

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SANDRO CHERUBIM

**ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAGEM ENTRE OS
PROCESSOS TIG AUTOMATIZADO E O PROCESSO
TIG MANUAL NA FABRICAÇÃO DE TANQUES COM
ESPESSURA DE CHAPA REDUZIDA**

SÃO CARLOS -SP

2024

SANDRO CHERUBIM

ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAGEM ENTRE OS PROCESSOS TIG
AUTOMATIZADO E O PROCESSO TIG MANUAL NA FABRICAÇÃO DE
TANQUES COM ESPESSURA DE CHAPA REDUZIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo.

Coorientador: Prof. Dr. Conrado Ramos Moreira Afonso

São Carlos-SP

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Sandro Cherubim, realizada em 29/08/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. João Fiore Parreira Lovo (EBSERH)

Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo (UFSCar)

Prof. Dr. Rodrigo da Silva (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Dedico este trabalho,
Aos meus pais, Narciso e Geni,
Minha filha Lorena
e à minha esposa Renata.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos, por ter me abençoado com oportunidade do aprendizado, a minha esposa Renata Aparecida Iziliani Cherubim e a minha filha Lorena Iziliani Cherubim por todo amor, entendimento, compreensão, paciência e apoio.

Aos meus pais Narciso Cherubim e Geni Rufino Cherubim, e aos demais familiares e amigos pelo incentivo e por acreditar nos meus propósitos.

Agradeço aos meus amigos Edgar Bergo Coroa e Thiago Prado que estiveram contribuindo direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

Aos professores orientador Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo e Coorientador: Prof. Dr. Conrado Ramos Moreira Afonso pelas orientações, ensinamentos, dedicação e paciência.

A todos os professores e coordenador do PPGEMec - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar.

A empresa Solis Indústria e Comércio de Aquecedor Solar S.A pela oportunidade de desenvolvimento do meu projeto.

As instituições de ensino Centro Paula Souza e SENAI ambas em Matão-SP, pelos preparativos das amostras e ensaios de laboratórios realizados.

À CAPES, pelo fomento e financiamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar.

A Equipe do Projeto SOLIS / EMBRAPPII / UFSCar: Coordenador: Prof. Dr. Conrado Ramos Moreira Afonso (DEMa); Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (DEMec); Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (DEMec); Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo (DEMec); Pós-Doutorando: Rafael Formenton Macedo dos Santos (DEMa); Mestrando-Bolsista: Gabriel Rocha (DEMec); Mestrando: Edgar Bergo Coroa; (DEMec); Mestrando: Thiago Moraes Prado (DEMec).

“Entrega teu caminho ao Senhor, confia nele e Ele tudo fará”.

Salmos 37:5

RESUMO

A automação nos processos de soldagem está em crescimento desde a década dos anos 70. Os benefícios técnicos, quando comparado ao processo manual de soldagem, são inúmeros: produtividade, qualidade, segurança do operador, etc. Este projeto aborda a soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), também conhecido como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), desenvolvido entre o final da década de 1930 e o início da década de 1940, em um período de grande transformação industrial e tecnológica impulsionado pela Segunda Guerra Mundial. Esse contexto histórico era marcado por uma intensa demanda por novos processos de fabricação, especialmente para atender à crescente indústria aeronáutica e militar, que necessitava de métodos de soldagem mais sofisticados e precisos. Atualmente, este processo é de extrema importância na fabricação e manutenção de peças em diferentes segmentos, como automobilístico, ferroviário, aeronáutico, civil, entre outros. A vantagem da solda TIG inclui a alta qualidade das soldas produzidas, a possibilidade de união de diferentes materiais e a precisão dimensional. O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um estudo para verificar a viabilidade do processo de soldagem TIG automatizado (orbital), em relação ao processo TIG manual, aplicado na produção de reservatórios de água em aço inoxidável AISI 304. Os reservatórios fazem parte de sistemas de aquecimento solar e são projetados para possuírem chapas de até 2 mm de espessura. O método estabelecido foi comparar a aparência, estrutura e funcionalidade dos cordões de solda, a partir de análise visual, ensaio mecânico de tração, líquido penetrante e partículas magnéticas. O estudo utilizou amostras retiradas dos reservatórios de água (corpo e tampo) fabricados em aço inoxidável AISI 304. Os ensaios mecânicos de tração demonstraram que as soldas automatizadas tiveram resultados moderados, com 7 dos 12 corpos de prova rompendo no material base em vez da solda, indicando que a solda não foi o ponto mais frágil. Os gráficos de tensão *versus* alongamento, comparando o processo manual e automatizado, indicam que o material base possui uma resistência à tração entre 600 e 675 MPa, com uma deformação de 0,6 a 0,7. Já a solda automatizada apresentou maior resistência à tração, entre 800 e 900 MPa, mas com menor deformação (0,3 a 0,4). Os resultados dos ensaios de Líquido Penetrante e Partícula Magnética revelaram descontinuidades tanto nas soldas manuais quanto automatizadas, sugerindo a

necessidade de melhorias no processo de preparação das chapas. O projeto e a construção de uma máquina automatizada de solda TIG orbital foi motivado principalmente pelo aumento de produtividade, com uma melhoria de 25% na velocidade em relação ao processo manual. Este aumento de velocidade impacta fatores de qualidade, como a penetração da solda, evidenciando que o processo automatizado é viável, mas ainda requer melhorias.

Palavras-chave: Processo TIG; Soldagem Manual; Soldagem Automatizada; Aços inoxidáveis; Ensaio Destrutivo; Ensaio não Destrutivo.

ABSTRACT

Automation in welding processes has been growing since the 1970s. The technical benefits, when compared to the manual welding process, are numerous: productivity, quality, operator safety, and other things. This project addresses TIG welding (Tungsten Inert Gas), also known as GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), developed between the late 1930s and the early 1940s, during a period of significant industrial and technological transformation driven by World War II. This historical context was marked by an intense demand for new manufacturing processes, especially to meet the needs of the growing aeronautical and military industries, which required more sophisticated and precise welding methods. Currently, this process is of utmost importance in the manufacturing and maintenance of parts in different sectors, such as automotive, railway, aerospace, civil, among others. The advantage of TIG welding includes the high quality of the welds produced, the possibility of joining different materials, and dimensional precision. The general objective of this work was to develop a study to verify the feasibility of the automated (orbital) TIG welding process, in relation to the manual TIG process, applied in the production of water reservoirs in AISI 304 stainless steel. The reservoirs are part of solar heating systems and are designed to have sheets up to 2 mm thick. The established method was to compare the appearance, structure, and functionality of the weld beads through visual analysis, tensile mechanical testing, liquid penetrant testing, and magnetic particle testing. The study used samples taken from water reservoirs (body and lid) made of AISI 304 stainless steel. The tensile mechanical tests demonstrated that the automated welds had moderate results, with 7 out of 12 test specimens breaking in the base material instead of the weld, indicating that the weld was not the weakest point. The stress versus strain graphs, comparing the manual and automated processes, indicate that the base material has a tensile strength between 600 and 675 MPa, with a deformation of 0.6 to 0.7. The automated weld, on the other hand, exhibited higher tensile strength, between 800 and 900 MPa, but with lower deformation (0.3 to 0.4). The results of the Liquid Penetrant and Magnetic Particle tests revealed discontinuities in both manual and automated welds, suggesting the need for improvements in the sheet preparation process. The design and construction of an automated orbital TIG welding machine was primarily motivated by the increase in productivity, with a 25% improvement in

speed compared to the manual process. This increase in speed impacts quality factors, such as weld penetration, highlighting that the automated process is viable but still requires improvements.

Keywords: TIG Process; Manual Welding; Automated Welding; Stainless Steels; Destructive Testing; Non-Destructive Testing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Passividade dos aços inoxidáveis à corrosão, expostos ao longo de 10 anos a uma atmosfera indústria	25
Figura 2 - Influência do Cromo na resistência de aços a oxidação a altas temperaturas	26
Figura 3 - Diagrama ferro-carbono	27
Figura 4 - Grão de ferro cromo	29
Figura 5 - Microestrutura típica da ferrita	30
Figura 6 - Aço inoxidável martensítico AISI 410	32
Figura 7 - Diagrama de Schaeffler	36
Figura 8 - Processo de soldagem TIG.....	39
Figura 9 - Equipamentos utilizados no processo TIG	41
Figura 10 - Tocha metal de adição gás arco metal base poça de fusão metal de solda	41
Figura 11 - Processo TIG Orbital	42
Figura 12 - Inspeção visual/dimensional	45
Figura 13 - Aplicação do líquido penetrante utilizando lata de aerossol	47
Figura 14 - Etapas da aplicação do ensaio líquido penetrante.....	47
Figura 15 - Procedimento limpeza da peça e aplicação do líquido penetrante	48
Figura 16 - Procedimentos remoção do líquido penetrante excedente e aplicação do revelador (formação da indicação de descontinuidade)	48
Figura 17 - Aplicação do líquido penetrante (imagem à direita) e aplicação do revelador e formação da indicação de falhas/poros (imagem à esquerda)	48
Figura 18 - Magnetização utilizando ferramenta Yoke.	50
Figura 19 - Comportamento do campo magnético quando há falhas na peça	50
Figura 20 - Método para magnetização longitudinal, por bobina indutora	51
Figura 21 - Esquema de retirada de corpos de prova	52
Figura 22 - Rompimento dos corpos de prova: inicial (A), metal base (B) e metal de solda (C)	52
Figura 23 - Gráfico tensão-deformação: 1. tensão máxima de tração, 2. tensão de escoamento, 3. tensão de ruptura, 4. região de encruamento, 5. região de “estricção”.	53

Figura 24 - (a) Máquina de ensaio de tração e (b) gráfico do ensaio	54
Figura 25 - Organograma	55
Figura 26 - Ensaio estabelecidos para o estudo do cordão de solda manual	56
Figura 27 - Proposta inicial do equipamento automatizado, projeto SOLIS / EMBRAPII / UFSCar	57
Figura 28 - Foto do protótipo de máquina de solda circunferencial automatizado do projeto SOLIS / EMBRAPII / UFSCar	57
Figura 29 - Posição sensor ótico para medição de distância, tocha TIG e reservatório	58
Figura 30 - Representação do comportamento da tocha TIG no batimento do reservatório	59
Figura 31 – Foto da máquina de solda DIGIPlus A7, da IMC.....	59
Figura 32 - Amostras do reservatório de aço inoxidável AISI 304 para ensaios	62
Figura 33 - Desenho esquemático e dimensões recomendadas para as amostras para os ensaios mecânicos de tração uniaxial segundo a norma ASTM E8M-13a, e encontra-se marcado em azul as dimensões mais adequadas pela norma para posicionar os cordões de solda no ponto.	64
Figura 34 - Em a) modelagem da amostra no Autodesk Inventor. Em b) simulação no EdgeCAM	64
Figura 35 - Máquina de corte a fio por eletroerosão GF AgieCharmilles FL 240 SLP	65
Figura 36 - Corpos de prova para o ensaio mecânico de tração - Visão Geral	66
Figura 37 - Máquina universal de ensaios - modelo: WDW-300E	68
Figura 38 - Parâmetros utilizados nos ensaios mecânicos de tração	69
Figura 39 - Preparação da máquina para os ensaios mecânicos de tração / corpo de prova rompido no final de um ensaio	70
Figura 40 - Fluxograma de ensaios não-destrutivos ENDs por líquido penetrante (LP)	70
Figura 41 - Preparação da superfície para o ensaio de (LP)	71
Figura 42 - Preparação e aplicação do líquido penetrante (LP)	72
Figura 43 - Em a) e b) remoção do excesso (LP)	73
Figura 44 - Aplicação do revelador	74
Figura 45 - Aparelho Yoke Modelo Y6	75
Figura 46 - Ensaio de Partículas Magnéticas	76

Figura 47 - Esquema de sobreposição em forma cruzada ou xis	77
Figura 48 - Corpos de prova CP1_CT_A1, CP2_CT_A1 e CP3_CT_A1 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b)	78
Figura 49 - Corpos de prova CP1_CT_A2, CP2_CT_A2 e CP3_CT_A2 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b)	79
Figura 50 - Corpos de prova CP1_CT_A3, CP2_CT_A3 e CP3_CT_A3 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b)	79
Figura 51 - Corpos de prova CP1_CT_A4, CP2_CT_A4 e CP3_CT_A4 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b)	80
Figura 52 - Dados dos ensaios mecânicos de tração - Gráfico – Valores Médios de LE, LRT e AL (%) das amostras 01, 02, 03 e 04	83
Figura 53 - Curva dos ensaios mecânicos de tração de CP2_CT_A1 e CP3_CT_A2 - Cordão de Solda Automatizado sem adição de material	84
Figura 54 - Corpo de prova junta tampo e corpo sem adição de material - LP.....	86
Figura 55 - Corpo de prova junta tampo e corpo - PM	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicações AISI 304 e 304L	33
Tabela 2 - Composição química do AISI 304 – 304L (% em peso)	35
Tabela 3 - Classificação das operações dos processos de soldagem.	44
Tabela 4 - Parâmetros de soldagem TIG (solda automatizada versus manual)	60
Tabela 5 - Quantidades e dimensões das amostras confeccionadas para realização dos ensaios não-destrutivos (líquido penetrante e partícula magnética), destrutivos de resistência mecânica à tração	62
Tabela 6 - Divisão das amostras e corpos de prova fabricados para o ensaio mecânico de tração	67
Tabela 7 - Divisão das amostras confeccionadas para os respectivos ensaios	67
Tabela 8 - Parâmetros dos gráficos nos ensaios mecânicos de tração das amostras	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

TIG - *Tungsten Inert Gas*

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

AISI - *American Iron and Steel Institute*

Fe – Ferro

Cr – Cromo

C - Carbono

Si - Silício

Ni – Níquel

CCC – Estrutura Cúbica de Corpo Centrado

MPa – Mega Pascal

kgf – quilograma força

W – Watt

M – Metro

K - Kelvin

GPA – Gigapascal

CFC – Cúbica de Face Centrada

O – *Oxygenic*

SAW – *Submerged Arc Welding*

MIG/MAG – *Metal Inert Gas / Metal Active Gas*

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

FCAW - *Flux-Cored Arc Welding*

PAW - *Plasma Arc Welding*

ESW - *Electro Slag Welding*

END - Ensaio não destrutivo

MB – Metal Base

MS – Metal de Solda

LR – Limite de Resistência

AL - Alongamento

A - Ampere

ZTA - Zona Termicamente Afetada

ASME - *American Society of Mechanical Engineers*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CSCO – Cordão de solda com overlap

CSSO - Cordão de solda sem overlap

CNC – Comando Numérico Computadorizado

LP - Líquido Penetrante

SAE - *Society of Automotive Engineers*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVO	23
1.2.	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	23
2.	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1.	AÇO INOXIDÁVEL: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO DE CHAPAS FINAS	24
2.1.1.	Aço Inoxidável Austenítico	28
2.1.2.	Ferrítico	29
2.1.3.	Martensítico	31
2.1.4.	Aço Inoxidável AISI 304	32
2.1.5.	Soldabilidade e Diagrama de Schaeffler	35
2.2.	PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG	36
2.2.1.	Processo de Soldagem TIG Manual.....	38
2.2.2.	Processo de Soldagem TIG Automatizado	40
2.2.3.	Processo de Soldagem TIG Orbital	41
2.3.	CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA AUTOMATIZADO	44
2.3.1.	Ensaio Visual.....	45
2.3.2.	Ensaio com Líquidos Penetrantes.....	46
2.3.3.	Partículas Magnéticas	49
2.3.4.	Ensaio Mecânicos Destrutivos	51
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1.	MÁQUINA DE SOLDA AUTOMATIZADA SOLIS/ EMBRAPII / USFCAR	56
3.2.	RESERVATÓRIO AÇO INOXIDÁVEL 304 E PARÂMETROS DE SOLDAGEM	59
3.3.	AMOSTRAS DOS CORDÕES DE SOLDA DO RESERVATÓRIO	61
3.4.	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR TIPO DE ENSAIO	63
3.5.	ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS DO TANQUE DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304	68
3.6.	ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE DAS AMOSTRAS DO RESERVATÓRIO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304	70
3.6.1.	Preparação da Superfície para LP nas Amostras	71
3.6.2.	Aplicação do Líquido Penetrante	71

3.6.3.	Remoção do Excesso de Penetrante	73
3.6.4.	Aplicação do Revelador	73
3.7.	ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	74
3.7.1.	Aparelho Yoke Eletromagnético	74
4.	RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES	76
4.1.	Resultados dos Ensaios Mecânicos de Tração	76
4.1.1.	Resultados e Discussão do Ensaio LP	85
4.1.2.	Resultados dos Ensaios de Partículas Magnéticas	87
5.	CONCLUSÕES.....	88
	REFERÊNCIAS.....	92
	APENDICE A – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 1 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A1	97
	APENDICE B – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 2 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A1	98
	APENDICE C – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 3 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A1	99
	APENDICE D – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 4 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A2	100
	APENDICE E – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 5 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A2	101
	APENDICE F – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 6 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A2	102
	APENDICE G – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 7 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A3	103
	APENDICE H – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 8 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A3	104

APENDICE I – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 9 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A3	105
APENDICE J – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 10 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A4	106
APENDICE K – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 11 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A4	107
APENDICE L – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 12 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A4	108
APENDICE M – Gráfico Tensão x Deformação	109

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de união permanente de materiais, geralmente metais ou termoplásticos, por meio do aquecimento e fusão das partes a serem conectadas. Este procedimento é fundamental na fabricação e manutenção de estruturas e componentes em diversas indústrias, incluindo automotiva, aeroespacial, construção civil e fabricação de equipamentos industriais (Fernandes, 2013).

O processo de soldagem envolve a aplicação de calor, pressão ou ambos para fundir as superfícies dos materiais a serem unidos, formando uma junção coesa ao solidificar. Existem várias técnicas de soldagem, cada uma adequada para diferentes tipos de materiais, como: aços carbono, aços inoxidáveis, Alumínio, Titânio e Cobre. As aplicações, vão desde estruturas metálicas, máquinas, equipamentos e construção civil. As mais comuns incluem a soldagem a arco elétrico, soldagem a gás, soldagem por resistência e soldagem a laser (Modenesi; Marques, 2011).

Cada método de soldagem oferece vantagens e desvantagens específicas, dependendo dos requisitos de resistência, flexibilidade, precisão e custo. Além disso, a escolha do processo de soldagem adequado depende do tipo de material, espessura das peças, configuração da junta e condições de serviço esperadas para o produto.

O uso da solda remonta a tempos antigos, com registros de soldagem sendo encontrados em artefatos datados de 3000 a.C. No entanto, foi no século XIX que a soldagem começou a se tornar uma técnica mais sistematizada e amplamente aplicada. Durante a segunda Revolução Industrial, a necessidade de construir estruturas complexas e duráveis impulsionou o desenvolvimento de processos de soldagem mais avançados.

Com o tempo, a soldagem evoluiu para atender a uma ampla variedade de requisitos e processos industriais. Hoje, pode ser aplicado a uma vasta gama de materiais e aplicações, desde micro soldagem em pequenas placas eletrônicas, com a intenção de simplesmente fixar pequenos condutores, até enormes estruturas metálicas que exigem rigidez e propriedades mecânicas, como resistência à tração, flexão e torção (Matiazzi, 2018).

Quanto à união de materiais, a soldagem foi e continua sendo uma das opções mais aplicadas, promovendo o desenvolvimento da indústria em diversos segmentos, como: automobilística, ferroviária, aeronáutica, civil, tanto na forma de fabricação, bem como manutenção e reparo de peças (Rezende, 2015).

A soldagem é uma habilidade técnica que exige treinamento e prática para garantir a qualidade e a segurança das junções soldadas. A inspeção e os testes de solda são etapas cruciais para assegurar que as juntas atendam aos padrões de qualidade e desempenho necessários.

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Arc Welding*), também conhecido como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) é um processo antigo, foi desenvolvido no final da década de 1930 e patenteado em 1941 por Russell Meredith, um engenheiro da *Northrop Aircraft Company* nos Estados Unidos. Esse desenvolvimento foi uma resposta às necessidades da indústria aeronáutica durante a Segunda Guerra Mundial, que exigia uma técnica de soldagem mais eficiente para metais leves como Alumínio e Magnésio, amplamente utilizados em aeronaves (Matiazzi, 2018).

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) começou a ser automatizado durante as décadas de 1950 e 1960. A automação da soldagem foi impulsionada pela crescente demanda por maior produtividade, precisão e consistência, especialmente em indústrias como a aeroespacial, nuclear e de oleodutos (Felizardo, 2016).

A soldagem TIG, em especial, é utilizada em produtos e processos que exigem durabilidade e asseio, convenientes para as indústrias química, farmacêutica e alimentícia, entre outras (Matiazzi, 2018).

Um dos principais benefícios da solda TIG é a alta qualidade das soldas produzidas. Esse método utiliza um eletrodo de Tungstênio não consumível, o qual é protegido por um gás inerte, como o Argônio. Essa proteção proporciona um ambiente livre de oxigênio e impede a contaminação da solda, resultando em juntas limpas, livres de impurezas e altamente duráveis.

Além disto, ela pode ser utilizada em uma ampla variedade de metais, incluindo aços carbono, aços inoxidáveis, Alumínio, Cobre e suas ligas. A solda TIG permite a união de diferentes combinações de materiais, oferecendo flexibilidade para a fabricação de produtos com propriedades específicas (Modenesi; Marques, 2011).

Este processo permite ao soldador o controle sobre a corrente elétrica, a velocidade de alimentação do metal de adição e a proteção gasosa, resultando em soldas de alta qualidade e precisão dimensional.

Ribeiro (2012) destaca que a solda TIG oferece também, a vantagem de produzir soldas com baixo nível de respingos e poucas distorções térmicas. Isso contribui para um processo de soldagem mais limpo e seguro, reduzindo a necessidade de retrabalhos e economizando tempo e recursos.

Das variações existentes deste processo, destaca-se a soldagem orbital, aplicada na união de peças cilíndricas, utilizada pela primeira vez na década de 1990 (Pigozzo, 2015). No entanto, existem indícios de que a soldagem de tubos começou em 1929, sugerindo que características produtivas iniciaram somente após 1933 (Widgery, 1999).

Em relação ao processo TIG orbital computadorizado (ou automatizado), a produtividade é superior à soldagem manual, mas é um processo de maior custo e depende da qualificação do profissional para programar e configurar o equipamento de soldagem.

O processo automatizado de solda TIG orbital se caracteriza pela soldagem de peças cilíndricas, em geral, tubos; por meio de comando numérico computadorizado, enquanto o processo manual acontece de forma não automatizada, sendo o manuseio da tocha, realizado totalmente por parte do operador (Silva, 2018).

O presente trabalho compara os processos de soldagem TIG manual e soldagem TIG automatizado (orbital). O objetivo, é estudar a união gerada por cada uma das soldas a partir de ensaios visuais, tração, líquido penetrante e partículas magnéticas. Dessa forma é possível inferir os aspectos positivos e negativos de cada processo.

Foram utilizadas amostras retiradas de reservatórios de aço inoxidável AISI 304, aplicados em sistema de aquecimento solar, também chamados de boiler. Esses reservatórios são caracteristicamente compostos de chapas finas, de até 2 mm de espessura.

As amostras manuais são da empresa SOLIS e as amostras automatizadas foram realizadas na UFSCar, no Departamento de Engenharia Mecânica por meio uma máquina de solda automatizada TIG orbital.

1.1. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre o processo de soldagem TIG manual e o processo TIG automatizado (orbital), aplicado na fabricação de reservatórios de água em aço inoxidável AISI 304. Os reservatórios fazem parte de sistemas de aquecimento solar e são projetados para possuírem chapas de até 2 mm de espessura.

O processo manual foi realizado pela empresa SOLIS, localizada na cidade de Birigui e fabricante de aquecedores solar. O processo automatizado foi realizado na UFSCar, no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), por meio de um equipamento projetado e construído para atender aos requisitos de um processo automatizado (ganho de produtividade e qualidade técnica da solda).

Os dados referentes à solda manual, foram obtidos por Coroa (2023), portanto, este trabalho se restringe exclusivamente em atividades da soldagem automatizada.

