional de Grey, que combina o resultado para várias respostas em apenas um único valor, que é o grau relacional de Grey. Por fim, foi utilizada a análise de variância (ANOVA) para avaliar o quanto cada parâmetro contribui no resultado. A combinação ótima obtida para os objetivos determinados foi: tensão 23,7 V, velocidade de soldadura 250 mm/min e ângulo da tocha 0°. Após a utilização da análise relacional de Grey, foram realizados experimentos de confirmação, utilizando a combinação ótima, que melhoraram o valor do grau relacional de Grey em 13,09%. Com a utilização da ANOVA, verificou-se que a velocidade de soldadura é o parâmetro que apresenta maior contribuição para o resultado final com 21,73%, o ângulo da tocha teve contribuição de 21,34% e a tensão 19,57%.

Palavras-chave: GMAW, Otimização, Taguchi, Grey.

## **ABSTRACT**

Welding is one of the most versatile and efficient materials joining processes in the industry and can be used in a wide range of materials, thicknesses, and applications. The correct selection of the welding parameters is crucial in the quality of the weld bead, ensuring greater process efficiency. The aim of this work is to optimize the welding parameters for a certain final process quality. The parameters considered for this analysis were voltage, welding speed and torch angle. And the quality characteristics are penetration, width, and reinforcement of the weld bead as the tensile strength. For this optimization, two methods were used. The Taguchi method allows to design an orthogonal array that enable the study of the selected factors with a reduced number of experiments. By this method, a L9 orthogonal array was created, with the three parameters at three levels each. The other method used was Grey Relational Analysis, which combines the result for multi responses into a single value, Grey relational grade. Finally, the analysis of variance (ANOVA) was used to evaluate how much each parameter contributes to the result. The optimal combination obtained for the previously determined objectives was voltage at 23,7 V, welding speed at 250 mm/min and torch angle at 0°. After the use of Grey Relational Analysis, confirmatory experiments were performed, using optimal combination, which improved the value of Grey relational grade by 13,09%. With the use of ANOVA, it was verified that the welding speed is the parameter that presents the greatest contribution to the result with 21,73%, the torch angle had contribution of 21,34% and the voltage 19,57%.

Key words: GMAW, optimization, Taguchi, Grey.

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABELAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES .....	xi
CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
CAPÍTULO II.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 PROCESSO DE SOLDADURA .....	4
2.2 PROCESSO DE SOLDADURA GMAW .....	5
2.2.1) Princípio operacional.....	6
2.2.2) Modos de Transferência Metálica .....	7
2.2.3) Variáveis do Processo e a Influência dos Parâmetros no Cordão de Soldadura.....	11
2.3 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA .....	15
2.3.1) Penetração .....	16
2.3.2) Largura e Reforço.....	16
2.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA ...	17
2.4.1) Ensaio de Tração em Juntas Soldadas.....	18
2.4.2) Macrografia .....	20

2.5 MÉTODO TAGUCHI .....	21
2.5.1 Razão Sinal-Ruído .....	24
2.6 ANÁLISE RELACIONAL DE GREY .....	25
2.6.1) Normalização da razão sinal-ruído .....	26
2.6.2) Coeficiente Relacional de Grey .....	27
2.6.3) Grau Relacional de Grey (GRG) .....	28
2.6.4) Teste de Confirmação .....	28
2.7) ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) .....	29
CAPÍTULO III.....	32
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	32
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	32
3.2 PLANEAMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	33
3.3 PREPARAÇÃO DAS CHAPAS .....	36
3.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	38
3.4.1) Realização dos Cordões de Solda.....	38
3.4.2) Obtenção dos Corpos de Prova para o Ensaio de Tração .....	44
3.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS .....	47
3.6 ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS CORDÕES DE SOLDA.....	49
3.6.1) Obtenção das amostras .....	49
3.6.2) Preparação das Amostras.....	50
3.6.3) Ensaio de Macrografia para Medição do Perfil dos Cordões .....	53
3.7 TRATAMENTO DOS DADOS .....	54
CAPÍTULO IV .....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	56
4.1 PENETRAÇÃO .....	56
4.2 LARGURA .....	59
4.3 REFORÇO .....	61

4.4 LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	63
4.5 ANÁLISE RELACIONAL DE GREY .....	66
4.6 CONFIRMAÇÃO DOS RESULTADOS .....	69
4.7 ANOVA .....	71
CAPÍTULO V.....	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	73
5.1 CONCLUSÕES .....	73
5.2 TRABALHOS FUTUROS .....	74
REFERÊNCIAS .....	76
ANEXOS .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquemática da soldadura GMAW .....	6
Figura 2: Esquema do modo de transferência curto-circuito, mostrando o comportamento da tensão e da corrente de soldadura durante a transferência.....	8
Figura 3: Transferência globular e a variação da tensão e da corrente de soldadura durante o processo .....	9
Figura 4: Transferência por spray e o comportamento da corrente e tensão de soldadura durante o processo.....	10
Figura 5: Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldadura para o processo GMAW-P.....	13
Figura 6: Efeito da orientação da tocha no cordão de soldadura para o sentido empurrando (A), perpendicular (B) e puxando (C) .....	14
Figura 7: Principais dimensões do cordão de solda.....	16
Figura 8: Diagrama de Tensão x Deformação convencional e real para material dúctil (aço) (sem escala).....	18
Figura 9: Representação do corpo de prova de acordo com a norma ISO 4136:2012 .....	20
Figura 10: Cálculos para realização da análise de variância a partir da tabela ANOVA.....	30
Figura 11: Distribuições populacionais para quando a) a hipótese nula é verdadeira e b) quando a hipótese nula é falsa. ....	30
Figura 12: Guilhotina Cutil mini 320 utilizada para corte das chapas de aço... 36	
Figura 13: Chapas cortadas nas dimensões propostas. ....	37
Figura 14: Furadora Radial EFI utilizada para realização dos furos. ....	38
Figura 15: Chapa após realização do corte longitudinal e dos furos. ....	38
Figura 16: Mecanismo de soldadura utilizado para realização dos cordões de solda com seus respectivos eixos.....	39
Figura 17: Eixos acoplados com a improvisação de uma mangueira.....	40
Figura 18: Mangueira rompida após a realização de alguns testes.....	41
Figura 19: Eixos ligados por um acoplamento flexível. ....	41
Figura 20: Fonte de Soldadura MIG 453 Modular. ....	42
Figura 21: Chapas posicionadas no mecanismo de soldadura para execução dos cordões com ângulo de tocha em 25°. ....	43

Figura 22: Chapa soldada de acordo com os experimentos 4, 5 e 6 da matriz ortogonal de Taguchi.....	43
Figura 23: Dimensões dos provetes para ensaio de tração, conforme norma ISO 4136:2012. ....	44
Figura 24: Fresadora CNC utilizada para maquinagem dos corpos de prova. ...	45
Figura 25: Representação do trajeto de corte da fresadora CNC.....	45
Figura 26: Chapa fixada na fresadora CNC para execução dos provetes.....	46
Figura 27: Aspeto da chapa após maquinagem. ....	47
Figura 28: Provetes acabados para utilização no ensaio de tração. ....	47
Figura 29: Equipamento utilizado para os ensaios de tração.....	48
Figura 30: Partes do cordão que foram aproveitadas para a macrografia.....	49
Figura 31: Equipamento de Corte Struers-Labotom.....	50
Figura 32: Embutidora Struers-LaboPress-1. ....	51
Figura 33: Equipamento para lixamento Struers-LaboPol-25. ....	52
Figura 34: Politriz Struers-RotoPol-21.....	52
Figura 35: Amostras preparadas para o ensaio de macrografia. ....	53
Figura 36: Macroscópio IRIS ligado ao Notebook para obtenção dos perfis do cordão de solda. ....	54
Figura 37: Medições realizadas nos cordões de solda. ....	54
Figura 38: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes à penetração do cordão. ....	58
Figura 39: Médias dos resultados observados para cada parâmetro e nível. ....	59
Figura 40: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes à largura do cordão. ....	60
Figura 41: Médias dos resultados observados da largura para cada parâmetro e nível. ....	61
Figura 42: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes ao reforço do cordão. ....	62
Figura 43: Médias dos resultados observados do reforço para cada parâmetro e nível. ....	63
Figura 44: Gráficos de Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) do experimento 1. ....	64
Figura 45: Perfil dos cordões de solda do experimento 4. a) provete 1.1; b) provete 1.2. ....	65

Figura 46: Perfil do cordão obtido no experimento 9, provete 9.1.....	65
Figura 47: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes ao limite de resistência à tração.....	66

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Corrente de transição globular-spray de diferentes aços e elétrodos..	11
Tabela 2: Dimensões normalizadas dos provetes de acordo com a norma ISO 4136:2012 (dimensões em mm). .....	20
Tabela 3: Seleção do arranjo ortogonal. ....	23
Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço EN 10051 .....	32
Tabela 5: Composição química do aço EN 10051.....	32
Tabela 6: Composição química do arame ER70S-6.....	33
Tabela 7: Propriedades Mecânicas do arame ER70S-6.....	33
Tabela 8: Faixa de utilização ideal para o arame ER70S-6.....	33
Tabela 9: Parâmetros selecionados e seus respectivos níveis. ....	34
Tabela 10: Desenho da matriz ortogonal $L_9$ para os experimentos. ....	35
Tabela 11: Valores das medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.	57
Tabela 12: Valores das medições, média e razão sinal-ruído para a largura. ....	59
Tabela 13: Valores das medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.....	61
Tabela 14: Valores das medições, médias e razão sinal-ruído para o limite de resistência à tração.....	64
Tabela 15: Razões sinal-ruído para todos os experimentos e características de qualidade.....	67
Tabela 16: Dados normalizados da razão S/N de cada atributo de qualidade. ...	67
Tabela 17: Avaliação de $\Delta 0_i$ para cada experimento e resposta.....	68
Tabela 18: Coeficiente relacional de Grey. ....	68
Tabela 19: Grau relacional de Grey para cada experimento e sua respectiva ordem. ....	69
Tabela 20: Resposta para o Grau Relacional de Grey. ....	69
Tabela 21: Resultados obtidos para o ensaio de confirmação. ....	70
Tabela 22: Resultados obtidos para o limite de resistência à tração do ensaio de confirmação. ....	70
Tabela 23: Comparação entre parâmetros iniciais e ótimos. ....	71
Tabela 24: Valores da ANOVA para a Análise Relacional de Grey. ....	71

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ANOVA	Análise de Variância
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding - Pulsed</i>
CO	Monóxido de Carbono
Ar	Argónio
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
S/N	<i>Signal-to-Noise</i> – Razão Sinal-Ruído
n	Número de Experimentos
$Y_i$	Dados observados no experimento
ARG	Análise Relacional de Grey
$\gamma_i^*$	Valor obtido normalizado
$\varepsilon_i$	Coefficiente relacional de grey
$\Delta_{0i}$	Diferença entre o valor ideal e o valor normalizado de um experimento na análise relacional de Grey
$\Delta_{max}$	Maior valor de $\Delta_{0i}$
$\Delta_{min}$	Menor valor de $\Delta_{0i}$
$\zeta$	Coefficiente distintivo
$\Gamma_i$	Grau Relacional de Grey
H <sub>0</sub>	Hipótese Nula
$\mu_A, \mu_B, \mu_C$	Amostras populacionais de um grupo
H <sub>1</sub>	Hipótese Alternativa
SS	Soma de Quadrados
$S_y^2$	Variância de y
MS	Quadrado médio
GDL	Graus de Liberdade

$\alpha$	Nível de significância do modelo estatístico
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
LMCM	Laboratório de Materiais de Construção Mecânica
LERM	Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais
MPa	Megapascal
V	Unidade de tensão, em Volts
mm	Milímetros
min	Minutos
l	Unidade de volume, em litros
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
Ø	Diâmetro
kN	Quilonewton
°C	Graus Celsius
µm	Micrómetro
dB	Decibel
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
SAW	<i>Submerged-arc welding</i>

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

Entre os processos de fabricação existentes, a soldadura, principalmente pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), possui muito espaço na indústria atual devido à vasta gama de aplicações, facilidade de automatização, às elevadas taxas de produtividade e às excelentes características metalúrgicas do metal depositado.

Tratando-se do processo GMAW, o conhecimento da influência dos diversos parâmetros no resultado do cordão de solda é primordial, visto que as características do cordão são afetadas pelo ajuste dos parâmetros de entrada, sendo necessário um controle muito eficaz na seleção destes. Este controle, no entanto, possui algumas dificuldades já que a soldadura é influenciada por múltiplas variáveis como as condições climáticas, materiais a serem trabalhados, o operador e entre outras, que exigem um planejamento específico para cada projeto a ser executado. Para este planejamento dos experimentos, existem vários métodos disponíveis, como o design fatorial, o método Taguchi e a Análise Relacional de Grey.

Em estudo sobre soldadura realizado anteriormente, percebeu-se a dificuldade de se realizar um planejamento efetivo de experimentos que determinem quais parâmetros e níveis seriam utilizados para estudar a taxa de deposição e produtividade em processos de soldadura. Diante desta dificuldade já encontrada, a motivação deste trabalho é em definir como se pode realizar este planejamento, a partir de métodos já existentes, para que os resultados atingidos em trabalhos científicos da área de soldadura tenham resultados mais consistentes, evitando que sejam feitos experimentos em demasia, ocorrendo em gasto de tempo e recursos.

O estudo da otimização dos parâmetros em soldadura já é bastante abordado por pesquisadores, como no trabalho de Pal [1] que utilizou o método de Grey-Taguchi para investigar a otimização dos parâmetros do processo MIG pulsado. Ghosh et al [2], utilizando o mesmo método, estudou a otimização dos parâmetros da soldadura MIG em

aço inoxidável austenítico 316L. O estudo de Hsiao [3] também se baseou no método Grey-Taguchi, mas para avaliar os parâmetros do processo de soldadura a plasma. Outros trabalhos utilizam apenas o método Taguchi para a determinação dos parâmetros ótimos como Cecílio [4] que fez um estudo de otimização sobre a soldadura MIG Standard e CMT Pulsado verificando a penetração, largura e reforço do cordão e Casarini [5] que investigou a otimização dos parâmetros da soldadura GMAW, em chapas de aço ao carbono, para a penetração, largura e reforço do cordão de solda e a resistência à tração da junta soldada.

Para tal estudo, Casarini [5] desenvolveu uma metodologia simples, eficaz e de baixo custo para estudar tais relações entre fatores de entrada e de saída. Porém, a utilização unicamente do método Taguchi permite avaliar apenas a otimização dos parâmetros para cada característica de qualidade do processo analisada individualmente, não sendo possível investigar como estes parâmetros podem ser otimizados de forma a abranger todas as respostas analisadas. Para se ter esta análise, é necessário aplicar a análise relacional de Grey, em conjunto com o método Taguchi, que se torna uma ferramenta mais poderosa quando se trata de planejamento de experimentos e de otimização de parâmetros, a qual será disposta neste trabalho.

## **1.1 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é otimizar parâmetros de soldadura de modo a maximizar as propriedades mecânicas das juntas soldadas e minimizar os seus defeitos geométricos.

Para isso, serão realizadas soldaduras do tipo topo-a-topo para a união de chapas de aço, por meio do processo GMAW.

Para o planejamento dos experimentos e o tratamento dos dados, serão utilizados o Método Taguchi juntamente com a Análise Relacional de Grey. O método Taguchi foi utilizado para caracterizar uma matriz de ensaios experimentais e determinar a melhor combinação de parâmetros para cada característica de qualidade analisada e a Análise Relacional de Grey foi utilizada para determinar a combinação ótima de parâmetros que atende ao conjunto de todas as respostas selecionadas (penetração, largura, reforço e resistência à tração). Também pretende-se avaliar o quanto cada parâmetro influencia no resultado da soldadura e, para isto, será utilizada a técnica da análise de variância (ANOVA).

## **1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro é dada uma introdução ao tema da soldadura, a motivação para a realização do trabalho, uma breve análise sobre o estado da arte relativo aos temas, os objetivos do trabalho e a estrutura deste relatório.

O segundo capítulo contém os fundamentos teóricos necessários para a compreensão do tema aqui estudado, da metodologia utilizada e dos resultados obtidos. São tratados temas como a soldadura GMAW, o método Taguchi e análise relacional de Grey.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais utilizados neste trabalho, bem como a metodologia utilizada para se realizar a soldadura, a preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração e das amostras para o ensaio de macrografia e como foram realizadas as medições e tratamento dos resultados obtidos.

No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos para a penetração, largura e reforço do cordão de solda e da resistência à tração da junta soldada. Juntamente com os resultados, é realizada uma discussão dos principais pontos analisados e a validação dos métodos utilizados neste relatório.

O sexto capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho, com os principais pontos a serem destacados e são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros semelhantes aos temas aqui estudados.

No final deste relatório encontram-se os anexos, contendo as imagens dos perfis dos cordões de solda obtidos e os gráficos de tensão e deformação resultantes dos ensaios de tração.

# CAPÍTULO II

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão introduzidos os principais conceitos dos assuntos que tangem o tema deste trabalho. Para isso, foram realizadas consultas em diversos livros, artigos, dissertações, normas e sites da internet para apurar a máximo de informação possível e, desta forma, criar uma base conceitual que permita compreender os procedimentos executados nesta dissertação, bem como, a análise e avaliação dos resultados.

### 2.1 PROCESSO DE SOLDADURA

A soldadura é considerada o principal processo de união de metais utilizado industrialmente. É baseado em interações interatômicas e intermoleculares em que a união entre os elementos a ligar é conseguida pela aproximação das moléculas das superfícies dos referidos elementos ou destes com um terceiro elemento, denominado material de adição, até uma distância relativamente curta para a formação de ligações químicas [6].

Há diversas definições para a soldadura encontradas nas bibliografias atuais. Segundo a *American Welding Society (AWS)*, a soldadura é “Um processo de união que produz a coalescência dos materiais aquecendo-os à temperatura de soldadura, com ou sem a aplicação de pressão ou pela aplicação de pressão apenas, e com ou sem o uso de metal de adição” [7].

Basicamente, a soldadura pode ser realizada pela fusão, através do calor proveniente de um arco elétrico ou combustão de um ou mais gases que gera a união das partes a serem soldadas (com ou sem metal de adição); e através da energia mecânica, por vezes auxiliada pelo calor, recorrendo ao atrito ou ao impacto para provocar a união entre as partes [8].

Entre as principais vantagens da soldadura, podemos destacar [8]:

- É um dos processos de ligação com a melhor relação custo-benefício;
- Permite ligar materiais com um grande gama de espessura – desde décimos de milímetro até dezenas de centímetros;

- É um processo extremamente versátil, podendo ser aplicado a uma grande variedade de materiais, formas e dimensões.

O processo mais usual de soldadura é utilizando o arco elétrico como fonte de calor e, dentro destes, destaca-se o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), também conhecido como MIG/MAG, que será discutido a seguir e será o foco deste trabalho.

## 2.2 PROCESSO DE SOLDADURA GMAW

A soldadura GMAW é um processo em que o arco elétrico é estabelecido entre o metal de base e um eletrodo metálico consumível, em formato de arame. Neste processo há um fluxo de gás sobre a zona fundida, com a função de proteger esta região da contaminação por elementos externos. Este gás pode ser inerte, ativo ou uma mistura destes. Quando o gás de proteção utilizado é um gás ativo, o processo é conhecido como MAG (*Metal Active Gas*) e quando a proteção é através de um gás inerte, é chamado de MIG (*Metal Inert Gas*) [6].

As principais vantagens do processo GMAW são [6,9,10,11]:

- Alta taxa de deposição, devido à elevada densidade de corrente na ponta do arame;
- Grande versatilidade de materiais e espessuras aplicáveis;
- Alta velocidade de soldadura;
- Requer mínima limpeza pós-operação devido à não-existência de fluxos de soldadura;
- Menores problemas de distorção e tensões residuais;
- Possibilidade de se obter cordões de soldadura mais longos sem interrupção, devido ao eletrodo ser contínuo;
- Soldadura pode ser realizada em todas as posições.

Estas vantagens possibilitam a automatização do processo, alcançando altos níveis de produtividade e uma aplicação cada vez maior com o auxílio da robótica.

Entre as suas limitações, destacam-se [6,9,10]:

- Equipamentos mais caros e robustos do que o eletrodo revestido;
- Geração excessiva de respingos;

- Maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação e, conseqüentemente, necessidade de um ajuste rigoroso dos parâmetros para se obter um cordão de solda com determinadas características;
- Robustez da tocha e a necessidade de grande proximidade da tocha com o metal de base impede de se realizar a soldadura em locais de difícil acesso;

### 2.2.1) Princípio operacional

A soldadura GMAW é um processo normalmente semiautomático em que a alimentação do eletrodo (em fio) é feita através de um alimentador motorizado. Este mesmo eletrodo é protegido por um gás fornecido através de uma fonte. Após a configuração correta dos parâmetros iniciais na máquina, o equipamento provém a autorregulação do arco elétrico estabelecido, como a voltagem e a velocidade de alimentação do eletrodo [6,9].

Os principais equipamentos envolvidos na soldadura GMAW são: tocha de soldadura, unidade de alimentação do eletrodo, fonte de energia de soldadura e aparato do gás de proteção (cilindro e cabo de condução) [9,10]. A Figura 1 ilustra o princípio básico da soldadura GMAW e seus componentes.

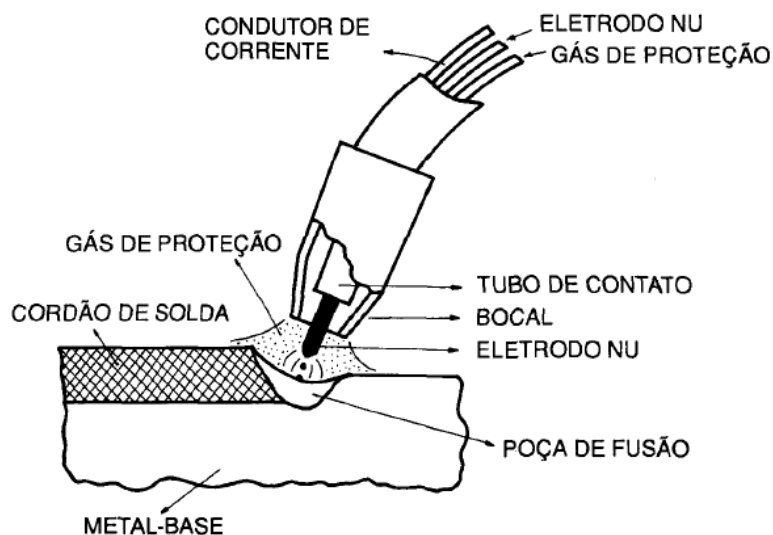


Figura 1: Esquemática da soldadura GMAW [10].

### 2.2.2) Modos de Transferência Metálica

Na soldadura, o metal é transferido da ponta do eletrodo para a poça de fusão. O modo como é transferido o metal é de grande importância na soldadura GMAW pois afetam diversas características do processo, como: a estabilidade do arco, a quantidade de gases absorvidas na poça de fusão (ex.: hidrogênio, nitrogênio e oxigênio), a profundidade do cordão, a quantidade de respingos gerados e a habilidade de soldar em diversas posições [6,12].

O modo de transferência metálica pode ser determinado por vários fatores, os mais influentes são: intensidade, tipo e polaridade de corrente utilizada, diâmetro do eletrodo, composição do eletrodo, comprimento do eletrodo e a composição do gás de proteção [9].

Os principais modos de transferência metálica são: por curto-circuito, globular e por spray.

a) *Transferência por curto-circuito*: ocorre quando se utiliza baixos valores de tensão e de corrente de soldadura e de eletrodos com diâmetros menores (entre 0,8 e 1,2mm). É utilizada na soldadura de chapas de fina espessura e pode ser realizada em todas as posições. Este modo é caracterizado por uma grande instabilidade do arco e grande geração de respingos, que podem ser controlados com a seleção correta dos parâmetros operacionais [6, 10]. Neste tipo de transferência, o metal na ponta do eletrodo é depositado durante repetidos curto-circuitos, formando um cordão de soldadura pequeno e de rápido resfriamento [9]. A gota de metal formada na ponta do eletrodo toca a poça de fusão, gerando um curto-circuito. Ela é, então, atraída para a poça pela tensão superficial desta [10]. Na Figura 2 está representado, esquematicamente, este tipo de transferência e a variação da tensão e da corrente durante a soldadura. Segundo Brien [9], não há transferência de metal pelo arco elétrico neste modo, apenas no contato com a poça de fusão, que ocorre entre 20 e 200 vezes por segundo. Além disso, segundo o mesmo autor, a composição gás de proteção afeta, significativamente, o diâmetro da gota e a duração do curto-circuito, além de influenciar as características operacionais do arco elétrico e a penetração do cordão no metal de base. Por exemplo, o uso de CO<sub>2</sub> produz maiores níveis de respingo quando comparados ao uso do Hélio e do Argônio, mas atinge maior penetração na peça. Para se obter um equilíbrio entre níveis de respingos e penetração na soldadura de aço-carbono e aço de baixa liga é comumente utilizada uma mistura de CO<sub>2</sub> e argônio como gás de proteção.

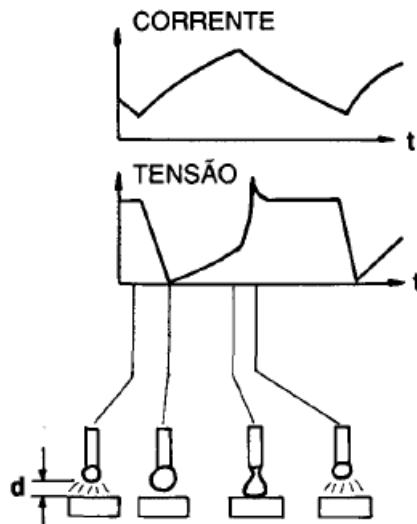


Figura 2: Esquema do modo de transferência curto-circuito, mostrando o comportamento da tensão e da corrente de soldadura durante a transferência [10].

b) *Transferência globular:* é caracterizado por uma gota de metal fundido de diâmetro maior que o do eletrodo consumível que é transferido para a poça de fusão por meio da ação da gravidade, sendo assim mais utilizada em soldadura na posição plana [6,9,10]. O diâmetro médio da gota varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta [6]. A Figura 3 representa o modo de transferência globular e o comportamento da corrente e tensão de soldadura durante o processo.