O estudo comparativo adota os métodos normalizados de avaliação visual, teste de tração, ensaios de líquido penetrante e de partículas magnéticas.

Os objetivos específicos são:

- Realizar a comparação entre e validação de cordões de solda TIG orbital, fabricados em diferentes processos (manual/automatizado), confrontando eventuais diferenças quantitativas das características mecânicas da solda;
- Investigar alterações de aparência da superfície do cordão de solda que possam indicar descontinuidades;
- Estudo de viabilidade de substituição do processo manual pelo processo automatizado.

1.2. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Justifica-se o estudo, tendo em vista o panorama de investimentos da empresa SOLIS, fabricante de aquecedores solar. A empresa investe em automatização de processos em busca de aumento de qualidade e produtividade.

De forma complementar, o estudo faz um levantamento detalhado das características mecânicas dos cordões de solda, por meio de ensaios destrutivos e

não destrutivos nas amostras retiradas dos corpos de prova fabricados a partir dos processos de soldagem manual e automatizado.

Por fim, existe a necessidade de se avaliar as condições em que os cordões são produzidos pelo processo manual (atual), gerando subsídios técnicos que possam influenciar a parametrização do processo automatizado.

A motivação científica e tecnológica deste trabalho é contribuir para melhorias no ramo industrial, trazendo métodos e resultados que possam auxiliar em ações de qualidade e desenvolvimento tecnológico, buscando otimizar a soldagem manual ao fornecer subsídios técnicos para a automação do processo. A avaliação detalhada das condições em que os cordões de solda são produzidos manualmente permite melhorar a qualidade, a eficiência e a precisão no ambiente industrial. O objetivo é utilizar esse conhecimento para ajustar a parametrização em processos automatizados, promovendo maior produtividade, redução de custos e melhor desenvolvimento tecnológico, contribuindo para inovações e avanços no setor.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica deste trabalho foi estruturada em três etapas principais, cada uma abordando um tema essencial para o desenvolvimento:

- Aço inoxidável: características e aplicação de chapas finas;
- Processo de soldagem TIG manual, TIG automatizada, TIG Orbital;
- Caracterização do cordão de solda.

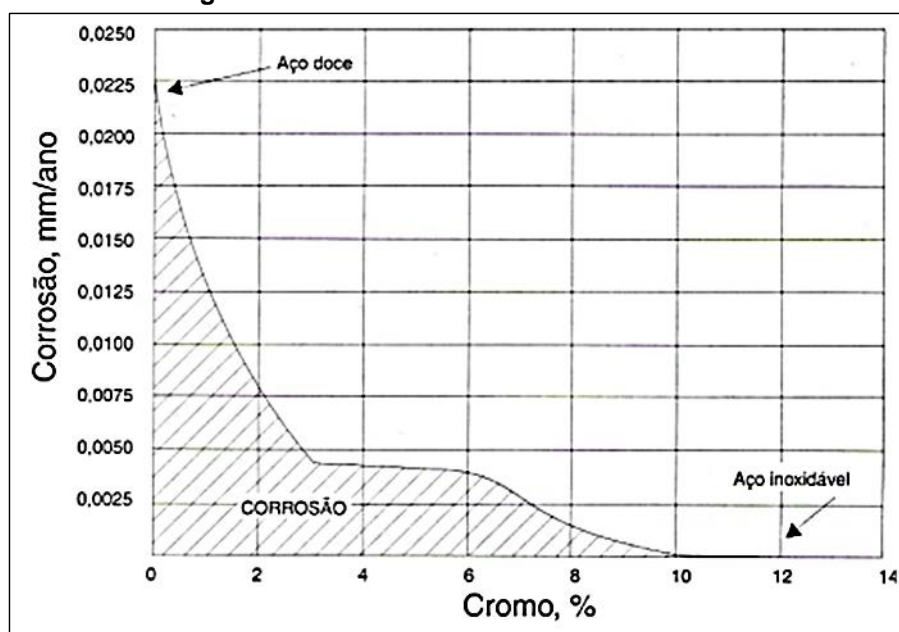
2.1. AÇO INOXIDÁVEL: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO DE CHAPAS FINAS

Os aços são ligas ferrosas constituídas por uma variedade de elementos químicos que podem conferir alta resistência, ductilidade e tenacidade ao impacto, características vantajosas para o setor industrial, além disso exibem elevada resistência à corrosão. O aço inoxidável é o resultado de uma mistura que contém, principalmente, Ferro (Fe) e Cromo (Cr) em uma concentração superior a 10%. Devido às suas propriedades físicas e químicas, esse tipo de liga é amplamente utilizado na indústria, apresentando alta resistência à corrosão e excelente

soldabilidade, o que o torna superior aos aços comuns, compostos, majoritariamente, por Ferro (Fe) e Carbono (C).

Chiaverini (1986) descreve a capacidade de um aço em resistir à corrosão como passividade. A Figura 1 ilustra essa capacidade de forma gráfica, em um experimento de corrosão de aços com diferentes concentrações de Cromo (Cr). A imagem indica que concentrações superiores a 10% de cromo reduzem sensivelmente a corrosão.

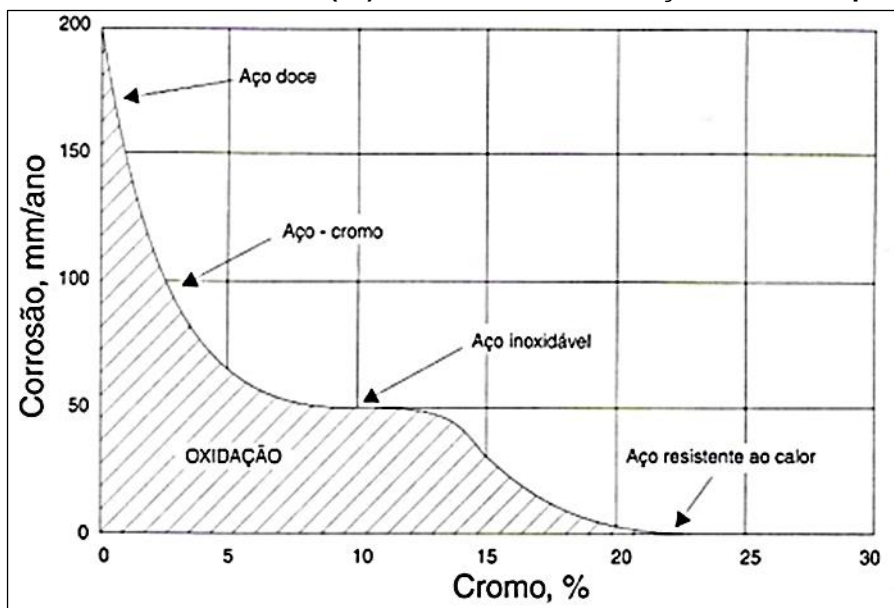
Figura 1 - Passividade dos aços inoxidáveis à corrosão, expostos ao longo de 10 anos a uma atmosfera indústria.



Fonte – Chiaverini, 1986.

Chiaverini (1986) também cita que a temperatura é uma grandeza capaz de alterar a oxidação. Experimentos com cubos de aço em diferentes proporções de Cromo (Cr), aquecidos à 1000 °C por 48 horas são compilados na Figura 2.

Figura 2 - Influência do Cromo (Cr) na resistência à oxidação a altas temperaturas.



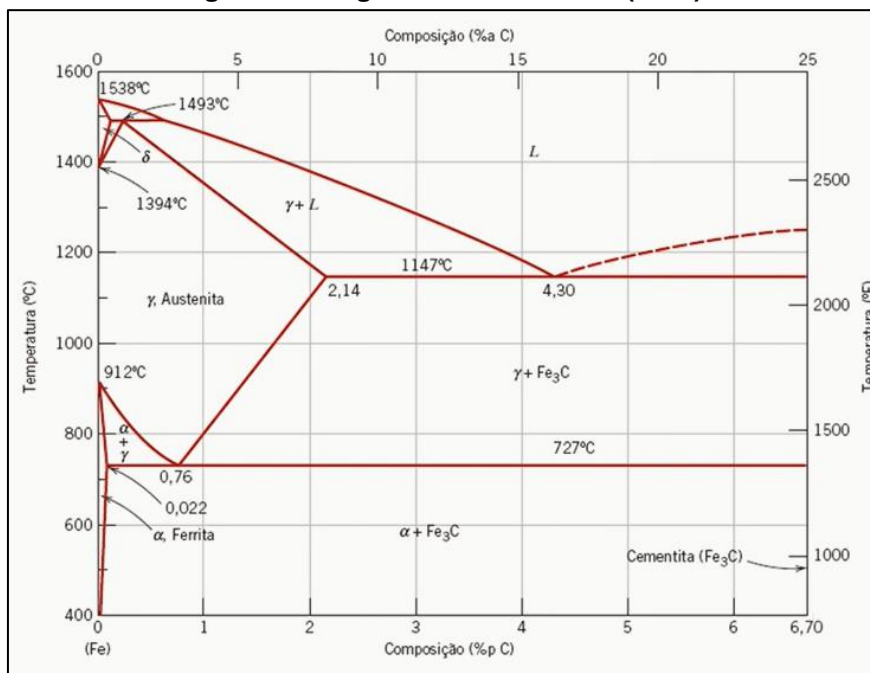
Fonte – Chiaverini, 1986.

A adição de outros elementos de liga, como Silício (Si), Níquel (Ni) e Carbono (C), altera várias das características metalúrgicas dos aços inoxidáveis, criando diferentes aços, como os Aços Austeníticos, Ferríticos e Martensíticos (Silva, 2017; Moura, 2018). Estes serão descritos a seguir, junto com os aços inoxidáveis AISI 304, que são foco deste trabalho. As alterações das características dos aços inoxidáveis podem ser observadas através do diagrama de ferro-carbono.

Callister (2018) descreve que o diagrama de Ferro-Carbono (Fe-C) é uma ferramenta fundamental na engenharia metalúrgica, pois ilustra as fases e as transformações que ocorrem nas ligas ferro-carbono (Fe-C) em função da temperatura e da composição. Este diagrama é crucial para o entendimento do comportamento dos aços e ferros fundidos, permitindo a otimização de processos térmicos e a previsão das propriedades mecânicas dos materiais. A Figura 3 representa as etapas de transformação e descreve os eixos do diagrama e o intervalo de composição de Carbono (C) que ele cobre.

Gaskell e Laughlin (2018) destaca que o diagrama (Fe-C) é composto por dois eixos principais: o eixo horizontal representa a porcentagem de Carbono (C) na liga, variando de 0% a 6,67%, enquanto o eixo vertical representa a temperatura, que pode chegar até aproximadamente 1600 °C. Este diagrama abrange a formação de aços (até 2,14% de Carbono) e ferros fundidos (de 2,14% a 6,67% de Carbono (C)).

Figura 3 – Diagrama ferro-carbono (Fe-C).



Fonte – Callister, 2018.

O diagrama (Fe-C) apresenta diversas fases: a austenita (fase γ), a ferrita (fase α), a martensita (fase α'), cementita e perlita. Nessas fases ocorrem transformação ao longo do diagrama, as reações eutetóide e eutética (Porter e Sher, 2009).

Transformações de fases são eventos críticos no diagrama (Fe-C):

- **Reação eutetóide:** ocorre a 727°C e 0,8% de Carbono (C), onde a austenita se decompõe em perlita (ferrita + cementita).
- **Reação eutética:** ocorre a 1147°C e 4,3% de Carbono (C), onde o líquido se solidifica formando austenita e cementita.

O diagrama (Fe-C) é uma ferramenta indispensável na engenharia de materiais, fornecendo um entendimento profundo das transformações de fases e das propriedades resultantes dos aços e ferros fundidos. Seu estudo permite a otimização de processos metalúrgicos e o desenvolvimento de materiais com propriedades mecânicas superiores (Callister, 2018).

2.1.1. Aço inoxidável Austenítico

O aço inoxidável austenítico é uma das classes amplamente utilizadas dos aços inoxidáveis, conhecido por suas excelentes propriedades de resistência à corrosão, boa formabilidade, e ductilidade, devido suas características austeníticas (Matiazzi, 2018).

A principal característica que define um aço inoxidável austenítico é sua composição química, que contém alto teor de Cromo (Cr) (geralmente entre 16% e 25%) e níquel (geralmente entre 8% e 35%). Alguns tipos também contêm Molibdênio, que melhora ainda mais a resistência à corrosão. Esses aços possuem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), o que lhe confere alta ductilidade e tenacidade, mesmo em baixas temperaturas (Rezende, 2015; Serafini, 2016).

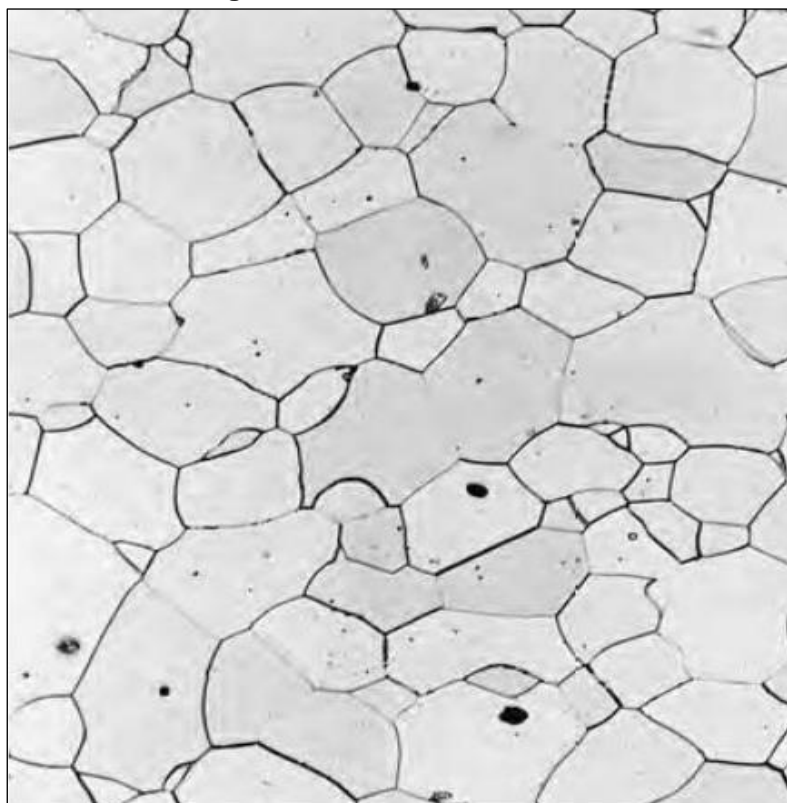
Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam ampla aplicação nas indústrias química, petroquímica, farmacêutica, alimentícia, de biotecnologia, entre outras. O seu uso nessas indústrias se deve à sua resistência à corrosão, propriedade determinante em seu desempenho. Apresentam simultaneamente Cromo (Cr) e Níquel (Ni) com os principais elementos de liga. O Níquel (Ni), além de melhorar a resistência à corrosão, melhora igualmente a resistência à oxidação a altas temperaturas. O Cromo (Cr) presente no aço inoxidável austenítico reage com oxigênio do ambiente para formar uma fina camada passiva de óxido de cromo na superfície. Essa camada se regenera automaticamente, desde que haja oxigênio disponível no ambiente. Isso ocorre devido à rápida reação do Cromo com o Oxigênio (Chiaverini, 1986).

Um problema potencial relacionado ao aço inoxidável austenítico é a influência da temperatura e do teor de C, que pode resultar na formação de carbonetos, levando à sensitização. Este fenômeno ocorre quando o aço é exposto a temperaturas entre 425 °C e 870 °C, causando a precipitação de carbonetos ricos em Cr nos contornos de grão. Isto provoca o empobrecimento de Cr nas regiões adjacentes ao contorno de grão, aumentando a suscetibilidade à corrosão intergranular (Cunha, 2018).

Responsáveis pela composição da grande maioria dos sólidos cristalinos, os grãos são pequenas partes da estrutura cristalina que se originam no núcleo e crescem de acordo com uma determinada orientação cristalográfica. A Figura 4, mostra uma micrografia de uma estrutura metálica, de um material policristalino,

onde é possível observar os grãos ou cristalitos separados por contornos de grão. Esses contornos delimitam as diferentes orientações cristalinas presentes no material. As manchas escuras no interior de alguns grãos podem indicar inclusões ou vazios. Durante a solidificação formam-se vários núcleos, dando origem a vários grãos com clara orientação cristalográfica. A interface entre os grãos é chamada de contorno de grão e é considerada uma região de alta energia de ruptura (Callister, 2008).

Figura 4 – Grão de ferro cromo.



Fonte – Callister, 2008.

Os aços austeníticos são essencialmente ligados à fase austenítica do diagrama (Fe-C). A adição de elementos de liga como Níquel (Ni) e Cromo (Cr) modifica o diagrama, estabilizando a fase austenítica a temperaturas mais baixas e ampliando sua faixa de estabilidade.

2.1.2. Ferrítico

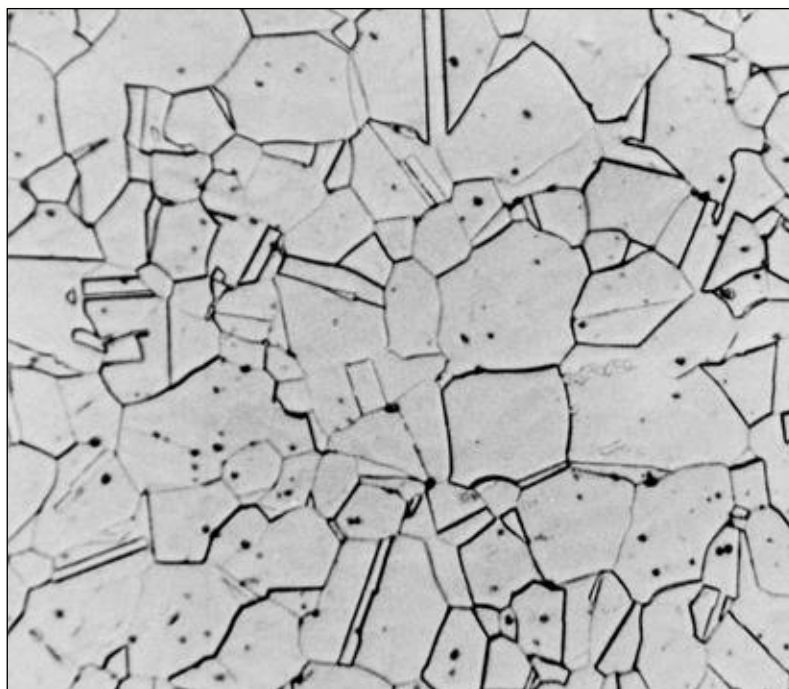
Aços inoxidáveis ferríticos são aços da série 400 e possuem uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Possuem cerca de 12 a 30% de Cromo (Cr) e até 0,1% de teor de Carbono (C), e não são endurecidos por têmpera. Um

teor de carbono mais baixo em aços inoxidáveis ferríticos resultaria em melhorias na soldabilidade, resistência à corrosão intergranular e ductilidade, tornando esses materiais mais adequados para aplicações que envolvem soldagem e conformação (Modenesi, 2006).

Esses aços podem ter precipitação de carbonitretos de Cromo (Cr) e ocasionar o crescimento do grão, fragilizando a estrutura o que diminui a resistência à corrosão, por isso não é o mais indicado para o processo de soldagem (Figura 5).

A adição de suplementos ou o recozimento da peça podem auxiliar nessas limitações, o aço ferrítico mais utilizado na indústria é o AISI 430 (Borges, 2019; Vidal, 2022).

Figura 5 – Microestrutura típica da ferrita.



Fonte – Modenesi, 2006.

Os aços ferríticos são diretamente relacionados à fase ferrítica do diagrama de ferro-carbono. A baixa concentração de Carbono (C) e a adição de elementos de liga como Cromo (Cr) estabilizam a ferrita em temperaturas mais baixas e ampliam sua faixa de estabilidade. Isso resulta em aços com propriedades desejáveis para diversas aplicações industriais, especialmente onde resistência à corrosão, ductilidade e estabilidade térmica são cruciais.

Chiaverini (1986) cita que o aço AISI 446 é o melhor para resistência à corrosão, contém no máximo de 0,35% de Carbono (C) e 23 a 27% de Cromo (Cr). Boa resistência à oxidação até a temperatura da ordem de 1.150°C. Utilizados em componentes de fornos, queimadores, radiadores etc.

2.1.3. Martensítico

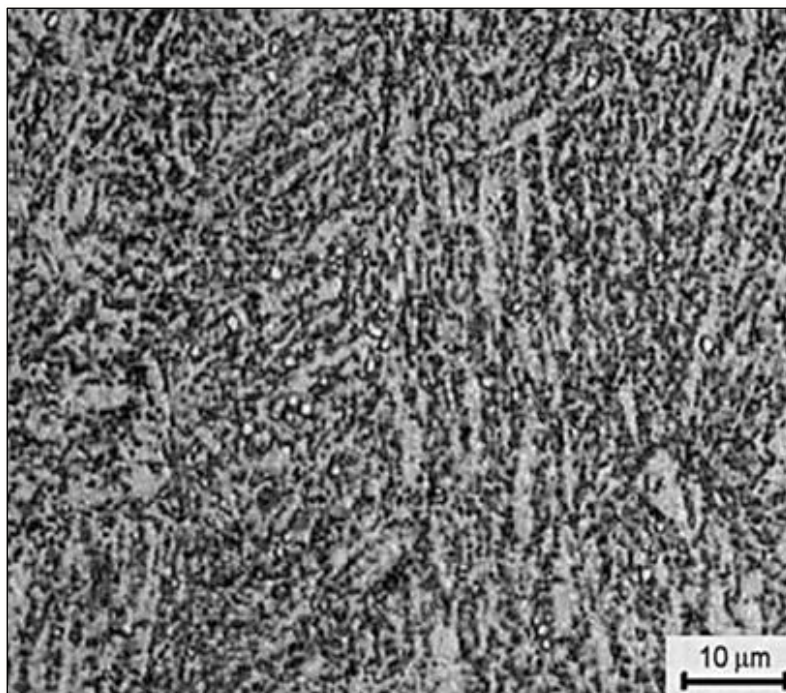
O aço inoxidável martensítico a microestrutura é caracterizada pela presença de martensita, originada do resfriamento da austenita. São parte da série 400, possuem teor de Cromo (Cr) entre 11% a 18%, alto teor de Carbono (C) e baixa ductilidade (Modenesi, 2006).

Uma das propriedades que esses aços apresentam é a resistência à corrosão que se dá por apresentar uma grande quantidade de Cromo em sua composição, pelo menos 10,5% em peso, o qual é responsável pela formação de uma fina camada de óxido estável que protege o material contra uma grande gama de ambientes agressivos para aços comuns (Macedo, 2016).

Dentre as vastas aplicações desses aços, está a utilização na fabricação de moldes para injeção de polímeros os quais, para sua aplicação, necessitam ter alta dureza; ser altamente resistente à corrosão por conter cloro na sua composição; e ser resistente ao desgaste, devido à adição de cargas com partículas abrasivas. Por apresentar essas características, o aço inoxidável martensítico AISI 420 vem sendo usado na fabricação dos moldes para injeção de polímeros (Pinedo; Monteiro, 2011).

Atualmente para se obter um aumento na resistência mecânica e ao desgaste estes aços passam por tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, podendo atingir valores de dureza Brinell de 500 e 620 e limites de resistência à tração até cerca de 200 kgf/mm², além de alta resistência ao desgaste (Chiaverini, 1986). A Figura 6 apresenta uma microestrutura de martensita revenida com finos carbonetes precipitados.

Figura 6 – Aço inoxidável martensítico AISI 410.



Fonte – Padilha, 2007.

Relacionando ao diagrama (Fe-C), a martensita é uma fase metaestável que se forma a partir da austenita quando o aço é resfriado rapidamente (têmpera). Esse resfriamento rápido impede a difusão do carbono, resultando em uma transformação não-difusional. A martensita possui uma estrutura tetragonal de corpo centrado (BCT), que é uma distorção da estrutura cúbica de corpo centrado (BCC) da ferrita devido à presença de Carbono.

2.1.4. Aço Inoxidável AISI 304

O aço Inoxidável AISI 304 trata-se de uma variedade do aço inox, composto por (Fe) (Cr) (Ni). Este aço inoxidável é chamado de austenítico porque esta é a fase que compõem a sua microestrutura, devido ao teor de níquel. Seu diferencial é o poder ainda maior de resistência à corrosão e à oxidação. Esse tipo de aço inoxidável é o mais utilizado nas indústrias alimentícia, farmacêutica, hospitalar, química e aeroespacial (Lippold e Kotecki, 2005).

O AISI 304 tem como variação principal, o AISI 304L ("L" de *Low* = Baixo nível de Carbono = 0,03% Máx). O que difere as ligas com a sigla "L" é o menor teor de (C) em suas composições. Este nível menor de (C) é indicado principalmente quando houver soldas. O menor teor de Carbono preveni a

precipitação de carbonetos de Cr (formando carbonetos de Cromo na região da solda).

Por esse motivo, materiais com menor teor de (C) em sua composição ("L"), são mais destacados no mercado de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Aplicações AISI 304 e 304L.

Aplicação do Aço Inoxidável AISI 304 e 304L	
304	Construção civil e arquitetura, equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química, utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, destilaria de etanol, fotografias, tubos e tanques em geral, estampagem geral, profunda e de precisão.
304L	Equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química, utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografia, tubos e tanques em geral, estampagem geral, profunda.

Fonte: elaborado pelo autor.

A indústria alimentícia é um dos ramos que manipulam alimentos e devem ter processos muito seguros em sua produção, legalmente registrados. Assim, o aço inoxidável, sobretudo o aço inoxidável AISI 304, é o mais indicado para compor partes de equipamentos e superfícies utilizadas na fabricação. No caso do aço inoxidável AISI 304, por exemplo, as vantagens vão além da resistência. O material é fácil de limpar, o que é muito importante para esse tipo de indústria; conserva o gosto e o odor natural do alimento, evitando alterações; possui baixíssima retenção biológica, por se tratar de um material que não desenvolve fissuras, entre outros diferenciais. Esse material possui um excelente custo-benefício.

Segundo Matiazzi (2018) o aço inoxidável AISI 304 tem propriedades particulares e da sua classificação, aço austenítico, que o fazem ser aplicado em diversas situações da indústria. Suas principais propriedades são:

- **Estampabilidade:** Capacidade que a chapa metálica ou liga tem de adquirir a forma de uma matriz pelo processo de estampagem sem se romper ou apresentar qualquer outro tipo de defeito;

- Soldabilidade: Facilidade que os metais têm de se unirem uns aos outros por meio da soldagem e de formarem uma série mais contínua e sólida, sem alterar as suas propriedades mecânicas originais;
- Resistência ao calor: O aço inoxidável AISI 304 possui ótima resistência à oxidação em temperaturas de 870° a 925°;
- Resistente à corrosão: O aço inoxidável AISI 304 é extremamente resistente à corrosão quanto em contato com diversos meios corrosivos. Mas, podem ocorrer corrosão de variados graus por fendas em ambientes que tenham cloretos, e a corrosão por tensão pode acontecer em temperaturas acima de 60 °C;
- Força abrangente: 210 MPa
- Prova de estresse: 210 Min MPa
- Alongamento: 45 Min%
- Ponto de fusão: 1450 °C
- Densidade aproximada: 7.900 Kg/m³
- Resistência à tração: 520-720 MPa
- Condutividade térmica: 16.2 W/m. K
- Módulo de elasticidade: 193 GPa

O aço inoxidável AISI 304 tem diversas aplicações industriais, desde o segmento de utensílios domésticos a indústrias navais e construção civil. Abaixo, confira as principais aplicações dessa liga de metal e seus segmentos mais comuns de uso:

- Arquitetura
- Stampagem geral, de precisão e profunda
- Tubos e tanques em geral
- Indústria fotográfica
- Construção civil
- Destilaria de etanol
- Destilarias em geral
- Instalações criogênicas: a criogenia consiste em conservar corpos, embriões, alimentos e outros materiais com a geração de temperaturas muito baixas.

Além disso, estuda o comportamento dos materiais que são submetidos a essas temperaturas:

- Utensílios domésticos

- Equipamentos para indústria aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose
- Indústria têxtil
- Refrigeríficos
- Indústria alimentícia e hospitalar
- Indústria farmacêutica, química e cosmética
- Indústria de laticínios

Santos (2019), descreve que o aço inoxidável AISI 304 tem uma composição química bastante rica, com elementos além do ferro, Níquel (Ni) e Cromo (Cr) para melhorar a resistência à corrosão e durabilidade. Tabela 2 demonstra a sua composição química.

Tabela 2 - Composição química do AISI 304 – 304L (% em peso).

AISI	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Fe
304	0,08	2	1	0,045	0,03	18 a 20	8 a 10,5	0	0	Sobra
304L	0,03	2	1	0,045	0,03	18 a 20	8 a 12	0	0	Sobra

Fonte: Santos, 2019

2.1.5 Soldabilidade e Diagrama de Schaeffler

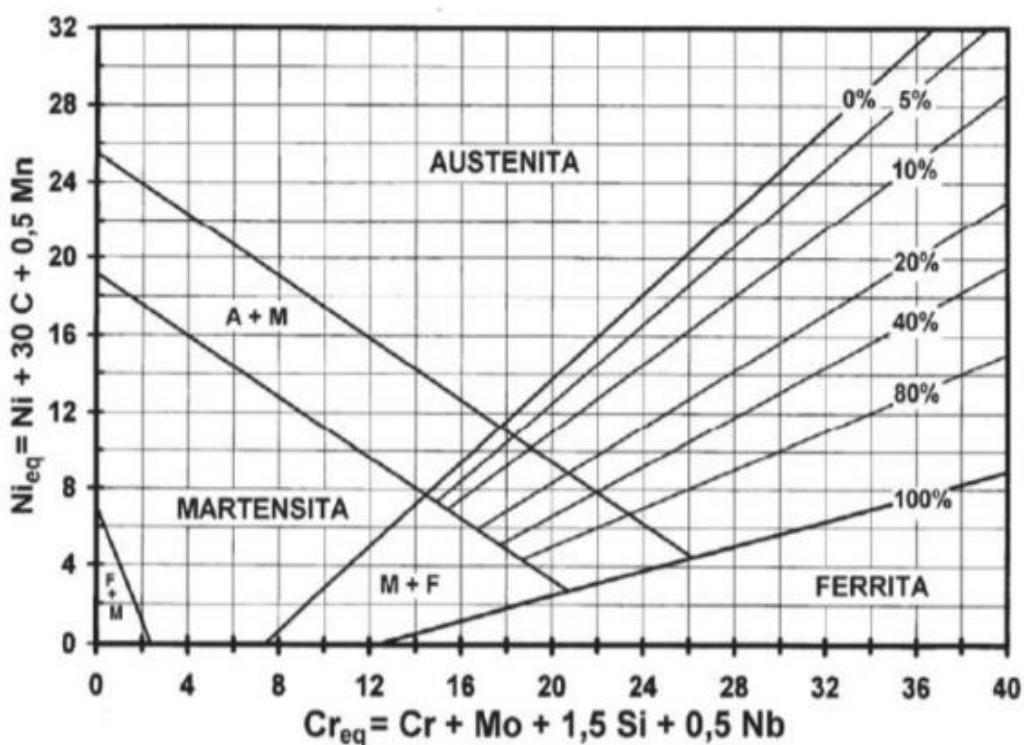
A soldabilidade é a capacidade de um metal de ser soldado em determinadas condições sem apresentar a presença de trincas. O limite de solubilidade é medido através da sensibilidade da peça com relação a trincas. (Padilha e Mendes, 2004).

Aços inoxidáveis austeníticos precisam de alguns cuidados durante a soldagem, porém apresentam boa soldabilidade. Eles possuem alto coeficiente de expansão térmica, equivalente a 50% a mais do que o aço carbono ou das ligas da série 400, o que exige cuidados para a minimização distorções e o empenamento de peças soldadas. (Rezende, 2015).

Uma forma rápida e eficaz para determinar a previsão de microestrutura após uma soldagem é a utilização do diagrama de Schaeffler, conforme mostrado na Figura 7. Esse diagrama permite prever a microestrutura da zona fundida com base na sua composição química e pode ser utilizado tanto para os aços austeníticos quanto para os ferríticos e martensíticos. (Rezende, 2015).

O diagrama de Schaeffler foi criada para fornecer atendimento rápido e acessível a técnicos de soldagem, engenheiros de soldagem, professores, soldadores e estudantes de engenharia ou cursos técnicos. Um diagrama de Schaeffler é um diagrama que permite prever a fase estrutural final de um aço inoxidável com base na composição química do metal base e do metal de adição. Cada área do diagrama pode representar um tipo de falha diferente, dependendo da microestrutura formada.

Figura 7: Diagrama de Schaeffler.



Fonte: Rezende, 2015.

2.2. PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG

O processo TIG é extremamente versátil, sendo utilizado tanto na fabricação para soldagem de uma ampla variedade de metais quanto para manutenção e revestimentos especiais, onde pode produzir resultados que nenhum outro processo pode alcançar.

É um processo que surgiu da necessidade de processos de soldagem eficientes para materiais complexos como alumínio e magnésio, principalmente nas indústrias aeroespacial e aeronáutica. Assim, com seu aperfeiçoamento surgiu um

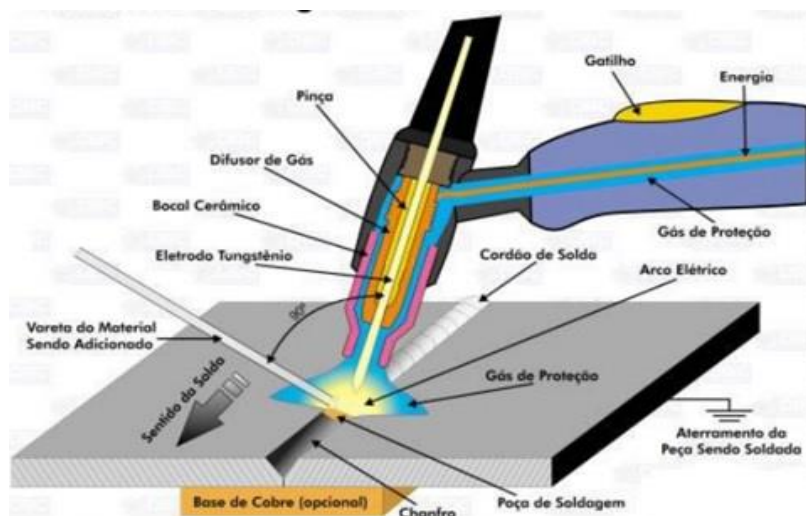
processo de alta qualidade e relativamente barato para uso em diversas aplicações. Mais tarde, esse tipo de soldagem tornou-se popular, mas ao mesmo tempo caro, então o gás hélio foi substituído pelo gás argônio como gás de proteção, por ser economicamente mais barato. O desenvolvimento da soldagem TIG foi concluído em 1941 e ficou conhecido como processo *Heliarc* ou *Tungsten Inert Gas* abreviação de processo TIG, porque o processo usava um eletrodo de tungstênio e hélio como gás de proteção. O processo foi considerado “ideal” quando passou a utilizar corrente alternada com adição de alta frequência (HF), que produzia um arco estável que permitia soldar ligas de alumínio e magnésio com perfeição e boa qualidade de solda.

O processo de soldagem TIG é amplamente utilizado na produção industrial e no serviço de soldagem de chapas finas (de 0,2 mm a 8 mm) de aço carbono, aço inoxidável, alumínio e suas ligas, cobre e suas ligas, titânio, zircônio, níquel e suas ligas (Marques, 2007).

TIG é um processo no qual peças metálicas são unidas por aquecimento e fusão com um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio, um material não consumível, e as partes que precisam ser unidas. A proteção do banho de soldagem e do arco elétrico da contaminação atmosférica é realizada por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes (Modenesi, 2006).

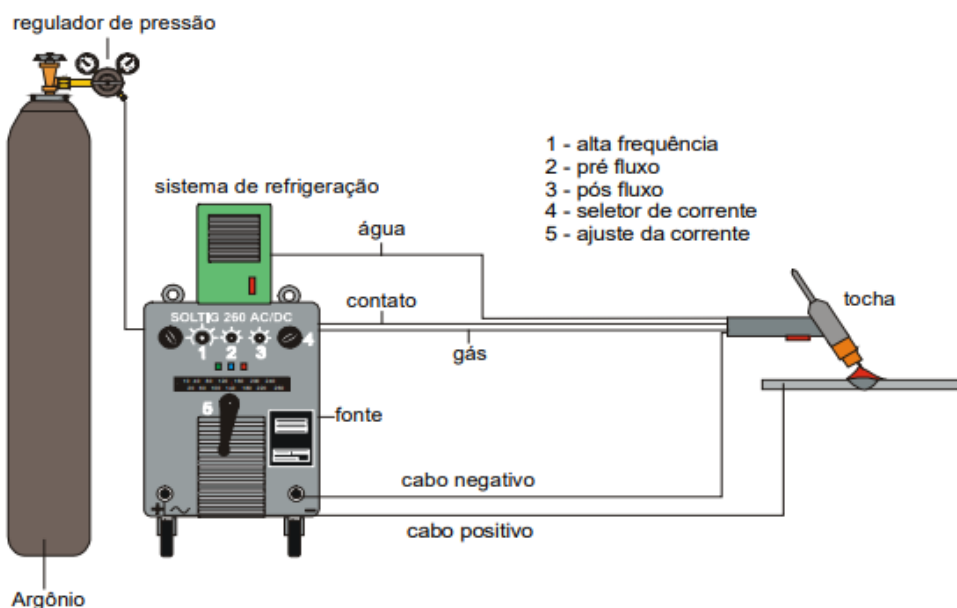
O calor necessário para a operação de soldagem é fornecido por um arco elétrico, que é estabelecido a partir de um eletrodo não consumível feito de tungstênio puro ou ligado. Para evitar a oxidação deste eletrodo por gases ativos como monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O), este processo utiliza gases inertes puros, combinados ou não. A escolha da proteção ideal depende da espessura e tipo de metal base a ser soldado. A Figura 8 ilustra o processo e a Figura 9 os equipamentos utilizados.

Figura 8 - Processo de soldagem TIG.



Fonte: Disponível: <<https://www.oxigenio.com>>. Acesso: 20 de março de 2023.

Figura 9 - Equipamentos utilizados no processo TIG.



Fonte: Disponível: <<http://www.esab.com.br> 2015>. Acesso: 18 de março de 2023.

2.2.1. Processo de Soldagem TIG Manual

O processo de soldagem TIG manual é considerado um dos mais difíceis de todos os processos comuns utilizados na indústria, devido à habilidade do operador necessária para manter um pequeno arco elétrico e evitar que o eletrodo encoste na peça, ilustrado na (Figura 10).

Durante o processo manual, sempre que o houver a necessidade do material de adição, o operador utiliza as duas mãos, dificultando ainda mais o processo, sendo que uma mão segura a tocha de soldagem, a outra, segura a vareta de adição (Larry, 2002).

Figura 10 - Tocha Metal de adição gás arco metal base poça de fusão metal de solda.



Fonte: SENAI, "Soldagem", São Paulo, SP, 1997.

No GTAW, quando a soldagem manual é definida, significa que uma pessoa controlará todos funções do processo de soldagem, como o uso de metal de adição e gás, o uso de soldagem manual com a tocha, cabos e fios elétricos, pedal (para controlar o nível de corrente de soldagem) e controles fluxo de gás (Bracarense, 2000).

No arco TIG com processo manual muitos fatores podem ser distinguidos: o comportamento de tensão, com o comprimento do arco, com variação de tensão em função do gás utilizado, comportamento tensão com corrente pulsada, efeito da mudança de tensão na potência do arco, efeito da corrente na mudança de isothermas de arco, mudança de pressão de arco com intensidade de corrente, perturbação tensão com alimentação de arame em arco, entre outros (Ribeiro, 2012).

Como qualquer processo de soldagem, GTAW tem vantagens que devem ser mencionadas, como excelente controle de poça de fusão, permite soldagem sem o uso de metal de adição, permite a mecanização e automação do processo de soldagem da maioria dos metais permite a obtenção de soldas de alta qualidade

e excelente acabamento, produz pouco ou nenhum respingo, não requer limpeza após a soldagem, permite soldar em qualquer posição, produtividade e custo relativamente baixos consumíveis é relativamente alto (Modenesi e Marquez, 2006; Silva, 2017).

As principais aplicações industriais do processo de soldagem TIG incluem: refino de petróleo, indústria química e alimentícia, costura e união de topo de tubos de aço inoxidável, soldagem de alumínio, ligas de titânio e níquel, peças leves e de precisão utilizadas na indústria aeroespacial, bem como na soldagem do primeiro canal radicular em tubos de liga de aço.

Durante a soldagem manual, após determinar a corrente de soldagem e o consumo de gás, o soldador deve controlar a altura do arco elétrico, a velocidade de soldagem e o fornecimento de metal de adição pelas hastes.

2.2.2. Processo de Soldagem TIG Automatizado

O sistema automatizado de soldagem executa todas as oito etapas, desde a montagem e transporte das peças até o local de soldagem, sem ajustes e controle do operador. A soldagem pode ser feita em uma ou mais etapas, e o produto é finalizado mecanicamente, sem intervenção manual. Um aspecto importante da soldagem automatizada é que o operador não precisa monitorar constantemente o processo. Em comparação com a soldagem automática, tende a aumentar a produtividade, melhorar a qualidade e reduzir a fadiga do operador (Broering, 2005).

Sistemas de soldagem automatizados são comumente usados em (*Submerged Arc Welding*) SAW, (*Gas Metal Arc Welding*) GMAW e (*Flux-Cored Arc Welding*) FCAW. Você pode usar, com limitações, GTAW, (*Plasma Arc Welding*) PAW e (*Electro Slag Welding*) ESW em processos automatizados.

O processo TIG automatizado é uma solução que surgiu no mercado industrial para solucionar diversos problemas dos processos de soldagem, tais como: melhorar a qualidade dos resultados, diminuir o desperdício de consumíveis e custos desnecessários, aumentando a produtividade.

O processo de soldagem automatizado é realizado por dispositivos, equipamentos, acessórios e robôs com auxílio de sensores, o que proporciona precisão no processo, aumento da velocidade do ciclo, qualidade da soldagem e

redução da intervenção humana, pois o operador tem contato principalmente com a câmara de soldagem apenas quando posicionar/retirar a peça do processo, quando executar o programa e quando inspecionar visualmente as soldas ao final do processo (Silva, 2018).

Em particular, a soldagem TIG automatizada é responsável pela mecanização do processo de soldagem descrito acima. Essa mecanização oferece às empresas, indústrias e fábricas a possibilidade de eliminar grande parte da mão de obra humana utilizada na manutenção, além de agilizar a produção (Ribeiro, 2012).

Vantagens do processo TIG automatizado são: obtenção de soldas com melhores acabamentos; facilitação do processo produtivo como um todo; tranquilidade e o aumento de garantias de sucesso no trabalho com chapas mais finas e ligas especiais mais complexas; redução de custos com trabalhadores, energia elétrica, consumíveis e desperdício de materiais.

Durante o processo de soldagem através da TIG automatizada podemos destacar outras vantagens: a redução do aquecimento da peça soldada e, conseqüente, a redução de distorção na solda; pouca sensibilidade à chamada corrosão intergranular e ausência de respingos.

Importante citar que o uso de solda TIG automatizada é recomendado para processos de soldagem de chapas e ligas com menos de 6 mm.

2.2.3. Processo de Soldagem TIG Orbital

No início dos anos sessenta, a soldagem orbital foi desenvolvida para fornecer condições básicas aeroespaciais para a produção de componentes de alta integridade. Verificação de mau funcionamento em conexões de sistemas hidráulicos sujeitos a vibrações e forças mecânicas durante o voo da aeronave, em velocidades próximas à velocidade do som, isso levou a melhorias nas técnicas de colagem. Assim foi criado sistema orbital do processo de soldagem TIG existente (Hanon, 2001; Garcia, 2007).

Os seres humanos têm uma capacidade inata de perceber erros e mudanças e agir para corrigi-los adequadamente para trabalhos de soldagem. Embora o produto passe pela etapa de inspeção, procedimentos manuais demandam muito tempo, o

que reduz o número e contribui no sentido contrário cumprimento de prazos. Além disso, o resultado repetível depende da habilidade do soldador depende das condições em que o trabalho é realizado. Eles limitam o conforto através do impacto nos ambientes menos ergonômicos (Paes, 2016).

A soldagem TIG orbital é onde o eletrodo de tungstênio segue uma trajetória coerente em torno de uma superfície geralmente circunferencial e acessível a partir da periferia externa (Figura 11). Soldas Alta qualidade e repetibilidade podem ser alcançadas na velocidade máxima de soldagem (Ratcliffe, 2002; Ribeiro, 2012).

Figura 11 - Processo TIG Orbital.



Fonte: Disponível:<www.dimakin.pt>. Acesso 22 de março 2023.

É um processo de soldagem de tubos que garante qualidade, reprodutibilidade e desempenho. Neste processo, a tocha de soldagem é posicionada de forma a seguir o perfil geométrico dos tubos a serem soldados, permanecendo estacionária. Essa configuração cria uma característica específica da soldagem orbital: a posição de soldagem muda constantemente durante o processo, tornando a investigação do efeito da posição essencial para o sucesso da aplicação. A soldagem orbital proporciona uma velocidade de soldagem relativamente alta e pode ser realizada em espaço limitado, além disso, por ser um processo automatizado, garante um baixo índice de defeitos (Figueirôa *et al.*, 2015).

Principalmente para a mecanização, em que há menos margem para inconsistências na montagem de tubos e no ajuste de variáveis, o principal problema na soldagem orbital é a necessidade de manter a poça de fusão em posições que não estejam sujeitas à força da gravidade e, portanto, há necessidade de estratégias muito bem elaboradas para manter a poça metálica no espaço.





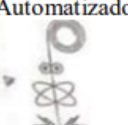
Portanto, a energia de soldagem deve estar em uma determinada faixa de valores específicos (Santori *et al.*, 2017).

O processo de soldagem TIG orbital é utilizado para automatizar a união de tubos e dutos de diversos diâmetros e espessuras em ambientes onde a qualidade está atrelada ao desempenho. O nível de energia de soldagem é significativamente baixo, o que ajuda a controlar a distorção e manter a precisão dimensional. (Garcia, 2007).

Os modernos sistemas de soldagem orbital têm gerenciamento baseado em sistema computadores que permitem armazenar parâmetros de soldagem na memória, simplificando o desenvolvimento de novos procedimentos de soldagem. A unidade de controle é responsável controlando o valor das variáveis de soldagem, como corrente e velocidade de movimento do eletrodo de acordo com a posição do eletrodo em relação ao tubo. Assim, as habilidades de um soldador certificado são fabricadas com um sistema que garante soldas repetíveis com poucos erros ou defeitos (Broering, 2005).

Os processos de soldagem podem ser classificados de acordo com seu tipo de operação. A Tabela 3 apresenta essa classificação de acordo com as ações do soldador e da máquina (ou robô) durante a execução dos processos de soldagem. Em geral, as operações automáticas e automatizadas são realizadas por robôs industriais.

Tabela 3 - Classificação das operações dos processos de soldagem.

Tipos de operação	Ação						
	Iniciar e manter o arco elétrico	Alimentar material	Controlar energia para adequada penetração	Deslocar a tocha	Guiar o arco elétrico ao longo da junta	Manipular a tocha	Corrigir arco elétrico em desvios
Manual 	Soldador	Soldador	Soldador	Soldador	Soldador	Soldador	Soldador
Semiautomático 	Máquina	Máquina	Soldador	Soldador	Soldador	Soldador	Soldador
Mecanizado 	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Soldador	Soldador	Soldador
Automático 	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Não corrige imperfeições detectadas na densidade de potência
Automatizado 	Máquina (com sensor)	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (com sensor)	Máquina (com sensor)	Máquina (com sensor)	Máquina (com sensor)

Fonte: Fernandes, (2013).