Em faixas de corrente pouco maiores que a utilizada na transferência por curto-circuito, pode-se alcançar um deslocamento axial da gota formada, com o uso de gases inertes. Se o comprimento do arco for curto (indicando baixa voltagem) a gota entra em contato com a superfície de trabalho antes de sua completa formação, gerando curto-circuito na peça de trabalho, causando sobreaquecimento e desintegração desta região, provocando respingos. Portanto, o arco deve ser suficientemente grande para garantir o despreendimento da gota antes do contato com a poça de fusão. Porém, uma soldadura realizada com valores de tensão mais elevados podem causar fusão incompleta, falta de penetração e/ou reforço excessivo do cordão de solda [10]. Este modo ocorre, mais usualmente, quando são utilizados  $\text{CO}_2$  e hélio como gás de proteção [9].

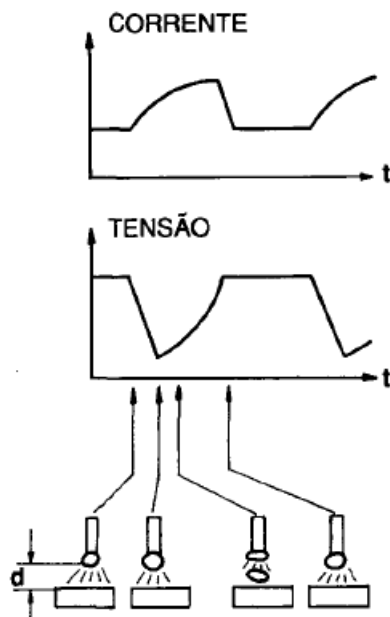


Figura 3: Transferência globular e a variação da tensão e da corrente de soldadura durante o processo [10].

c) *Transferência por Spray*: com o aumento da corrente de soldadura, o diâmetro das gotas de metal fundido que se transferem para a peça diminuem até que o valor da corrente atinge uma faixa estreita de valores, conhecida como “corrente de transição” em que a transferência deixa de ser globular e passa a ser por spray ou aerossol [6]. Neste modo, as gotas são pequenas, com diâmetro menor que do eletrodo e em número elevado e são transferidas axialmente através do arco elétrico [6,10]. Devido ao elevado valor de densidade de corrente, a quantidade de calor gerado é adequada à soldadura de chapas grossas, não sendo aplicadas para chapas finas, podendo cortá-las em vez de as soldar [9]. A Figura 4 demonstra, esquematicamente, como ocorre a transferência metálica por *spray* e a variação da tensão e da corrente de soldadura durante o processo.

O modo *spray* gera um fluxo de metal fundido que é transferido axialmente para a poça de fusão em velocidades que superam os efeitos da gravidade, sendo assim, possível de ser aplicada para a soldadura em todas as posições. Porém, a alta taxa de deposição deste meio pode produzir um cordão de soldadura muito largo para ser suportado pela tensão superficial na posição vertical ou sobrecabeça, por isso, esta transferência é geralmente limitada à posição plana e horizontal [10].

Como o diâmetro das gotas são menores que o comprimento do arco, não ocorrem curto-circuitos, sendo assim o arco é bastante estável, há pouca ou nenhuma ocorrência de respingos e o cordão formado é suave e regular [6][10].

A transferência por *spray* ocorre com o uso de argônio ou uma mistura de gases rica em argônio como gás de proteção [9].

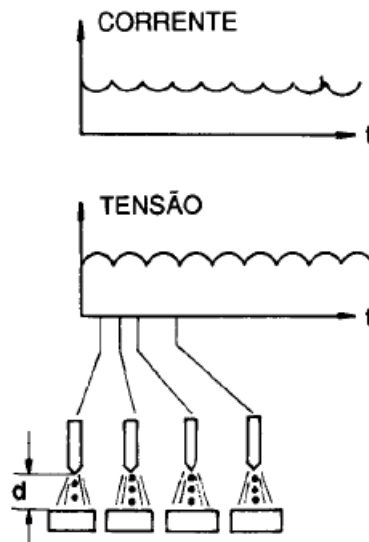


Figura 4: Transferência por spray e o comportamento da corrente e tensão de soldadura durante o processo [10].

Na Tabela 1 estão representados os valores da corrente de transição de globular para *spray* para soldadura de aço carbono e aço inoxidável e diferentes diâmetros de arame.

Tabela 1: Corrente de transição globular-spray de diferentes aços e eletrodos. (Adaptado de [6,11])

Material	Diâmetro do Arame (mm)	Gás de Proteção	Corrente de transição (A)
Aço Carbono	0,8	98% Argônio + 2% de Oxigênio	150 -160
	1,0		180-190
	1,2		220-240
	1,6		260-280
Aço Carbono	0,8	95% Argônio + 5%CO <sub>2</sub>	135-145
	1,0		180-190
	1,2		230-250
	1,6		270-285
Aço Carbono	0,8	80% Argônio + 20%CO <sub>2</sub>	155-165
	1,0		200-210
	1,2		265-280
	1,6		320-345
Aço Inoxidável	0,8	98% Argônio + 2% de Oxigênio	160-170
	1,0		160-170
	1,2		210-230
	1,6		260-270

### 2.2.3) Variáveis do Processo e a Influência dos Parâmetros no Cordão de Soldadura.

Como dito anteriormente, o processo GMAW possui um grande número de variáveis envolvidas no processo e que são interdependentes entre elas, o que dificulta a otimização dos parâmetros.

As principais variáveis de soldadura do processo GMAW são a tensão, corrente e polaridade do arco de soldadura, velocidade de soldadura, composição e vazão do gás de proteção, *stick-out* (diâmetro e comprimento do eletrodo percorrido pela corrente elétrica), velocidade de alimentação do arame eletrodo e a orientação da tocha de soldadura [5,6,9,12]. A seguir serão apresentadas algumas destas variáveis e qual o efeito que cada um produz sobre o cordão de soldadura.

A corrente de soldadura influencia na penetração, largura e reforço do cordão de soldadura, na taxa de deposição, na energia de soldadura e no modo de transferência metálica [5,6]. O valor da corrente é dado em função da espessura das peças a se unir, da geometria esperada do cordão e do diâmetro do eletrodo [6]. Além disso, a corrente de

soldadura varia diretamente com a velocidade de alimentação do eletrodo (desde que a extensão do eletrodo seja constante) [9,12]. Quando todas as outras variáveis são mantidas constantes, um aumento na corrente de soldadura implica no aumento da profundidade e largura do cordão de solda, no aumento da taxa de deposição e um aumento no tamanho do cordão final [9].

A tensão está diretamente relacionada ao comprimento do arco que, por sua vez, controla a geometria do cordão, a penetração e a quantidade de respingos [12]. A tensão depende de algumas variáveis, dentre elas o material a ser trabalhado, o gás de proteção, o modo de transferência de metal desejado e a corrente de soldadura definida [6,9]. Mantida constante as outras variáveis, a tensão está diretamente relacionada com o comprimento do arco, que é uma variável de maior interesse do que propriamente a tensão, porém, como é mais fácil de se controlar a tensão, esta é mais comumente utilizada para definição dos parâmetros [9].

Com o aumento da tensão, aumenta-se a área aquecida na superfície de trabalho, aumentando, assim, a poça de fusão [5]. Por isso, um aumento da tensão pode causar excesso de respingos, cordão de soldadura mais baixo, largos e com menor penetração, além de poder ocasionar mordeduras [5,6,9,10]. Tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito, que causam maior instabilidade do arco. Tal instabilidade facilita a entrada de gases da atmosfera na poça de fusão, causando o problema de porosidade [6].

O *stick-out* é a distância entre a extremidade do bico de contato e a peça a ser trabalhada, também denominada extensão do eletrodo. O *stick-out* afeta a corrente de soldadura necessária para fundir o eletrodo a uma certa velocidade de alimentação do arame. Quando a distância bico-peça é aumentada, menor é a corrente de soldadura necessária para fundir o arame pelo efeito Joule [13].

Grandes extensões do eletrodo podem causar um excesso de deposição de metal de solda com baixo calor do arco, gerando imperfeições no cordão e baixa penetração, além de tornar o arco menos estável [13].

A velocidade de soldadura é definida como a velocidade em que o arco elétrico se move ao longo da junta. Este parâmetro influencia a quantidade de calor cedida à peça (aporte térmico), pois quanto mais rápido se desloca o arco elétrico, menor é a quantidade de calor por unidade de comprimento transferida para a peça. O controle da velocidade de soldadura permite, também, controlar a penetração e a área do cordão [14].

Altas velocidades de soldadura aumentam a tendência a mordeduras, extinção do arco, fissuras e falta de fusão do metal [6,14]. Já para velocidades muito baixas, o arco

elétrico colide com a poça de fusão, ao invés de colidir com o metal de base, reduzindo, assim, a penetração efetiva, chamado de efeito da sobreposição [9]. Além disso, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento aumenta, causando um cordão com maior largura e reforço [12].

Mantendo todas as outras variáveis constantes, a penetração atinge um valor máximo em velocidades intermediárias de soldadura. Isto ocorre porque em baixas velocidades de soldadura, conforme já foi dito, ocorre o efeito da sobreposição do arco sobre o cordão. Com o incremento da velocidade de soldadura, o arco passa a agir diretamente sobre o metal de base, aumentando o aporte térmico transferida para este, diminuindo o efeito da sobreposição e aumentando a penetração do cordão. Com o incremento da velocidade, se reduz a quantidade de calor transferida para a peça, diminuindo a penetração efetiva. Ou seja, em baixas velocidades de soldadura o efeito da sobreposição prevalece e para altas velocidades o efeito do aporte térmico predomina [14].

A Figura 5 apresenta o estudo de Pereira [15] que demonstra a variação da penetração em função da velocidade de soldadura e da corrente, sendo possível perceber que para um mesmo valor de corrente, a penetração máxima ocorre num valor intermediário da velocidade de soldadura.

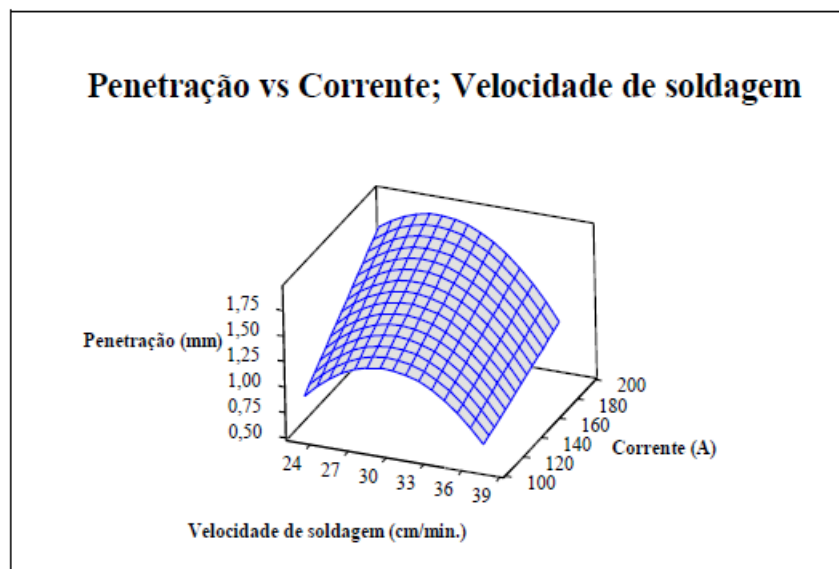


Figura 5: Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldadura para o processo GMAW-P [15].

A orientação da tocha de soldadura afeta o formato do cordão de soldadura e a penetração. A orientação da tocha pode ser dada em duas direções, o ângulo formado entre o eixo do eléctrodo com o sentido de deslocamento da tocha e o ângulo entre o eixo do eléctrodo e a superfície de trabalho [9]. Quando o sentido de alimentação do arame é o oposto ao sentido de deslocamento do arco, denomina-se técnica puxando, neste caso o arame é adicionado ao metal de solda já depositado. Quando o sentido de alimentação do eléctrodo é o mesmo da movimentação da tocha, é denominado técnica empurrando e, neste caso, o arame é adicionado diretamente na peça [13].

Mantida todas as condições inalteradas, a mudança de posição de perpendicular para empurrando, ocasiona menor penetração e o cordão fica mais largo e achatado. A técnica puxando produz um cordão mais convexo e mais estreito e um arco mais estável e com menos respingos [9]. A Figura 6 apresenta o efeito do ângulo entre o eléctrodo e o sentido de deslocamento da tocha no cordão de soldadura.

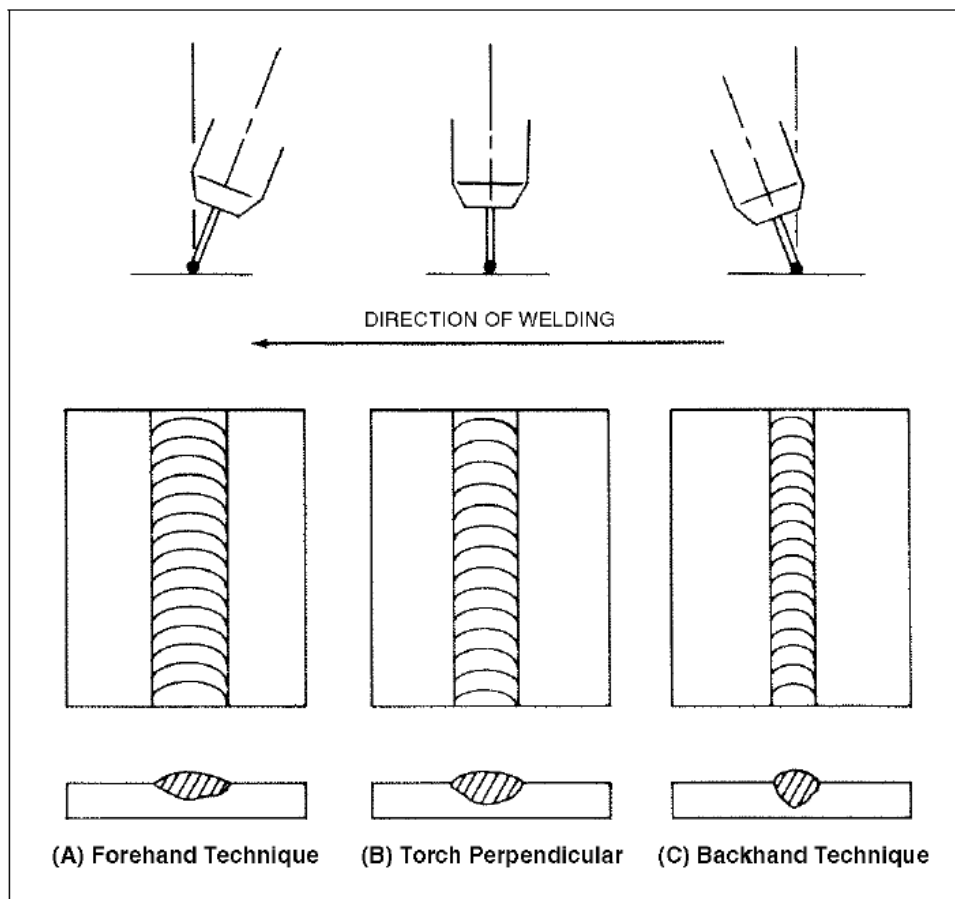


Figura 6: Efeito da orientação da tocha no cordão de soldadura para o sentido empurrando (A), perpendicular (B) e puxando (C) (Adaptado de Brien [9]).

Em várias bibliografias, é dito que para se obter a maior penetração, o ângulo de inclinação ótimo é o de 25° na técnica puxando [5,9,12].

Os gases de proteção são gases puros ou mistura de gases introduzidos na região de soldadura com a finalidade de proteger a poça de fusão e o metal fundido da ação da atmosfera exterior. Tal medida é necessária pois o metal fundido em contato com o ar tende a formar óxidos e, em alguns casos, nitretos. Por exemplo, o oxigênio reage com o carbono do aço fundido vindo a formar CO e CO<sub>2</sub>. Estes produtos podem resultar em discontinuidades do cordão de soldadura, como inclusão de escória, porosidade e fragilização do metal soldado [9].

Além da função de proteção, o gás também influencia a estabilidade do arco, no modo de transferência metálica, na geometria, propriedades mecânicas e metalúrgicas do cordão de soldadura [14].

O gás mais utilizado em processos de soldadura é o argônio e suas misturas, devido à disponibilidade e o baixo potencial de ionização [5]. A adição de pequenos teores de gases ativos (CO<sub>2</sub> e/ou oxigênio) aos gases inertes (ex.: Argônio - Ar) tendem a melhorar a estabilidade do arco, diminuir a ocorrência de respingos e de mordeduras e aumentar a penetração [10]. A soldadura com Ar + CO<sub>2</sub> tende a apresentar maior largura e menor reforço, pois o arco elétrico gerado incide em uma maior área do metal de base [15]. Além disso, a adição de argônio, melhora a aparência do cordão, diminuindo a quantidade de respingos e gera um arco de temperatura menor, sendo ideal para soldadura de chapas finas. Em contrapartida o argônio encarece a mistura [10]

O arco gerado com o uso de CO<sub>2</sub> puro tende a ser mais constrito, causando redução da largura do cordão e aumentando o reforço. Esta constrição causa uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, aumentando a penetração [14].

## **2.3 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA**

A seguir serão vistas as principais dimensões do cordão de solda (Figura 7) e suas definições, bem como as variáveis do processo que as influenciam.

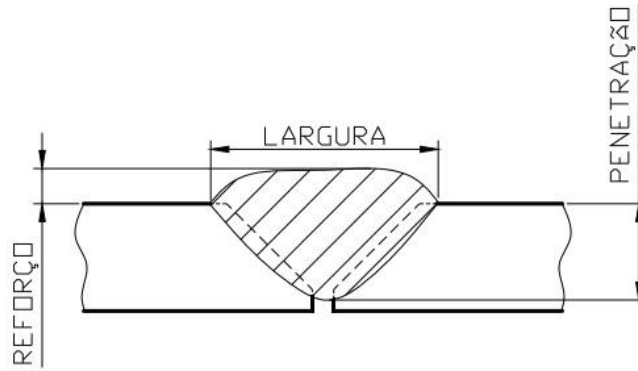


Figura 7: Principais dimensões do cordão de solda [16].

### **2.3.1) Penetração**

Segundo Fortes e Vaz [13] a penetração de solda é a distância que a linha de fusão se estende abaixo da superfície do material sendo soldado. Como já dito na seção anterior, a corrente e tensão de soldadura, a extensão do eletrodo, a posição da tocha e a velocidade de soldadura têm efeito sobre a penetração total do arco elétrico.

Geralmente, para o processo GMAW, a penetração é pequena e estreita, ou seja, em formato de “dedo”, o que gera um risco de falta de fusão, não preenchendo completamente a junta soldada [17].

### **2.3.2) Largura e Reforço**

Duas características principais do cordão de solda são a largura e o reforço do cordão. Estas características são essenciais para garantir que a junta soldada seja preenchida adequadamente, evitando que venha a ocorrer defeitos de soldadura. Um cordão de solda com um reforço excessivo pode dificultar os passes subsequentes e quanto mais protuberante e estreito for um cordão, maiores são as chances de ocorrer falta de fusão [13].

A corrente e a velocidade de soldadura são os parâmetros de maior influência na aparência final do cordão de solda. Isso se dá pelo motivo de que o principal regulador da dimensão do cordão de solda é a taxa de deposição do metal de solda sobre o metal de base, variável que é bastante afetada pela corrente e velocidade de soldadura. Corrente de

soldadura e o tamanho do cordão de solda variam no mesmo sentido, já a velocidade de soldadura varia inversamente à dimensão do cordão de solda [13].

A tensão de soldadura também é utilizada para controlar o formato do cordão de solda. Um aumento na tensão do arco ocasiona numa diminuição da altura do cordão e incremento da largura. O aumento da largura do cordão causa um achatamento do seu topo, o que traz benefício para o processo de soldadura, pois o metal de solda “molha” o metal de base com maior eficiência, melhorando a fusão do metal de base [13].

Segundo a norma AWS 3.0, o reforço de solda é a quantidade de metal de solda em excesso necessário para preencher uma junta. Por esta definição, é possível perceber que o reforço é uma característica desnecessária para o cordão, sendo preciso minimizar o máximo possível a sua altura [18].

Além disso, durante um possível carregamento dinâmico, na região da margem entre o metal de base o reforço da solda, por ser uma região de descontinuidade, pode haver uma concentração de tensões, ocorrendo um pico de tensões devido ao carregamento submetido, vindo a ser a região de surgimento de fissuras e levando o material a falhar [18].

Pelos motivos citados, o ideal, após a realização da soldadura, é remover todo o reforço de solda presente, quando possível. Essa remoção é, geralmente, feita a partir do esmerilhamento do reforço.

## **2.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA**

Para avaliar a qualidade do cordão de solda, vários ensaios e testes podem ser realizados a partir do cordão, a fim de verificar sua geometria, qualidade e resistência. Estes ensaios podem ser definidos como ensaios destrutivos ou não-destrutivos.

Segundo Castro [19] citando ABENDE [20] os ensaios não destrutivos são os realizados nos materiais para verificar a existência de defeitos ou de descontinuidades na peça, sem alteração de suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, sendo possível o seu uso posterior aos ensaios.

Ensaio destrutivos são aqueles que deixam marcas na peça de trabalho após a realização, podendo ou não, prover sua inutilização após a realização do ensaio [20]. Entre os ensaios destrutivos podemos destacar o ensaio de dureza, de dobramento e de tração, que será utilizado neste presente trabalho.

Para avaliação da geometria da peça, é realizada uma análise macrográfica da peça, que será discutida futuramente.

#### 2.4.1) Ensaio de Tração em Juntas Soldadas

Este ensaio tem como objetivo avaliar a resistência mecânica e a ductilidade de uma junta soldada [19]. A partir deste teste é possível avaliar a capacidade do material em suportar solicitações quando lhe é aplicado uma força uniaxial, através de uma máquina, durante um intervalo de tempo até à sua rutura, podendo determinar as suas propriedades mecânicas, como: limite de resistência a tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade e alongamento [21].

Como resultado do teste é obtida uma curva de Tensão x Deformação do material e, através dela, é possível determinar as propriedades mecânicas supracitadas e se o material é dúctil ou frágil [5]. A trajetória da curva (Figura 8) é feita pelo registo das deformações ocorridas no material na direção da tensão aplicada, para cada valor de tensão durante o carregamento [22].

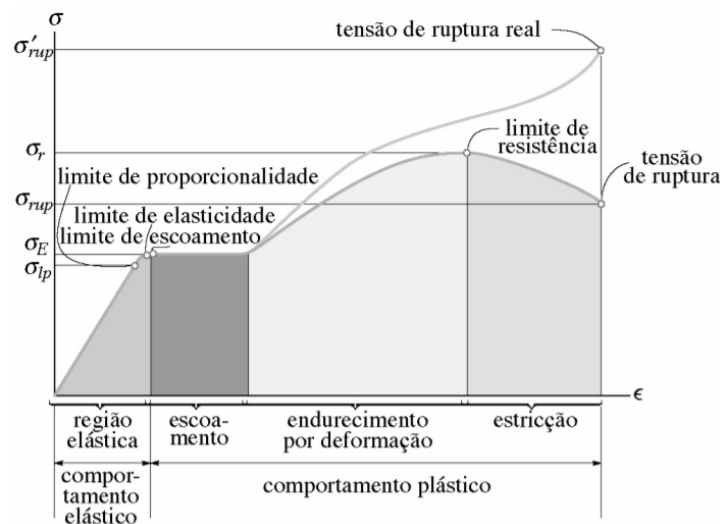


Figura 8: Diagrama de Tensão x Deformação convencional e real para material dúctil (aço) (sem escala) [21].

A deformação elástica corresponde a uma deformação não permanente do material, ou seja, após a remoção da carga aplicada, a peça retorna à sua dimensão original. Durante este regime a tensão e a deformação são proporcionais (como visto no gráfico da Figura 8), obedecendo à Lei de Hooke ( $\sigma = E\varepsilon$ ) [23].

À medida que o material é deformado, ele ultrapassa a região do comportamento elástico, a tensão não varia proporcionalmente com a deformação e ocorre uma deformação permanente no material, denominada deformação plástica. Para grande parte dos materiais metálicos, a deformação elástica ocorre entre deformações de 0,2 a 0,5% da dimensão original da peça [23].

A deformação plástica ocorre mediante o corte da peça, envolvendo a movimentação entre as discordâncias ocorridas no material. O ponto de escoamento (ou cedência) determina a transição do comportamento elástico e plástico do material com ou sem patamar de escoamento (cedência) [23,24].

Após ocorrer o escoamento, a tensão no material continua a aumentar, mantendo o regime plástico, até que se atinja um valor máximo, a partir daí a tensão diminui até ocorrer a fratura do material. Este valor máximo atingido é o limite de resistência à tração da peça.

Para realização do ensaio de tração, assim como em outros testes e ensaios, existem normas que regulamentam a realização destes ensaios. No caso do ensaio de tração, a norma reguladora é a ISO 6892-1:2009 denominada “Ensaio de Tração – Materiais metálicos – Método de teste à temperatura ambiente” [25].

Porém, há uma norma específica para os testes de tração realizados em juntas soldadas e que segue o mesmo padrão da ISO 6892-1, que é a ISO 4136:2012 denominada “Ensaio Destrutivo em Soldaduras em Materiais Metálicos – Teste de Tração Transversal” [26].

Segundo a norma ISO 4136:2012 o corpo de prova para realização do ensaio de tração deve ser retirado na seção transversal do cordão de solda e deve possuir uma dimensão especificada de acordo com a dimensão do material original. As dimensões normalizadas dos provetes para o teste de tração (Figura 9) serão mostradas na Tabela 2.