Com o advento da automação industrial surgiu a oportunidade de se utilizar um robô no processo de soldagem, visto que a automatização dos processos de soldagem tem permitido um aumento significativo da produtividade em relação aos processos convencionais, sendo muito importante e amplamente utilizado na indústria. (Fernandes, 2013).

2.3. CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA AUTOMATIZADO

Segundo Souza (2000), vários ensaios são realizados para determinar as propriedades mecânicas de materiais metálicos, nomeadamente ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos. É usado para determinar algumas propriedades físicas do metal, bem como para detectar defeitos internos, testes não destrutivos são usados. Testes não destrutivos incluem raios X, raios gama, ultrassom, fluxo magnético, partículas magnéticas e testes de líquidos penetrantes.

O mesmo autor também diz que testes destrutivos fazem com que o material se quebre ou se torne inutilizável. Os testes de fratura são classificados em testes de tração, testes de flexão, testes de torção, testes de fadiga, testes de impacto, testes de cisalhamento e testes de compressão. Os testes de dureza, que, embora provavelmente não tornem a peça testada inutilizável, estão incluídos na categoria de testes destrutivos.

2.3.1. Ensaio Visual

O teste visual é o primeiro método de teste que deve ser usado para avaliar peças ou componentes que serão submetidos a outros métodos de ensaios não destrutivos. Isso se deve ao fato de que a maioria dos métodos de END requer condições de superfície em boas condições. Ao utilizar um teste visual como primeira opção de análise, qualquer quebra na superfície de um componente ou peça que possa impedir um teste específico posteriormente será identificada e corrigida, evitando desperdício de tempo e recursos. Inspeção visual exige definição clara e precisa de critérios de aceitação e rejeição do produto conforme (Figura 12).

Figura 12 - Inspeção visual/dimensional.



Fonte: Disponível:<<https://infosolda.com.br>>. Acesso 18 de março 2023.

2.3.2. Ensaio com Líquidos Penetrantes

Segundo a norma N-1596H (2013) o teste de líquido penetrante é um método projetado especificamente para detectar trincas superficiais, mesmo que estejam abertas na superfície do material. Este método foi pioneiro antes da Primeira Guerra Mundial, principalmente na indústria ferroviária para inspecionar eixos, mas ganhou força quando o método do penetrante fluorescente foi desenvolvido nos EUA em 1942. Na época, esse ensaio era adotado pela indústria aeronáutica, que, trabalhando com ligas não ferrosas, precisava de um método de detecção de defeitos superficiais que não fosse o teste de partículas magnéticas (não aplicável a materiais não magnéticos).

Sua finalidade é detectar discontinuidades abertas na superfície das peças, como trincas e poros, que não sejam visíveis a olho nu. Podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira (Cuppari, 2008).

É muito usado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio, e zircônio, além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos (Andreucci, 2023).

Na aplicação do líquido é utilizado um pincel, lata de aerossol como pode ser visualizado na (Figura 13), pistola ou mesmo a imersão do produto que receberá o ensaio em tanques, em qualquer dos casos o líquido penetrante sempre é aplicado em excesso, toda a superfície deve ser coberta. As partes que não puderem ser afetadas pelo penetrante devem ser protegidas.

Figura 13 - Aplicação do líquido penetrante utilizando lata de aerossol.



Fonte: Disponível:<<http://www.faend.com.br/galeria/liquido6.jpg>>. Acesso 18 março 2023.

De acordo com Andreucci (2013) os princípios básicos da inspeção com líquidos penetrantes, conforme (Figura 14).

Figura 14 - Etapas da aplicação do ensaio líquido penetrante.



Fonte: Andreucci, (2013).

O ensaio determina a capacidade do líquido de penetrar nos orifícios da superfície da peça, escoando sobre a superfície de forma contínua e uniforme e posteriormente migrando pelas cavidades abertas na superfície (Sampaio, 2009).

O teste pode ser explicado da seguinte forma na (Figura 15 e 16). Procedimentos 1 e 2. A imagem da esquerda é para limpeza da peça e a imagem da direita é para aplicação do penetrante. Procedimentos 3 e 4. A imagem da

esquerda remoção do líquido penetrante excedente e a imagem da direita é a aplicação do revelador (Pais Filho e Fujyama, 2014).

Figura 15 - Procedimento limpeza da peça e aplicação do líquido penetrante.



Fonte: Worman, (2011).

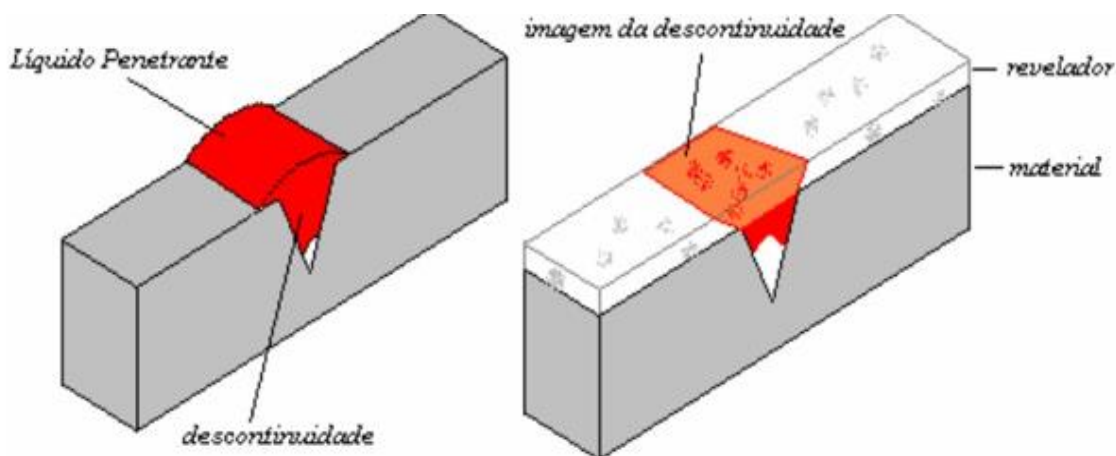
Figura 16 - Procedimentos remoção do líquido penetrante excedente e aplicação do revelador.



Fonte: Worman, (2011).

Observa-se que como o penetrante é aplicado na superfície das peças/soldas neste teste, este teste é limitado a identificar rachaduras e defeitos na superfície do material de teste conforme (Figura 17).

Figura 17 - Aplicação do líquido penetrante (imagem à esquerda) e aplicação do revelador e formação da indicação de falhas/poros (imagem à esquerda).



Fonte: Sampaio, (2009).

2.3.3. Partículas Magnéticas

O ensaio por partícula magnética é um tipo de ensaio não destrutivo e é usado para materiais ferromagnéticos, como materiais fundidos, laminados, peças soldadas etc. Os ensaios geralmente são realizados durante e após o processo de fabricação para detectar danos superficiais e subsuperficiais (Carneval *et al.*, 2007).

A técnica utilizada para realizar a magnetização pela indução em campo magnético, gerado por um eletroímã em forma “U” é conhecida como técnica loque ou Yoke. É gerado no corpo de prova um campo magnético paralelo a linha imaginária que une as duas pernas do aparelho Yoke.

O Yoke é um circuito magnético constituído de um núcleo magnético de pequena relutância com uma bobina na parte superior e dois pólos magnéticos que, apoiados sobre uma peça a ser ensaiada, formam um circuito magnético fechado.

O corpo de prova a ser analisado pelo ensaio de partículas magnéticas é magnetizada através de uma corrente elétrica (Figura 18), e no material há uma concentração de linhas oriundas do campo magnético. Se houver descontinuidade no corpo de prova, essa imperfeição interferirá na direção das linhas de fluxo magnético, alterando o campo que será emitido da superfície da peça. Fazendo com que o campo magnético atraia com mais força as partículas de ferro espalhadas na peça durante o ensaio, e a aglomeração dessas partículas vai indicar o perímetro do campo de vazamento (Figura 19), revelando assim a forma e o comprimento do defeito (Carneval *et al.*, 2007).

Figura 18 - Magnetização utilizando ferramenta Yoke.



Fonte: Andreucci, (2009).

Figura 19 - Comportamento do campo magnético quando há falhas na peça.

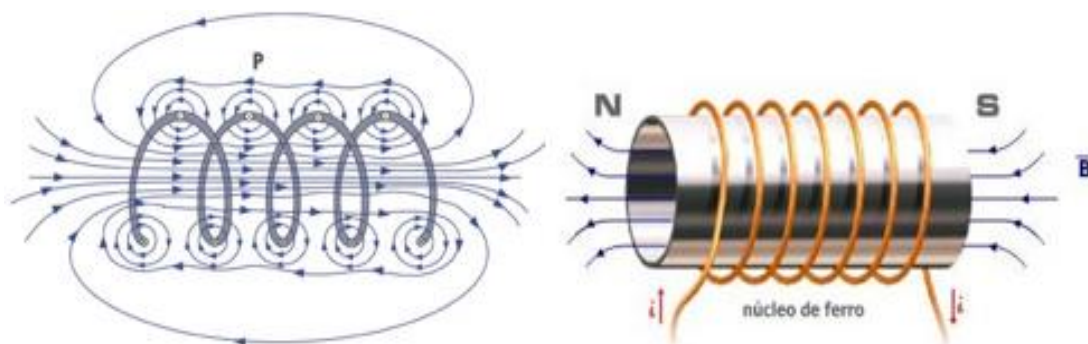


Fonte: ZOLIN, (2011).

É possível realizar este ensaio em cinco etapas: preparação e limpeza da superfície, magnetização da peça, aplicação de partículas magnéticas e inspeção da peça e limpeza após análise e por fim desmagnetização da peça (Zolin, 2011).

No caso do método de magnetização longitudinal o campo magnético do circuito pra detecção de descontinuidade transversais é obtida por indução de campo por bobinas ou eletroímãs, conforme (Figura 20). A magnetização é gerada através de um campo magnético longitudinal da peça e fechando com o circuito através do ar.

Figura 20 - Método para magnetização longitudinal, por bobina indutora.



Fonte: Carneval, (2007).

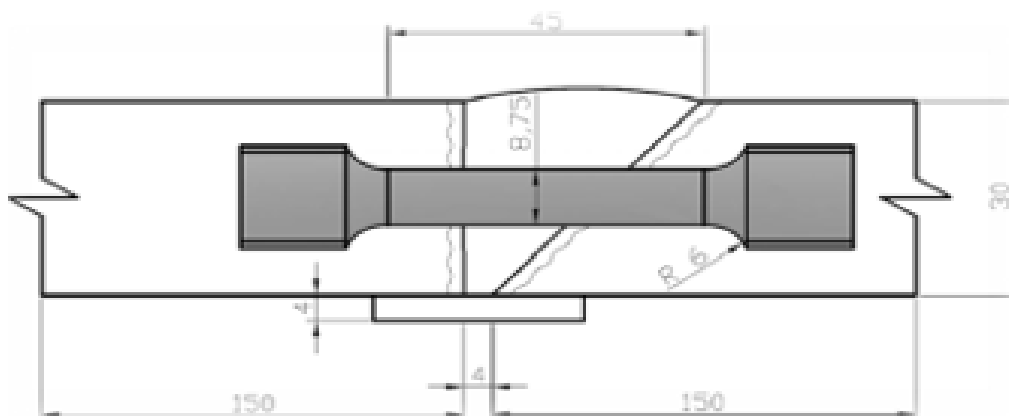
2.3.4. Ensaio Mecânicos Destrutivos

Ensaio destrutivos são aqueles que deixam uma marca na peça ou corpo de prova submetido ao ensaio, mesmo que não seja inútil. São métodos usados para analisar o comportamento de materiais sob estresse mecânico e sob certas condições semelhantes às condições operacionais (Calister, 2010).

Segundo Zolin (2011), ensaios destrutivos são ensaios mecânicos que requerem procedimentos que resultam em materiais ou amostras inúteis, mesmo que o dano seja pequeno. O ensaio de dureza, em alguns casos, causa danos menores. Este impacto (marcas) não destrói o corpo de prova testado, mas deixa vestígios que serão pontos de concentração de tensões e fonte de possíveis falhas.

Um dos ensaios mecânicos destrutivos utilizado é o ensaio de tração, com o objetivo de avaliar a resistência mecânica e ductilidade da junta soldada. Normalmente para juntas de baixa espessura o corpo de prova é retirado transversalmente ao cordão de solda (Madeira e Modenesi, 2010), conforme (Figura 21). O ensaio consiste em tracionar uniaxialmente o metal base (MB) do corpo de prova sob esforço progressivo até sua ruptura.

Figura 21 - Esquema de retirada de corpos de prova.

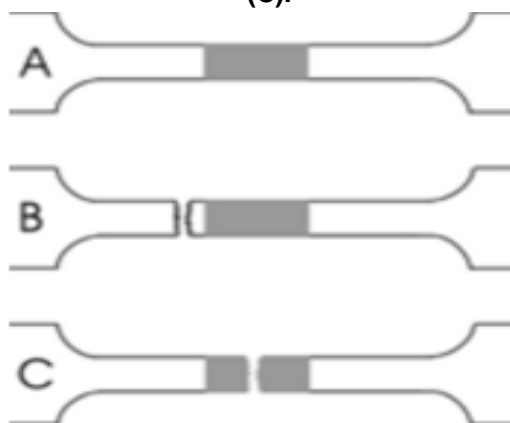


Fonte: Junior, 2013.

Com os dados obtidos observa-se inicialmente o local de ruptura, sendo este no metal base (MB) ou no metal de solda (MS), conforme (Figura 22). Para cada uma das situações é feita a análise do limite de resistência (LR) e do alongamento (AL) a fim de determinar a possibilidade de uso ou não de determinados tipos de solda na indústria ou construção civil.

Sabe-se que em alguns casos o corpo de prova tende a romper-se no metal base. Quando isso ocorre, a junta soldada acaba não sendo testada até seu limite de resistência e, portanto, os valores das propriedades mecânicas não devem ser comparados. Caso o rompimento ocorra na junta, haverá influência direta da deformação do metal base nos resultados (Madeira e Modenesi, 2010).

Figura 22 - Rompimento dos corpos de prova: inicial (A), metal base (B) e metal de solda (C).



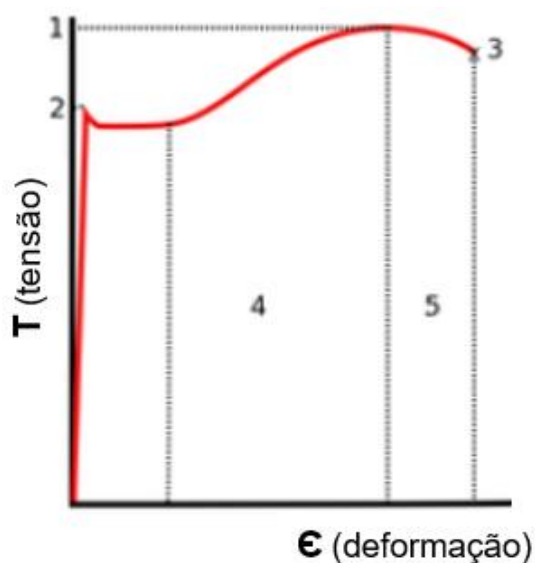
Fonte: ASM Treinamentos, (2007).

O ensaio de tração consiste em submeter o material a um esforço que tende a alongá-lo até a ruptura. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio.

No ensaio de tração o corpo de prova é deformado por alongamento, até o ponto em que se rompe. Os ensaios de tração permitem conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem.

Num ensaio de tração, obtém-se o gráfico tensão-deformação (Figura 23), no qual é possível analisar o comportamento do material ao longo do ensaio. Do início do ensaio, até a ruptura, os materiais geralmente passam pelas seguintes etapas.

Figura 23 - Gráfico tensão-deformação: 1. tensão máxima de tração, 2. tensão de escoamento, 3. tensão de ruptura, 4. região de encruamento, 5. região de “estricção”.



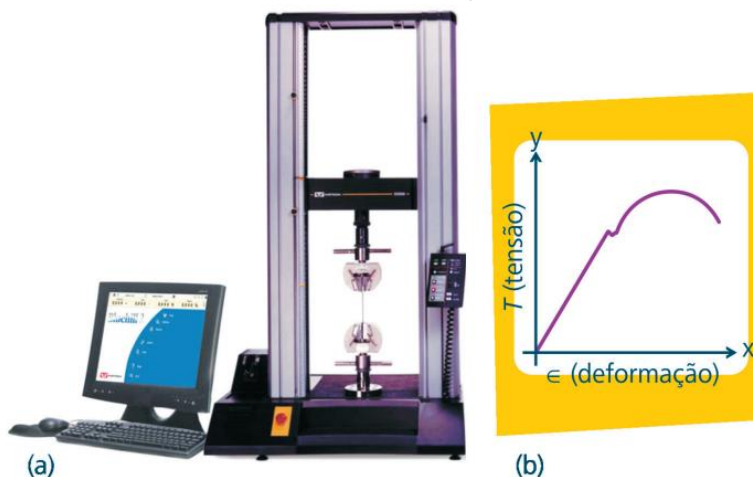
Fonte: Disponível: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ensaio_de_tração>. Acesso 15 de abril 2023.

O objetivo principal deste estudo é determinar o comportamento das amostras em conexão com a influência da carga de tração. Segundo Zolin (2011), o ensaio de tração consiste na aplicação de uma força que, atuando na superfície de um corpo sólido, provoca deformação no sentido da força, criando pressão. Quando essa força tende a se alongar, ocorre o que chamamos de tensão de tração. Existe uma relação entre a tensão aplicada (carga na área da seção transversal da peça) e a deformação resultante.

Pode-se melhor representar esse fenômeno na forma de um diagrama tensão x deformação indicado pela (Figura 24b). Os valores para construir o gráfico (diagrama) tensão-deformação são obtidos pelo ensaio de tração realizado em uma máquina apropriada para essa função. A máquina usada para realizar o ensaio de tração deve possuir os seguintes dispositivos: garras para prender a peça ou corpo de prova, uma célula de carga para monitorar a força e um instrumento para verificar a deformação (por exemplo, um extensômetro).

Quando aplicamos uma força de tração sobre a superfície transversal de uma peça, produzimos um alongamento. Esse, dentre certos limites, é proporcional à tensão aplicada. As máquinas modernas estão equipadas com sistema de captação e processamento de dados. A (Figura 24a) representa uma máquina de ensaio de tração (Zolin, 2011).

Figura 24 - (a) Máquina de ensaio de tração e (b) gráfico do ensaio.

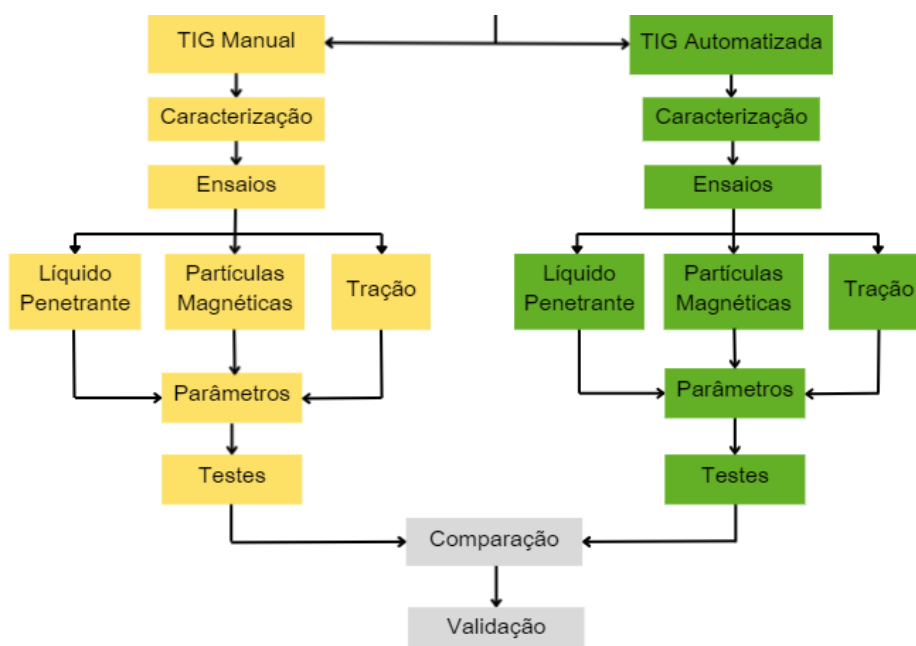


Fonte: Disponível:<(a) <http://instron.itrademarket.com/722730/instron-5560-series-table-model-testing-systems-universal.htm> (b)CTISM>. Acesso: 10 de abril 2023.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos que foram aplicados no desenvolvimento do estudo. Seguindo o objetivo proposto, foi elaborado uma sequência de atividades técnicas que findam no estudo comparativo da solda manual *versus* automatizada. Os dados referentes à solda manual, foram obtidos por Coroa (2023), portanto, neste trabalho, a sequência de atividades técnicas se concentra exclusivamente em obter dados provenientes da soldagem automatizada. A Figura 25 ilustra a sequência proposta.

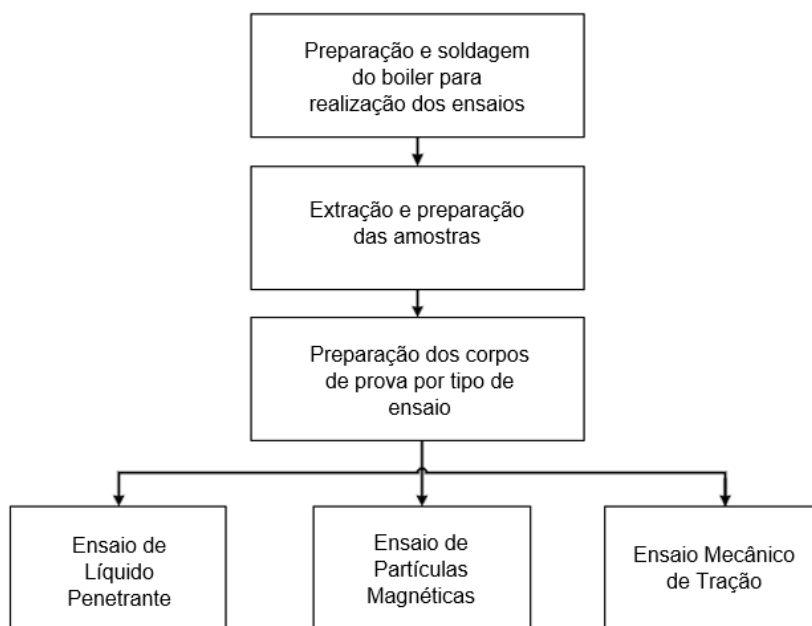
Figura 25 – Sequência de atividades técnicas propostas para estudo comparativo entre solda manual versus automatizada em reservatórios de aço inoxidável com chapas de espessura inferior à 2 mm.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Coroa (2023) concentrou seus estudos na sequência de atividades do lado esquerdo da Figura 25. A Figura 26 estabelece essa sequência de forma resumida.

Figura 26 - Ensaio estabelecidos para estudo do cordão de solda manual.



Fonte: Coroa (2023).