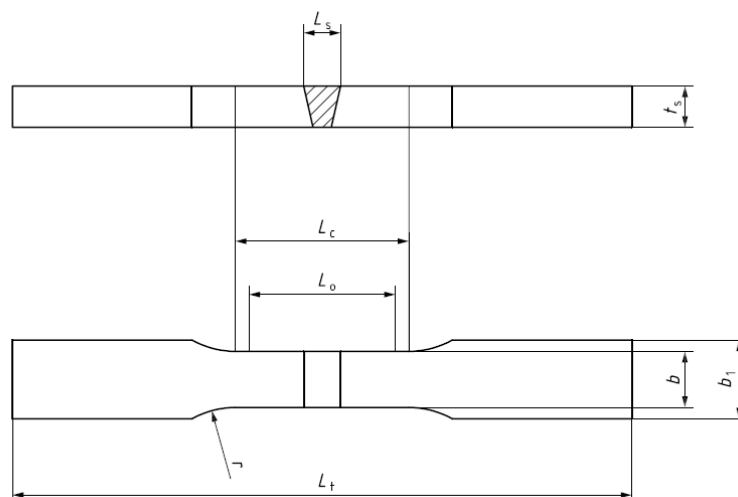


Figura 9: Representação do corpo de prova de acordo com a norma ISO 4136:2012 [26].

Tabela 2: Dimensões normalizadas dos provetes de acordo com a norma ISO 4136:2012 (dimensões em mm) [26].

Denominação	Símbolo	Dimensões
Comprimento total do corpo de prova	$L_t$	De acordo com a máquina utilizada para o teste
Largura da cabeça	$b_1$	$b + 12$
Largura do comprimento paralelo	$b$	12 para $ts \leq 2$ 25 for $ts > 2$
Comprimento paralelo	$L_c$	$\geq L_s + 60$
Raio de concordância	$r$	$\geq 25$

#### 2.4.2) Macrografia

A macrografia é utilizada para verificar a qualidade e a geometria do cordão de solda e se ela atende aos requisitos previamente definidos.

Um ensaio macrográfico consiste na verificação, a olho nu ou com uma ampliação até 50 vezes, do aspeto de uma superfície plana preparada após ser polida e atacada por uma substância que reage com a superfície lixada revelando detalhes macrográficos da junta soldada [4,27].

A preparação da superfície a ser analisada é constituída pela etapa de corte ou desbaste, de lixamento, polimento e o ataque químico.

A seção do corpo de prova deve ser cortada, preferencialmente, com uso de um material abrasivo que eliminam a influência do trabalho mecânico de operações mais severas (como o torneamento, esmerilhamento e entre outros), por possuírem um sistema de refrigeração que resulta numa amostra com baixa rugosidade da superfície [5]. Caso este método não seja possível, é recomendado o desbaste da seção por meio de esmeril

ou plaina, finalizando a operação com uma lixa fina. Nestes processos, deve-se evitar o encruamento local do material, bem como o aquecimento da peça a temperaturas superiores a 100°C, para evitar distorções nos resultados do ensaio [27].

Antes do lixamento o corpo de prova é embutido numa resina. O embutimento garante que a amostra possua maior planicidade [5].

O lixamento deve ser executado por uma série de lixas com granulação decrescente, tomando ao cuidado de sempre proceder o lixamento na direção perpendicular ao executado anteriormente. Para a macrografia, não é necessário um polimento muito elevado [27].

Por fim, o material é submetido a um ataque químico em que a amostra é colocada em contato com um reagente químico específico para aumentar o contraste entre as fases [4]. O ataque pode durar de alguns segundos a alguns dias, podendo ser a frio (quando realizado a temperatura ambiente) ou a quente [27].

Os reagentes químicos são, geralmente, soluções ácidas, alcalinas ou complexas que são dissolvidas num solvente – principalmente álcool e água. Os reagentes mais utilizados são o ácido clorídrico ou muriático, reativo de iodo, reativo de persulfato de amônio e reativo nital [27].

## **2.5 MÉTODO TAGUCHI**

O Método Taguchi foi desenvolvido pelo Dr. Genichi Taguchi, engenheiro e estatístico japonês que desenvolveu novos métodos de otimização no planejamento de experimentos. A abordagem criada por Taguchi permitiu criar, além de um poderoso método de desenho de experiências, um conceito de condução prática que traz diversas melhorias na qualidade final, diferente das práticas que eram conhecidas anteriormente, como o planejamento fatorial [28].

O Método Taguchi faz parte de uma metodologia conhecida como Planejamento de Experimentos (em inglês, DOE – *Design of Experiments*) que visa melhorar uma ou mais características de um determinado produto ou processo de acordo com a necessidade do projeto [29].

Tal método baseia-se em um desenho de experiência utilizando arranjos ortogonais e controlando-se, estrategicamente, os níveis das variáveis de entrada de forma a analisar como elas afetam o resultado da característica desejada.

O processo de planejamento de experimentos segue 3 macro etapas [29]:

- 1) Fase de Planeamento;
- 2) Fase de Condução;
- 3) Fase de Análise.

A fase de análise é a fase mais importante em termos estatísticos, porém, para o sucesso da qualidade final do experimento a fase de planeamento e de condução apresentam maior relevância.

Segundo Ross [29], dentro destas 3 etapas principais temos os seguintes passos para um planeamento de experimentos completos:

- 1) Definição do(s) problema(s) ou área de interesse;
- 2) Definição do(s) objetivo(s) do experimento;
- 3) Seleção das características de qualidade que serão estudadas e dos sistemas de medições;
- 4) Seleção dos fatores (parâmetros) que podem influenciar as características definidas;
- 5) Identificar fatores de controle e de ruído;
- 6) Selecionar os níveis dos fatores (quantos serão e quais os respectivos valores);
- 7) Selecionar o arranjo ortogonal apropriado;
- 8) Apurar as interações entre os fatores que podem influenciar na característica de qualidade estudada;
- 9) Desenhar o arranjo ortogonal juntamente aos fatores e níveis escolhidos, definindo a interação entre estes;
- 10) Conduzir os testes de acordo com o arranjo ortogonal;
- 11) Analisar e interpretar os resultados dos testes;
- 12) Realizar o experimento de confirmação.

As etapas de 1 a 9 se encontram na fase de planeamento, a etapa 10 pertence à fase de condução e as etapas 11 e 12 à fase de análise.

Relativamente à etapa 5, define-se fatores de controle como aqueles que podem ser variados pelo operador (como as variáveis de entrada num processo de soldadura – tensão, velocidade de soldadura e outros) e fatores de ruído são aqueles que não podem ser controlados [1].

Segundo Moita [28] citando Park [30] os ruídos podem ser definidos em três tipos:

- Ruídos externos: são fatores ambientais externos que podem afetar o experimento, como: temperatura ambiente e humidade;
- Ruído interno: são desgastes que ocorrem no produto durante o seu armazenamento;
- Ruído unidade a unidade: diferenças individuais que podem ocorrer durante o processo de fabrico do produto devido a, por exemplo, variações no *setup* da máquina.

Futuramente, neste capítulo, será discutido como é realizado o tratamento dos fatores de ruído num experimento baseado no modelo de Taguchi.

O uso dos arranjos ortogonais trouxe uma evolução deste método em relação ao método clássico de DOE que existiam antes do desenvolvimento de Taguchi. A principal vantagem do uso destes arranjos é a possibilidade de avaliar vários fatores, simultaneamente, em um menor número de testes, evitando-se, assim, custos excessivos de projeto [29].

A seleção de um arranjo ortogonal depende de: [29]

- O número de fatores (parâmetros) e interações de interesse;
- O número de níveis para os fatores de interesse;
- As limitações de custo e a resolução experimental desejada.

Assim, é construído um arranjo do tipo  $L_n$ , em que “n” representa o número de experimentos a serem efetuados. A Tabela 3 apresenta os arranjos ortogonais possíveis para um determinado experimento, de acordo com o número de fatores e de níveis escolhidos.

Tabela 3: Seleção do arranjo ortogonal (Adaptado de [36])

Número de níveis	Número de Parâmetros									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	
3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	
4	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32	
5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	

Após a seleção do arranjo ortogonal ideal, cada teste (que consiste numa combinação de níveis dos fatores) deve ser colocado de forma aleatória, de forma a

proteger o experimento de fatores desconhecidos e incontroláveis que podem variar durante os experimentos, podendo afetar os resultados [29].

Neste trabalho os experimentos serão distribuídos de maneira aleatória usando o método da simples repetição, em que cada teste tem a mesma chance de ser selecionado como o primeiro, porém, após a seleção deste, todas as repetições deste teste serão realizadas em seguida.

### ***2.5.1 Razão Sinal-Ruído***

Para medir o quanto a característica de qualidade se desvia do valor desejado, o método Taguchi recomenda o uso da função de perda, que é posteriormente transformada na razão sinal-ruído.

A razão sinal-ruído mede o quão sensível é a característica de qualidade estudada de uma maneira controlada em relação aos fatores não-controláveis, os fatores de ruído (conforme explicados na secção anterior) [3].

É possível tratá-la, também, como a medida da variação em um experimento quando fatores de ruído estão presentes [1]. Taguchi criou esta razão para a transformação dos dados relativos a cada teste (e suas repetições) em um valor que mede a variação presente entre cada repetição. Para tal estudo, é necessário que pelo menos uma repetição seja realizada para cada teste descrito no arranjo ortogonal desenhado [29].

Dependendo do objetivo pretendido para a característica de qualidade, ela pode ser classificada em três categorias: maior é o melhor, nominal é o melhor e o menor é o melhor [32].

Independentemente da categoria selecionada para o atributo de qualidade, uma maior razão sinal-ruído (S/N) corresponde a uma melhor performance da característica selecionada. Isso serve para quando se trata de apenas uma característica selecionada, quando é necessário considerar mais de uma característica, a maior razão S/N para uma qualidade pode ser a menor razão S/N para outra estudada. Logo, devem ser incluídas mais funções de perda relativas a cada atributo considerado, melhorando a correlação entre estas razões S/N e as características desejadas. O Método Taguchi baseado em Grey permite integrar as funções de perda individuais em uma única função de perda geral e, assim, obter as configurações de parâmetros ideais que contemplem todas as características desejadas [1,3].

Quando se deseja minimizar a resposta para a característica de qualidade escolhida, o atributo “menor é o melhor” é escolhido, e a razão  $S/N_s$  é calculada segundo a equação 1 [32]:

$$S/N_s = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2\right) \quad (1)$$

Quando o objetivo é maximizar a resposta da característica de qualidade, é selecionado o atributo “maior é o melhor” e a razão sinal-ruído é calculada de acordo com a equação 2 [32]:

$$S/N_L = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (2)$$

Tanto para a equação 1 quanto para a 2,  $n$  representa o número de observações realizadas e  $Y_i$  os dados observados.

Quando dizemos que um valor nominal é o melhor, ou seja, há um valor ideal para tal característica de qualidade, a razão sinal-ruído é calculado de acordo com a equação 3 [33]:

$$S/N_N = 10 \times \log\left(\frac{\bar{Y}^2}{\sigma^2}\right) \quad (3)$$

A variável  $\bar{Y}$  é a média dos dados dos experimentos e  $\sigma$  é o desvio padrão. Neste caso, é criada uma resposta alvo e a razão sinal-ruído é baseada somente nas médias e no desvio padrão.

## 2.6 ANÁLISE RELACIONAL DE GREY

A teoria do sistema de Grey foi proposta por Deng Julong em 1982 e tem sido aplicada em diversas áreas bem como na engenharia industrial, economia, agricultura e em estudos sociais [35,36].

A análise relacional de Grey (ARG), que foi originada a partir da teoria do sistema de Grey, é um método de medição que determina a correlação entre uma sequência de resultados usando uma certa quantidade de dados. A principal vantagem da ARG, assim como o método Taguchi, em relação a outros métodos estatísticos de análise é que a análise de Grey requer apenas uma pequena quantidade de dados, podendo limitar a quantidade de ensaios a um número reduzido [36].

A Análise Relacional de Grey resolve problemas envolvendo tomada de decisão de múltiplos atributos (*multi-attribute decision making*, em inglês) combinando toda a gama das características de desempenho (ou de qualidade) que estão sendo avaliadas no processo em um único valor, que é o grau relacional de Grey, permitindo que a decisão dos valores ótimos seja agora dada sobre apenas um valor. A combinação paramétrica ideal é, então, avaliada maximizando-se o valor do grau relacional de Grey. [34,35]. Isto confere uma vantagem sobre o método de Taguchi, que só permitia avaliar a influência dos fatores sobre apenas uma característica de qualidade do processo ou produto, já utilizando Grey, é possível analisar a combinação ótima de fatores que irá atender a todo o conjunto dos resultados esperados.

A seguir será demonstrado o passo a passo desenvolvido para o cálculo do grau relacional de Grey, que será seguido neste trabalho para avaliar qual o nível ótimo dos parâmetros selecionados que irão alcançar as características de qualidade desejadas durante a soldadura GMAW.

### ***2.6.1) Normalização da razão sinal-ruído***

Na análise relacional de Grey é realizado um reprocessamento de dados já obtidos anteriormente no intuito de se normalizar os dados não tratados. Uma normalização linear é executada sobre os resultados obtidos para cada característica de qualidade analisada obtendo-se um valor que vai de 0 (zero) a 1 (um). Assim como o cálculo da razão sinal-ruído, a normalização segue equações diferentes de acordo com a resposta desejada para cada característica de qualidade [1, 34, 37].

A normalização dos dados experimentais quando o atributo “menor é o melhor” é escolhido para a característica de qualidade é dado segundo a equação 4 [1,35,36,37]:

$$\gamma_i^*(k) = \frac{\max \gamma_i(k) - \gamma_i(k)}{\max \gamma_i(k) - \min \gamma_i(k)} \quad (4)$$

Onde  $\gamma_i^*(k)$  representa o valor do dado normalizado,  $\gamma_i(k)$  é a k-ésima resposta do i-ésimo experimento,  $\max \gamma_i(k)$  é o maior valor de  $\gamma_i(k)$  para a k-ésima resposta e  $\min \gamma_i(k)$  é o menor valor de  $\gamma_i(k)$  para a k-ésima resposta.

Quando o atributo “maior o melhor” for escolhido para a resposta analisada, a normalização é dada segundo a equação 5 [1,3,32,34,35,37]:

$$\gamma_i^*(k) = \frac{\gamma_i(k) - \min \gamma_i(k)}{\max \gamma_i(k) - \min \gamma_i(k)} \quad (5)$$

Para a característica “nominal é melhor” a normalização dos dados é calculada de acordo com a equação 6 [38, 39]:

$$\gamma_i^*(k) = \frac{|\gamma_i(k) - y_{ob}|}{\max\{\max \gamma_i(k) - y_{ob}; y_{ob} - \min \gamma_i(k)\}} \quad (6)$$

Neste caso  $y_{ob}$  representa o valor nominal ao qual se deseja obter para a resposta selecionada.

Quando os experimentos são realizados sem repetições, a normalização dos dados é processada sobre os resultados obtidos para cada experimento e para cada resposta analisada, aplicando as equações 4, 5 e 6, conforme a particularidade das respostas. Quando há repetição dos ensaios, a normalização é realizada sobre a razão S/N calculada para cada experimento e para cada característica de qualidade, assim já serão agrupados todas os resultados obtidos pelas repetições. Neste último caso, o processamento dos dados é feito a partir da equação 5, pois para a razão S/N sempre é desejado o maior valor possível.

### **2.6.2) Coeficiente Relacional de Grey**

Após realizada a normalização linear dos valores da razão sinal-ruído obtidos nos experimentos, já é possível calcular o coeficiente relacional de Grey que expressa a relação entre o melhor (ideal) e o resultado real. O coeficiente relacional de Grey é calculado de acordo com a equação 7 a seguir [1,32,36,37]:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta\Delta_{max}} \quad (7)$$

Em que  $\varepsilon_i(k)$  é o coeficiente relacional de Grey para o  $i$ -ésimo experimento e a  $k$ -ésima resposta,  $\Delta_{0i}(k)$  é a diferença entre o valor ideal ou de referência  $\gamma_0^*(k)$  dos valores normalizados (geralmente este valor é dado com 1) e  $\gamma_i^*(k)$  que é o valor normalizado para o  $i$ -ésimo experimento e a  $k$ -ésima resposta,  $\Delta_{max}$  é o maior valor de  $\Delta_{0i}(k)$ , ou seja, a maior diferença entre o valor ideal normal e o  $\gamma_i^*(k)$  e  $\Delta_{min}$  é o menor valor de  $\Delta_{0i}(k)$  e  $\zeta$  é o coeficiente distintivo. Este coeficiente  $\zeta$  varia entre 0 e 1 e usualmente na literatura é utilizado o valor de 0,5 [31,36].

### 2.6.3) Grau Relacional de Grey (GRG)

Após o cálculo do Coeficiente Relacional de Grey, o GRG é calculado pela média do coeficiente correspondente a cada atributo de performance escolhido. Sendo assim, obtém-se o Grau Relacional de Grey a partir da equação 8 [3,36,40,41]:

$$\Gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (8)$$

Em que  $\Gamma_i$  representa o valor do GRG para o  $i$ -ésimo experimento e  $n$  representa o número de respostas analisadas. O Grau Relacional de Grey representa a correlação entre a sequência ideal (ou de referência) e as obtidas. Se as duas sequências forem idênticas, então o seu valor de GRG será 1. Assim, quanto maior o valor do grau relacional (que varia de 0 a 1), maior a relevância daquela sequência de resultados sobre o cenário ideal [40,41].

### 2.6.4) Teste de Confirmação

Após o cálculo do grau relacional de Grey e a determinação da combinação ótima dos fatores de controle é necessário efetuar um teste de validação para avaliar o quanto a abordagem do método Taguchi contribui para a melhora do processo [1,3,32]. O grau

relacional de Grey estimado, usando o nível ideal dos parâmetros determinados pela análise relacional de Grey, é calculado segundo a equação 9 [1,32,34]:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q \bar{\eta}_i - \eta_m \quad (9)$$

Em que:

- $\hat{\eta}$  é o grau relacional de Grey estimado para a combinação ótima de parâmetros;
- $\eta_m$  é a media total do grau relacional de Grey de todos os experimentos;
- $\bar{\eta}_i$  é o Grau relacional para o nível ótimo de cada parâmetro;
- $q$  é o número de parâmetros significantes para o processo.

## 2.7) ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância é uma técnica utilizada para comparação entre mais de 2 níveis de uma ou mais variáveis de teste e também para verificar se as médias de três ou mais grupos (ou níveis, no caso deste trabalho) são diferentes [42,43].

As variâncias são uma medida de dispersão, que avaliam o quão distante os dados de uma população estão distantes de sua média.

Um dos objetivos da análise de variância é observar se há diferença significativa entre a distribuição de resultados em uma amostra de três ou mais grupos. As hipóteses do teste são mostradas na Figura 11 e descritas a seguir [43,45]:

- $H_0$  ou hipótese nula: não existe diferença significativa entre as amostras de resultados, ou seja, as médias populacionais são iguais ( $H_0 = \mu_A = \mu_B = \mu_C$ );
- $H_1$  ou hipótese alternativa: existe diferença significativa de resultados entre 2 ou mais amostras ( $\mu_A \neq \mu_B$  e/ou  $\mu_A \neq \mu_C$  e/ou  $\mu_B \neq \mu_C$ ).

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	$SS_T = n \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{\bar{x}})^2$	$nk - 1$		

Figura 10: Cálculos para realização da análise de variância a partir da tabela ANOVA [5].

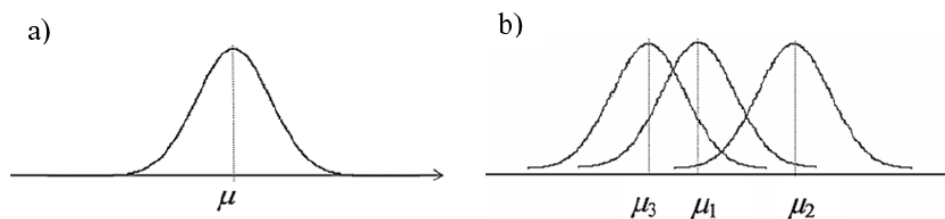


Figura 11: Distribuições populacionais para quando a) a hipótese nula é verdadeira e b) quando a hipótese nula é falsa [5].

Para o desenvolvimento da análise de variância é necessária a execução de uma tabela ANOVA, conforme descrita na Figura 10, para os cálculos de cada fator pertencente à ANOVA.

- A soma dos quadrados é uma medida da variação para os diferentes componentes do modelo. Quando aplicada entre os grupos, ela quantifica a variação nos dados de resposta que é explicada pelo grupo, já quando é calculada dentro dos grupos ela quantifica a variação nos dados que não são explicados pelo modelo proposto (ou pela experimentação) [44];
- Os graus de liberdade (GDL) são a quantidade de informações totais no modelo [44];
- Os quadrados médios são a razão da soma dos quadrados pelo grau de liberdade e representa a variação entre as médias amostrais [44];
- O valor F é a estatística de teste utilizada para determinar se um fator de controle do modelo está associado com a resposta e o quanto de influência ele exerce sobre esta resposta [31,45].

A aplicação da ANOVA em um experimento Taguchi permite, também, identificar quais fatores são significantes para o aumento do valor da razão S/N e, conseqüentemente, para a redução da razão [29].

# CAPÍTULO III

## 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias e os procedimentos adotados para a realização deste trabalho, desde o planeamento dos experimentos até a obtenção dos resultados, bem como, os materiais utilizados para este fim.

Todas as práticas e experimentos citados a seguir foram realizados nas instalações do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM), no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) e no FabLab, todos os laboratórios citados se encontram na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

Como o trabalho de Casarini [5] apresentou uma metodologia simples e eficiente, permitindo avaliar todas as respostas desejadas e obtendo-se resultados satisfatórios, este trabalho vai utilizar parte desta metodologia, principalmente, no que se refere à preparação das chapas e na soldadura.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os cordões de solda foram realizados em chapas de aço carbono S235JR laminado a quente do fornecedor *Ferpinta*, produzido de acordo com a norma EN 10051. A composição química do aço e suas propriedades mecânicas estão contidas na Tabela 4 e Tabela 5, respetivamente.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço EN 10051 [46].

Resistência à Tração	Tensão de cedência	Alongamento
360 MPa	235 MPa	20%

Tabela 5: Composição química do aço EN 10051 [46].

Elemento	C	Mn	P	S	N	Cu
% Máx	0,19	1,50	0,045	0,045	0,014	0,60

Para o metal de adição, foi utilizado o arame sólido M/SG 2 ER70S-6 do fornecedor EUROTROD, de acordo com a norma AWS 5.18 (*Specification for Carbon*

*Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*”). Este arame é revestido em cobre e possui diâmetro de 0,8 mm. É necessário que a resistência à tração e a tensão de cedência do metal de adição sejam maiores que a do metal de base, o que foi verificado com o uso do arame ER70S-6. A composição química bem como as propriedades mecânicas do arame estão indicados na Tabela 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6: Composição química do arame ER70S-6 [47].

Elemento	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
% Mín.	0,06	0,80	1,40							
% Máx.	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5	0,15	0,15	Mo	0,03

Tabela 7: Propriedades Mecânicas do arame ER70S-6 [47].

Resistência à Tração	Tensão de cedência	Alongamento
560 MPa	460 MPa	26%

Segundo a (ESAB, n.d.), a faixa ideal dos parâmetros para a soldadura do arame ER70S-6 com diâmetro de 0,8mm são:

Tabela 8: Faixa de utilização ideal para o arame ER70S-6 [48].

Corrente	Tensão	Velocidade de alimentação do arame
60-200 A	18-24 V	3,2 – 10 m/min

### 3.2 PLANEAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para garantir um experimento de qualidade e otimizado, utilizou-se o método Taguchi para o planeamento dos experimentos, conforme citado no capítulo anterior. A metodologia de Taguchi permite estudar os fatores de controlos selecionados e as características de qualidade do processo com um número pequeno de experimentos, reduzindo o tempo e recursos dispensados na execução do trabalho.

Conforme dito nos objetivos do trabalho, o propósito é encontrar a combinação de parâmetros que permitisse otimizar as características de saída do cordão de solda, como penetração, largura, reforço e resistência à tração transversal na junta soldada. Como as chapas de aço soldadas possuíam espessura de 3 mm, procurou-se obter um cordão de solda com penetração e largura com a mesma dimensão da espessura da chapa.

O reforço desejado é o mais próximo possível de 0 (zero), pois como dito na seção 2.3.2, o reforço do cordão é uma característica a ser evitada na soldadura. Para o limite de resistência à tração, buscou-se maximizar este valor, para garantir boa resistência da junta soldada.

Os parâmetros considerados para o estudo foram tensão, velocidade de soldadura e ângulo da tocha, pois eram os possíveis de serem controlados com a fonte de soldadura disponível no laboratório. Para cada parâmetro foram atribuídos 3 níveis, conforme listado na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros selecionados e seus respectivos níveis.

<b>Parâmetros</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>
Tensão (V)	22,4	23,7	24,1
Velocidade de soldadura (mm/min)	250	325	400
Ângulo da Tocha (°)	0	15	25

Como este trabalho baseou-se numa sugestão de trabalho futuro do trabalho desenvolvido por Casarini [5] foram estudados os resultados obtidos pelo autor de acordo com os valores dos parâmetros por ele utilizados e a partir de testes realizados previamente para avaliação de cada nível utilizado, com base na faixa de valores apresentados na Tabela 8.

No trabalho de Casarini, a tensão de 22,4 V apresentou os melhores resultados para reforço e largura do cordão, a velocidade de soldadura de 400 mm/min teve melhores resultados para reforço e penetração e o ângulo de 0° para penetração e largura. Estes, então, foram selecionados por estarem envolvidos nos melhores resultados e para verificação se estes níveis realmente atingem os objetivos esperados.