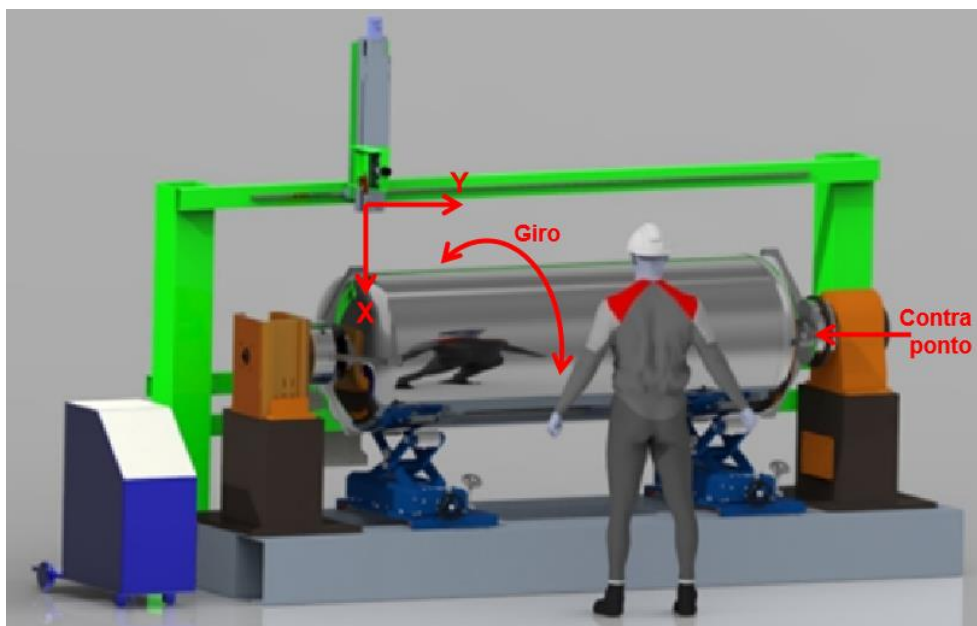
Para caracterização da solda automatizada, foi realizado o mesmo conjunto de ensaios, porém, as amostras foram obtidas através do equipamento automatizado de soldagem, projetado e construído por meio de um projeto entre EMBRAPPII / UFSCar - Materiais e a empresa SOLIS, chamado Projeto SOLIS / EMBRAPPII / UFSCAR.

As próximas seções abordam as atividades listadas na Figura 26, contemplando não apenas os ensaios, mas também: a máquina de solda automatizada utilizada neste estudo. Materiais e parâmetros de soldagem. As amostras provenientes de reservatórios soldados. A preparação dos corpos de prova e os ensaios aplicados.

3.1. MÁQUINA DE SOLDA AUTOMATIZADA SOLIS / EMBRAPPII / UFSCAR

O equipamento foi concebido para rotacionar o reservatório enquanto uma tocha TIG executa a união circunferencial entre tampo e corpo do reservatório. A proposta funcional do equipamento automatizado é apresentado na Figura 27. O reservatório é posicionado entre duas garras (uma fixa e um contra ponto), que seguram o reservatório e executam o giro em velocidade controlada. A movimentação da tocha na direção Y se dá exclusivamente para a soldagem em cada extremo do reservatório.

Figura 27 – Proposta inicial do equipamento automatizado, projeto SOLIS / EMBRAPII / UFSCar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 28 traz o protótipo de máquina de solda circunferencial automatizado finalizado.

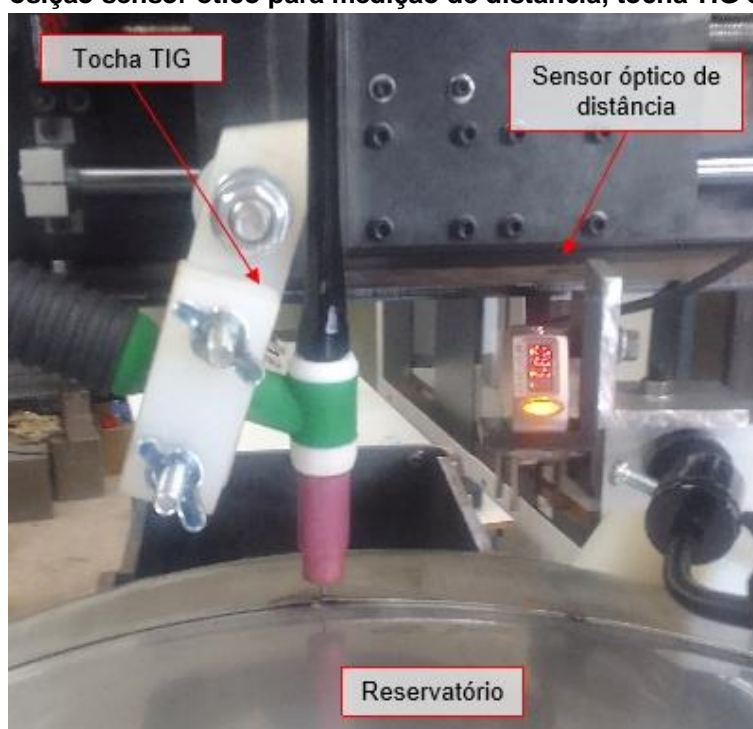
Figura 28 – Foto do protótipo de máquina de solda circunferencial automatizado do projeto SOLIS / EMBRAPII / UFSCar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tocha executa uma movimentação na direção X (vide Figura 27) como forma de compensação do batimento do reservatório. Estudos realizados pela empresa SOLIS, apontam que um reservatório pode ter uma variação de batimento radial de até 10 mm. Tendo em vista que o batimento influencia diretamente na distância entre tocha TIG (e conseqüentemente, o eletrodo de Tungstênio) e as chapas a serem soldadas, foi adicionado um sensor ótico de medição de distância, capaz de mensurar o batimento a cada um grau de deslocamento angular, Figura 29.

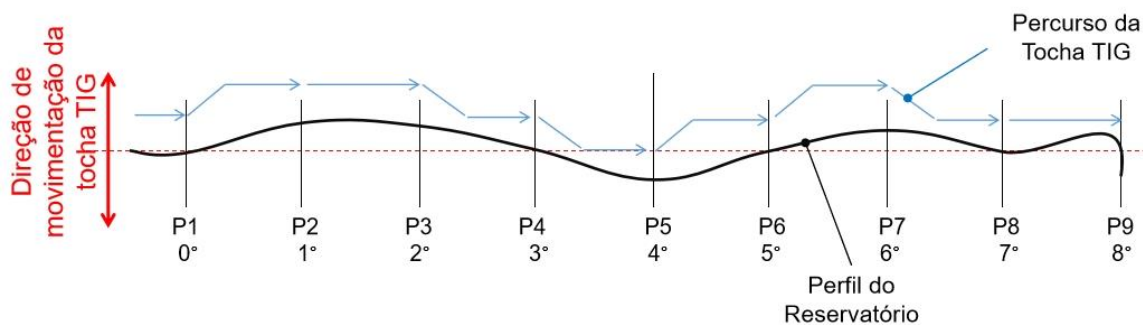
Figura 29 – Posição sensor ótico para medição de distância, tocha TIG e reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tocha TIG é então reposicionada de acordo com os valores coletados pelo sensor, também a cada um grau de deslocamento, gerando um comportamento como descrito na Figura 30. As linhas azuis representam o percurso da tocha TIG com base nas informações de batimento de reservatório. O perfil de batimento do reservatório é dado por uma linha sinuosa, onde a leitura do batimento é feita a cada um grau. Cada leitura de batimento é associada à posição angular e recebe o nome de ponto, sendo descrita por P1, P2, P3, e assim adiante. Dessa forma, um perímetro completo do reservatório a ser soldado, contém cerca de 360 pontos, com dimensões de batimento.

Figura 30 – Representação do comportamento da tocha TIG no batimento do reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Entende-se que a distância entre tocha TIG e chapas a serem soldadas, é crucial ao correto desenvolvimento do cordão de solda. No processo manual, essa distância é gerenciada pelo soldador.

3.2. RESERVATÓRIO AÇO INOXIDÁVEL 304 E PARÂMETROS DE SOLDAGEM

O reservatório utilizado para a obtenção das amostras foi fabricado pela empresa SOLIS, em aço inoxidável 304, tanto no tampo quanto corpo. A espessura da chapa do tampo foi de 0,8 mm e do corpo 0,5 mm.

Figura 31 – Foto da máquina de solda DIGIPlus A7, da IMC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fonte de solda TIG utilizada pelo protótipo de máquina de soldagem circunferencial automatizado foi o modelo DIGIPlus A7 AC/DC (Figura 31), da fabricante brasileira IMC. Os parâmetros de soldagem automatizada constam na Tabela 4. A tabela também traz os parâmetros de Coroa (2023), para a soldagem manual.

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem TIG (solda automatizada versus manual).

Parâmetros de Soldagem	Solda Automatizada	Solda Manual Coroa (2023)
Fonte de solda	DIGIPlus A7 AC/DC, IMC	Modelo MaxxiTIG 300P AC/DC, BALMER
Chapa [mm]	Tampo de 0,8mm Corpo de 0,5mm	Tampo de 1,5mm Corpo de 1,0mm
Corrente [A]	60	80
Diâmetro do eletrodo [mm]	2,4	2,4
Tipo do Eletrodo	WT20	WT20
Ângulo de afiação	$\leq 30^\circ$	$\leq 30^\circ$
Material do bocal	Cerâmica	Cerâmica
Diâmetro do bocal mm (tocha WT 20)	7	7
Gás de proteção	Argônio puro	Argônio puro
Vazão do gás de proteção [l/min.]	De 7 a 12	De 7 a 10
Vareta consumível	Não foi utilizado	316L
Diâmetro da vareta [mm]	---	5,3
Veloc. aproximada de soldagem [mm/s]	2	1,6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar de ser o mesmo método de soldagem (TIG), destacam-se as seguintes diferenças:

- As fontes de solda, no trabalho de Coroa (2023) utilizou a máquina de solda modelo MaxxiTIG 300P AC/DC, da fabricante BALMER. Na solda automatizada, foi utilizada a fonte da fabricante IMC;
- Diferenças das espessuras de chapas entre amostras comparativas, sendo a espessura do tampo de 0,8 mm e corpo de 0,5 mm para as amostras da solda automatizada. Nas amostras de Coroa (2023) a espessura de tampo e corpo foram de 1,5 mm e 1,0 mm, respectivamente. Essa mudança teve como origem um pedido da empresa SOLIS, que considera uma combinação de chapas mais

fina, estratégica para o mercado, pois reduz massa do reservatório e, indiretamente, reduz custos para a empresa;

- O dado de amperagem, na solda automatizada, foi regulado em um valor de 60A, diferente do parâmetro de Coroa (2023) que foi de 80A. A escolha da amperagem no processo automatizado foi baseada principalmente pela espessura reduzida das chapas (de tampo e corpo) que compõem o reservatório;
- Na solda automatizada, não houve adição de material (vareta consumível) devido uma escolha da empresa SOLIS. O objetivo da escolha foi a redução de custos, mantendo a qualidade mecânica da união soldada. De alguma forma, entende-se que a não adição de material também impacta no valor do parâmetro de amperagem;
- Velocidade de 2 mm/s contra 1,6 mm/s do processo manual. Um aumento de 25%;

3.3. AMOSTRAS DOS CORDÕES DE SOLDA DO RESERVATÓRIO

Apesar das diferenças apontadas na seção anterior, a avaliação do cordão de solda do reservatório, entre tampo e corpo, soldado no equipamento automatizado, consistiu em verificar qual o nível da solda obtida comparativamente aos resultados obtidos por Coroa (2023). Os principais ensaios realizados para esta verificação foram os ensaios destrutivos e não destrutivos, também realizados por Coroa (2023), citados na Figura 26.

Os ensaios não destrutivos visam detectar defeitos que possam ameaçar a Zona Termicamente Afetada (ZTA), combinando medições indiretas, qualitativas e raramente quantitativas (Cuppari e Nose, 2008).

Ensaio destrutivos, segundo Souza (2000), são aqueles que provocam a destruição parcial ou total de uma peça por meio da análise de suas características até o ponto de falha.

Foram propostos os seguintes métodos de controle não destrutivo e destrutivo da solda:

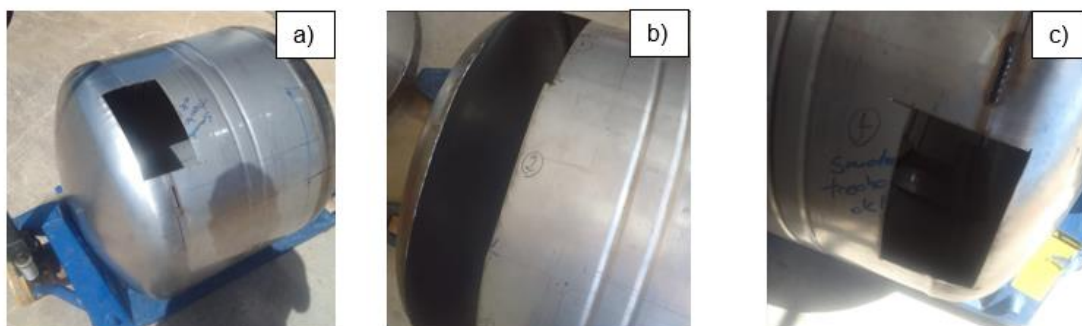
- a) Ensaio Mecânicos de Tração baseada na norma ASTM E8M. Por ser um material isotrópico as propriedades elásticas em um plano independem da

orientação. Foram realizados os ensaios para se verificar as propriedades mecânicas da junta soldada;

- b) Líquido penetrante conforme a norma ASME, seção VIII, divisão 1, apêndice 8, para soldas de vaso de pressão e tanques de armazenamento. Teve como objetivo detectar poros, cavidade ou fissuras que chegam até a superfície em análise;
- c) Partículas Magnéticas de acordo com a norma ASTM-E709. Este ensaio teve como objetivo verificar possíveis trincas ou demais defeitos providos do processo da soldagem.

Para este trabalho, entende-se por amostra, longos trechos dos cordões de solda realizados segundo os parâmetros e condições já citados nas seções anteriores, extraídos dos reservatórios por meio de disco de corte abrasivo. As Figuras 32 a), b) e c) ilustram os trechos segmentados.

Figura 32 - Amostras do reservatório de aço inoxidável AISI 304 para ensaios.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os ensaios, foram utilizadas quatro amostras de aço inoxidável AISI 304 de cada item abaixo (Tabela 5):

Tabela 5 - Quantidades e dimensões das amostras confeccionadas para realização dos ensaios não-destrutivos (líquido penetrante e partícula magnética), destrutivos de resistência mecânica à tração.

Ensaio	Nº amostras cordão tampo e corpo	Dimensões
		Comprimento (C) x Largura (L)
Ensaio Mecânico	4	250 mm (C) x 120 mm (L)
Líquido Penetrante	4	250 mm (C) x 120 mm (L)
Partícula Magnética	4	
Total	12	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das amostras, foram extraídos corpos de provas específicos para cada ensaio.

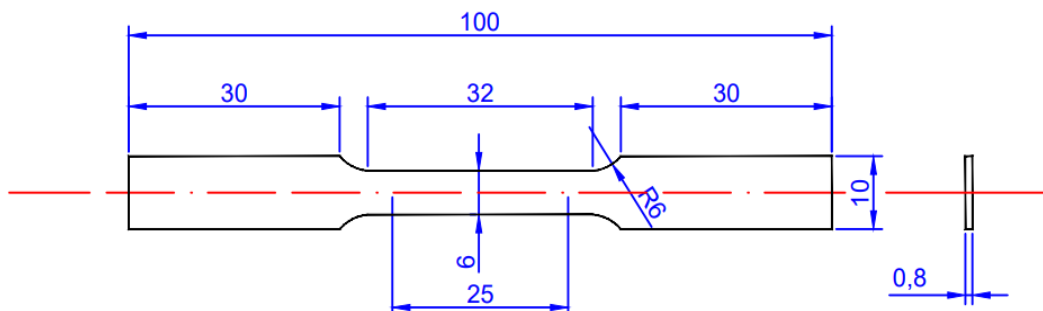
3.4. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR TIPO DE ENSAIO

O primeiro conjunto de corpos de prova a ser trabalhado foi do ensaio mecânico de tração. O objetivo dos ensaios mecânicos de tração é a verificação da resistência mecânica em tração e outras propriedades mecânicas extraídas das curvas tensão x deformação, de acordo com a solicitação da aplicação, comparando-se o metal de base com a juntas soldadas. O ensaio consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial em um corpo de prova padronizado em uma máquina universal de ensaios até que ele se rompa. Os ensaios mecânicos de tração serão realizados segundo a norma ASTM E8M, seguindo as recomendações:

- Medir carga x deformação;
- Dimensional da amostra deve ser padronizado: Espessura do cordão e comprimento; Dimensões da chapa (comprimento e largura); padronizar distância mordente do cordão;
- Definir velocidade de tração: sugestão 0,5 mm/min;
- Realizar teste com material sem solda nas mesmas dimensões das amostras com cordão;
- Confrontar os dados da chapa soldada, sem adição de material;
- Confrontar os dados do processo manual X processo automatizado.

Os corpos de prova, para a realização dos ensaios de tração, foram obtidos a partir das amostras citadas anteriormente, conforme a geometria padrão e as dimensões recomendadas pela norma ASTM E8M-13a (Figura 33).

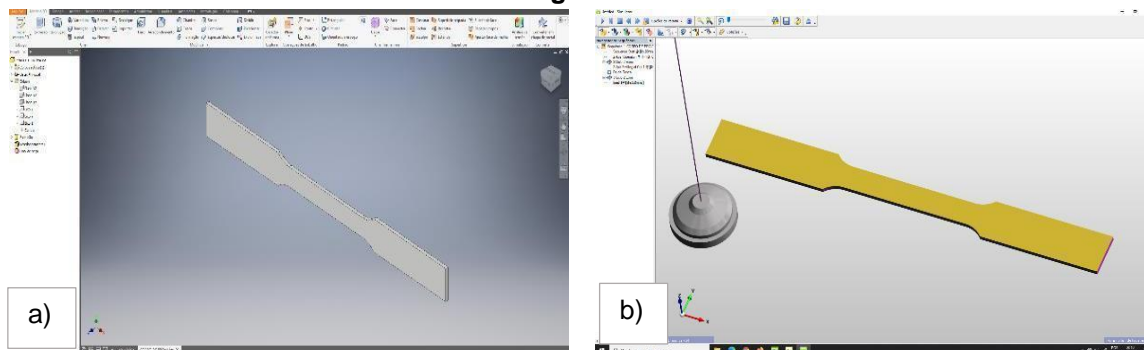
Figura 33 - Desenho esquemático e dimensões recomendadas para as amostras para os ensaios mecânicos de tração uniaxial segundo a norma ASTM E8M-13a, e encontra-se marcado em azul as dimensões mais adequadas pela norma para posicionar os cordões de solda no ponto.



Fonte: Adaptado pelo autor segundo a norma ASTM E8M-13a.

O corpo de prova foi projetado/modelado no software Autodesk Inventor v2022 (Figura 34 a). Com o software EdgeCam v2022, foi possível fazer uma simulação da peça a ser cortada por eletroerosão a fio, gerando também, a programação CNC conforme (Figura 34 b).

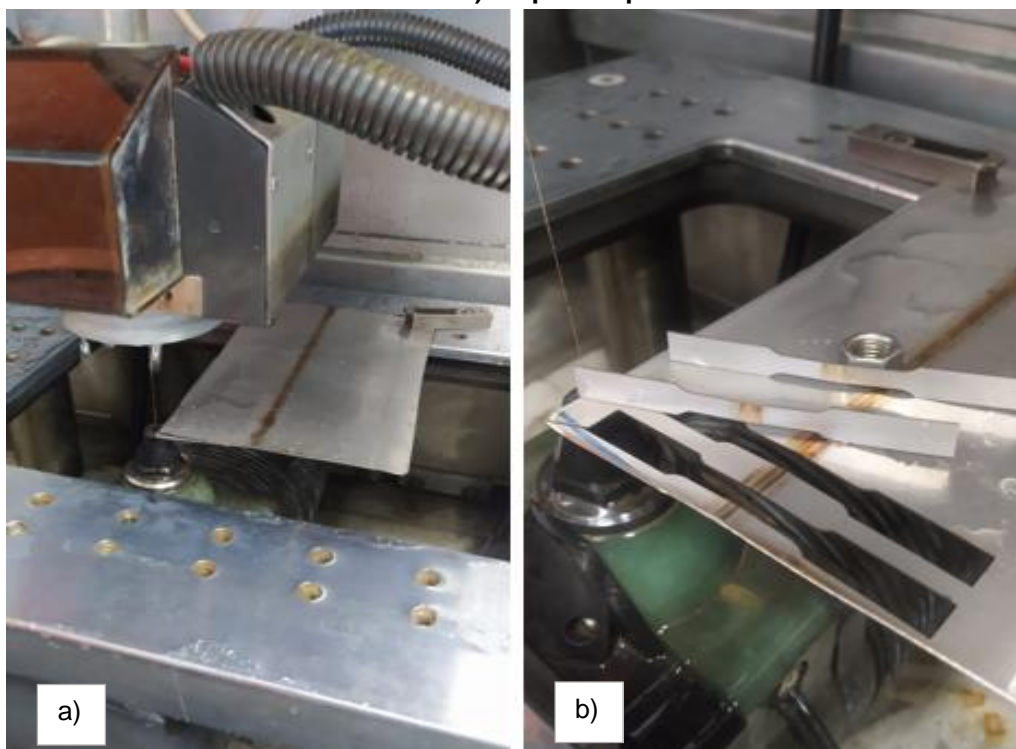
Figura 34 - Em a) modelagem da amostra no Autodesk Inventor. Em b) simulação no EdgeCam.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na máquina de corte por eletroerosão a fio, GF AgieCharmilles FL 240 SLP, disponível no SENAI de Matão, utilizou-se um fio de latão com o diâmetro de 0,25 mm para fabricar o contorno programado do corpo de prova. A Figura 35 a) e b) ilustram o início e fim do corte.

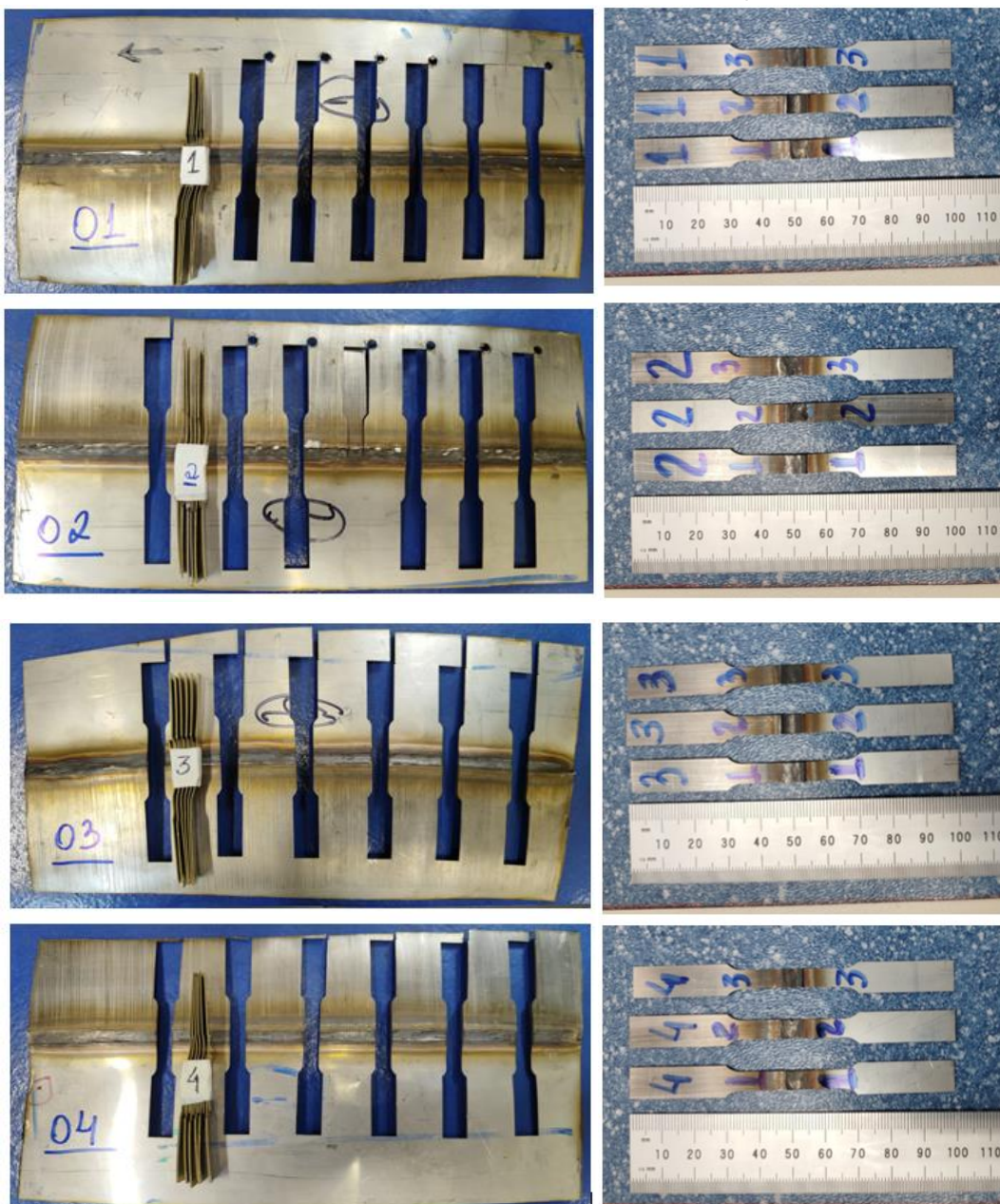
Figura 35 - Máquina de corte a fio por eletroerosão GF AgieCharmilles FL 240 SLP. Em a) início do corte. Em b) corpos de prova cortados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma visão geral dos corpos de prova obtidos pode ser vista na Figura 36.