O ângulo de 25° foi utilizado pois, como dito na seção 2.2.3, este ângulo proporciona maior penetração do cordão de solda e o de 15° como um valor intermediário entre o ângulo de 0° e de 25° que já haviam sido previamente escolhidos. Como a medição do ângulo foi realizada com o auxílio de um transferidor, de maneira bastante analógica, o ângulo de 15° seria mais fácil de posicionar e garantir a isometria dos testes do que o de 12,5° que seria o valor exatamente intermediário, optando-se, então, pelo ângulo de 15°.

Para as velocidades de 250 e 325 mm/min estes valores foram selecionados no intuito de evitar velocidades muito baixas, que nos testes preliminares apresentaram excesso de fusão do material e grande reforço. Também se evitou altas velocidades que podem causar cordões com baixa largura e penetração, podendo ainda causar falta de fusão do cordão de solda.

A tensão de 24,1 V apresentou os melhores resultados visuais nos testes preliminares e, para além disso, também se apresentou como o nível de tensão que permite a resposta ótima para a resistência à tração no trabalho de Casarini [5]. Como valor intermediário, foi selecionado a tensão de 23,7 V também por ter demonstrado cordões satisfatórios, visualmente, nos testes experimentais.

Conforme a Tabela 3, com a utilização de 3 parâmetros com 3 níveis cada, a matriz ortogonal de Taguchi adequada para esta situação é a L9. A partir desta matriz, serão organizadas nove combinações de parâmetros distribuídas aleatoriamente que serão, posteriormente, executados. Para uma melhor análise estatística, cada combinação será executada 2 vezes, permitindo a repetição de cada teste. Cada repetição será executada após o primeiro teste do respetivo ensaio. Sendo assim, serão executados 18 cordões de soldadura no total.

Com o auxílio do software *Minitab 20*® foi possível desenhar a matriz ortogonal L<sub>9</sub> de Taguchi dos experimentos (Tabela 10).

Tabela 10: Desenho da matriz ortogonal L<sub>9</sub> para os experimentos.

Número do Ensaio	Ângulo da Tocha (°)	Tensão (V)	Velocidade de Soldadura (mm/min)
1	0	22,4	250
2	0	23,7	325
3	0	24,1	400
4	15	22,4	325
5	15	23,7	400
6	15	24,1	250
7	25	22,4	400
8	25	23,7	250
9	25	24,1	325

Optou-se por colocar o ângulo da tocha na primeira coluna, pois no programa *Minitab*® o parâmetro inserido na coluna 1 é repetido em sequência e isto irá facilitar durante a realização dos cordões para evitar que a cada experimento seja necessário ajustar o posicionamento da tocha.

Parâmetros como velocidade de alimentação do arame e a distância do bico da tocha à peça (*stick-out*) não foram incluídos no estudo, mas cada um foi ajustado de maneira diferente em cada ensaio, conforme os valores de parâmetros utilizados, para evitar defeitos de soldadura.

A velocidade de alimentação do arame foi ajustada de acordo com cada combinação de parâmetros empregada sendo utilizado no intervalo de 3,2 a 4 m/min, respeitando os limites mostrados na Tabela 8. Para o *stick-out* se utilizou uma distância de  $\pm 10$  mm nas soldaduras com ângulo de  $0^\circ$  e  $\pm 15$  mm nos testes com ângulo da tocha de  $15^\circ$  e  $25^\circ$ , para que o bocal da tocha não colidisse com o metal de base. Todos os cordões com angulação da tocha de  $15^\circ$  e  $25^\circ$  foram executados na orientação “puxando”.

### 3.3 PREPARAÇÃO DAS CHAPAS

Para a realização dos cordões foram utilizadas 3 chapas de aço S235JR com dimensões 420 x 285 x 3 mm. Estas dimensões foram selecionadas para possibilitar a fixação posterior das chapas soldadas no centro de maquinagem CNC e também que permitisse obter os provetes para o ensaio de tração e as amostras para macrografia.

Para obter as chapas nestas dimensões foi utilizada uma guilhotina modelo Cuitil Mini 320 (Figura 12). A Figura 13 mostra como ficaram as chapas após o corte na guilhotina e de acordo com as dimensões desejadas.



Figura 12: Guilhotina Cuitil mini 320 utilizada para corte das chapas de aço.



Figura 13: Chapas cortadas nas dimensões propostas.

Após a obtenção das chapas, elas foram cortadas ao meio longitudinalmente, por onde serão realizados os cordões de solda. Após esta divisão, as chapas foram furadas em 13 pontos em cada meia chapa. Estes furos servirão, posteriormente, para fixação da chapa no centro de maquinagem CNC. A posição dos furos foi selecionada de modo a não coincidir com o cordão de solda e nem por onde serão retirados os provetes das chapas. Os furos foram realizados por meio de uma furadora radial do fabricante EFI com a utilização de uma broca de  $\varnothing 6$  mm. Porém, quando foram testados os furos para a fixação no suporte de madeira do CNC, percebeu-se que alguns não coincidiam com os furos que já havia no suporte, dificultando que os parafusos fossem fixados. Para corrigir esta situação, os furos foram alargados utilizando uma broca de  $\varnothing 10$  mm e um furo extra foi adicionado, garantindo que a chapa soldada pudesse ser fixada ao suporte de madeira da CNC.

As Figuras 14 e 15 representam, respectivamente, o modelo de furadora utilizado e as chapas de aço após o procedimento de furação.



Figura 14: Furadora Radial EFI utilizada para realização dos furos.



Figura 15: Chapa após realização do corte longitudinal e dos furos.

### **3.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

#### ***3.4.1) Realização dos Cordões de Solda***

Para a realização dos cordões de solda foi utilizado um mecanismo de soldadura previamente desenvolvido no IPB (Figura 16). Tal mecanismo permite fazer a movimentação da tocha de soldadura nos três eixos (X, Y e Z) e acionar o arco elétrico permitindo a execução dos cordões com maior precisão, estabilidade e sem precisar da

experiência de um soldador para o deslocamento e acionamento da tocha. O equipamento é ligado a um computador e por meio do programa *Grbl Controler*, que utiliza código G, é possível determinar o traçado do cordão com boa exatidão.

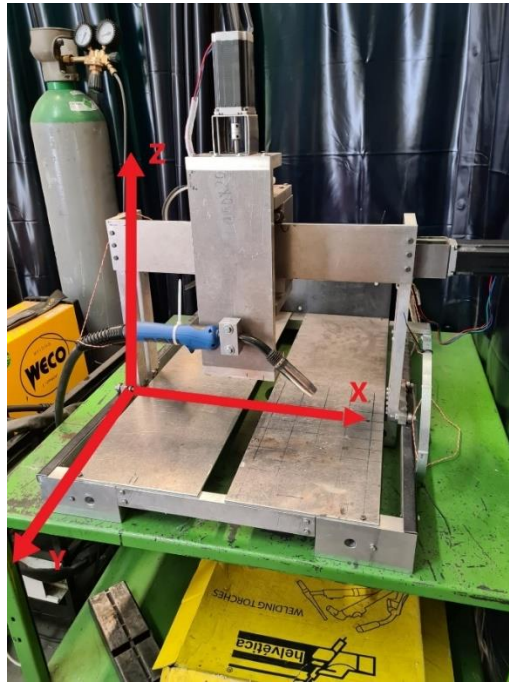


Figura 16: Mecanismo de soldadura utilizado para realização dos cordões de solda com seus respectivos eixos.

A máquina apresentou boa precisão durante os testes experimentais, permitindo realizar os cordões como desejados. Um pequeno problema encontrado foi que no deslocamento do eixo X a máquina apresenta um ligeiro desalinhamento, necessitando de alguma atenção durante o posicionamento da chapa, evitando que o cordão seja depositado fora da região da junta entre as chapas.

Outro problema encontrado foi que o acoplamento do eixo do motor junto ao eixo que movimenta a máquina na direção de X estava sendo feito, provisoriamente, com a utilização de um tubo de mangueira e duas abraçadeiras, conforme mostrado na Figura 17. Durante os testes experimentais, algumas vezes os eixos não trabalhavam com mesma rotação devido a uma pequena folga das abraçadeiras, fazendo com que a movimentação da máquina no eixo X não era executada na velocidade selecionada ou mesmo não realizando o movimento. Outras vezes, a mangueira rompia-se durante a movimentação da máquina (Figura 18), impedindo o funcionamento do mecanismo.



Figura 17: Eixos acoplados com a improvisação de uma mangueira.

Além de não absorver os possíveis desalinhamentos dos eixos, a utilização desta mangueira prejudicava o funcionamento da máquina, não garantindo sua execução da melhor maneira possível. Para evitar que estes problemas voltassem a ocorrer, o tubo foi substituído por um acoplamento metálico flexível que garantisse que os eixos girassem de maneira uniforme (Figura 19). Após esta mudança não ocorreram problemas na movimentação da tocha de soldadura no eixo X, apesar de permanecer o pequeno desalinhamento que, possivelmente, é um erro de projeto da máquina. Apesar disto, este mecanismo de soldadura apresentou-se bastante eficiente, precisando de algumas melhorias pontuais para que possa ser utilizado em maior escala.

O mecanismo citado anteriormente funciona junto a uma fonte de soldadura do modelo MIG 453 Modular (Figura 20). Esta fonte é ligada ao conjunto que contém uma tocha (que é conectada ao mecanismo), um cilindro de gás de proteção, um alimentador do arame e cabos. Tal fonte permite fazer o ajuste da velocidade de alimentação do arame e da tensão de soldadura durante o processo.

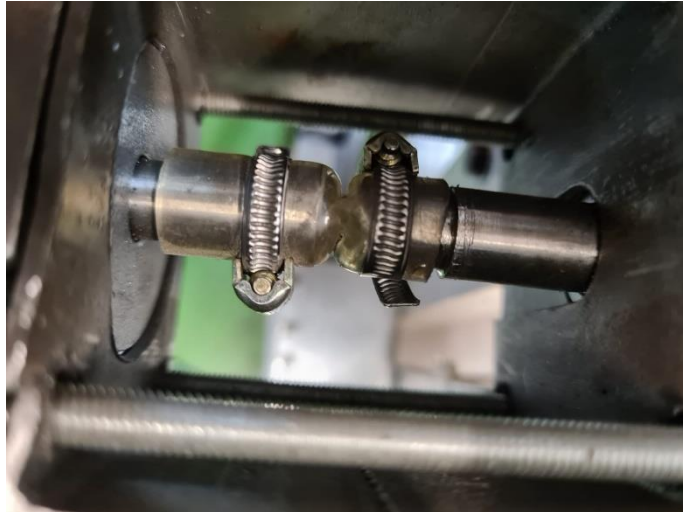


Figura 18: Mangueira rompida após a realização de alguns testes.



Figura 19: Eixos ligados por um acoplamento flexível.

O cilindro de gás de proteção conectado a esta fonte contém uma mistura de 8% de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) e 92% de Argônio (Ar), de acordo com a norma ISO 14175-M20-ArC-8. Como já dito anteriormente, este gás tem a função de proteger a região soldada da atmosfera exterior, evitando a inclusão de elementos presentes no ar, como hidrogénio, oxigénio e nitrogénio, no cordão de solda. Para o caudal do gás, foi utilizado um valor fixo de 12 l/min para todos os ensaios realizados.



Figura 20: Fonte de Soldadura MIG 453 Modular.

Para a execução dos cordões de solda, as duas metades da chapa foram posicionadas no mecanismo de soldadura. Como as chapas possuíam espessura relativamente pequena (3 mm), não foi necessário a realização de chanfros na junta entre estas. Também, devido à pequena espessura da chapa, elas foram apoiadas sobre tubos de seção quadrada, para evitar que o calor gerado no processo não aquecesse o suporte de alumínio do equipamento de soldadura, evitando, assim, a fusão deste material. Além disso, este apoio facilita o acesso da tocha à região da junta. Tomou-se o cuidado, também, para não colocar os tubos por baixo da região a ser soldada, evitando que o calor gerado pudesse fundir o material dos tubos e que o cordão se depositasse sobre eles. Para atenuar os efeitos da distorção térmica e da tensão residual gerados e impedir a movimentação das chapas durante o processo de soldadura, estas foram fixadas com o auxílio de grampos e de pesos. O posicionamento da tocha era ajustado com o auxílio de um transferidor, para ajustar de acordo com o ângulo selecionado. Na Figura 21 é possível visualizar como foi efetuado o posicionamento das chapas no equipamento de soldadura.

Cada chapa foi unida por meio de 6 cordões soldados (2 para cada ensaio) de, aproximadamente, 70 mm, de acordo com os parâmetros listados na Tabela 10. Com a união de três chapas totalizou-se, assim, os 18 cordões dos ensaios pré-determinados pelo método Taguchi. Um exemplo das chapas unidas após a execução dos cordões pode ser visto na Figura 22.

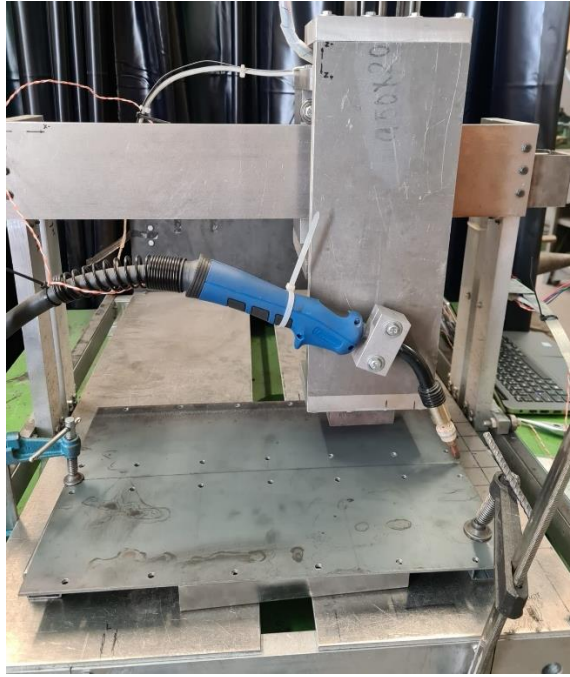


Figura 21: Chapas posicionadas no mecanismo de soldadura para execução dos cordões com ângulo de tocha em 25°.

Após a realização de cada ensaio, o cordão era escovado para remoção da sujidade superficial e dos óxidos gerados durante a soldadura.

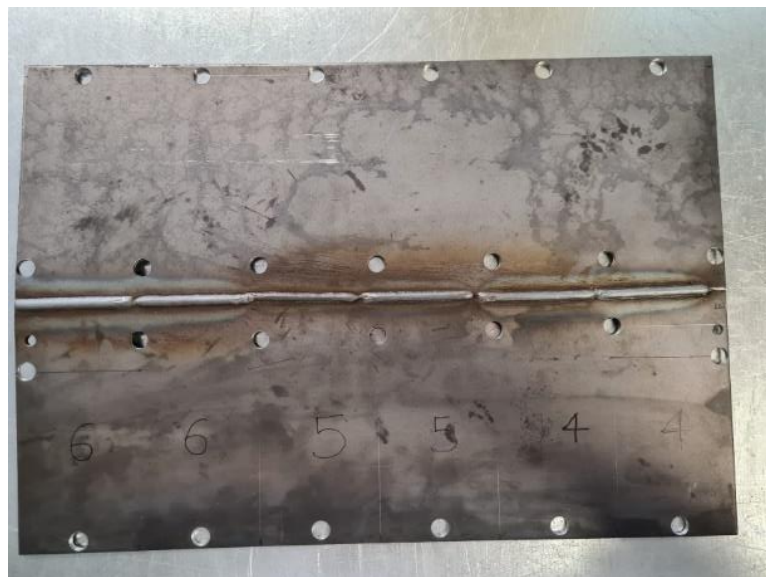


Figura 22: Chapa soldada de acordo com os experimentos 4, 5 e 6 da matriz ortogonal de Taguchi.

### 3.4.2) Obtenção dos Corpos de Prova para o Ensaio de Tração

Para produzir os provetes que serão utilizados no ensaio de tração, utilizou-se as dimensões e geometria definidos pela norma ISO 4136:2012, tal como indicado na Tabela 2. A representação do corpo de prova e suas dimensões são representadas na Figura 23.

Com estas dimensões, foi possível realizar 6 provetes em cada chapa soldada (um para cada cordão de solda presente).

Para a maquinagem das chapas utilizou-se a fresadora CNC DMC 63V da fabricante *Deckel Maho*® (Figura 24). Esta fresadora possui diversas ferramentas para várias operações de maquinagem e permite realizar os processos com grande precisão.

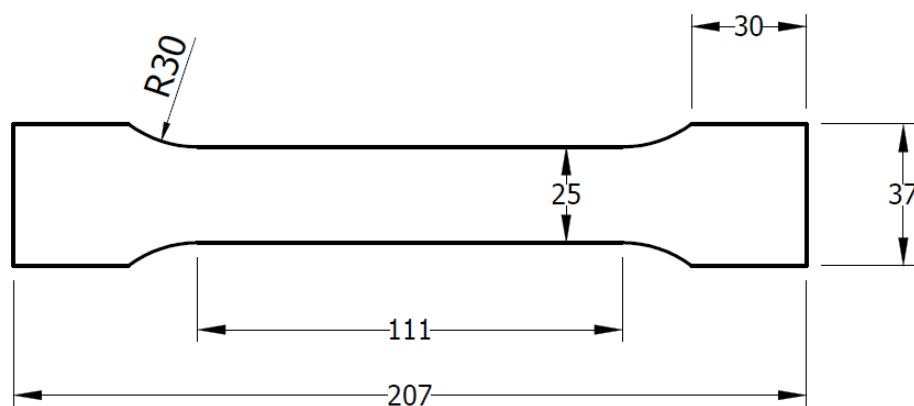


Figura 23: Dimensões, em mm, dos provetes para ensaio de tração, conforme norma ISO 4136:2012.



Figura 24: Fresadora CNC utilizada para maquinagem dos corpos de prova.

Este equipamento realiza os procedimentos a partir da pré programação da fresadora utilizando código G, que irá determinar o percurso da ferramenta, velocidade, avanço e outros parâmetros. Com o uso da integração entre sistemas CAD/CAM, é possível utilizar desenhos executados em CAD 3D para determinar a sequência de operações da fresadora. Na Figura 25 é ilustrada simulação de como ficaria a maquinagem das chapas soldadas a partir da simulação feita no software *Mastercam*®.

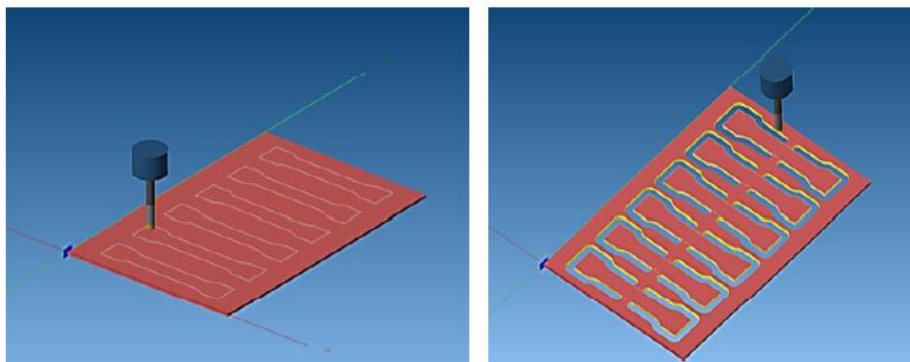


Figura 25: Representação do trajeto de corte da fresadora CNC.

Após a definição da trajetória da ferramenta e, tendo em consideração, o material a ser maquinado e sua espessura, foram definidos pelo operador os parâmetros de maquinagem adequados à operação a ser realizada. Tomou-se, também, o cuidado para evitar que o a ferramenta colidisse com o cordão de solda, pois como este possui dureza diferente do metal de base, poderia danificar a ferramenta vindo até a inutilizá-la. Para

isso foi deixada uma distância de segurança para o cordão, como pode ser visto na Figura 25.

A chapa foi, então, fixada no suporte de madeira presente na fresadora com o auxílio de parafusos de diâmetro de 12 mm de cabeça (Figura 26). Esta fixação permite evitar o deslocamento da chapa durante a maquinagem e a amortecer as vibrações do processo e atenuar os efeitos das distorções térmicas gerados após a soldadura da chapa. Para a operação foi utilizada uma fresa de  $\varnothing 12$  mm. A Figura 27 mostra como ficou o aspecto final da chapa após a maquinagem dos provetes.

Para destacar os provetes da chapa, foi utilizada uma rebarbadora com disco de corte de aço. Após a remoção os provetes, com o auxílio da mesma rebarbadora, porém, utilizando um disco *flap* de desbaste, foi dado o acabamento dos provetes, removendo o excesso de material devido ao corte e todo o reforço do cordão de solda, fazendo com que o corpo de prova tenha espessura constante, seguindo a norma ISO 4136:2012. A aparência dos provetes após a operação de acabamento pode ser visualizada na Figura 28.



Figura 26: Chapa fixada na fresadora CNC para execução dos provetes

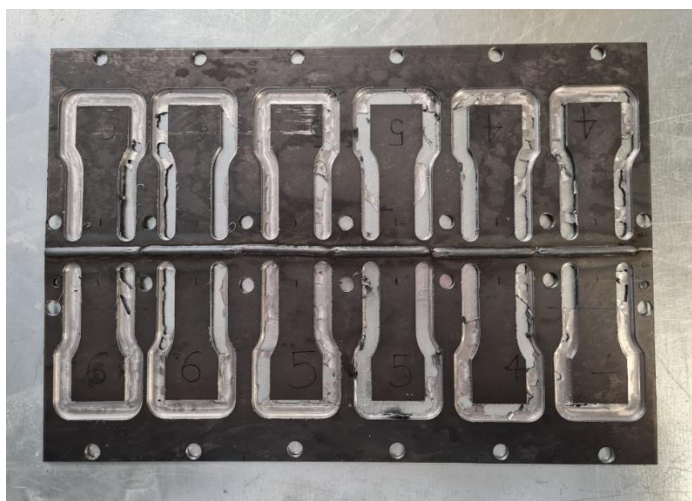


Figura 27: Aspeto da chapa após maquinagem.

Os provetes foram marcados de acordo com o ensaio que cada um representava, para facilitar a organização dos dados após os ensaios de tração.



Figura 28: Provetes acabados para utilização no ensaio de tração.

### 3.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS

Para realização dos ensaios de tração transversal foi utilizado a máquina universal de ensaios, modelo 4485 da fabricante *Instron*® (Figura 29). Todos os ensaios foram executados seguindo as normas ISO 6892-1:2009 e ISO 4136:2012.

Segundo estas normas, para ensaios de tração de juntas soldadas é obtido apenas o limite de resistência à tração. Isto deve-se ao facto de que os provetes utilizados apresentam três regiões distintas (metal de base, zona termicamente afetada e o metal de solda). Estas regiões apresentam propriedades mecânicas distintas o que pode tornar as medições de alongamento não confiáveis [48].

Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e a uma velocidade de 2,54 mm/min. Os provetes foram fixados pela cabeça nas garras do equipamento, mantendo uma distância de 147 mm entre as garras.

Durante os ensaios eram gravados os valores da força aplicada e do deslocamento das garras a cada instante de tempo e os provetes eram tracionados até que ocorresse a rutura dos mesmos. Após o fim do procedimento eram obtidos todos os dados, que foram tratados utilizando o software *Microsoft Excel*® para o cálculo da tensão, da deformação e a execução da curva Tensão x Deformação. Os dados obtidos pelo ensaio são a força (em kN) e o deslocamento do provete (em mm). Para o cálculo da tensão, utilizou-se os valores de força obtidos e a área da seção transversal do provete (25 mm de largura e 3 mm de espessura) e para o cálculo da deformação do provete foram usados o valor obtido do deslocamento dividido pelo comprimento útil inicial de 147 mm. De posse destes valores foi possível traçar o gráfico de Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm)



Figura 29: Equipamento utilizado para os ensaios de tração.

### 3.6 ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS CORDÕES DE SOLDA

#### 3.6.1) *Obtenção das amostras*

Para obter as amostras que serão utilizadas nas análises de macrografia foram aproveitadas as partes dos cordões de solda das chapas que não foram retirados pelos provetes (Figura 30).

Para seccionar esta amostra no tamanho ideal para o embutimento foi empregue uma máquina de corte modelo Labotom do fabricante Struers (Figura 31). Este equipamento realiza o corte utilizando um disco abrasivo e com resfriamento a água durante o procedimento, o que garante um bom acabamento à peça e sem aquecê-la garantindo que não ocorra transformações em sua microestrutura.

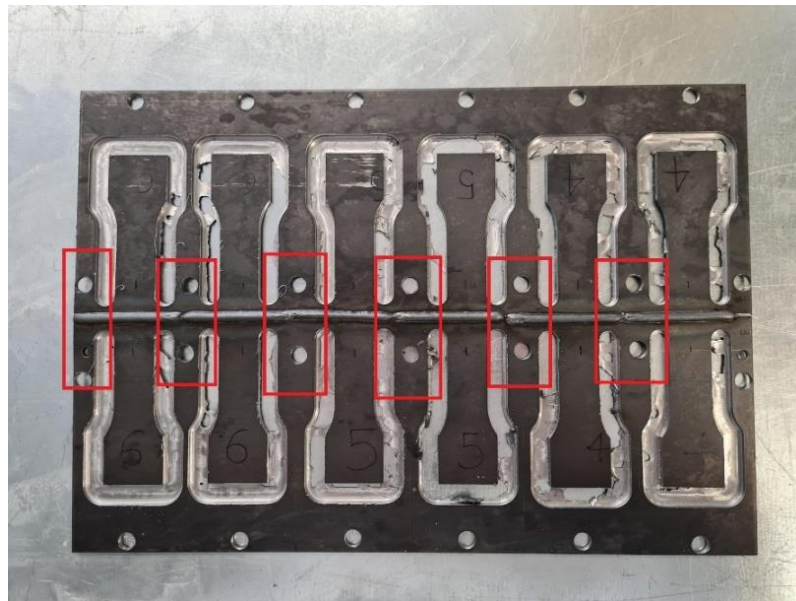


Figura 30: Partes do cordão que foram aproveitadas para a macrografia.



Figura 31: Equipamento de Corte Struers-Labotom.