Figura 36 - Corpos de prova para ensaio mecânico de tração - Visão Geral.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os ensaios destrutivos de resistência mecânica à tração, foram divididas as amostras, para confecção dos corpos de prova de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Divisão das amostras e corpos de prova fabricados para o ensaio mecânico de tração.

Resistência Mecânica à Tração (RMT)		
Nome do Grupo de Amostras	Característica	Quantidade
Amostra Tipo 1 RMT	cordão / junta corpo e tampo	CP1_CT_A1*
		CP2_CT_A1
		CP3_CT_A1
Amostra Tipo 2 RMT	cordão / junta corpo e tampo	CP1_CT_A2
		CP2_CT_A2
		CP3_CT_A2
Amostra Tipo 3 RMT	cordão / junta corpo e tampo	CP1_CT_A3
		CP2_CT_A3
		CP3_CT_A3
Amostra Tipo 4 RMT	cordão / junta corpo e tampo	CP1_CT_A4
		CP2_CT_A4
		CP3_CT_A4

*CP1_CT_A1 - Corpo de Prova 1 - Corpo/Tampo - Amostra 1

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir do material restante das amostras, foram selecionadas regiões para os ensaios de Líquido Penetrante e Partícula Magnética. Foram divididas as amostras de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Divisão das amostras confeccionadas para os respectivos ensaios.

Líquido Penetrante (LP) e Partícula Magnética (PM)		
Nome do Grupo de Amostras	Característica	Quantidade
Amostra Tipo 1 LP	cordão / junta corpo e tampo	Amostra T1.1
		Amostra T1.2
		Amostra T1.3
		Amostra T1.4
Amostra Tipo 2 PM	cordão / junta corpo e tampo	Amostra T2.1
		Amostra T2.2
		Amostra T2.3
		Amostra T2.4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o ensaio de líquido penetrante, foram verificadas as descontinuidades superficiais. O ensaio de partículas magnéticas teve como objetivo verificar

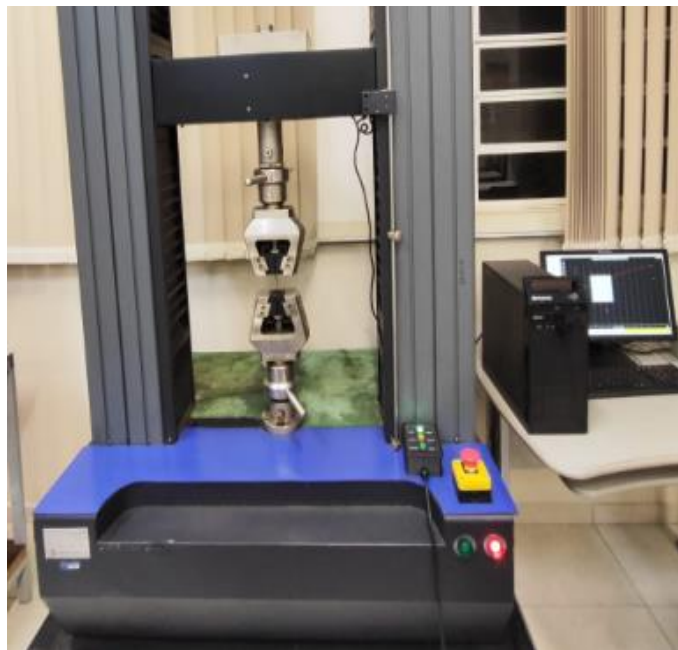
possíveis trincas ou outros defeitos oriundos do processo de soldagem. O foco foi verificar as descontinuidades superficiais e subsuperficiais.

3.5. ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS DO TANQUE DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

De acordo com Garcia (2000), o ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial em um corpo de prova padronizado em uma máquina universal de ensaios até que ele se rompa.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Metrologia da Etec Sylvio de Mattos Carvalho – Matão-SP seguindo as recomendações da norma ASTM E8M. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios, Modelo: WDW-300E, fabricada pela empresa chinesa, *Beijing United Test Co., Ltd.*, uma empresa chinesa. A máquina possui uma célula de carga de alta precisão, adequada para realizar testes com diferentes capacidades de carga, que podem chegar a até 300 KN (Figura 37).

Figura 37 - Máquina universal de ensaios - modelo: WDW-300E.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o controle dos parâmetros de ensaios utilizou-se o software VERSA-Software V01-08. Os parâmetros que serão aplicados durante os ensaios de tração, estão descritos na Figura 38, destacando a velocidade de tração sugerida de 0,5 mm/min.

Figura 38 - Parâmetros utilizados nos ensaios mecânicos de tração.

The screenshot displays the 'Controle de Ensaio Mecânicos' software interface. The main window is titled 'Métodos' and contains several configuration panels:

- Localizar:** Método: CP2_CT_A2
- Ordenar por:** Data
- Data:** 10/06/202
- Quantidade de lote:** 0
- Força:** Radio buttons for N (selected), KN, Kgf, and Tf.
- Carga máxima prevista:** 6000 N
- Sentido:** Radio buttons for Tração (selected), Compressão, and Flexão.
- Tipo velocidade:** Radio buttons for Por deslocamento (selected) and Por força.
- Velocidade de ensaio:** 0,5 mm/min
- Deslocamento máximo previsto:** 30 mm
- Valor de pré-Carga:** 3 %
- Força de interrupção:** 10 %
- Comprimento da amostra:** 36 mm
- Pontos da reta do patamar:** Força inferior: 10 %, Força superior: 20 %, Distância: 0,1 %
- Tipo do extensômetro:** Radio buttons for Pequenas deformações, Grandes deformações, and Nenhum (selected).
- Zerar a tara:** Radio buttons for Nunca, Opcional, and Sempre (selected).

At the bottom, there are buttons for 'Salvar', 'Cancelar', and a highlighted '+ Novo' button. The status bar at the bottom shows '(99/0) OK! Pacote: 1B 06 C0 90 01 18 9C 0C F9 3F 05 00 00 36 11 00 00 0A 1D 00 BC 00 3E 00 00 00 00 31 00 00 18 03 10 (15)'

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 39 apresenta a montagem utilizada nos experimentos da máquina de ensaios mecânicos de tração (a) e, um corpo de prova rompido ao final do ensaio (b).

Figura 39 - Em a) preparação da máquina para os ensaios mecânicos de tração. Em b) corpo de prova rompido ao final de um ensaio.

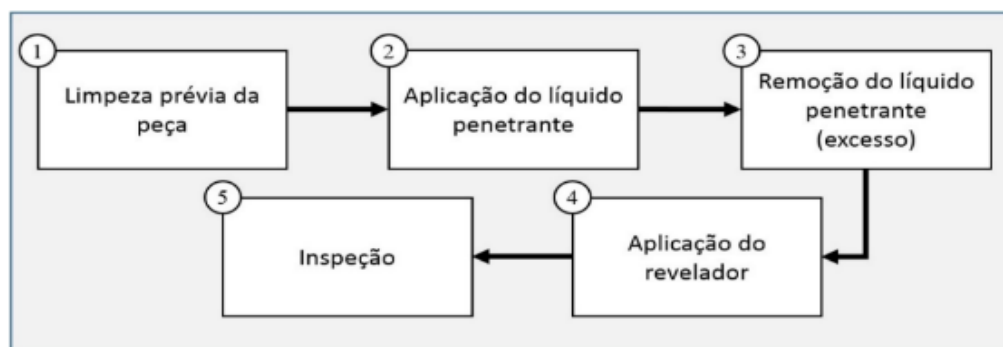


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6. ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE DAS AMOSTRAS DO RESERVATÓRIO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Os ensaios de líquido penetrante foram realizados nas amostras da junta de solda corpo e tampo sem adição de material. A análise dos aspectos relacionados aos ENDS por LPs em peças soldadas da amostra foi analisada no fluxograma da (Figura 40) apresentado por Pais Filho e Fujiyama (2014), com ênfase nas etapas 1 e 3, limpeza prévia da peça e remoção do líquido penetrante (excesso), respectivamente.

Figura 40 - Fluxograma de ensaios não-destrutivos ENDS por líquido penetrante (LP).



Fonte: Pais Filho e Fujiyama, (2014).

3.6.1. Preparação da Superfície para LP nas Amostras

Foi utilizado o solvente referente ao kit de ensaio. É importante lembrar que produtos como *thinner* é difícil obter um certificado de contaminantes para uso em inoxidáveis. Nesse caso, o removedor do mesmo fabricante dos produtos penetrantes, foi o mais indicado ou apropriado. A evaporação do solvente ocorre de forma natural, tempo mínimo de cinco minutos (Figura 41).

Figura 41 - Preparação da superfície para o ensaio de (LP). Em a) preparação para limpeza. Em b) escovação. Em c) aplicação de removedor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.2. Aplicação do Líquido Penetrante

O líquido penetrante possui coloração vermelha intensa e contrastante para identificação de discontinuidades, com características excepcionais de penetração. Por ser facilmente removível com água, gera menos efluente e é ecologicamente correto, além de ser biodegradável (Magnaflex, 2023).

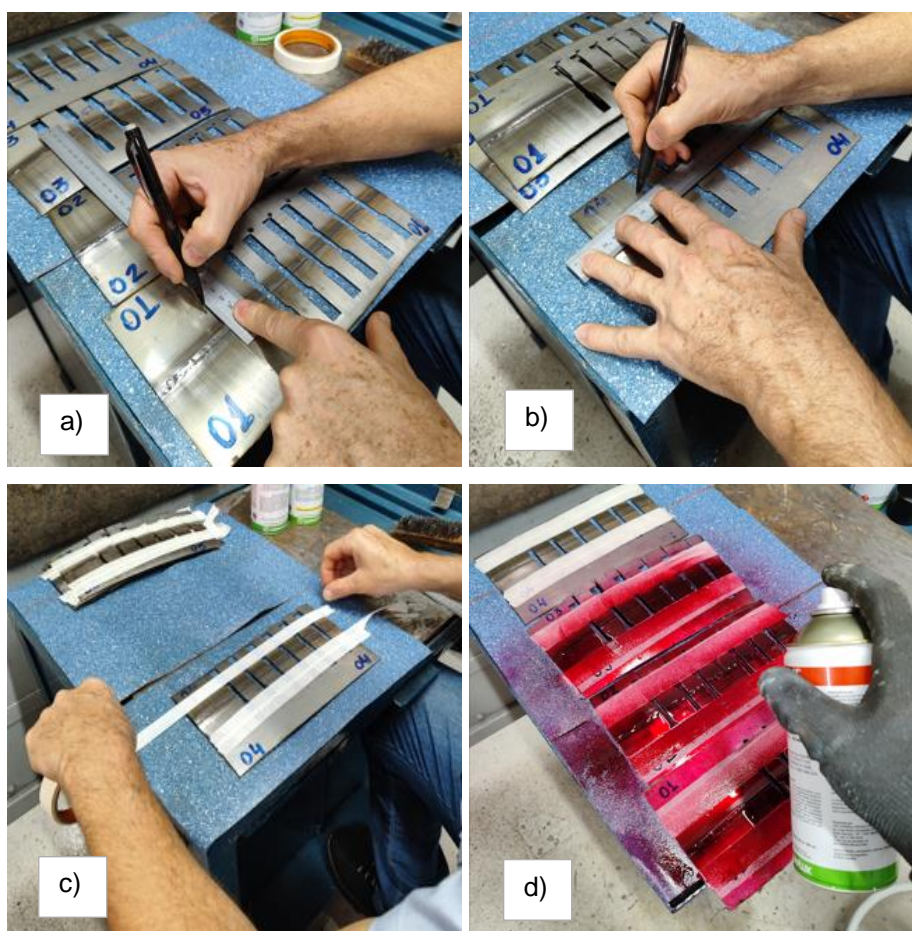
Costuma ser utilizado em soldas, forjados, vasos de pressão, fundidos, metalurgia geral e é adequado a um ambiente de produção em que muitas peças

são inspecionadas todos os dias.

O SKL-WP2 consta na Lista de Produtos Qualificados (QPL) SAE AMS 2644., pois este método prático e dispensa o uso de luz negra.

Foi aplicado o líquido penetrante em aerossol (SKL-WP2) de 20 a 30 cm da peça (Figura 42). Este é um penetrante lavável à água que elimina a necessidade de solventes ou emulsificantes para a remoção do excesso de penetrante da superfície da área inspecionada. Tempo de penetração do líquido penetrante, conforme orientação do fabricante, foi de no mínimo quinze minutos e no máximo trinta minutos.

Figura 42 – Preparação e aplicação do líquido penetrante (LP). Em a) e b) marcação das dimensões da área de aplicação. Em c) delimitação da área de aplicação com fitas adesivas. Em d) aplicação do líquido penetrante.



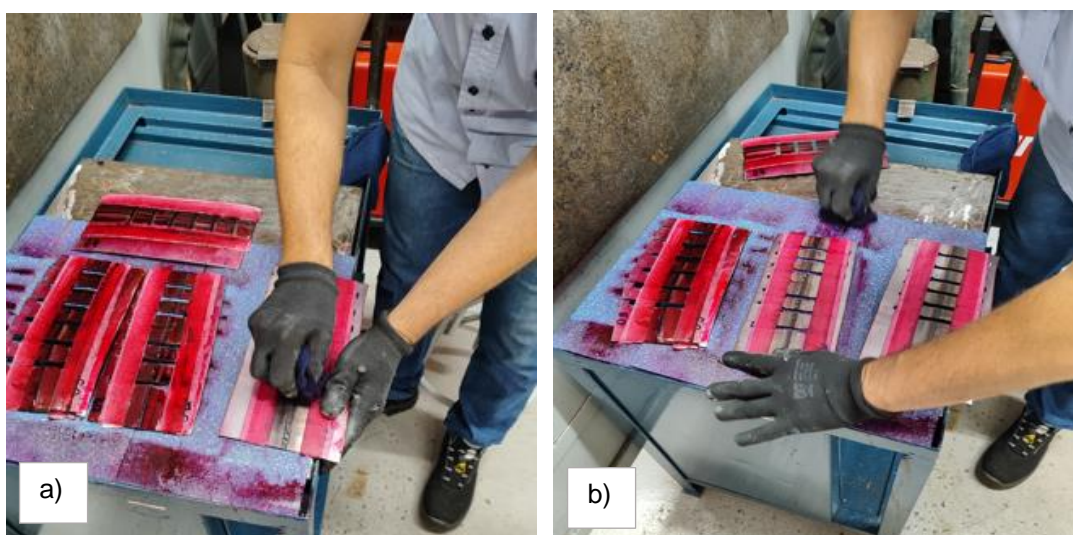
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.3. Remoção do Excesso de Penetrante

Estes tipos de líquidos penetrantes são fabricados de forma a permitir que o excesso seja removido com pano seco, papel-toalha ou qualquer outro material absorvente que não solte fiapo, até que reste uma pequena quantidade de líquido na superfície de ensaio; esta deve ser então removida com um solvente removedor apropriado.

Após o tempo de penetração suficiente, foi limpa a superfície com toalha industrial conforme Figura 43.

Figura 43 - Em a) e b) remoção do excesso (LP).



Fonte: Elaborada pelo autor.

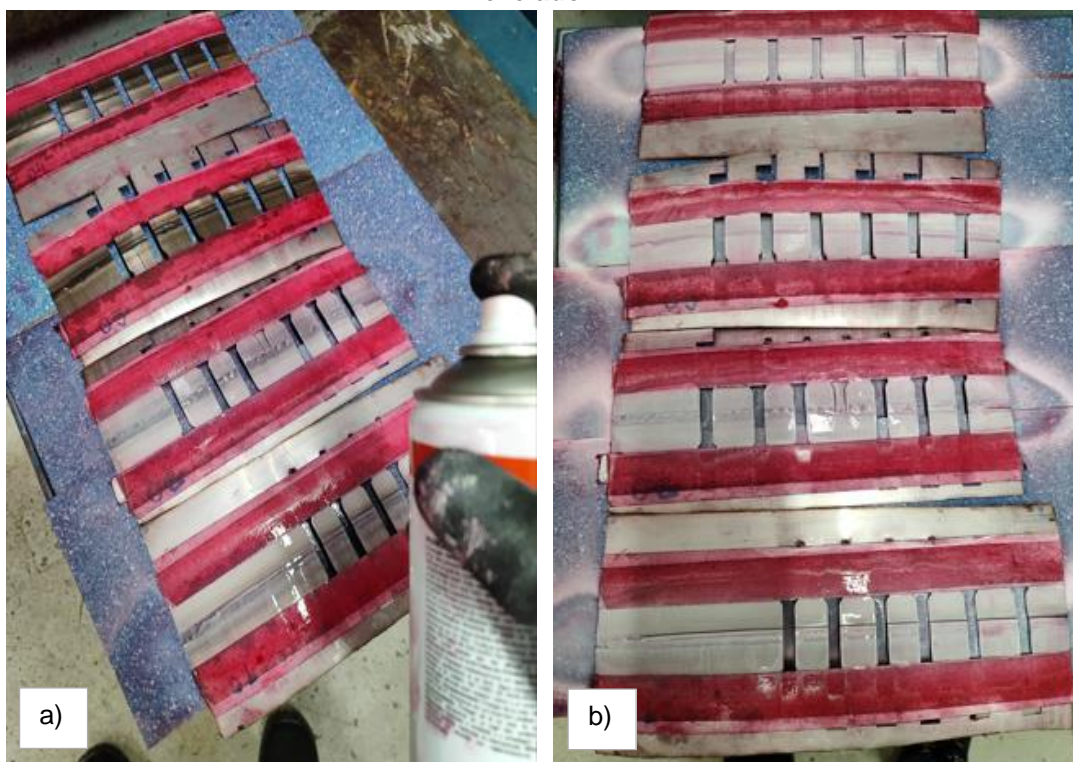
3.6.4. Aplicação do Revelador

Utilizou-se o SKD-S2 é um revelador não aquoso a base de solvente não clorado e não halogenado, pronto para uso, que tem destaque pela sua utilização em aplicações do setor nuclear e em ligas especiais (Magnaflex, 2023). É ideal para aplicações em soldas, oficinas de máquinas e aplicações em construção. O SKD-S2 consta na Lista de Produtos Qualificados (QPL) SAE AMS 2644.

O revelador foi aplicado imediatamente após a secagem / limpeza da superfície, pois tempos longos de secagem podem prejudicar a sensibilidade do ensaio, não devendo ser superior a trinta minutos. A camada a ser aplicada será fina e uniforme, durante a aplicação o revelador chegará à superfície da chapa levemente umedecido.

A espessura apropriada secou até obter uma camada branca uniforme. O excesso de revelador pode mascarar as discontinuidades; pouco revelador não revelará a indicação o suficiente. Para a aplicação, uma lata de spray com pulverizador foi colocada a uma distância de 20 a 30 cm da peça, e pequenas áreas foram pulverizadas sucessivamente (Figura 44). Depois que o revelador secou, surgiram sinais de discontinuidade levando alguns minutos para serem detectados.

Figura 44 - Em a) aplicação do revelador. Em b) visão geral dos corpos de prova LP com revelador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.7. ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

A preparação da superfície dos corpos de prova para os ensaios de partículas magnéticas, foi o mesmo adotado no item 3.6.

3.7.1. Aparelho Yoke Eletromagnético

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de partículas magnéticas foi o modelo Yoke eletromagnético de corrente alternada 220 V (Y-6 Slim).

Com aproximadamente 3,0 kg pode ser considerado um dos mais leves e ergonômicos Yokes do mercado e possui design ergonômico (Figura 45). Oferece um meio portátil de criar campos magnéticos de corrente alternada para a detecção de indicações de superfície ou subsuperfície durante ensaio de partícula magnética (Magnaflux, 2023).

Figura 45 - Aparelho Yoke Modelo Y6.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando o Yoke é acionado com as sapatas posicionadas sobre a superfície das amostras dos corpos de prova, corpo e tampo sem adição de material, gerou-se um campo magnético induzido no sentido longitudinal entre as sapatas, na superfície da peça, conforme Figura 46.

Figura 46 – Ensaio de Partículas Magnéticas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma luminária portátil de luz de LED ultravioleta foi usada para inspecionar descontinuidades superficiais ou ligeiramente subsuperfícies perpendiculares à direção do fluxo magnético aplicado. Assim, gerou-se um campo de fluxo magnético ascendente, que atraiu partículas magnéticas. Foi esse acúmulo de partículas que deu forma as indicações das descontinuidades.

Ao inspecionar toda a área, as zonas de solda se sobrepuseram em um padrão cruzado ou xis (Figura 47), sendo que cada área foi verificada duas vezes, a procura de descontinuidades perpendiculares ao sentido do fluxo aplicado.

Figura 47 – Esquema de sobreposição, em forma cruzada ou xis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Nesta etapa foram analisadas os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração, líquido penetrante e partícula magnética. A comparação dos resultados obtidos neste trabalho, com os resultados obtidos por Coroa (2023), será feita na seção de conclusão.

4.1. Resultados dos Ensaio Mecânicos de Tração

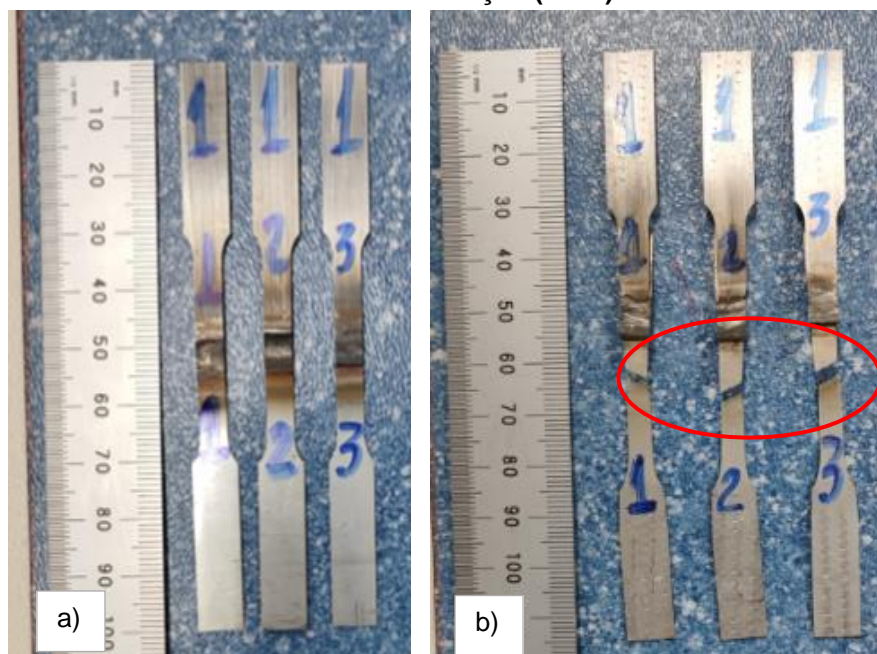
Como citado anteriormente, existem diferenças entre as amostras utilizadas por Coroa (2023) e as amostras deste estudo. Espessura da chapa e o fato de a soldagem ser autógena. Neste trabalho, o corpo do reservatório possui espessura de 0,5 mm e o tampo do reservatório 0,8 mm.

As amostras de Cordão de Solda juntam tampo e corpo sem adição de material no mesmo corpo de prova, de um lado da união da chapa soldada possui 0,8 mm correspondente ao corpo do reservatório e do outro lado da amostra, a chapa possui 0,8 mm de espessura que corresponde tampo do reservatório. Para o cálculo da área, foi adotada a espessura 0,5 mm e largura 6 mm, ou seja, 3,0 mm² com intuito de padronizar as medidas das amostras.

A Figura 48, mostra os corpos de prova CP1_CT_A1, CP2_CT_A1 e CP3_CT_A1, antes (a) e depois (b) do ensaio mecânico de tração, com as

respectivas rupturas. Isto indica que a ruptura foi no corpo, com 0,5 mm, comprovando, que a solda possui maior resistência mecânica à tração.

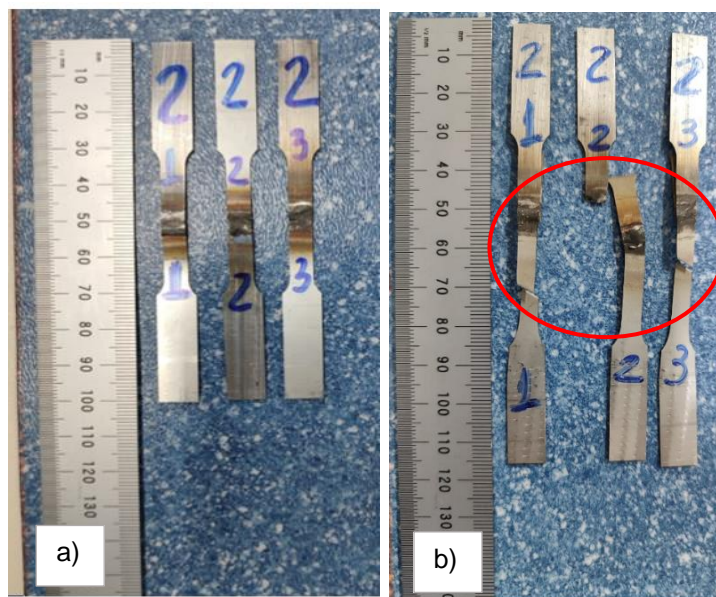
Figura 48 - Corpos de prova CP1_CT_A1, CP2_CT_A1 e CP3_CT_A1 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 49, observam-se os corpos de prova CP1_CT_A2, CP2_CT_A2 e CP3_CT_A2, antes (a) e depois (b) do ensaio mecânico de tração, com as respectivas rupturas. Os corpos de prova CP1_CT_A2 e CP3_CT_A2 apresentaram ruptura do material de corpo de menor espessura. Porém, o corpo de prova CP2_CT_A2, apresentou ruptura na solda, demonstrando ser uma região de união fraca, conseqüentemente não rompeu até o limite de alongamento estabelecido no equipamento de teste.

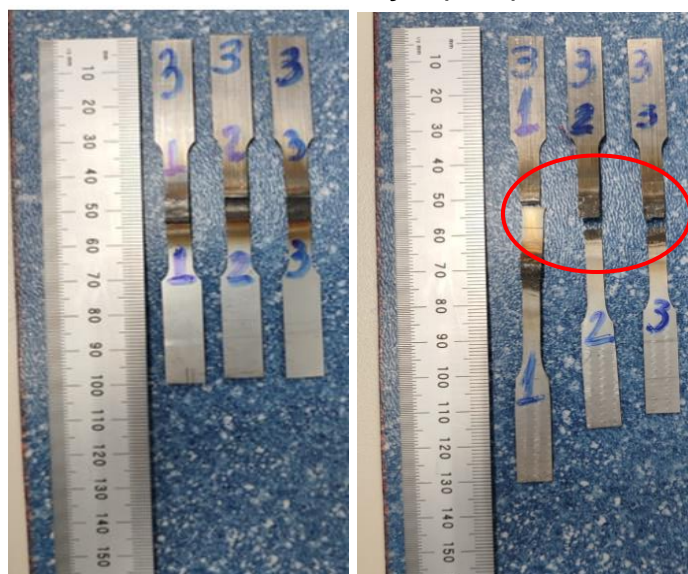
Figura 49 - Corpos de prova CP1_CT_A2, CP2_CT_A2 e CP3_CT_A2 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os corpos de prova CP1_CT_A3, CP2_CT_A3 e CP3_CT_A3, apresentaram rupturas em material de espessura de 0,5 mm e no cordão de solda. O corpo de prova CP1_CT_A2 apresentou ruptura no material de espessura de 0,8 mm. Porém, os corpos de prova CP2_CT_A2 e CP3_CT_A2, apresentaram ruptura na solda, demonstrando ser uma região de união fraca (Figura 50).

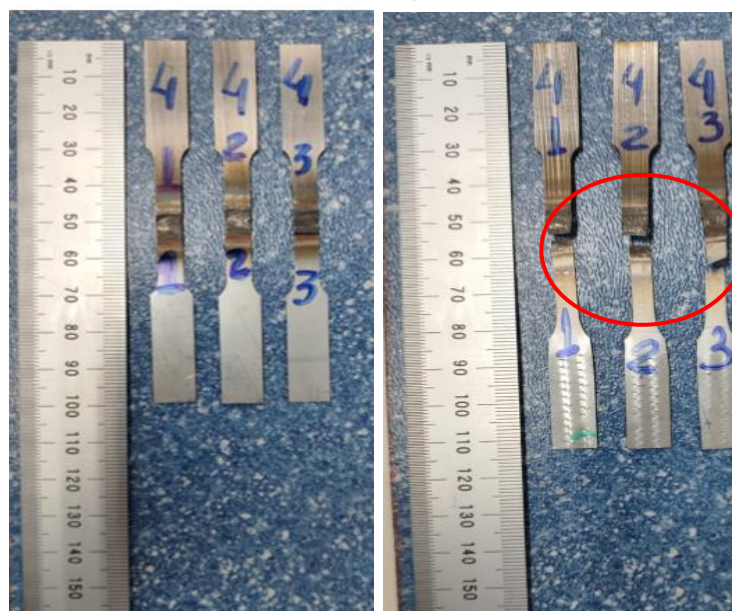
Figura 50 - Corpos de prova CP1_CT_A3, CP2_CT_A3 e CP3_CT_A3 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma similar à amostra 3 na Figura 51. Os corpos de prova CP1_CT_A4 e CP2_CT_A4 apresentaram ruptura no cordão de solda, também mostrando, intuitivamente, que a união é menos resistente do que o próprio material. O corpo de prova CP3_CT_A4 apresentou ruptura no material de espessura de 0,5 mm.

Figura 51 - Corpos de prova CP1_CT_A4, CP2_CT_A4 e CP3_CT_A4 antes (em a) e depois do ensaio de tração (em b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir serão apresentados, na Tabela 9, os principais dados adquiridos nos ensaios mecânicos de tração: força aplicada na tração (F_y) em [N]. Força Máxima (F_u), em [N]. Deformação linear (d_L), em [mm]. Limite de escoamento (LE), em [MPa]. Limite de resistência a tração (LRT), em [MPa]. Alongamento (Al), em [%]. Adicionalmente são incluídas informações dimensionais, como: espessura da chapa (t_0), em [mm]. Foi adotada espessura do corpo de prova de 0,5 mm, apesar do corpo de prova ser composto pelas espessuras de 0,5 mm e 0,8 mm. Trata-se de abordagem simplificadora pois a norma de ensaios de tração (ASTM 276) não aborda espessuras diferentes para o mesmo corpo de prova em ensaio de tração. Largura (w_0) e Comprimento total (L_0), ambos em [mm]. As linhas na coloração cinza, na tabela 8, sinalizam as amostras que romperam no cordão de solda.

Tabela 8 – Parâmetros dos gráficos nos ensaios mecânicos de tração das amostras.

CORDÃO DE SOLDA AUTOMATIZADA_SEM ADIÇÃO DE MATERIAL										
Amostra 01	t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)	
CP1_CT_A1	0,5	6,0	36,0	2405,0	2754,0	10,5	501,0	573,8	29,3	
CP2_CT_A1	0,5	6,0	36,0	2404,0	2574,0	14,3	500,7	536,2	39,6	
CP3_CT_A1	0,5	6,0	36,0	1236,8	2786,4	14,6	257,7	580,5	40,5	
							Média	419,8	563,5	36,5
							Desvio padrão	140,4	23,9	6,2
CORDÃO DE SOLDA AUTOMATIZADA_SEM ADIÇÃO DE MATERIAL										
Amostra 02	t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)	
CP1_CT_A2	0,5	6,0	36,0	0,0	2542,0	12,2	0,0	0,0	33,8	
CP2_CT_A2	0,5	6,0	36,0	0,0	1932,0	18,1	0,0	0,0	50,2	
CP3_CT_A2	0,5	6,0	36,0	1459,2	2531,0	13,1	304,0	527,3	36,4	
							Média	101,3	175,8	40,1
							Desvio padrão	175,5	304,4	8,8
CORDÃO DE SOLDA AUTOMATIZADA_SEM ADIÇÃO DE MATERIAL										
Amostra 03	t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)	
CP1_CT_A3	0,5	6,0	36,0	2267,6	2825,9	1,3	472,4	588,7	3,7	
CP2_CT_A3	0,5	6,0	36,0	1557,9	2500,5	11,2	324,6	520,9	31,1	
CP3_CT_A3	0,5	6,0	36,0	1476,9	2526,2	12,6	307,7	526,3	35,0	
							Média	368,2	545,3	23,3
							Desvio padrão	90,6	37,7	17,1
CORDÃO DE SOLDA AUTOMATIZADA_SEM ADIÇÃO DE MATERIAL										
Amostra 04	t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)	
CP1_CT_A4	0,5	6,0	36,0	1606,4	2408,3	9,4	334,7	501,7	26,1	
CP2_CT_A4	0,5	6,0	36,0	1397,7	2543,9	12,2	291,2	530,0	33,8	
CP3_CT_A4	0,5	6,0	36,0	2275,8	2764,3	1,6	474,1	576,0	4,3	
							Média	367	536	21,4
							Desvio padrão	95,5	37,5	15,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 9, pode-se observar os seguintes resultados do ensaio mecânico de tração:

1) Amostra 01 - A resistência à tração do ensaio apresentou os seguintes valores médios: a) limite de escoamento (LE) de 419,8 MPa; b) limite de resistência (LRT) de 563,5 MPa; c) alongamento (%AL) de 36,5%.

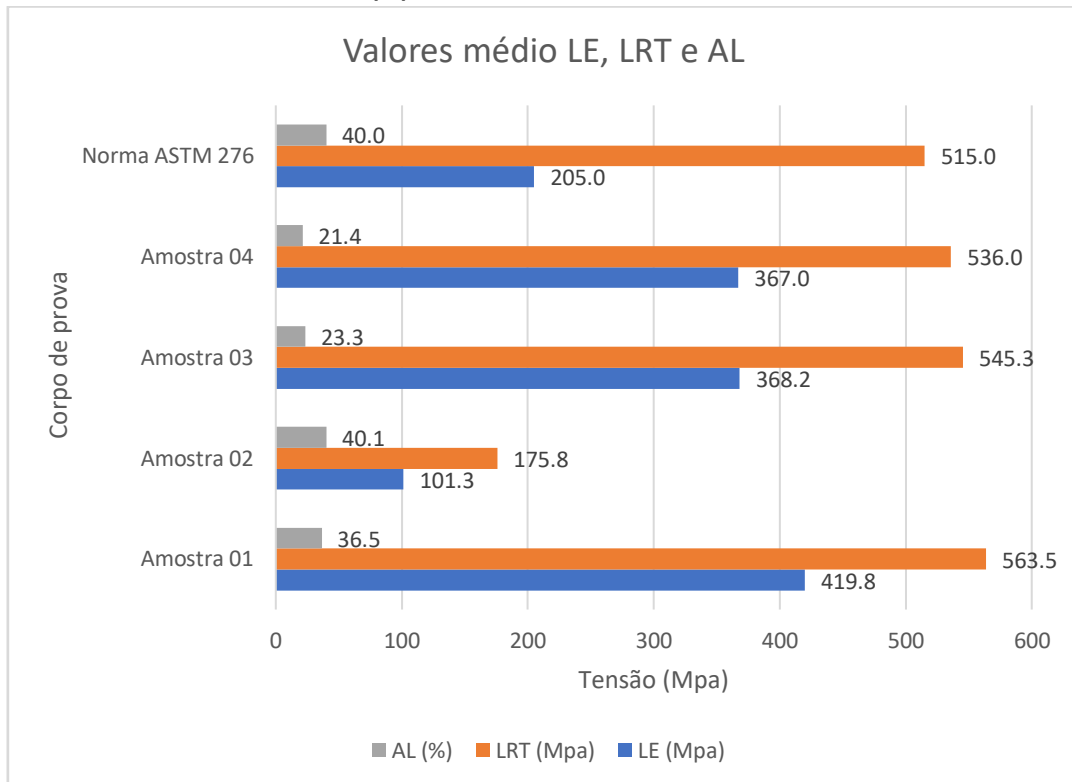
2) Amostra 02 - A resistência à tração do ensaio apresentou os seguintes valores médios: a) limite de escoamento (LE) de 175,5 MPa; b) limite de resistência (LRT) de 304,4 MPa; c) alongamento (%AL) de 8,8%. Os resultados obtidos na amostra dois foram insatisfatórios, devido ao corpo de prova 01 e 02 romperem na solda. Os valores do limite de escoamento, limite de resistência e força em ambos, foram 0,0.

3) Amostra 03 - A resistência à tração do ensaio apresentou os seguintes valores médios: a) limite de escoamento (LE) de 368,2 MPa; b) limite de resistência (LRT) de 545,3 MPa; c) alongamento (%AL) de 23,3%. Apesar dos valores apresentados da amostra 03 estarem na média em relação as outras amostras, vale destacar que o CP01_CT_03 apresentou valores distintos em relação aos corpos de prova 02 e 03, devido ao rompimento precoce na junta da solda.

4) Amostra 04 - A resistência à tração do ensaio apresentou os seguintes valores médios: a) limite de escoamento (LE) de 367 MPa; b) limite de resistência (LRT) de 536 MPa; c) alongamento (%AL) de 21,4%. Apesar dos valores apresentados da amostra 04 estarem na média em relação as outras amostras, vale destacar que o CP03_CT_04 apresentou valores distintos em relação aos corpos de prova 01 e 02, devido ao rompimento precoce na junta da solda.

A Figura 52 mostra o gráfico com os valores médios obtidos nos ensaios mecânicos de tração sobre LE, LRT e AL (%) das amostras 01, 02, 03 e 04, seus corpos de prova. Cordão de Solda Automatizado sem adição de material com relação a norma ASTM 276.

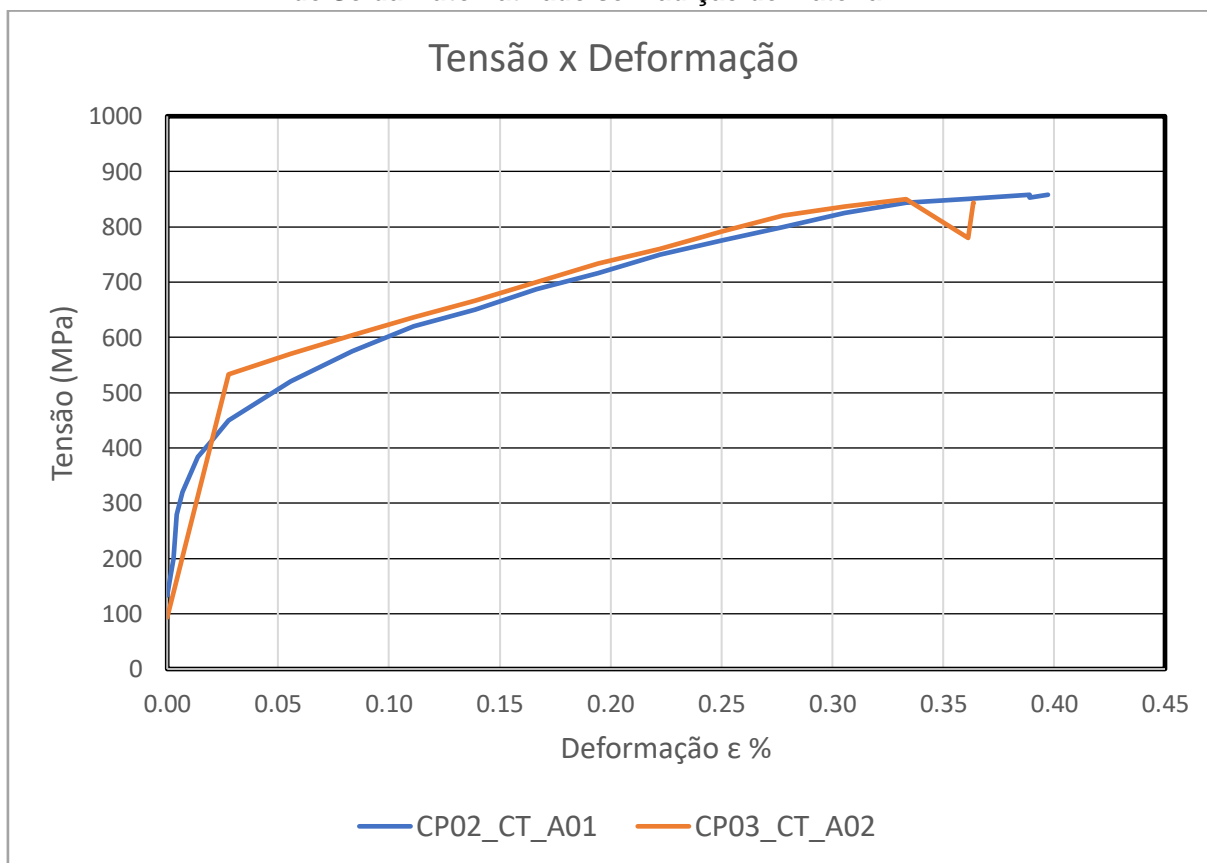
Figura 52 - Dados dos ensaios mecânicos de tração - Gráfico – Valores Médios de LE, LRT e AL (%) das amostras 01, 02, 03 e 04.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 53 mostra o gráfico das curvas de Tensão versus Deformação dos corpos de prova CP2_amostra 1 e CP3_amostra 2, pois são as curvas onde houve ruptura dentro dos padrões apontados pelos trabalhos de Coroa (2023).

Figura 53 - Curva dos ensaios mecânicos de tração de CP2_CT_A1 e CP3_CT_A2 - Cordão de Solda Automatizado sem adição de material.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As amostras 3 e 4 não foram consideradas devido a ruptura na solda e comportamento irregular no alongamento.

4.1.1. Resultados e Discussão do Ensaio de LP

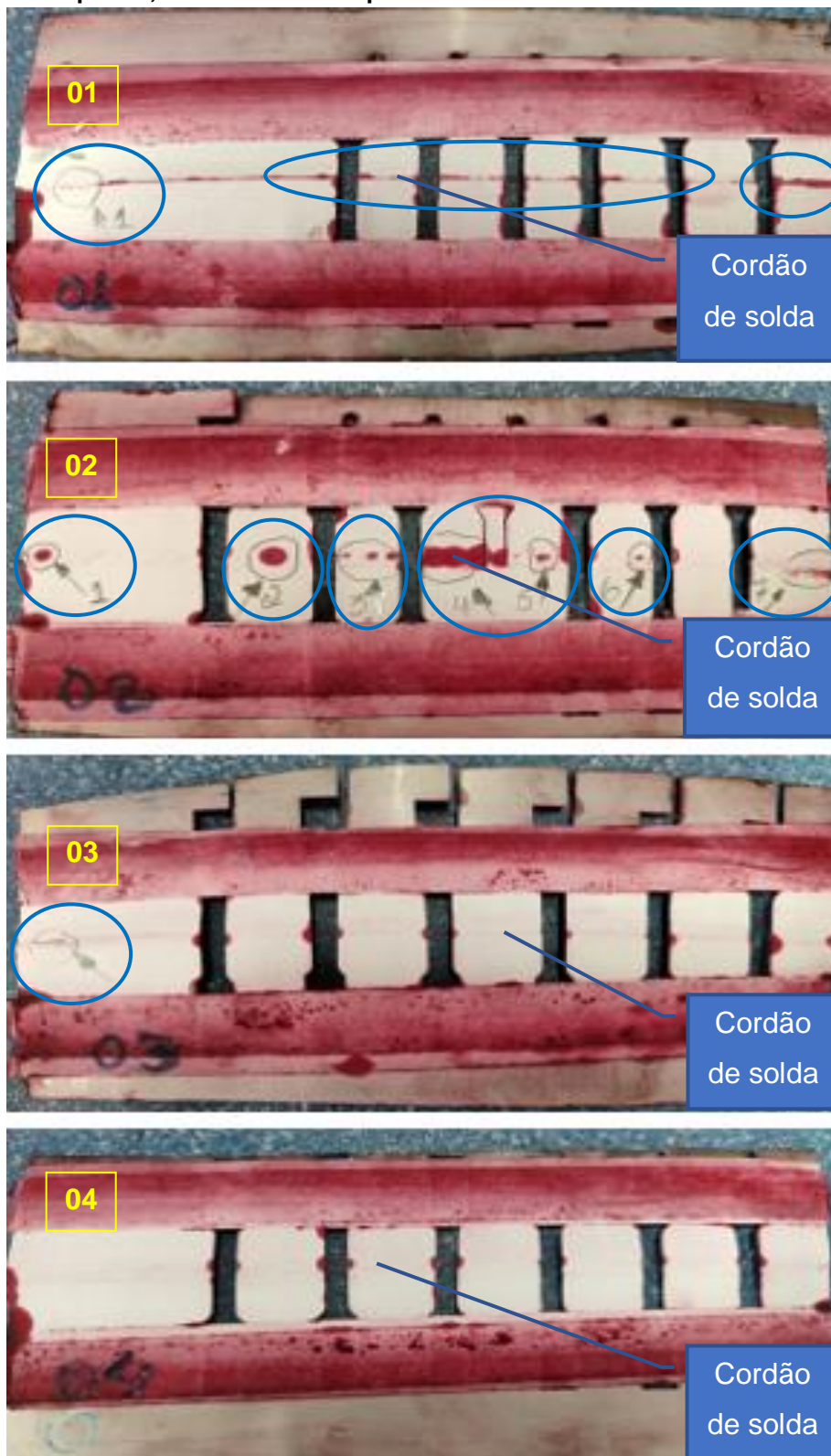
Todas as amostras apresentaram indicações que sugerem a presença de descontinuidades.

O critério de avaliação foi conforme a norma ASME seção VIII divisão 1 apêndice 8, para soldas de vaso de pressão e tanques de armazenamento, demonstrados no ANEXO A, inserido ao final deste trabalho.

a) Corpo de prova junta tampo e corpo sem adição de material (Figura 54):

- Amostra T1.1 apresentou vários pontos de descontinuidade ao longo do cordão (porosidade) e uma trinca na extremidade direita;
- Amostra T1.2 apresentou seis pontos de descontinuidade (porosidade) e uma trinca na extremidade direita;
- Amostra T1.3 apresentou somente uma trinca na extremidade esquerda;
- Amostra T1.4 não apresentou nenhuma descontinuidade.

Figura 54 - Corpo de prova junta tampo e corpo sem adição de material - LP. Amostra 01 com vários pontos de descontinuidade ao longo do cordão (porosidade) trinca na extremidade direita, Amostra 02 com seis pontos de descontinuidade (porosidade) e uma trinca na extremidade direita, Amostra 03 apresentou somente uma trinca na extremidade esquerda, Amostra 04 não apresentou nenhuma descontinuidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o término dos registros dos resultados a peça foi limpa utilizando um pano umedecido com solvente.

4.1.2. Resultados dos Ensaios de Partículas Magnéticas

As amostras um e dois apresentaram indicações que sugerem a presença de descontinuidades, a amostra três apresentou pequenos pontos de descontinuidade e a amostra quatro não apresentou nenhuma descontinuidade.