### ***3.6.2) Preparação das Amostras***

Após a execução dos cortes, as amostras são submetidas ao processo de embutimento, utilizando o equipamento de embutimento LaboPress-1 do fabricante Struers (Figura 32). As peças foram embutidas de duas em duas, contemplando assim as duas amostras de cada experimento no mesmo embutimento. Para a moldagem foi utilizada uma resina fenólica em pó de cor preta. Durante o processo as amostras permanecem aquecidas a uma temperatura de 180°C com uma força aplicada de, aproximadamente, 20 kN durante 10 minutos, conforme orientações do fabricante da resina para o processo de cura da mesma. Após decorrido este tempo, as amostras são resfriadas por água corrente durante 5 minutos.



Figura 32: Embutidora Struers-LaboPress-1.

Com as amostras embutidas, prosseguiu-se ao processo de lixamento. Para esta etapa foi utilizada uma máquina rotativa LaboPol-25 (Figura 33) e lixas de granulometria 180, 240, 320, 600, 800, 1000, 1200. Estes números correspondem à quantidade de grãos do abrasivo por uma determinada área. Assim sendo, quanto maior o número, menor é a quantidade de grãos da lixa e mais “lisa” ela é. O processo de lixamento é feito da lixa de menor granulometria para a de maior granulometria, obtendo uma peça final com bom acabamento superficial.

O próximo passo é realizar o polimento das amostras. Esta etapa foi realizada na politriz RotoPol-21 do fabricante Struers (Figura 34). O processo de polimento tem como finalidade dar um acabamento espelhado e sem riscos da superfície da amostra. Para a operação de polimento, a peça é colocada sobre o pano do disco da politriz juntamente a uma solução contendo partículas de sílica coloidal de 0.06  $\mu\text{m}$ .



Figura 33: Equipamento para lixamento Struers-LaboPol-25.

Por fim, as amostras polidas são submetidas a um ataque químico utilizando o reagente Nital que é uma solução de ácido nítrico com álcool etílico. Neste procedimento, foi utilizado o Nital contendo 3% do ácido e as amostras eram imersas na solução durante, aproximadamente, 6 segundos. Esta operação garante que as diferentes fases da região de soldadura ficassem destacadas, sendo possível verificar mais facilmente o cordão durante o ensaio de macrografia.



Figura 34: Politriz Struers-RotoPol-21.

O aspeto final das amostras após todos os procedimentos citados acima é mostrado na Figura 35.



Figura 35: Amostras preparadas para o ensaio de macrografia.

### ***3.6.3) Ensaio de Macrografia para Medição do Perfil dos Cordões***

Para realizar as medições do perfil dos cordões de solda procedeu-se à utilização do equipamento IRIS do fabricante Newtec (Figura 36). Este macroscópio permite obter imagens do cordão com ampliação de até 50x, possibilitando a medição e visualização do cordão com boa qualidade de imagem. O equipamento é ligado diretamente ao computador e com a utilização do *software* Axione é possível obter os perfis dos cordões e, também, fazer medições diretamente nas imagens.

Para obter as medidas do cordão, o *software* Axione utiliza uma distância de calibração fornecida pelo utilizador. A partir desta medida, o programa converte os *pixels* da imagem em um valor de comprimento. No caso das medições do cordão de solda, a medida de referência utilizada foi a espessura da chapa, que já era conhecida, sendo de 3 mm. Assim, foi possível medir a largura, penetração e o reforço do cordão, como ilustrado na Figura 37.



Figura 36: Macroscópio IRIS ligado ao Notebook para obtenção dos perfis do cordão de solda.

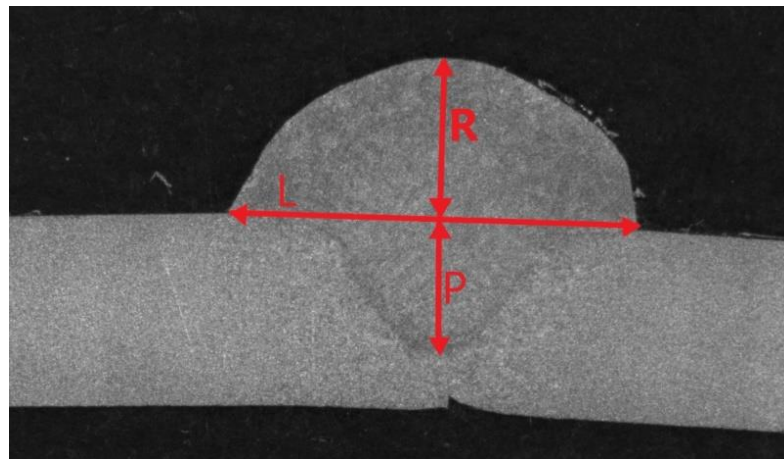


Figura 37: Medições realizadas nos cordões de solda (R – reforço, L – largura e P – penetração).

### 3.7 TRATAMENTO DOS DADOS

A partir do arranjo ortogonal  $L_9$  do método Taguchi, mostrado na Tabela 10, foram executados os 9 experimentos com uma repetição cada, totalizando 18 cordões de solda. Após a obtenção dos resultados de largura, penetração, reforço e limite de resistência à tração, foram calculadas as médias e a razão sinal-ruído de cada parâmetro, de acordo com sua especificidade. Para a largura e a penetração, a característica desejada é a de nominal é melhor, pois esperava-se obter, para estas respostas, a medida de 3mm (mesma espessura da chapa de aço utilizada). Para o reforço, a razão sinal-ruído é

calculada como “menor é melhor”, pois espera-se obter o menor reforço possível. Para o limite de resistência à tração a razão sinal-ruído é calculada pela forma “maior é melhor” já que se pretende obter uma junta com a maior resistência possível. O cálculo das razões sinal-ruído foi auxiliado pelo uso do *software* Minitab 20.

Com as razões sinal-ruído determinadas, é realizada a Análise Relacional de Grey, com o cálculo da normalização das razões sinal-ruído, do coeficiente de Grey e, por fim, do grau relacional de Grey. Após concluído os cálculos é possível obter a combinação ótima dos parâmetros que irão atingir o objetivo especificado neste trabalho. Os cálculos da análise relacional de Grey foram executados no *software Excel*.

Por fim, é realizada a Análise de Variância (ANOVA) a fim de verificar qual a influência de cada parâmetro no resultado final. Para esta análise o *software* utilizado foi novamente o Minitab 20.

Determinado qual a combinação ótima dos parâmetros, é realizado um teste de confirmação. Seguindo os mesmos procedimentos descritos neste capítulo, foram feitos dois cordões de soldas a partir destes parâmetros e sobre eles foram medidos a largura, penetração e o reforço e o limite de resistência à tração da junta. A partir dos resultados obtidos é verificado qual o grau relacional de Grey para este experimento e o quanto ele melhorou ou piorou o processo em relação ao melhor resultado obtido dentre os nove experimentos inicialmente determinados.

# CAPÍTULO IV

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados após todos os experimentos e procedimentos descritos no capítulo III, juntamente com uma análise de cada um deles. Serão apresentados, sempre que possível, gráficos, imagens e tabelas que facilitem a percepção e compreensão do resultado.

Inicialmente, será apresentado cada resultado individualmente para a penetração, largura, reforço e limite de resistência à tração da junta. Após a apreciação destes resultados, serão mostrados os cálculos da análise relacional de Grey para a determinação da combinação ótima que agrega todos os requisitos previamente definidos para a soldadura.

As imagens dos perfis dos cordões de solda de todos os experimentos estão no Anexo I deste trabalho e os gráficos das curvas de tensão x deformação dos ensaios de tração estão situados no Anexo II. Ocasionalmente, para casos específicos, eles serão mostrados neste capítulo para discussão do resultado.

### 4.1 PENETRAÇÃO

Os resultados das medições da penetração do cordão de solda na junta, as médias e as razões sinal-ruído calculadas estão representados na Tabela 11. São mostrados os resultados das amostras 1 e 2 de cada experimento, que corresponde à repetição de cada um. Os cálculos da razão sinal-ruído para a penetração foram realizados conforme a equação 3.

Tabela 11: Valores das medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Média (mm)	Razão Sinal-Ruído (dB)
1	3,21	2,00	2,61	9,67
2	3,40	1,46	2,43	4,97
3	1,81	1,88	1,85	31,43
4	3,26	2,47	2,87	14,20
5	1,72	1,65	1,69	30,64
6	1,11	1,30	1,21	19,05
7	1,28	1,51	1,40	18,67
8	3,07	3,32	3,20	25,14
9	2,10	1,70	1,90	16,54

Sabe-se que o maior valor da razão sinal-ruído representa o experimento que chegou mais próximo ao objetivo pré-estabelecido. Para este trabalho, era esperado um valor de 3mm para a penetração, correspondendo à espessura da chapa utilizada. Pelos dados da Tabela 11 é possível verificar que o experimento que apresentou a maior valor da razão sinal-ruído foi o experimento 3, porém, aquele que apresentou a média de penetração mais próximo do desejado foi o experimento 4, com 2,87 mm. Esta diferença no tratamento ocorre porque a equação utilizada no método Taguchi para o cálculo da razão sinal-ruído para uma característica definida como “nominal é melhor” (equação 3) utiliza as médias e desvios-padrão. A fórmula não se baseia em um valor nominal do qual se deseja atingir e, sim, na variação amostral dos dados observados. Por isso, o experimento 3 por ter tido uma variação menor entre seus resultados (0,07 mm) teve um melhor resultado da razão sinal-ruído.

Ainda assim, serão considerados os valores obtidos normalmente pelas fórmulas do método Taguchi, para manter a lógica do procedimento e dos resultados.

Com estes dados, calculou-se as médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível selecionado. Este resultado pode ser visualizado na Figura 38.

A partir da Figura 38 é possível estabelecer qual o nível ótimo dos parâmetros quando analisado individualmente para a penetração. Esta combinação ótima é o ângulo da tocha de 15°, tensão de 24,1 V e velocidade de soldadura de 400 mm/min. Quando comparado ao trabalho de Casarini [5], a velocidade de soldadura ótima foi igual, porém, para o ângulo da tocha e a tensão, foram obtidos valores diferentes (0° e 23,3 V, respectivamente).

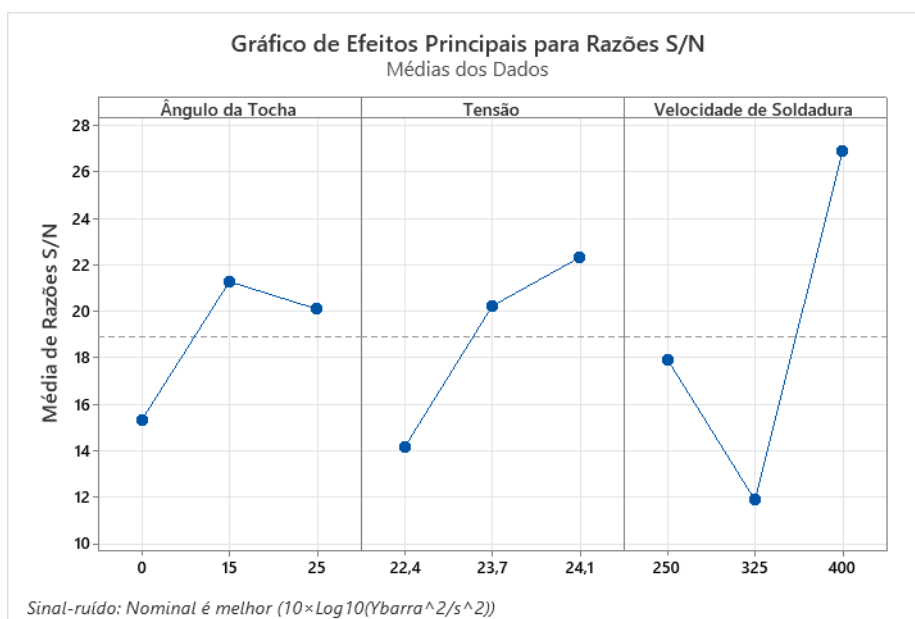


Figura 38: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes à penetração do cordão.

Como o processo de soldadura é bastante sensível a variações, as alterações na condição de execução dos cordões em cada trabalho (condições climáticas, material utilizado, preparação da junta e outros) podem originar resultados diferentes.

Analisando agora pelas médias dos resultados observados, percebe-se pelos gráficos da Figura 39 que neste experimento, o maior valor médio de penetração não foi obtido com o ângulo de 25°, como é dito nas referências 9, 11 e 12 e na seção 2.2.3 deste trabalho. Apesar disto, o experimento nº 8, que utiliza o ângulo de 25°, apresentou o maior valor de penetração observado e também o maior valor médio, corroborando com a informação citada nas referências bibliográficas.

Para a velocidade de soldadura, foi possível verificar que, para este parâmetro, os maiores valores médios de penetração ocorrem num valor intermediário da velocidade, assim como foi mostrado no trabalho de Pereira [15].

Já para a tensão, conforme dito na seção 2.2.3 baseado nas referências 6, 9, 10 e 12, um maior valor de tensão pode ocasionar cordões com menor penetração. Facto que foi identificado nos experimentos deste trabalho, como observado na Figura 39, a tensão de 24,1 V obteve o menor valor médio de penetração.

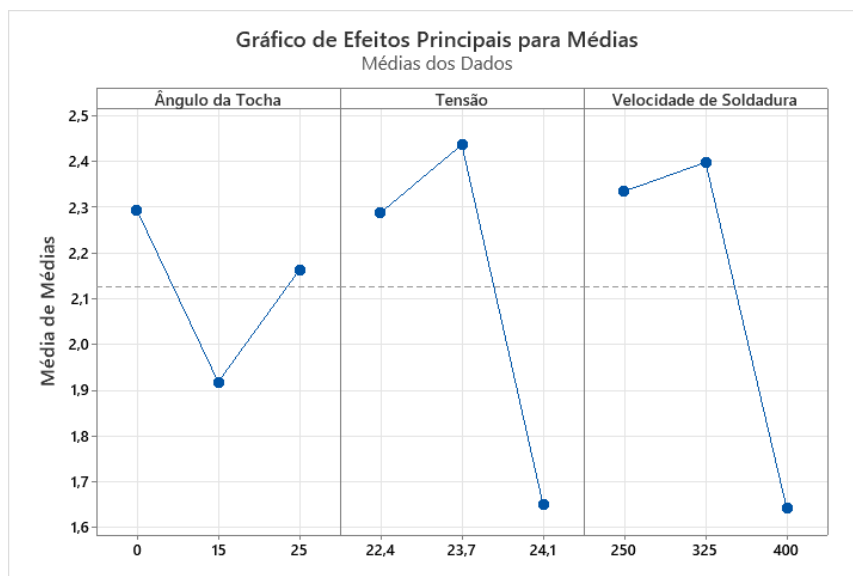


Figura 39: Médias dos resultados observados para cada parâmetro e nível.

## 4.2 LARGURA

Os valores experimentais obtidos para a largura, as médias dos resultados e a razão sinal-ruído calculada são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12: Valores das medições, média e razão sinal-ruído para a largura.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Média (mm)	Razão Sinal-Ruído (dB)
1	6,82	6,80	6,81	53,65
2	6,55	6,74	6,65	33,89
3	5,74	6,19	5,97	25,46
4	5,76	6,20	5,98	25,68
5	5,87	6,05	5,96	33,41
6	6,59	7,00	6,80	27,40
7	6,40	5,61	6,01	20,63
8	7,42	7,41	7,42	60,41
9	6,43	6,90	6,67	26,04

Para a largura do cordão, a razão S/N também foi calculada conforme a equação 3. A maior razão sinal-ruído obtida ocorreu no experimento 8, porém, o experimento que teve a média de resultados mais próximos do esperado, de 3 mm, foi o experimento 5. Assim como para os resultados da penetração, isto ocorreu porque a menor variação entre as duas amostras foi encontrada no experimento 8 (0,01 mm) e no experimento 5 tivemos

uma variação entre as amostras de 0,18 mm. Como dito na seção 4.3, esta diferença ocorre devido à formulação utilizada no cálculo da razão S/N do método Taguchi.

Com os dados da razão sinal-ruído, calculou-se as médias das razões para cada parâmetro e nível, como mostrado na Figura 40.

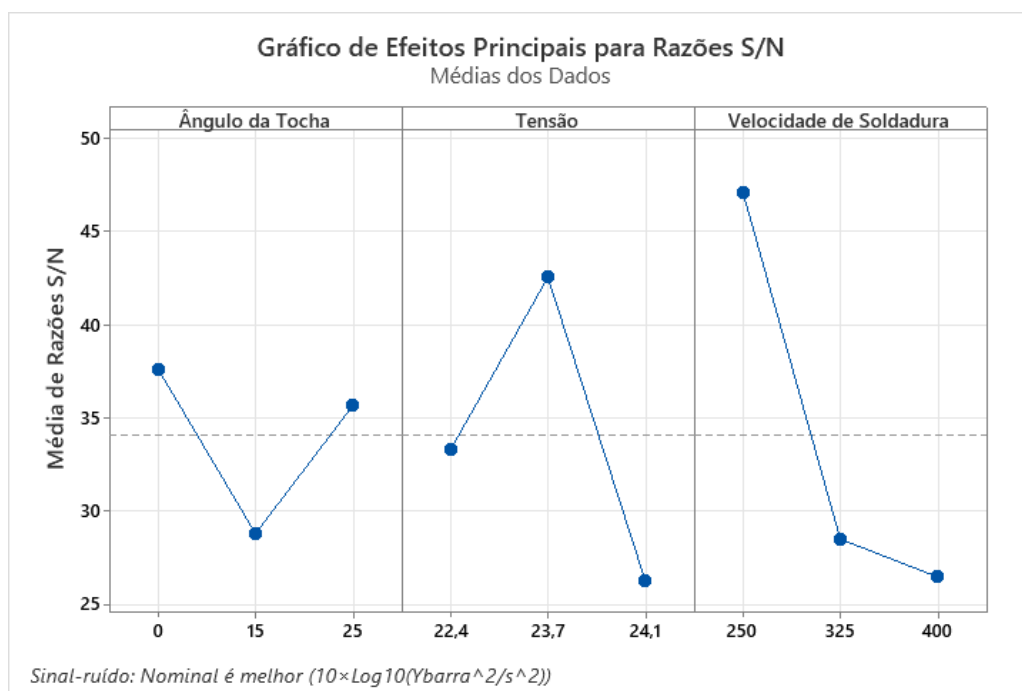


Figura 40: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes à largura do cordão.

Assim, pela análise dos gráficos, tem-se que para a resposta largura do cordão, os parâmetros ótimos são: ângulo da tocha de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 250 mm/min. Comparando, novamente, com o trabalho de Casarini [5], apenas o ângulo de 0° foi observado nos dois trabalhos como sendo o nível ótimo para a largura do cordão.

Analisando os efeitos de cada parâmetro e nível nas médias dos resultados, de acordo com os gráficos da Figura 41, observa-se que quanto menor a velocidade de soldadura, maior é a largura do cordão, devido ao efeito do aumento de metal depositado por unidade de comprimento, tal como o verificado no trabalho de Barbedo [12].

Para a tensão, era esperado que quanto maior o valor desta, maior seria a largura do cordão obtido [5,6,9,10]. De facto, isto ocorreu para a tensão de 22,4 V que apresentou a menor média de valores para a largura do cordão. Contudo, a tensão de 23,7 V resultou em cordões mais largos, em média, do que para a tensão de 24,1 V.

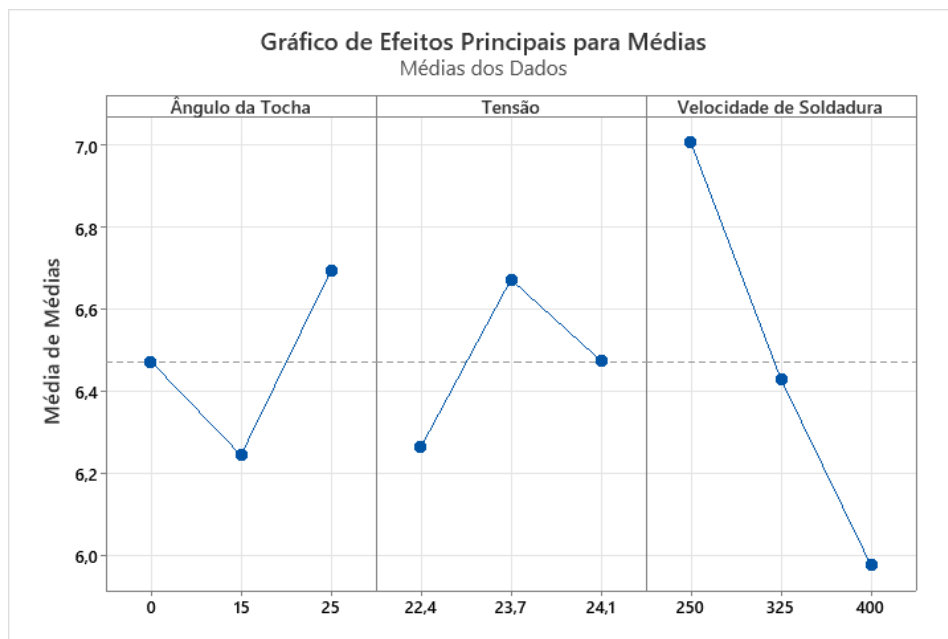


Figura 41: Médias dos resultados observados da largura para cada parâmetro e nível.

### 4.3 REFORÇO

Os resultados obtidos para o reforço, as médias e a razão sinal-ruído estão exibidas na Tabela 13. Para o reforço do cordão, a razão S/N foi calculada segundo a equação 1.

Tabela 13: Valores das medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Média (mm)	Razão Sinal-Ruído (dB)
1	1,99	2,37	2,18	-6,80
2	2,25	2,61	2,43	-7,74
3	1,85	2,11	1,98	-5,95
4	2,36	2,23	2,30	-7,22
5	2,18	2,30	2,24	-7,01
6	2,82	2,64	2,73	-8,73
7	2,83	2,57	2,70	-8,64
8	2,42	2,23	2,33	-7,34
9	2,58	2,53	2,56	-8,15

Como o cálculo da razão sinal-ruído para o reforço contempla que quanto menor o valor observado, melhor, para este caso o experimento que obteve a maior razão S/N (-5,95 dB) também foi o que apresentou menor valor médio para o reforço (1,98 mm) que

foi o experimento 3. Analogamente, o experimento 6 que apresentou o maior valor médio do reforço do cordão, obteve o menor valor da razão sinal-ruído.

De posse dos dados da Tabela 13, foram calculadas as médias da razão S/N para os fatores de controle e seus respectivos níveis. Estes resultados estão representados nos gráficos da Figura 42.

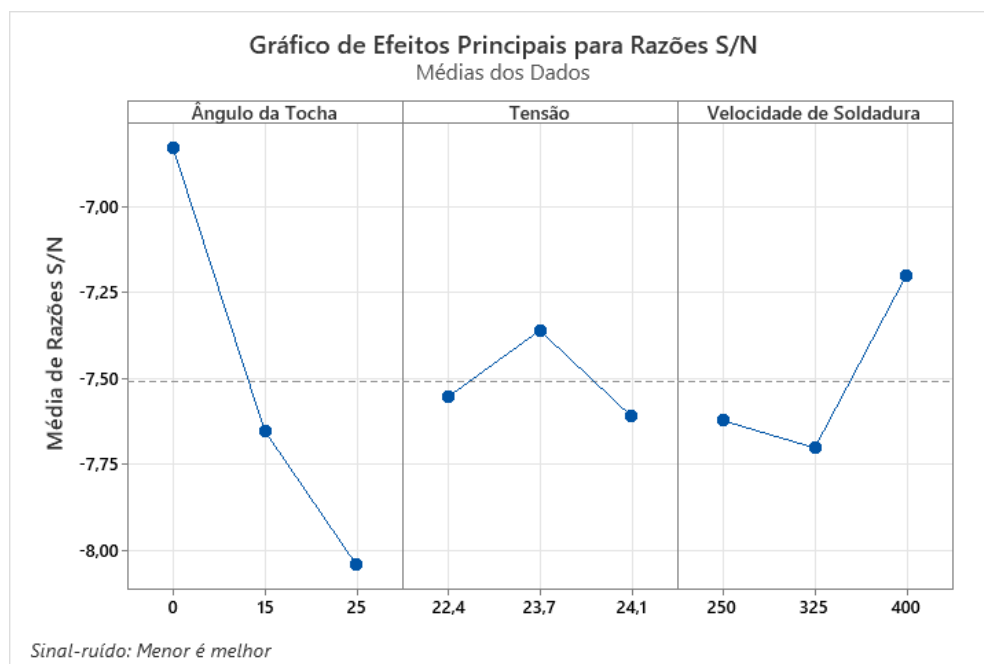


Figura 42: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes ao reforço do cordão.

Para o reforço, a combinação ótima de parâmetros que gera um cordão com o menor reforço possível é: ângulo da tocha de  $0^\circ$ , tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 400 mm/min. Novamente, comparando os resultados com a pesquisa de Casarini [5] os dois apresentaram a velocidade de 400 mm/min como ótima para minimizar o reforço. Isso condiz também, com o dito por Barbedo [12] e Brien [9] que afirmam que o aumento da velocidade de soldadura diminui o efeito da sobreposição do cordão, reduzindo, também, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento e, assim, diminuindo a altura do cordão.

No trabalho de Casarini [5] também foi possível constatar que, apesar de não ser dado como o nível ótimo para o reforço, o ângulo de  $0^\circ$  teve um valor de sinal-ruído quase igual ao ótimo naquele trabalho.

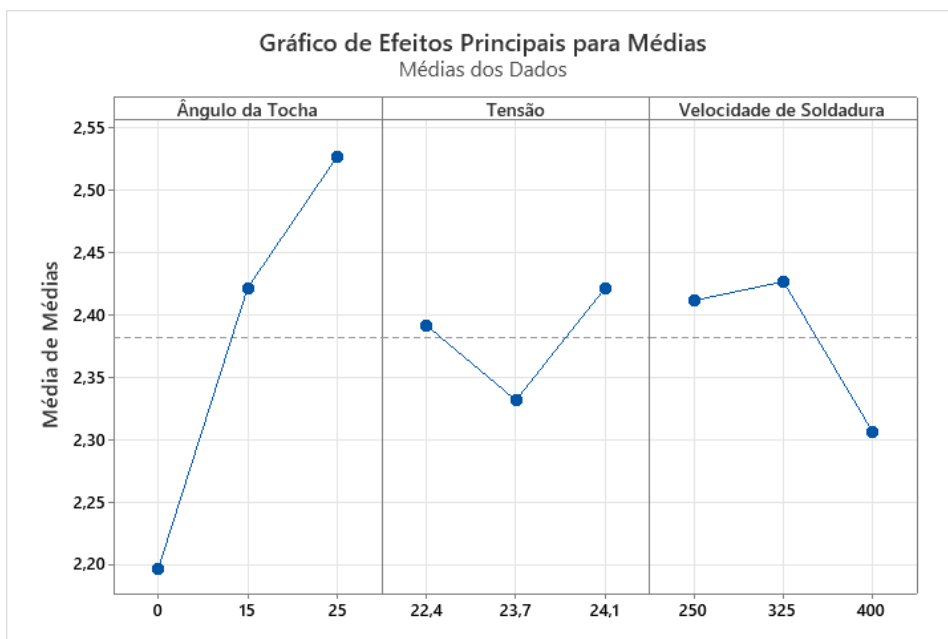


Figura 43: Médias dos resultados observados do reforço para cada parâmetro e nível.

Pela análise das médias dos resultados, percebe-se que o aumento da angulação da tocha gerou cordões com reforços maiores.

Para a tensão, na seção 2.2.3 deste trabalho é dito que um aumento da tensão gera cordões com menor altura (menor reforço), porém, este dado não foi observado nos experimentos executados, já que o comportamento da variação da tensão com o tamanho do reforço do cordão não foi uniforme.

Vale a pena destacar que estes comportamentos das influências dos parâmetros nas características geométricas do cordão, são, geralmente, estudados quando os outros parâmetros se mantêm constantes. Não foi o caso deste trabalho, em que mais de um parâmetro foi variado a cada experimento, podendo gerar estas diferenças de observações. Todavia, esta análise ainda é válida para examinar a influência de cada parâmetro no resultado final da soldadura, já que é possível realizar uma análise pelas médias obtidas de cada parâmetro e nível para cada característica de qualidade do cordão.

#### 4.4 LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Após a realização dos ensaios de tração, foram obtidas as curvas de Tensão x Deformação (como o exemplo da Figura 44) e o máximo valor de tensão aplicada em cada provete. Os resultados obtidos das tensões máximas para cada experimento, as médias e a razão sinal-ruído calculada são exibidas na Tabela 14. Para o limite de

resistência à tração, a razão S/N é calculada segundo a equação 2. Os gráficos obtidos dos ensaios de tração de todos os experimentos estão no Anexo II deste trabalho.

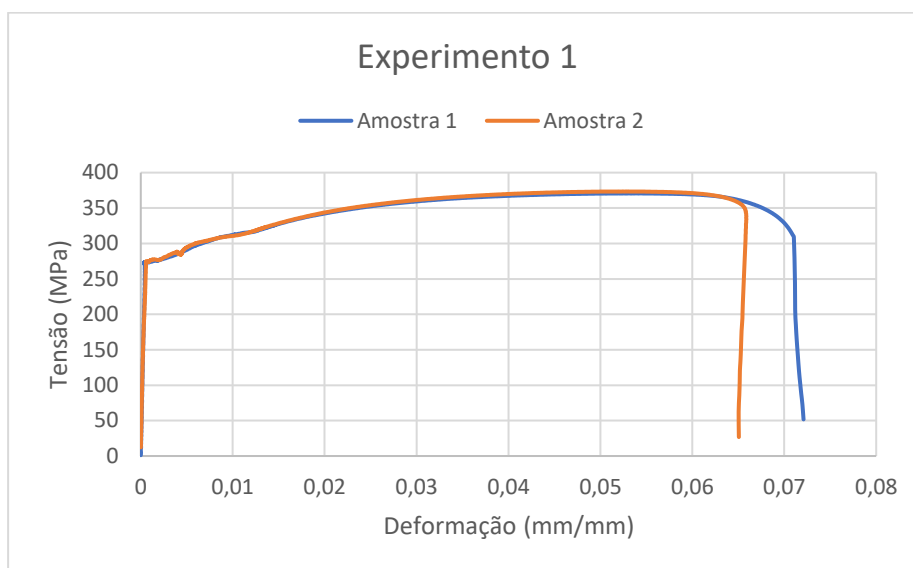


Figura 44: Gráficos de Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) do experimento 1.

Tabela 14: Valores das medições, médias e razão sinal-ruído para o limite de resistência à tração.

Experimento	Amostra 1 (MPa)	Amostra 2 (MPa)	Média (MPa)	Razão Sinal-Ruído (dB)
1	370,68	373,40	372,04	51,41
2	358,08	366,53	362,31	51,18
3	251,92	371,97	311,95	49,40
4	371,40	138,59	254,99	45,28
5	291,51	217,56	254,53	47,84
6	333,88	283,35	308,61	49,70
7	202,45	71,23	136,84	39,56
8	305,25	367,53	336,39	50,43
9	308,68	331,16	319,92	50,08

Durante a realização dos ensaios de tração, observou-se que alguns provetes não romperam no metal de base, como era esperado. Isto ocorreu, possivelmente, devido à presença de defeitos de soldadura no cordão de solda destes provetes.

Para alguns experimentos, apenas um dos provetes rompeu na região de soldadura, como, por exemplo, no experimento 4. Como pode ser visto na Figura 45, no provete 4.1 deste cordão houve um preenchimento total da junta, porém, no provete 4.2 o desalinhamento presente no mecanismo de soldadura fez com que o cordão não fosse depositado sobre a região da junta, não ocorrendo a correta união da chapa. Além disso,

nesta região ocorrem pontos de concentração de tensão, que em ensaios de tração são mais suscetíveis a romperem por fadiga.

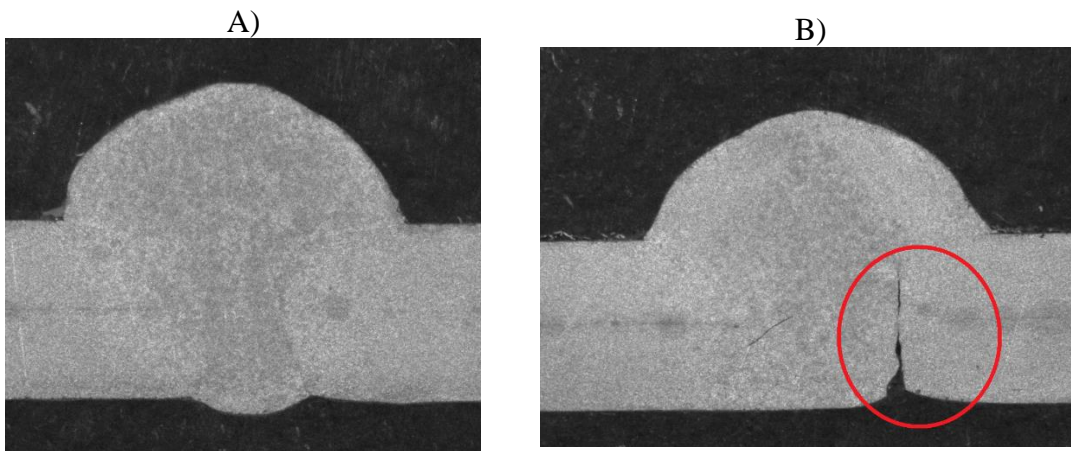


Figura 45: Perfil dos cordões de solda do experimento 4. a) provete 4.1; b) provete 4.2.

Em outros casos, como no experimento 9 (Figura 46), não houve desalinhamento da tocha com a região da junta a ser soldada, porém, o provete também se rompeu na região do cordão. Uma justificativa para esta ocorrência pode ser a presença de outros defeitos de soldadura, como porosidade, inclusão de gases da atmosfera externa e falta de penetração. Estes problemas, geralmente, estão associados às condições incorretas de soldadura ou preparação pobre da junta de soldadura.

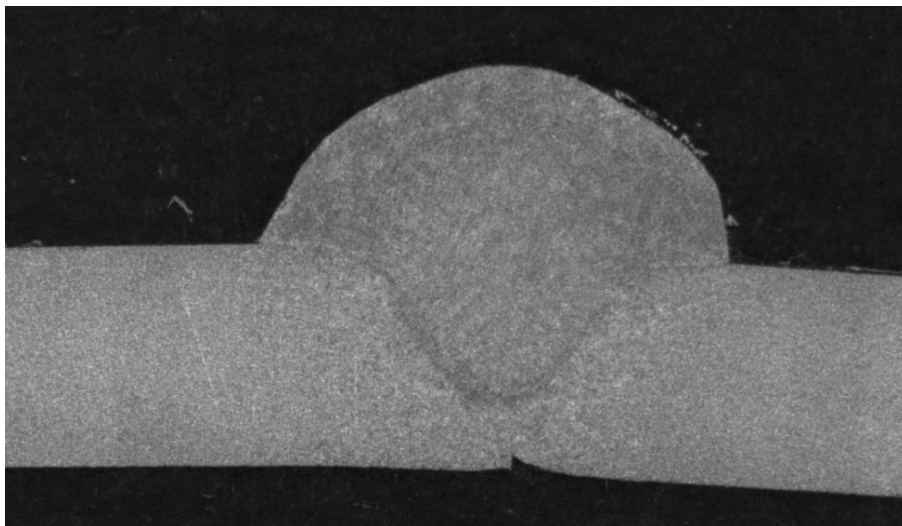


Figura 46: Perfil do cordão obtido no experimento 9, provete 9.1.

Com os valores da Tabela 14, calculou-se as médias das razões S/N para cada parâmetro e nível, visto na Figura 47.

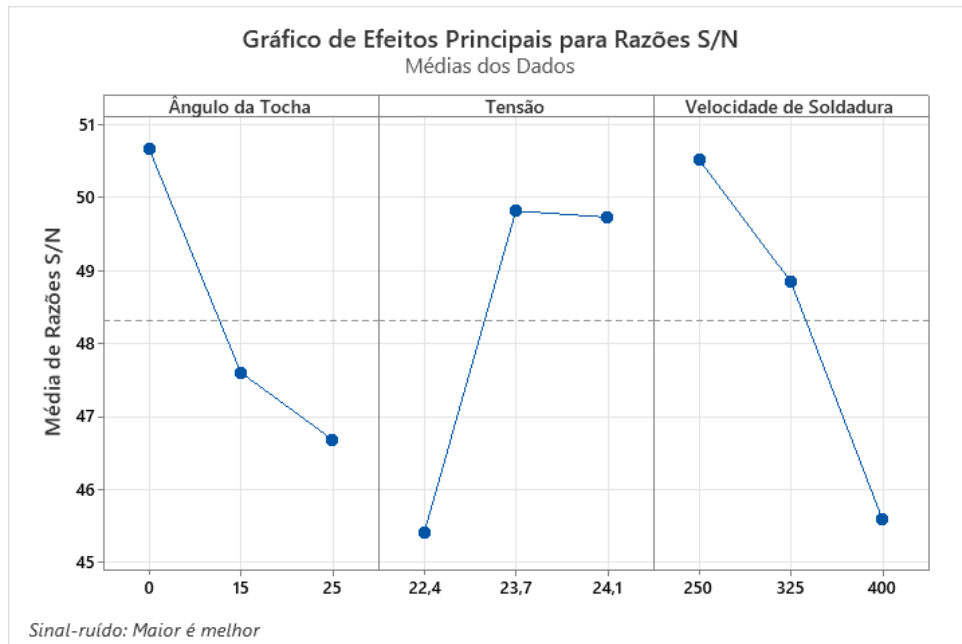


Figura 47: Médias das razões sinal-ruído para cada parâmetro e nível referentes ao limite de resistência à tração.

De acordo com os gráficos da Figura 47, a combinação ótima de parâmetros que resultará numa maior resistência à tração da junta soldada é: ângulo da tocha de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 250 mm/min. Assim como para as outras características de qualidade, fazendo a comparação com os resultados obtidos por Casarini [5] nenhum dos valores ótimos coincidiram. Contudo, a tensão de 24,1 V teve um alto valor da razão sinal-ruído em ambas pesquisas e foi possível observar um comportamento semelhante para o gráfico das médias da razão S/N para a velocidade de soldadura, em que o aumento deste parâmetro implica numa diminuição da resistência máxima da soldadura.

#### 4.5 ANÁLISE RELACIONAL DE GREY

Para a execução da análise relacional de Grey serão utilizadas todas as razões sinal-ruído calculadas para todos os experimentos e respostas analisadas (Tabela 15).

Tabela 15: Razões sinal-ruído para todos os experimentos e características de qualidade.

Experimento	S/N Resistência à Tração (dB)	S/N Penetração (dB)	S/N Largura (dB)	S/N Reforço (dB)
1	51,41	9,67	53,65	-6,80
2	51,18	4,97	33,89	-7,74
3	49,40	31,43	25,46	-5,95
4	45,28	14,20	25,68	-7,22
5	47,84	30,64	33,41	-7,01
6	49,70	19,05	27,40	-8,73
7	39,56	18,67	20,63	-8,64
8	50,43	25,14	60,41	-7,34
9	50,08	16,54	26,04	-8,15

O primeiro passo é o reprocessamento dos dados para normalização dos resultados. Este passo tem como objetivo eliminar os efeitos das variações das respostas e torná-las adimensionais, padronizando os resultados numa escala de 0 a 1. A normalização é feita a partir da equação 5 (característica “maior é melhor”), pois tal como referido anteriormente, como a normalização será realizada sobre a razão S/N, é sempre desejado o maior valor possível. Os valores normalizados dos resultados estão exibidos na Tabela 16.

Tabela 16: Dados normalizados da razão S/N de cada atributo de qualidade.

Experimento	S/N Resistência à Tração (dB)	S/N Penetração (dB)	S/N Largura (dB)	S/N Reforço (dB)
<b>Sequência ideal</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
1	1,0000	0,1778	0,8301	0,6938
2	0,9804	0,0000	0,3332	0,3574
3	0,8300	1,0000	0,1214	1,0000
4	0,4827	0,3489	0,1269	0,5435
5	0,6986	0,9702	0,3213	0,6196
6	0,8557	0,5324	0,1702	0,0000
7	0,0000	0,5178	0,0000	0,0327
8	0,9168	0,7624	1,0000	0,5015
9	0,8881	0,4375	0,1361	0,2088

A sequência ideal representa o valor ideal da normalização da razão sinal-ruído, ou seja, o melhor resultado para a razão S/N.

Posteriormente, foi calculado o coeficiente relacional de Grey, com os valores da Tabela 16 e utilizando a equação 7. Para este cálculo, primeiramente é necessário determinar o  $\Delta_{0i}$  que é a diferença entre o valor da sequência ideal e o valor normalizado obtido para cada experimento e cada resposta analisada. Os valores  $\Delta_{0i}$  calculados constam na Tabela 17. Com estes valores foram determinados os coeficientes relacionais de Grey (Tabela 18). Para este trabalho, o valor do coeficiente distintivo ( $\zeta$ ) utilizado foi de 0,5.

Tabela 17: Avaliação de  $\Delta_{0i}$  para cada experimento e resposta.

$\Delta_{0i}$				
Experimento	Resistência à Tração	Penetração	Largura	Reforço
1	0,0000	0,8222	0,1699	0,3062
2	0,0196	1,0000	0,6668	0,6426
3	0,1700	0,0000	0,8786	0,0000
4	0,5173	0,6511	0,8731	0,4565
5	0,3014	0,0298	0,6787	0,3804
6	0,1443	0,4676	0,8298	1,0000
7	1,0000	0,4822	1,0000	0,9673
8	0,0832	0,2376	0,0000	0,4985
9	0,1119	0,5625	0,8639	0,7912

Tabela 18: Coeficiente relacional de Grey.

Experimento	Resistência à Tração	Penetração	Largura	Reforço
1	1,0000	0,3782	0,7464	0,6202
2	0,9624	0,3333	0,4285	0,4376
3	0,7462	1,0000	0,3627	1,0000
4	0,4915	0,4344	0,3641	0,5228
5	0,6239	0,9438	0,4242	0,5679
6	0,7760	0,5167	0,3760	0,3333
7	0,3333	0,5090	0,3333	0,3408
8	0,8573	0,6779	1,0000	0,5008
9	0,8171	0,4706	0,3666	0,3872

Por último, com os valores da Tabela 18 e com a equação 8 é possível obter o grau relacional de Grey, que é a média dos coeficientes relacionais de Grey para cada experimento. Os valores calculados e a respectiva ordem de cada experimento podem ser verificados na Tabela 19. Para o grau relacional de Grey, quanto maior seu valor, mais próximo a razão S/N do experimento esteve do valor idealizado.

Tabela 19: Grau relacional de Grey para cada experimento e sua respectiva ordem.

Experimento	Grau Relacional de Grey	Ordem
1	0,6862	3
2	0,5405	5
3	0,7772	1
4	0,4532	8
5	0,6400	4
6	0,5005	7
7	0,3791	9
8	0,7590	2
9	0,5104	6

Assim como para cada característica de qualidade, também é possível determinar o efeito de cada parâmetro no grau relacional de Grey. Utilizando o *software* Minitab20, obteve-se a média do grau relacional de Grey para cada parâmetro e nível (Tabela 20). Com estes valores, é possível determinar a combinação ótima.

Tabela 20: Resposta para o Grau Relacional de Grey.

Parâmetro	Grau relacional de Grey			
	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Delta
Ângulo da tocha	<b>0,6680</b>	0,5312	0,5495	0,1367
Tensão	0,5062	<b>0,6465</b>	0,5960	0,1403
Velocidade de soldadura	<b>0,6486</b>	0,5013	0,5988	0,1472

Logo, de acordo com a Tabela 20, a combinação ótima de parâmetros que resulta em mínimo reforço do cordão, largura e penetração próximos de 3 mm e máxima resistência à tração é: ângulo da tocha de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 250 mm/min.

#### 4.6 CONFIRMAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a seleção do nível ideal dos parâmetros, foram realizados os experimentos para confirmação dos resultados. Primeiramente, com auxílio da equação 9 é calculado o grau relacional de Grey estimado para a combinação ótima definida. Sendo esta combinação 0°, 23,7 V e 250 mm/min o grau relacional estimado é dado por:

$$\hat{\eta} = 0,5829 + (0,6680 - 0,5829) + (0,6465 - 0,5829) + (0,6486 - 0,5829)$$

$$\hat{\eta} = 0,7973$$

Utilizando da mesma metodologia citada no Capítulo III para execução dos cordões de solda e, posterior, preparação das amostras e ensaios, foram efetuados dois cordões utilizando os parâmetros ótimos definidos. Os resultados obtidos neste experimento, as médias e as razões S/N calculadas são apresentados na Tabela 21 e 22. As imagens dos perfis dos cordões e o gráfico Tensão x Deformação obtidos estão no Anexo I e II, respectivamente.

Tabela 21: Resultados obtidos para o ensaio de confirmação.

Resposta	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Média (mm)	Razão Sinal-ruído (dB)
Penetração	3,68	3,70	3,69	48,33
Largura	7,43	7,25	7,34	35,22
Reforço	2,84	2,80	2,82	-9,01

Tabela 22: Resultados obtidos para o limite de resistência à tração do ensaio de confirmação.

Resposta	Amostra 1 (MPa)	Amostra 2 (MPa)	Média (MPa)	Razão Sinal-ruído (dB)
Resistência à tração	372,60	363,24	367,96	51,31

Do mesmo modo, com as razões S/N determinadas, foi executada a Análise Relacional de Grey sobre os resultados do ensaio de confirmação para determinar o Grau Relacional de Grey. A Tabela 23 apresenta a evolução do Grau Relacional de Grey para o melhor experimento inicial e para a combinação ótima, posteriormente estabelecida.

O experimento definido como inicial foi o número 3, pois foi o que apresentou o maior grau relacional de Grey, segundo a Tabela 19. Este experimento utilizou os seguintes níveis: ângulo da tocha de 0°, tensão de 24,1 V e velocidade de 400 mm/min.

A nomenclatura adotada na Tabela 23 para o nível dos parâmetros é representada pela letra referente ao parâmetro (A – ângulo da tocha; T – tensão e; V – velocidade de soldadura) e o nível do respectivo parâmetro.

Tabela 23: Comparação entre parâmetros iniciais e ótimos.

	Combinação inicial	Fatores ótimos de soldadura	
		Prognóstico	Experimental
Nível	A1 T3 V3	A1 T2 V1	A1 T2 V1
Penetração (mm)	1,85	-	3,69
Largura (mm)	5,97	-	7,34
Reforço (mm)	2,11	-	2,82
Limite de Resistência à tração (MPa)	311,95	-	367,96
Grau Relacional de Grey	<b>0,7772</b>	<b>0,7973</b>	<b>0,8790</b>

Pela análise da Tabela 23 é visto que a utilização do método Taguchi juntamente com a Análise Relacional de Grey trouxe uma melhoria ao processo de 13,09%.

#### 4.7 ANOVA

A Análise de Variância é aplicada no final deste estudo, para inferir algumas importantes conclusões baseadas na análise dos resultados experimentais. Este método foi utilizado para verificar o nível de influência de cada fator de controle numa resposta específica. O cálculo de cada componente da ANOVA é feito pelas equações mostradas na Figura 10. Estes cálculos foram realizados pelo *software* Minitab20. Os resultados da análise de variância se encontram na Tabela 24.

Tabela 24: Valores da ANOVA para a Análise Relacional de Grey.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Contribuição
Ângulo da Tocha	2	0,03306	0,01653	0,57	21,34%
Tensão	2	0,03031	0,01515	0,52	19,57%
Velocidade de soldadura	2	0,03365	0,01682	0,58	21,73%
Erro residual	2	0,05788	0,02894		37,37%
Total	8	0,15489			100,0%

Com esta análise verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência no resultado final é a velocidade de soldadura com 21,73%, seguido do ângulo da tocha com 21,34% e da tensão com 19,57%.

Outro ponto de interesse observado na Tabela 24 é que o erro residual apresentou influência de 37,37% nos resultados. Este erro representa a variabilidade que permanece no modelo após a identificação de todos os efeitos principais [50]. Ou seja,

aproximadamente, um terço das variações dos resultados não são explicados modelo selecionado.

Este erro pode estar relacionado com a seleção dos parâmetros e dos níveis que não foram capazes de explicar o modelo. Por exemplo, a utilização de outros parâmetros, como a corrente de soldadura e a velocidade de alimentação do arame ou a utilização de outros níveis para os parâmetros estudados neste trabalho poderiam diminuir a variabilidade restante do modelo. A utilização de mais níveis para os parâmetros, sendo utilizada uma matriz ortogonal maior, também poderia diminuir o erro residual, porém, isto tornaria o processo mais caro e demorado.

Além disso, podem ocorrer erros intrínsecos aos instrumentos utilizados e que não são facilmente mensuráveis, como a inexperiência na utilização de alguns equipamentos e a variação presente entre os valores ajustados e os valores nominais dos equipamentos.

Os defeitos de soldadura encontrados também podem aumentar o erro residual do modelo, já que interferem nos resultados observados para cada experimento.

Apesar deste valor do erro, o modelo aplicado nas práticas experimentais permitiu obter um resultado que trouxe melhorias em relação às condições inicialmente definidas, demonstrando a eficiência do uso do método Taguchi e da análise relacional de Grey no planejamento de experimentos.

# CAPÍTULO V

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão feitas as últimas considerações do trabalho, como a validação do método utilizado, um resumo dos resultados e outros pontos de interesse que foram percebidos durante a sua execução. Posteriormente, serão feitas algumas propostas de trabalhos futuros com temas semelhantes aos estudados nesta dissertação.

### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo determinar uma combinação ótima dos níveis dos parâmetros selecionados que obteriam uma resposta desejada e também verificar quais destes parâmetros exerciam maior influência sobre o resultado final da soldadura.

Para esta otimização foram utilizados dois métodos, o método Taguchi que permite criar uma matriz de ensaios pequena e que permite estudar a interação de um ou mais fatores e, também, determinar qual a combinação ótima para cada resposta analisada, individualmente. A análise relacional de Grey possibilita a determinação da combinação ótima que abrange todas as características de qualidade selecionadas. Por fim, foi realizada a análise de variância (ANOVA) que identificou a contribuição de cada parâmetro no resultado final.

Para a penetração do cordão, o nível ótimo dos parâmetros que proporcionou o melhor resultado foi o ângulo da tocha de 15°, tensão de 24,1 V e velocidade de soldadura de 400 mm/min.

Para a largura do cordão, a combinação ótima determinada foi: ângulo da tocha de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 250 mm/min.

Para o reforço, a combinação ótima que proporcionou a sua minimização foi ângulo da tocha de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 400 mm/min.

E para maximizar o valor do limite de resistência à tração, os valores ótimos dos parâmetros foram: ângulo da tocha de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 250 mm/min.

Por fim, para se obter a maior resistência à tração, menor reforço e largura e penetração do cordão próximos a 3 mm, a combinação ótima encontrada foi: ângulo da tocha de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de soldadura de 250 mm/min. De posse destes valores foram executados novos cordões e, a partir da análise dos resultados obtidos, pode-se notar que o uso do método Taguchi e da análise relacional de Grey melhorou o modelo em 13,09% em relação ao melhor resultado obtido nos experimentos iniciais. Tal facto comprova a utilidade destes métodos no planeamento de experimentos e na determinação de níveis e fatores ótimos.

Com a utilização da ANOVA, conclui-se que a velocidade de soldadura é o parâmetro que apresenta maior contribuição para o resultado final com 21,73%, o ângulo da tocha teve contribuição de 21,34% e a tensão 19,57%.

Para haver um refinamento dos resultados e diminuição do erro residual, podem ser realizadas mais iterações pelo método Taguchi, pela seleção de mais parâmetros, quando possível, e de mais níveis, utilizando matrizes ortogonais maiores. Porém, é válido ressaltar que quanto maior a matriz ortogonal selecionada, mais onerosos são os experimentos.

Apesar de se mostrar efetivo e prático, o método Taguchi apresenta uma certa limitação quando as respostas analisadas são da característica “nominal é melhor”, ou seja, quando é desejada um valor nominal para esta resposta. Isto acontece, pois, a fórmula utilizada para o cálculo da razão sinal-ruído nestes casos abrangem apenas as médias e desvios padrões dos experimentos. Logo, o experimento que terá maior valor da razão S/N será aquele que apresenta menor variação dos resultados e não aquele que mais se aproximou do valor esperado. Apesar disso, ainda é possível realizar uma análise eficaz deste tipo de resultado.

## **5.2 TRABALHOS FUTUROS**

A soldadura é uma área extremamente ampla e que se desenvolve cada dia mais. No que toca aos estudos dos parâmetros de soldadura e suas interações, existe ainda uma necessidade de estudo destas interações, pois são muitas e complexas. Neste trabalho foram otimizadas a tensão, velocidade de soldadura e o ângulo da tocha com base na largura, penetração e reforço do cordão e no limite de resistência à tração. Seria interessante estudar como outros fatores, como a corrente de soldadura, velocidade de alimentação do arame, caudal do gás e o *stick-out* possuem influência sobre estes mesmos

resultados, encontrando, também, uma combinação ótima destes. Pode-se, também, realizar um estudo em que são otimizados os mesmos parâmetros deste trabalho, porém, avaliando os defeitos de soldadura encontrados, permitindo otimizar um cordão de solda que apresente o menor risco de ocorrer defeitos.

Também é válido, quando disposto de tempo e material, aumentar o número de iterações do modelo, aumentando de três níveis para quatro ou cinco e/ou a utilização de mais parâmetros, que irá aumentar a precisão dos resultados.

É possível, também, estender este estudo para outros processos de soldadura, como TIG, SAW, eletrodo revestido e outros métodos, bem como para outros materiais de base, como alumínio, o ferro fundido e o aço inoxidável que são industrialmente relevantes.

## REFERÊNCIAS

---

- [1] Pal, S., Malviya, S. K., Pal, S. K., & Samantaray, A. K. (2009). Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11–12), 1250–1260. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-1931-0>
- [2] Ghosh, N., Pal, P. K., & Nandi, G. (2016). Parametric Optimization of MIG Welding on 316L Austenitic Stainless Steel by Grey-based Taguchi Method. *Procedia Technology*, 25(Raerest), 1038–1048. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.204>
- [3] Hsiao, Y. F., Tarng, Y. S., & Huang, W. J. (2008). Optimization of plasma arc welding parameters by using the Taguchi method with the grey relational analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(1), 51–58. <https://doi.org/10.1080/10426910701524527>
- [4] Cecílio, V. A. M. (2017). *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.
- [5] Casarini, A. (2019). *Estudo dos Parâmetros de Soldadura MIG / MAG para Otimização das Propriedades Mecânicas e Geométricas do Cordão de Solda*. Instituto Politécnico de Bragança (IPB).
- [6] Marques, P. V., Modenesi, P. J., & Bracarense, A. Q. (2011). *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia* (3rd ed.). Editora UFMG.
- [7] *American Welding Society - Learning*. (n.d.). Acesso em: 17/11/2020. from <https://awo.aws.org/>
- [8] Silva, F. J. G. (2016). *Tecnologia da Soldadura - Uma Abordagem Técnico-Didática* (Publindústria (Ed.); 2º Edição).
- [9] Brien, A.O. (1983). Welding Handbook. In *Welding Handbook* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1007/978-1-349-05561-6>
- [10] Wainer, E., Brandi, S. D., & Mello, F. D. H. de. (2004). *Soldagem: Processos e Metalurgia* (E. Blücher (Ed.)).
- [11] Ribeiro, J.E. “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
- [12] Barbedo, N. D. D. (2011). Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica. In *Universidade Federal de Itajuba*. <http://juno.unifei.edu.br/bim/0038675.pdf>

- [13] Fortes, C., & Vaz, C. T. (2005). Soldagem MIG / MAG. *Soldagem MIG/MAG*.
- [14] Nogueira, R. M. U. (2015). *Variabilidade do Cordão de Solda nos Processos de Soldagem MIG/MAG e Arame Tubular*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [15] Pereira, A. S. (2012). *Soldagem Em Operação De Tubos API Técnica em De Alta Resistência E Baixa Espessura Com Ênfase Na Perfuração E Trincas a Frio*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [16] Dutra, M. (2013). *Juntas e Símbolos de solda*. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/marcoscdutra/juntas-e-simbolos/2>>
- [17] de Souza, C. I. (2011). *Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal* [Universidade Federal de Uberlândia]. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000300009>
- [18] Ferrari, M. (2019). *O reforço da solda aumenta a resistência da junta?* Acesso em: 30/03/2021. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/o-reforço-da-solda-aumenta-resistência-junta-marcello-ferrari/?originalSubdomain=pt>
- [19] Castro, N. L. B., Ferreira, C. R., Leite, D. U., Lima, K. U., & Vieira, M. E. L. (2018). Ensaio Para Determinação De Resistência Em Juntas Soldadas. *Revista CONSTRUINDO*, 9, 57–67.
- [20] ABENDE (2004). Apostila Sobre Ensaio Não-Destrutivos, disponível em: [www.abende.org.br](http://www.abende.org.br), campo - Conheça os Ensaio Não Destrutivos
- [21] De Lima Júnior, L. R. (2013). *Caracterização Microestrutural e Mecânica de Juntas Soldadas Utilizando o Processo GTAW, FCAW e SMAW*. Universidade Federal de Pernambuco.
- [22] Maquiné, T. M., Lima, M. C. G. de A., Oliveira, P. A., Medeiros, S. R. de, & Neto, J. C. de M. (2019). Influência da Variação dos Parâmetros de Soldagem MIG (GMAW) no Comportamento das Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas em Aço Naval ASTM 131 Grau A. *Revista de Educação, Ciência e Tecnologia Do Ifam*, 31(2), 15–30.
- [23] Marcomini, J. B. (n.d.). *Ensaio Mecânicos dos Materiais - Tração*. Universidade de São Paulo. Disponível em: [http://www.smm.eesc.usp.br/smm/images/material-didatico/smm342/AULA 5- Ensaio de Tracao.pdf](http://www.smm.eesc.usp.br/smm/images/material-didatico/smm342/AULA%205-Ensaio%20de%20Tracao.pdf)
- [24] *Notas de aula sobre: TENSÃO E DEFORMAÇÃO*. (n.d.). (USP), Universidade de São Paulo. Acesso em: 22/02/2021, [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/182782/mod\\_resource/content/1/Notas de aula de tensao e deformacao.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/182782/mod_resource/content/1/Notas%20de%20aula%20de%20tensao%20e%20deformacao.pdf)
- [25] European Committee For Standarization. (2009). *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009)*. *TURKISH STANDARD*.

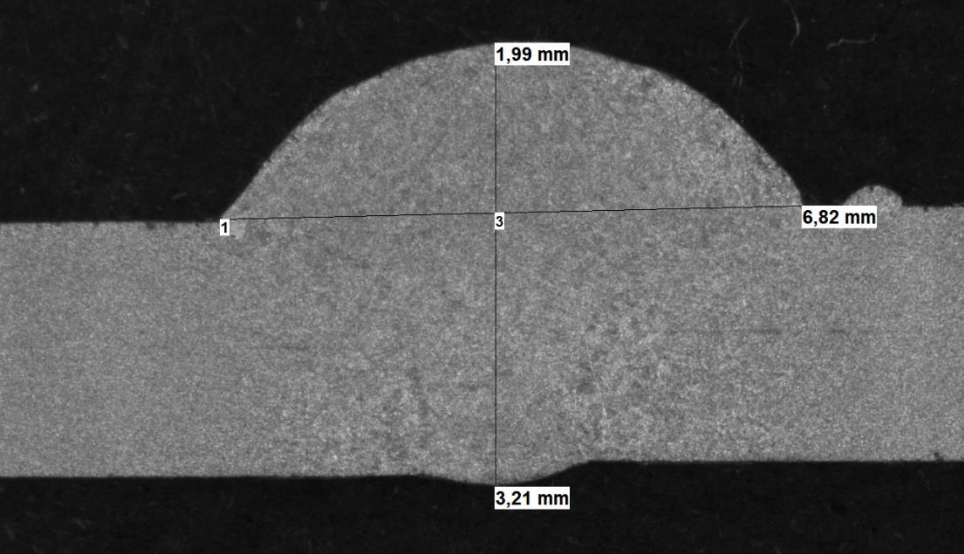
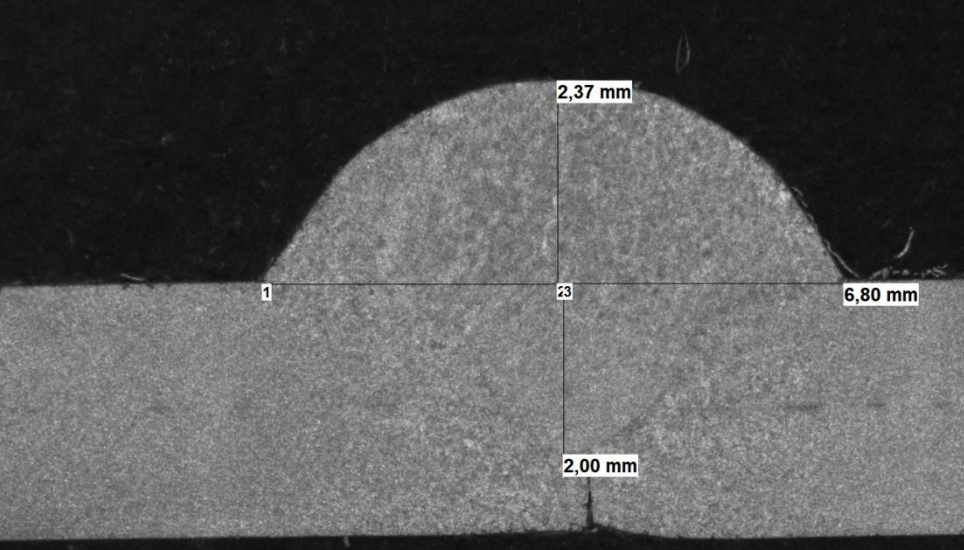
- [26] British Standards Institution. (2012). *BS4136: Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test*. 18.
- [27] InfoSolda. (2018). *Ensaio Macrográfico*. Acesso em: 22/02/2021, <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos-livros-senai/219-ensaio-macrografico>
- [28] Moita, N. F. V. C. (2007). *Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos*. Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico.
- [29] Ross, P. J. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [30] Roy R.K (2001) *Design of Experiments Using the Taguchi Approach*. Wiley, New York
- [31] Park, S. H. - *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Chapman & Hall, First Edition, 1996
- [32] Pereira, D., Ribeiro, J., & Queijo, L. (2018). Otimização de Parâmetros de Fresagem Usando o Método Taguchi com a Análise Relacional de Grey. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 10, 56–70.
- [33] “O que é razão sinal-ruído em um experimento de Taguchi?”, *Minitab Support*, 2018. [Online]. Disponível em: <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/> Acesso em: 25/03/2021.
- [34] Sapakal, S. V., & Telsang, M. T. (2012). Parametric Optimization of Mig Welding Using Taguchi Design Method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1(IV), 2–4.
- [35] Kuo, Y., Yang, T., & Huang, G. W. (2008). The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers and Industrial Engineering*, 55(1), 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.002>
- [36] Mohamed, S. A. N., Zainudin, E. S., Sapuan, S. M., Deros, M. A. M., & Arifin, A. M. T. (2019). Integration of Taguchi-Grey relational analysis technique in parameter process optimization for rice husk composite. *BioResources*, 14(1), 1110–1126. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1110-1126>
- [37] Ertugrul, I., & Prof, A. (2016). Grey Relational Analysis Approach In Academic Performance Comparison Of University: A Case Study Of Turkish Universities. *European Scientific Journal*, 12(10), 128–139.
- [38] Wu, W. (2021). A revised grey relational analysis method for multicriteria group decision-making with expected utility theory for oil spill emergency management.

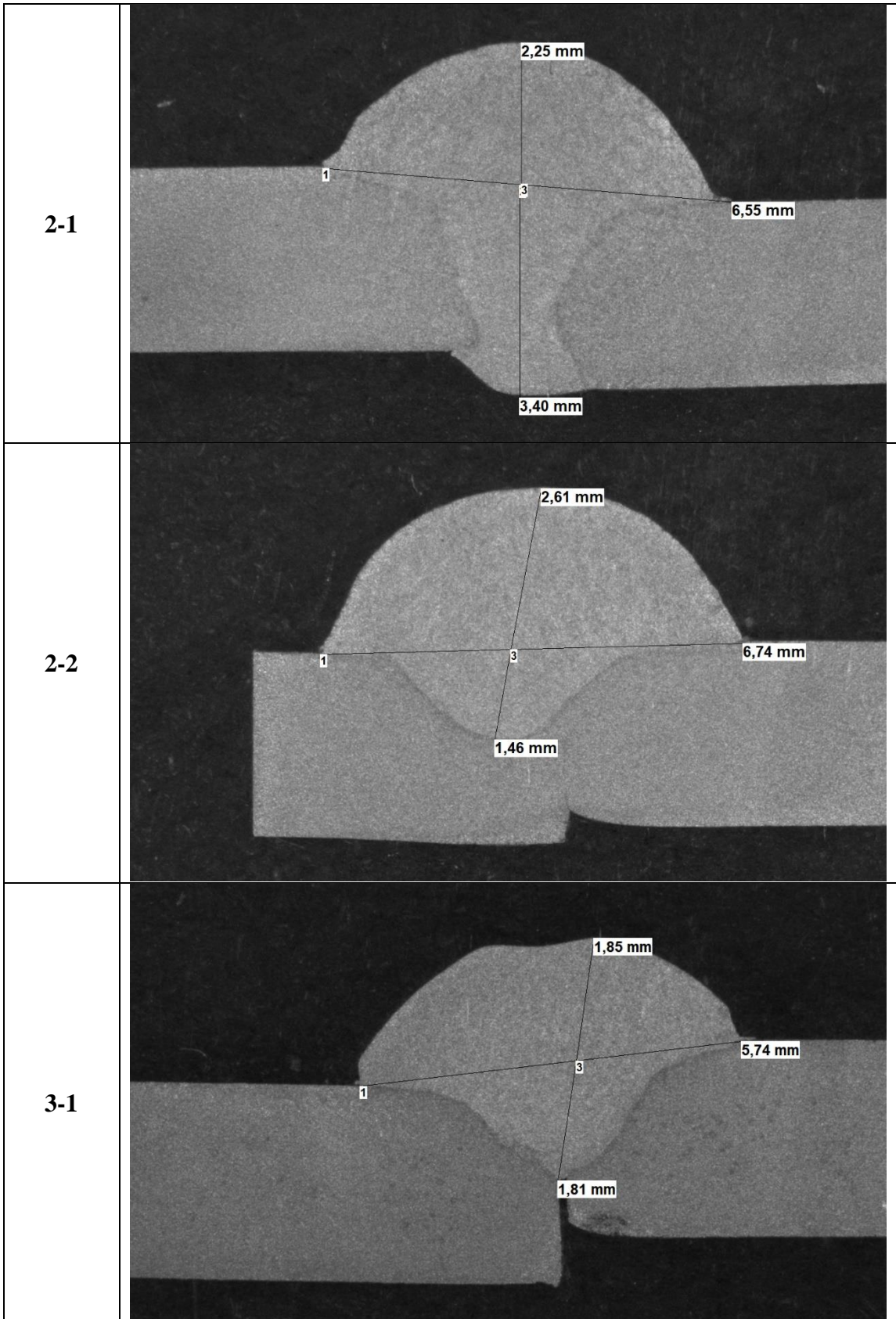
- [39] Lin, S. Te, Horng, S. J., Lee, B. H., Fan, P., Pan, Y., Lai, J. L., Chen, R. J., & Khan, M. K. (2011). Application of grey-relational analysis to find the most suitable watermarking scheme. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 7(9), 5389–5401.
- [40] Khan, Z. A., Siddiquee, A. N., Khan, N. Z., Khan, U., & Quadir, G. A. (2014). Multi Response Optimization of Wire Electrical Discharge Machining Process Parameters Using Taguchi based Grey Relational Analysis. *Procedia Materials Science*, 6(September), 1683–1695. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.154>
- [41] Panda, A., Sahoo, A. K., & Rout, A. K. (2016). Multi-attribute decision making parametric optimization and modeling in hard turning using ceramic insert through grey relational analysis: A case study. *Decision Science Letters*, 5(4), 581–592. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2016.3.001>
- [42] Blog da Minitab. (2019). *Entendendo Análise de Variância (ANOVA) e o teste F*. Acesso em: 01/04/2021 Disponível em <<https://blog.minitab.com/pt/entendendo-analise-de-variancia-anova-e-o-teste-f>>
- [43] Carpinetti, L. C. (2017). *Experimento em Blocos Completamente Aleatorizados*. Acesso em: 01/04/2021 Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=XmlHh189j94>>
- [44] Suporte Minitab 18. *Tabela Análise de Variância de Análise de Variabilidade*. Acesso em: 01/04/2021 Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-variability/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/>
- [45] Oper. *Como Interpretar uma Análise de Variância (ANOVA)*. Acesso em: 05/04/2021. Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/como-interpretar-analise-de-variancia-anova/>>
- [46] Grupo Ferpinta. (n.d.). Acesso em: 05/05/2021. Disponível em: <http://www.ferpinta.pt/index.php?cat=26>
- [47] SUMIG. *ER70S-6Arame MIG/MAG Aço Carbono*. Acesso em: 26/04/2021. Disponível em: [https://www.sumig.com/arquivo-catalogo/06\\_Acessorios/Arame MIG MAG ACO CARBONO SUMIG.pdf](https://www.sumig.com/arquivo-catalogo/06_Acessorios/Arame MIG MAG ACO CARBONO SUMIG.pdf)
- [48] ESAB, “Mig/Mag Wires (Gmaw) Mild Steel Wires.” p. 2, 2020, [Online]. Disponível em: [https://www.esab.co.uk/shared/customcf/spdfcall.cfm?cnodeID=13282&siteID=en\\_GB&localeID=1](https://www.esab.co.uk/shared/customcf/spdfcall.cfm?cnodeID=13282&siteID=en_GB&localeID=1).

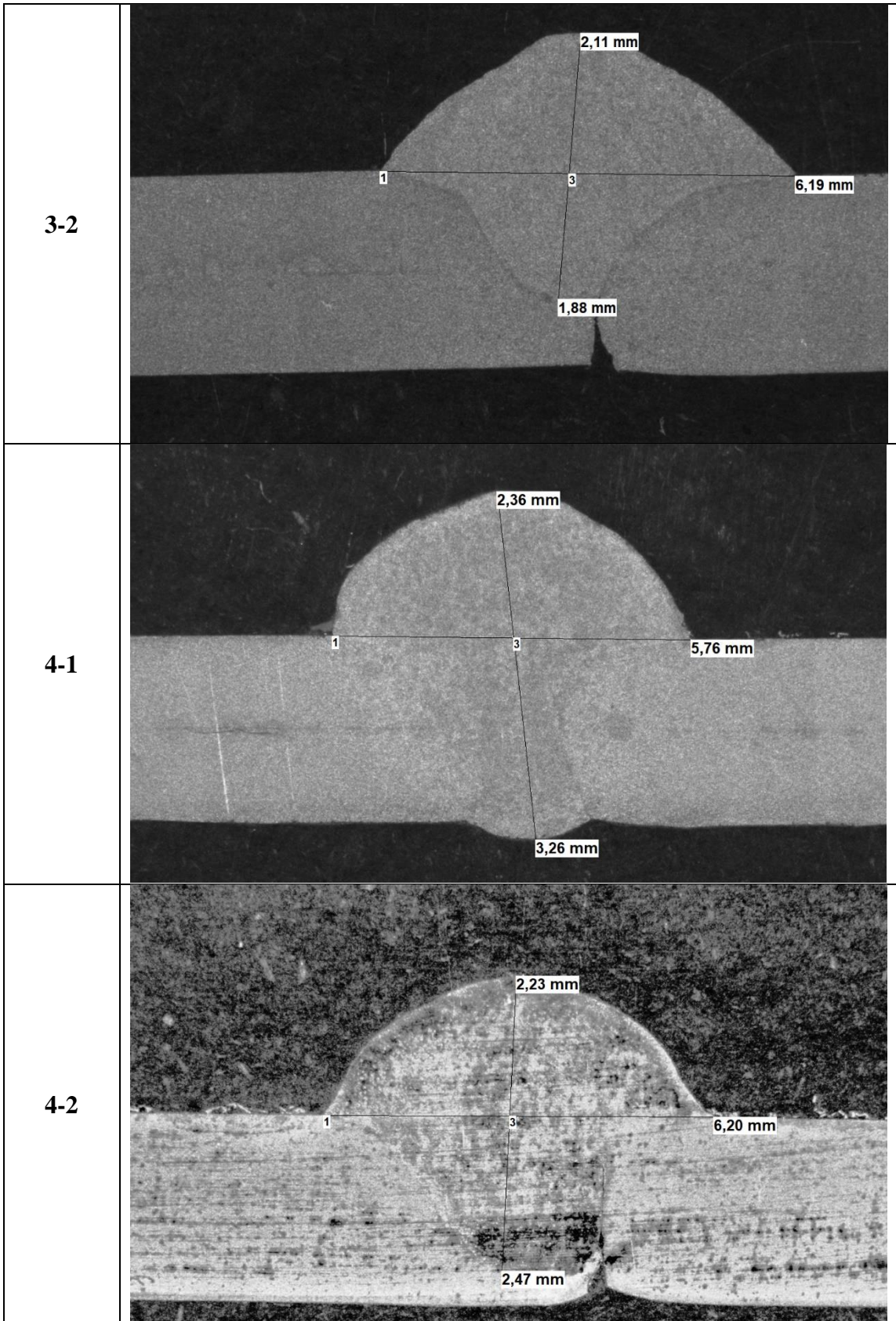
- [49] American Welding Society. (2005). *AWS 5.18/5.18M: Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*.
- [50] Ferrari, M. (2020). *Ensaio de Tração em Juntas Soldadas*. Acesso em 24/05/2021. Disponível em: [https://www.linkedin.com/pulse/ensaio-de-tração-em-juntas-soldadas-marcello-ferrari/?trk=related\\_artice\\_Ensaio de Tração em Juntas Soldadas\\_article-card\\_title](https://www.linkedin.com/pulse/ensaio-de-tração-em-juntas-soldadas-marcello-ferrari/?trk=related_artice_Ensaio%20de%20Tração%20em%20Juntas%20Soldadas_article-card_title)
- [51] Mendes, H. D. O. (2019). *Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento CNC*. Instituto Politécnico de Bragança.
- [52] Suporte Minitab 18. (n.d.). *O que é erro?* Acesso em: 14/06/2021, Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-error/>

# ANEXOS

## ANEXO I – PERFIS DOS CORDÕES DE SOLDA OBTIDOS E SUAS RESPECTIVAS MEDIÇÕES

Amostra N°	Perfil do Cordão de Solda
1-1	
1-2	

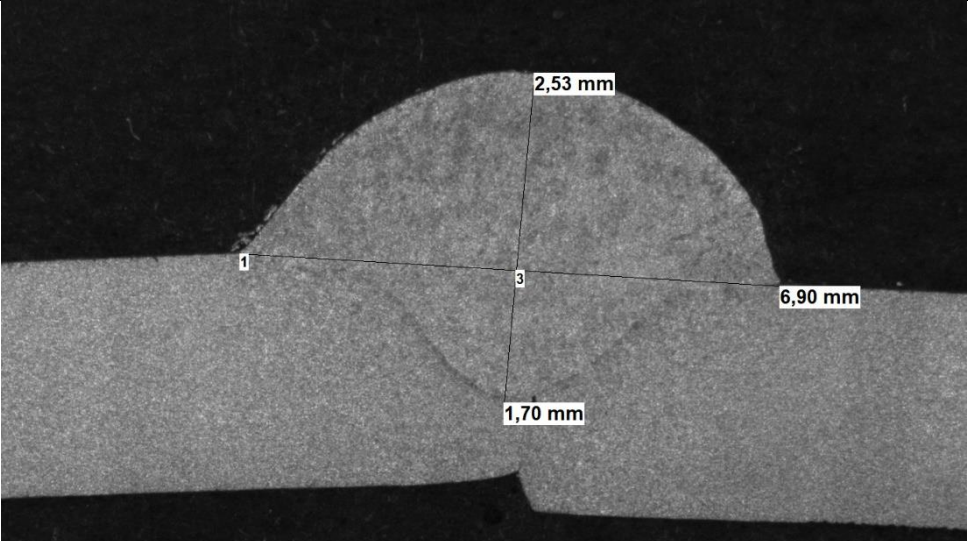
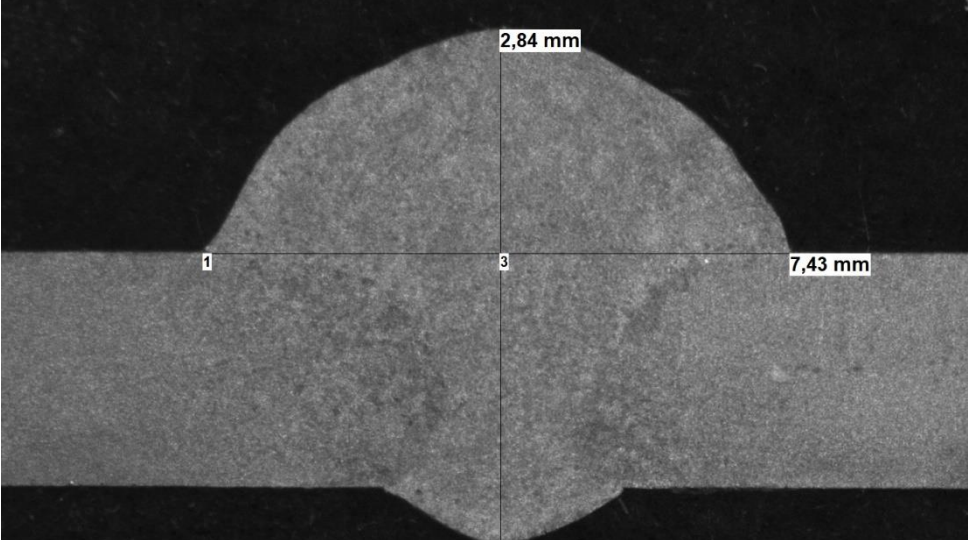
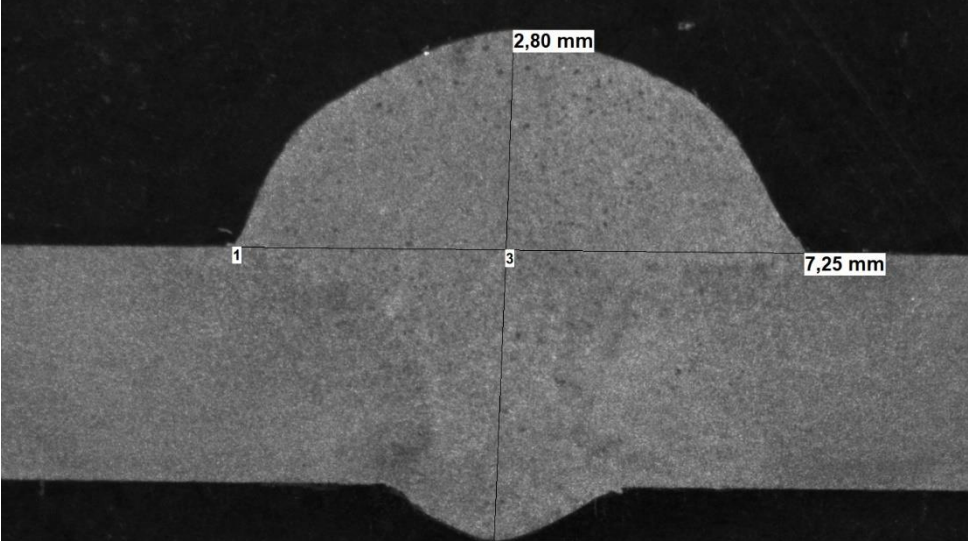




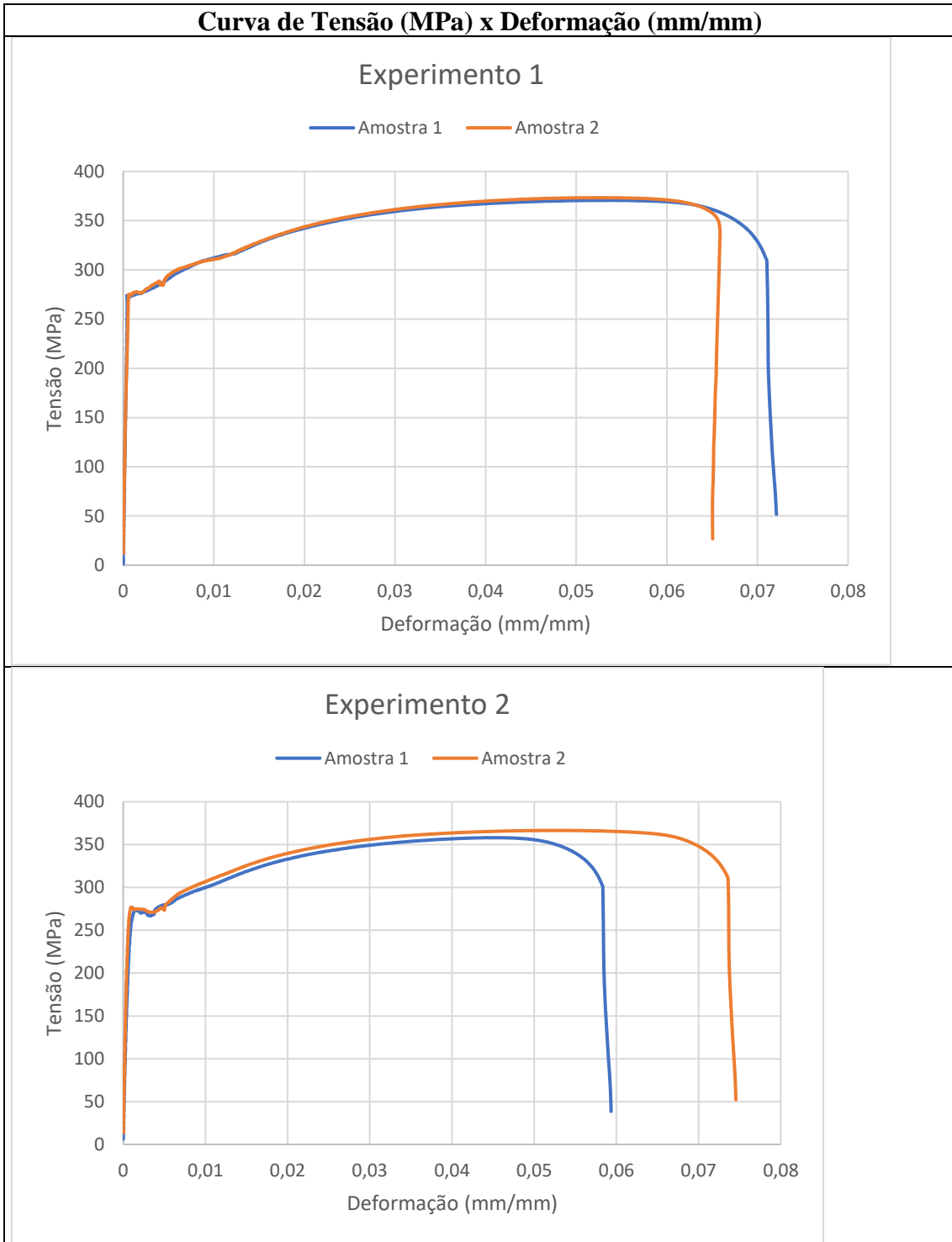
<p>5-1</p>	
<p>5-2</p>	
<p>6-1</p>	

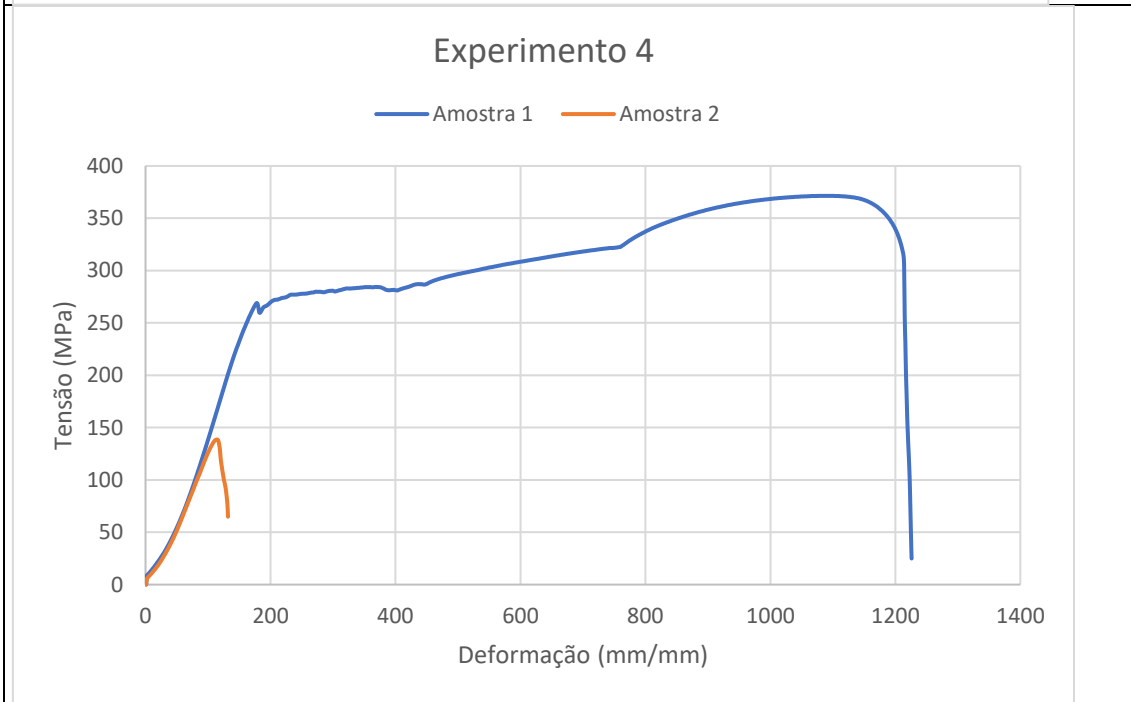
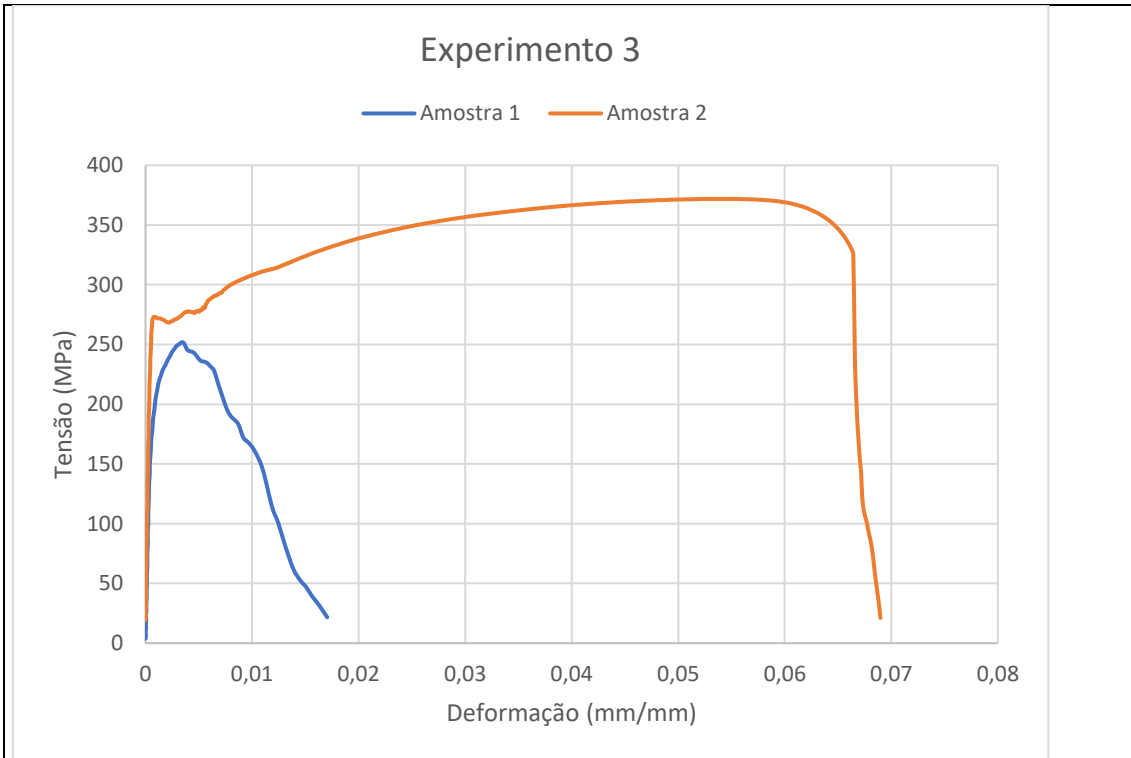
<p>6-2</p>	
<p>7-1</p>	
<p>7-2</p>	

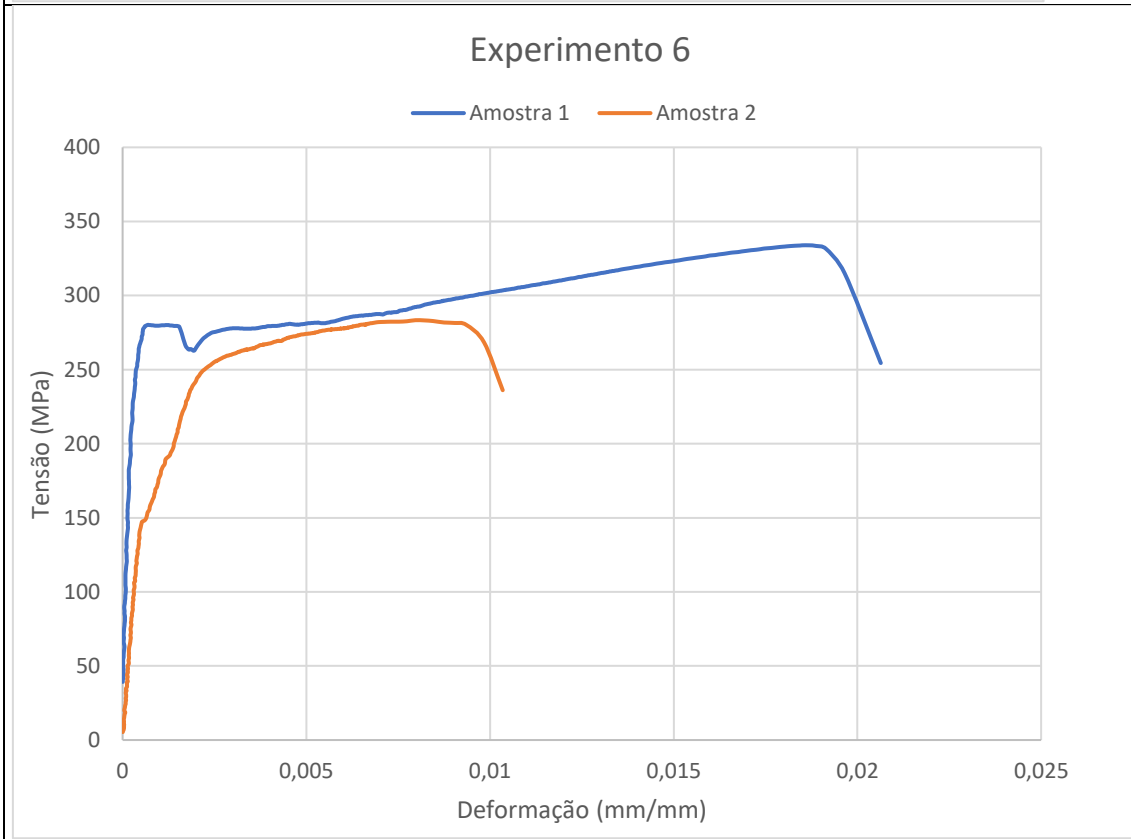
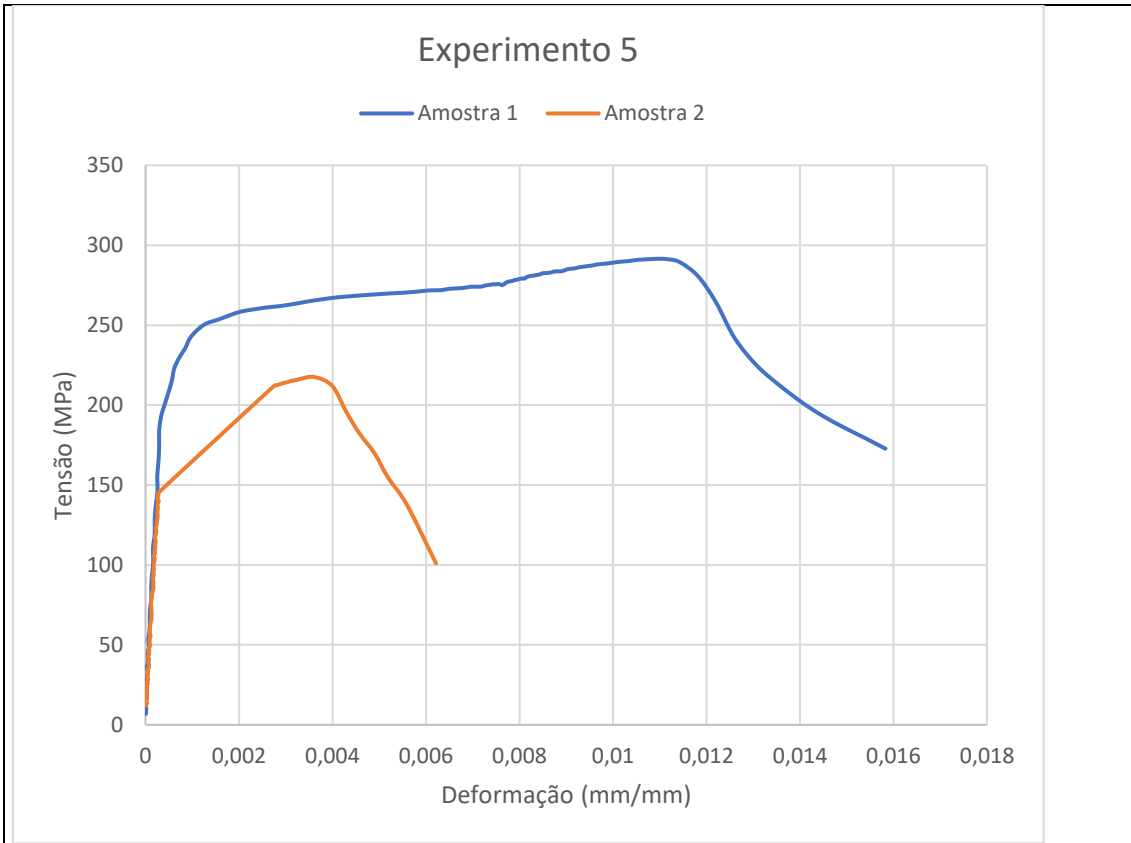
<p>8-1</p>	
<p>8-2</p>	
<p>9-1</p>	

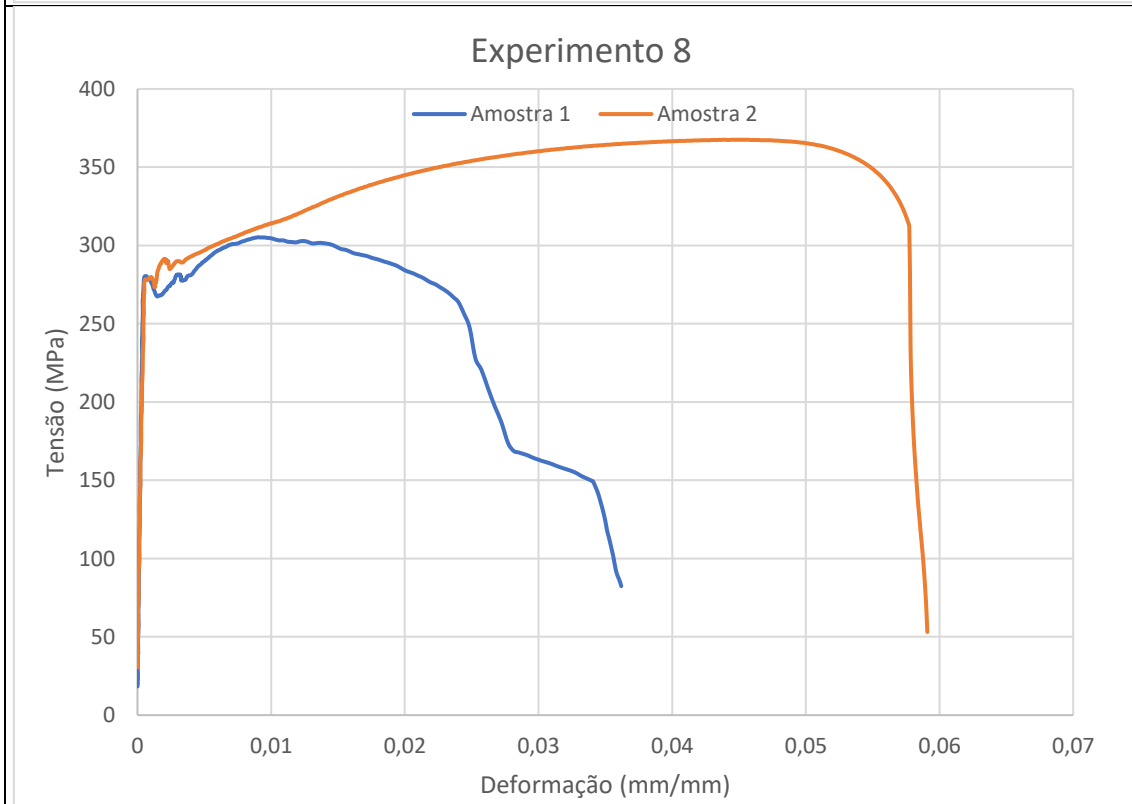
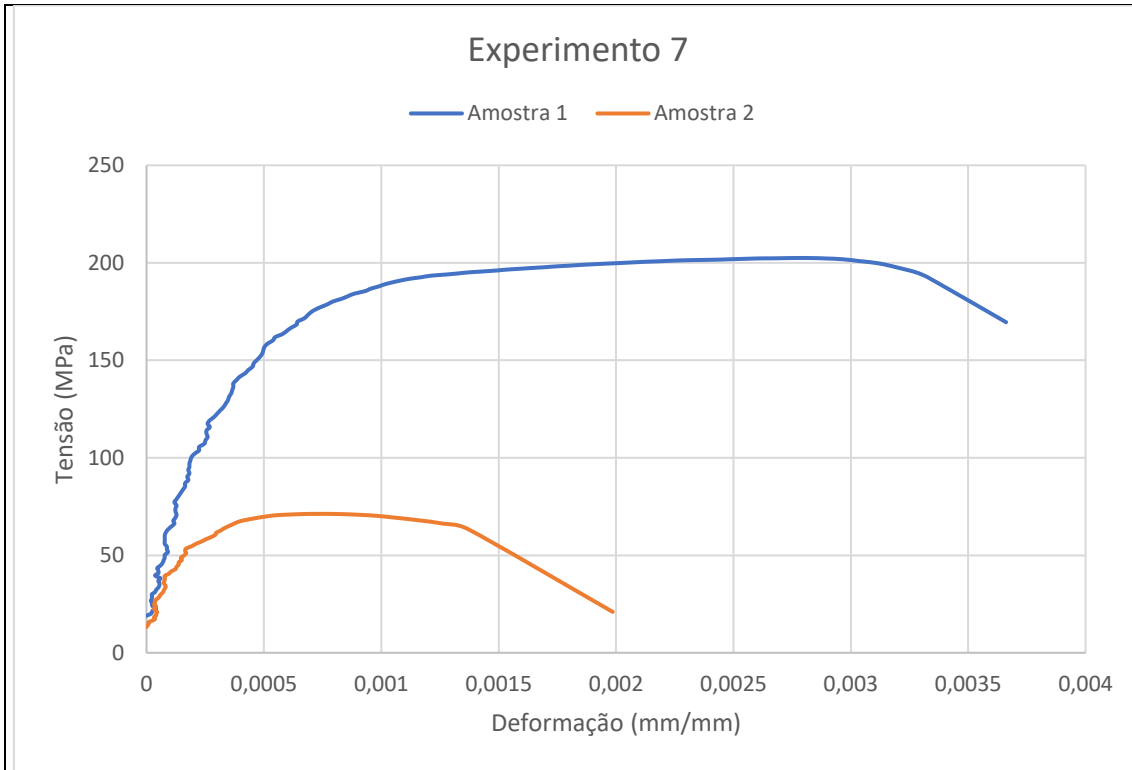
<p>9-2</p>	 <p>2,53 mm</p> <p>6,90 mm</p> <p>1,70 mm</p> <p>1 3</p>
<p>Conf-1</p>	 <p>2,84 mm</p> <p>7,43 mm</p> <p>3,68 mm</p> <p>1 3</p>
<p>Conf-2</p>	 <p>2,80 mm</p> <p>7,25 mm</p> <p>3,70 mm</p> <p>1 3</p>

**ANEXO II – CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA CADA EXPERIMENTO**

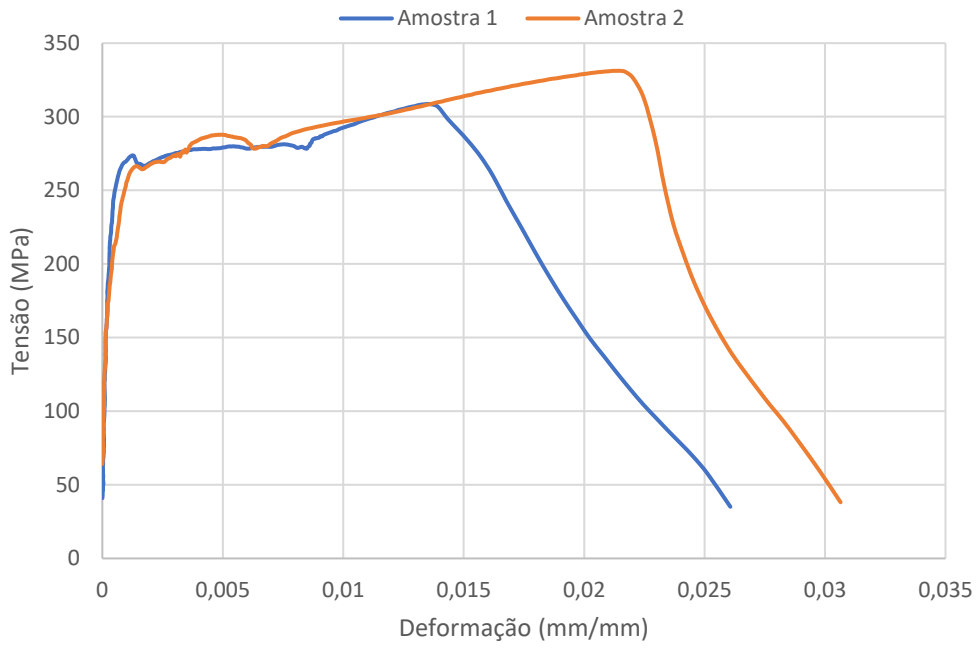








### Experimento 9



### Experimento de Confirmação