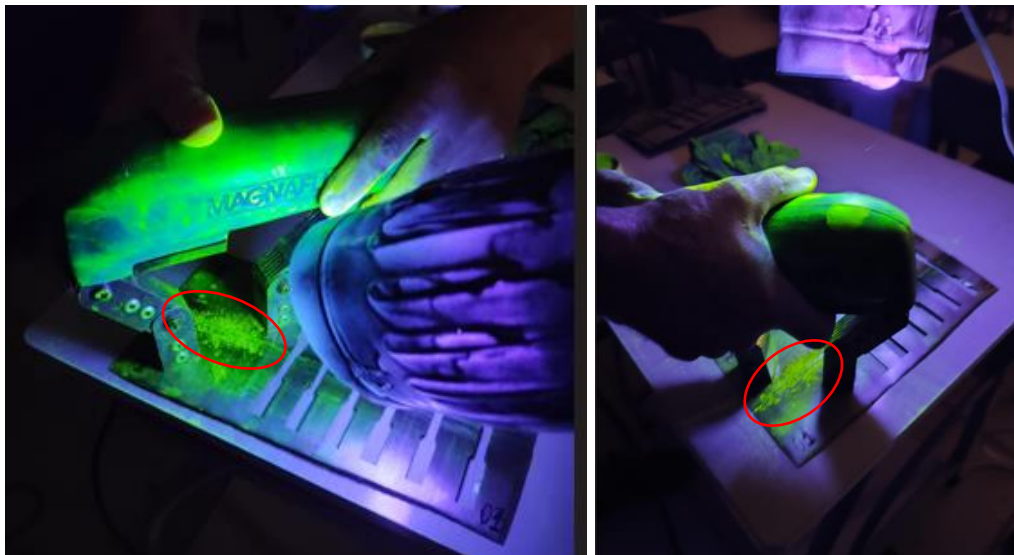
Os critérios de aceitação para os análises dos ensaios de partículas magnéticas que atendem os requisitos necessários conforme ASME Sec. VIII Div. 1 e 2, constam no anexo B.

Foi utilizado o método fluorescente úmido, usado com o Yoke e com a luminária de luz UV. Pode-se encontrar falhas bem finas superficiais e/ou ligeiramente subsuperficiais. Todas as descontinuidades superficiais criaram campos de fuga de fluxo magnético que atraíram as partículas magnéticas dando forma às indicações.

a) Corpo de prova junta tampo e corpo sem adição de material (Figura 54)

- Amostra T1.1 apresentou mordeduras na margem do cordão de solda;
- Amostra T1.2 apresentou mordeduras ao longo do cordão;
- Amostra T1.3 apresentou pequenas mordeduras ao longo do cordão;
- Amostra T1.4 não apresentou nenhuma descontinuidade.

Figura 55 - Corpo de prova junta tampo e corpo – PM. Amostra 01 apresentou mordeduras na margem do cordão de solda, Amostra 02 apresentou mordeduras ao longo do cordão, Amostra 03 apresentou pequenas mordeduras ao longo do cordão e Amostra 04 não apresentou nenhuma descontinuidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

CONCLUSÕES

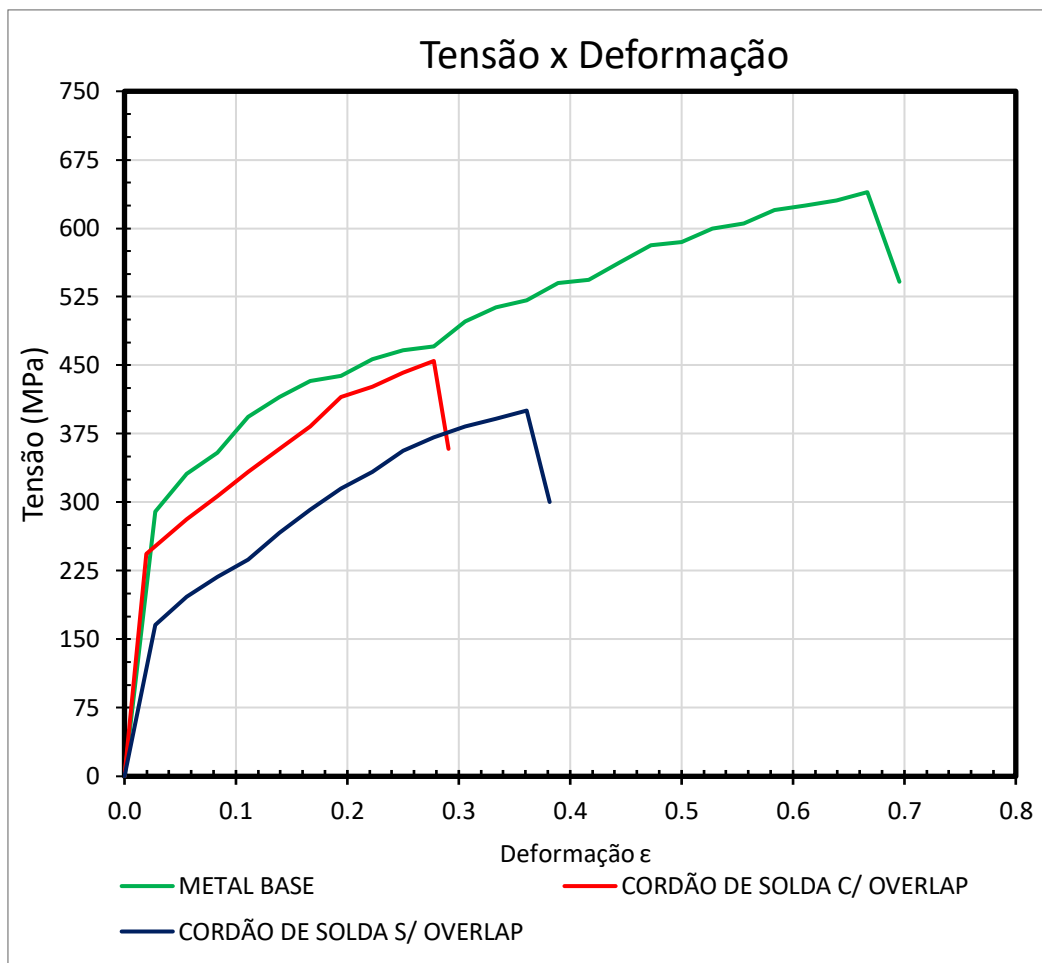
Este projeto de pesquisa teve como objetivo o estudo comparativo entre o processo de soldagem manual e automático para reservatórios de aço inoxidável de chapas de pequena espessura, na aplicação de sistemas de aquecedores solar.

Entende-se que o objetivo foi alcançado, tomando como referência, os ensaios e os resultados obtidos por (Coroa, 2023).

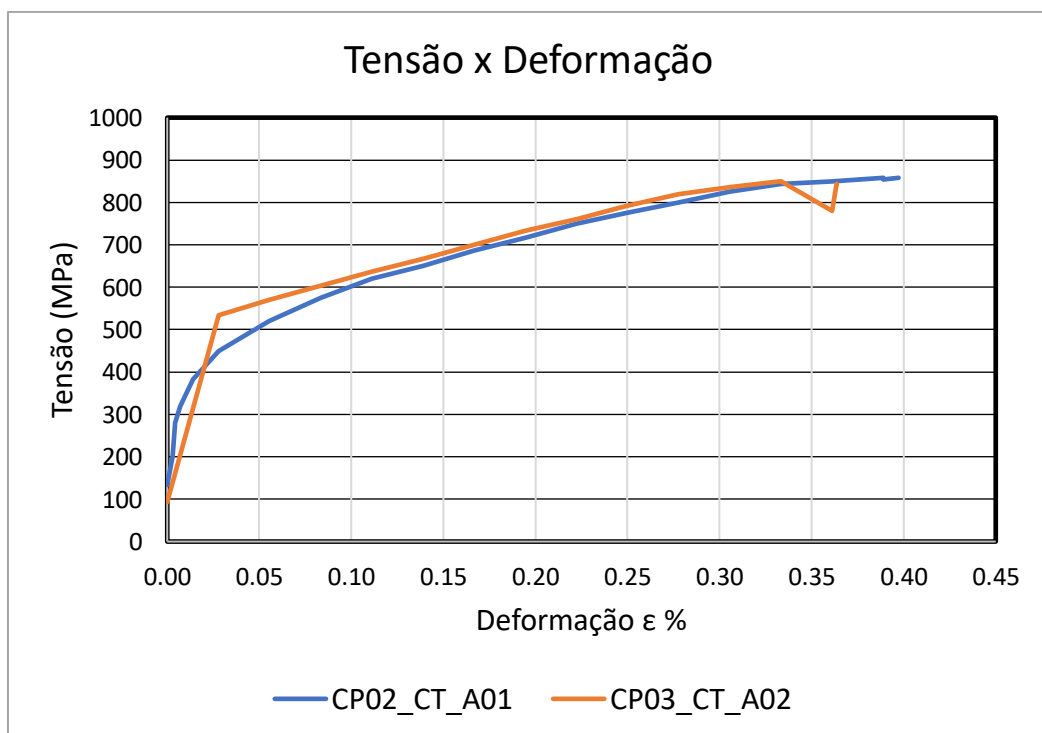
A melhor comparação acontece em 3 frentes: os resultados dos ensaios mecânicos de tração, de líquido penetrante e partícula magnética.

Sobre os resultados dos ensaios mecânicos de tração, as amostras provenientes da solda automatizada tiveram, em maior parte, resultados moderados, pois de 12 corpos de prova ensaiados, 7 romperam no material e não na solda.

Os gráficos de tensão *versus* alongamento, do processo manual Coroa (2023) e do processo automatizado, indicam as curvas e dados dos valores médios. Optou-se em plotar apenas as curvas intermediárias para efeito de comparação entre os resultados.



Fonte: Coroa (2023)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A curva do material de base apresentado por Coroa (2023) indica que o material do reservatório tem Limite de Resistência a tração em torno de 600 a 675 MPa, com deformação entre 0,6 e 0,7. No caso dos resultados da solda automatizada, o Limite de Resistência a tração está entre 800 a 900 MPa e deformação entre 0,3 e 0,4. Sabendo que o material é o mesmo (AISI 304), conclui-se que pode ter ocorrido um tratamento térmico que gerasse essas diferenças nas propriedades mecânicas do material em estudo. Uma das hipóteses gira em torno do fato da espessura das chapas serem significativamente menores na solda automatizada nos trabalhos de Coroa (2023), tanto tinha espessura de 1,5 mm e corpo de 1,0 mm, ao passo que na solda automatizada, tanto tinha 0,8 mm e corpo 0,5 mm, indicando um alcance de condução maior. Ou seja, a Zona Termicamente Afetada (ZTA) deve ter maior extensão quando comparado aos trabalhos de Coroa (2023). Neste ponto fica evidente que um ensaio metalográfico se faz necessário para obter maiores conclusões.

Por outro lado, os resultados insatisfatórios (ruptura na solda) apontam que:

- Melhorias precisam ser feitas no processo automatizados, tanto na parametrização de amperagem, quando velocidade de rotação do reservatório e o uso de material de adição;
- Melhorias no funcional do equipamento automatizado, onde a leitura do batimento pelo sensor ótico precisa ser mais bem estudada, além, de uma interpolação de melhor resolução (leitura do sensor e compensação da posição da tocha em X, em menos de um grau);

No caso dos ensaios de Líquido Penetrante indicam que tanto a solda manual quanto a solda automatizada possuem descontinuidades, o que pode ser um indicativo de melhorias a serem aplicadas no processo de preparação das chapas, reduzindo os espaçamentos entre chapas.

Por fim, o ensaio de Partícula Magnética, assim como de Líquido Penetrante, apresentam situações de descontinuidades, implicando em melhorias de parametrização e processo de preparação de chapas.

Ainda sobre os objetivos. No caso dos objetivos específicos, acredita-se que este trabalho consolidou um método de estudo e validação de cordões de solda TIG fabricados em diferentes processos (manual/automatizado). Apesar do

processo manual apresentar solda com alguns defeitos de descontinuidades e porosidade, os reservatórios são aprovados pelo teste de estanqueidade. Dessa forma, pode-se afirmar que esses novos ensaios podem ser incorporados às práticas da empresa, como forma de balizar estudos de redução de custo e produtividade.

A princípio, o cordão gerado pelo equipamento automatizado possui diferenças visuais principalmente devido aos parâmetros de soldagem, como amperagem e a não adição de material. Dessa forma, um estudo sobre aparências dos cordões ficou em segundo plano, haja vista que melhorias são necessárias para aumentar a resistência mecânica da solda e com potencial de alteração de aparência.

O projeto e a construção de uma máquina automatizada de solda TIG orbital, teve vários elementos motivadores. Tradicionalmente, a automatização de um processo visa aumento de produtividade. Neste caso, a velocidade estabelecida teve um aumento de 25% comparativamente à velocidade do processo manual. Evidentemente que isso implica em fatores de qualidade de execução da solda, como penetração, reforçando ainda mais a conclusão de que o processo de soldagem automatizado é viável, porém necessita de aprimoramentos.

Por fim, como último objetivo secundário, este estudo estabeleceu um caminho quantitativo para a substituição do processo manual pelo automatizado aplicado na união de tampo e corpo de reservatórios de água com baixa espessura. A empresa que opta pela automatização necessita de um período de adaptação ao processo automatizado, especialmente na padronização das peças e das suas etapas, buscando melhorias em corte, dobra e conformação.

Vale salientar que o processo de conformação que ocorre na etapa de preparação do tampo do reservatório, pode ter provocado alongamento de grãos no material de espessura 0,8 mm, criando áreas com maior propensão a falhas sob carga. Alterações como a formação de grãos alongados ou a presença de segregações podem resultar em uma menor resistência mecânica, provocando o rompimento na espessura de 0,8 mm do CP1_CT_A3.

REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, R. **Ensaio por partículas magnéticas**, Ed. 2ª. Disponível em: <http://www.aendur.ancap.com.uy/boletin/ensaioporporparticulasmagneticas.pdf>
Acessado em: 23 abril 2023.

ARCELORMITTAL. **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. 2008. Elaborado por: Eng. Héctor Mario Carbó. Disponível em: <http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>. Acesso em: 22 fev de 2024.

BAO, Wen; LIU, Hongbing; WANG, Fei; DU, Jinhong; WANG, Yuhua; LI, Huan; YE, Xinjian. **Keyhole critical failure criteria and variation rule under different thicknesses and multiple materials in K-TIG welding**. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirectcom.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1526612524007497?via%3Dihub>. Acesso em: 28 set. 2024.

BIRDEANU, Aurel Valentin. **Soldagem pulsada LASER-(Micro)TIG de chapas finas de aços de alta resistência avançados revestidos com Zn dissimilar automotivo em configuração sobreposta**. Advanced Materials Research, vol. 1138, Trans Tech Publications, Ltd., julho de 2016, pp. 147–152. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1138.147.

BORGES, T. L. **Estudo do uso de atmosfera de proteção interna em tubos de aço inoxidável AISI 304L no processo de soldagem TIG**. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica – Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2019.

BRACARENSE, Alexandre Q., **Processo de Soldagem TIG – GTAW**. Belo Horizonte, MG. UFMG, 2000.

BROERING, C. E. **Desenvolvimento de Sistemas para a Automação da Soldagem e do Corte Térmico**. Fev. 2005. 96p. Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2005.

CALLISTER, W.J. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Uma Introdução. 7ed. Rio de Janeiro. LTC, 2008.672 p.

CALLISTER, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). **Materials Science and Engineering: An Introduction** (10th ed.). John Wiley & Sons.

CARNEVAL, R. O. et al. **Uso das Técnicas de END: Ultra-som (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga.** IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Out. 2007.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**, 6ª edição. Associação Brasileira de Metais (ABM), São Paulo, 1988.

COROA, Edgar Bergo. **Ensaaios Destrutivos e Não Destrutivos em Cordão de Solda a Gás Inerte com Eletrodo de Tungstênio na Fabricação de Tanques de Aquecedor Solar com Espessura de Chapa Reduzida.** 2024. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, PPGMec, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-Sp, 2023.

CUPPARI, F. M.; NOSE, M. M. **TIPOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E APLICAÇÃO EM CALDEIRAS.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2008.

FELIZARDO, Ivanilza. **Tecnologia da Soldagem.** 2016. Disponível em: <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf>. Acesso em: 28 set. 2024.

FERNANDES, Paulo Eduardo Alves (org.). **Soldagem.** São Paulo: Senai-SP Editora, 2013. 720p.

FIGUEIRÔA, D.W. et al. **Influência da Posição e dos Parâmetros de Soldagem na Soldagem TIG Orbital Aplicada a Tubulações de Aço Baixo Carbono.** p, 446. Recife, PE. UFPE, 2015.

GARCIA, José A. O. et al. **Desenvolvimento da Tecnologia de Soldagem do Titânio pelo Processo TIG Orbital no Segmento Aeroespacial Brasileiro - Parte 2: Caracterização das Juntas Soldadas.** p, 107-108. Campos dos Goytacazes, RJ. UENF, CCT, LAMAV, 2007.

GASKELL, D. R., & LAUGHLIN, D. E. (2018). **Introduction to the Thermodynamics of Materials** (6th ed.). CRC Press.

KUMAR, Hemant; SINGH, N K. **Performance of activated TIG welding in 304 austenitic stainless steel welds.** 2017. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2214785317310945?via%3Dihub>. Acesso em: 28 set. 2024.

LARRY, Jeffus (2002). Welding: **Principles and Applications**. Thomson Delmar

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. 1° Edition. Ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2005.

LIU, Yoing; WANG, Ping; FANG, Hongyuan; MA, Ninshu. **Mitigation of residual stress and deformation induced by TIG welding in thin-walled pipes through external constraint**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421011716?via%3Dihub>. Acesso em: 28 set. 2024.

MADEIRA, P.; MODENESI, P. J. **Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas**. Soldagem Insp., São Paulo, Jan/Mar 2010. 30.

MAGNAFLUX. **Líquido Penetrante**. Disponível em: <https://magnaflux.com.br/produtos/liquidos-penetrantes/consumiveis/skl-wp2/>. Acesso em: 17 mar. 2023.

MARQUES, Paulo Villani, **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**, 2d, Belo Horizonte, 2007.

MATIAZZI, L. P. **Influência da vazão do gás de purga na proteção de soldas em aço inox AISI 304 pelo processo TIG**. Trabalho de conclusão de curso do Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

MODENESI, Paulo J... **A química da formação do cordão de soldagem TIG**. Soldagem & Inspeção, (s.l.), v. 18, n. 3, p.287-300, set. 2013. FapUNIFESP (ScieLO). Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92240130003300011>. Acesso em: 26 maio de 2024.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. **Introdução aos Processos de Soldagem**. 2011

PADILHA, A.F., GUEDES, L.C. **Aços inoxidáveis austeníticos: Microestrutura e propriedades**; Ed. Hemus, São Paulo, 2004

PAES, Luiz E. S. **Soldagem Tig orbital – técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade**. p, 45. Florianópolis, SC. UFSC, 2016.

PAIS FILHO, Estevam Ferreira; FUJYAMA, Roberto Tetsuo. **Análise comparativa em ensaios não destrutivos por líquido penetrante em peças usadas e novas: Influência da execução das etapas de limpeza prévia e remoção do líquido penetrante.** Revista abendi, São Paulo, edição 63, ano VIII, 2014.

PETROBRAS, Norma N-1596H, " **Ensaio Não Destrutivo – Líquido Penetrante**", RJ, Petrobras, set./2013

PIGOZZO; Ivan O.; **Soldagem TIG Orbital: Otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe raiz.** 2015
PINEDO, C. E.; et al. **On the kinetics of plasma nitriding a martensitic stainless steel.** Surface & Coatings Technology, v. 179, p. 119- 123, 2004.

PORTER, D. A., EASTERLING, K. E., & SHERIF, M. Y. (2009). **Phase Transformations in Metals and Alloys** (3rd ed.). CRC Press.

REZENDE, R. P. **Soldagem de juntas tubulares de aço inoxidável austenítico AISI 348 para varetas combustíveis em reatores nucleares.** Dissertação (Mestrado) - Autarquia associada à Universidade de São Paulo, Programa de pós-graduação em Ciências, 2015.

RIBEIRO, Júlio C. B. **Análise de técnicas para a soldagem Tig automatizada.** p. 29. Florianópolis, SC. UFSC, 2012.

RIFFEL, et al., **Keyhole GTAW com alimentação dinâmica de arame aplicada à soldagem orbital de tubos SS 304L,** Soldagem & Inspeção, São Paulo 24 (2019), <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si24.18>. ISSN 1980-6973.

SAMPAIO, M. V. C. **Aplicação de inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de pampo.** (Dissertação de Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTORI, Francisco. et al. **Uma Análise Comparativa entre Diferentes Versões de Variantes Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital.** p, 443. Florianópolis, SC. UFSC, 2017.

SANTOS, A. S. et al. **Avaliação da susceptibilidade à corrosão de um aço inoxidável AISI 316L submetido à simulação térmica com o uso da Gleeble.** Revista Matéria. São Luís, MA. IFMA, 2019.

SERAFINI, F. L. **Microestrutura e propriedades tribológicas de aços austeníticos fe-cr-ni--mo sinterizados com adição de itria e boro.** Dissertação (Mestrado) - - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016.

SILVA GV, SILVA GC. **Virtual prototyping of an automotive manufacturing cyber-physical system based on artificial neural network.** Journal of Production and Automation. 2018;1(2):41-58.

SINGH, Sudhanshu Ranjan; KHANNA, Pradeep. A-TIG (activated flux tungsten inert gas) welding: - A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 808–820, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.712>.

WORMAN, J. Liquid Penetrant Examination. National Board Bulletin, v. 66, p. 6-9, 2011. ISSN 1.ZOLIN, I. **Ensaio Mecânico e Análises de Falhas.** Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

VIDAL, V.C. **Utilização de gás de purga no processo de soldagem TIG em aço inoxidável austenítico ABNT 304.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná - (UTFPR), Curitiba, 2022.

ZOLIN, I. **Ensaio Mecânico e Análises de Falhas.** Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

APENDICE A – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 1 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A1

A500

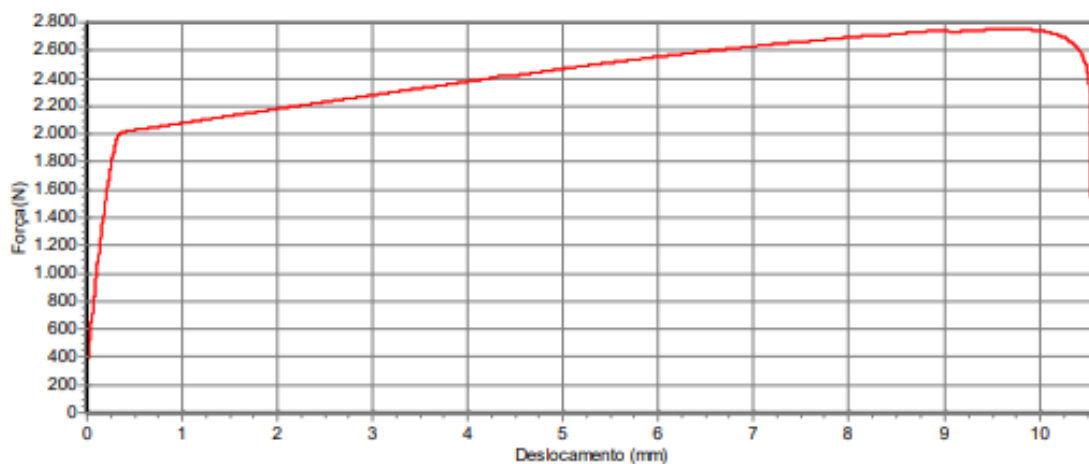
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	LOTE01	Data do lote:	18/05/2024
Nome do método:	CP1_CT_A1	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizados:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Título	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	4,8000	2754	573,8	10,537	29,271	17,355	501,0	2405	2194	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE B – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 2 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A1

A500

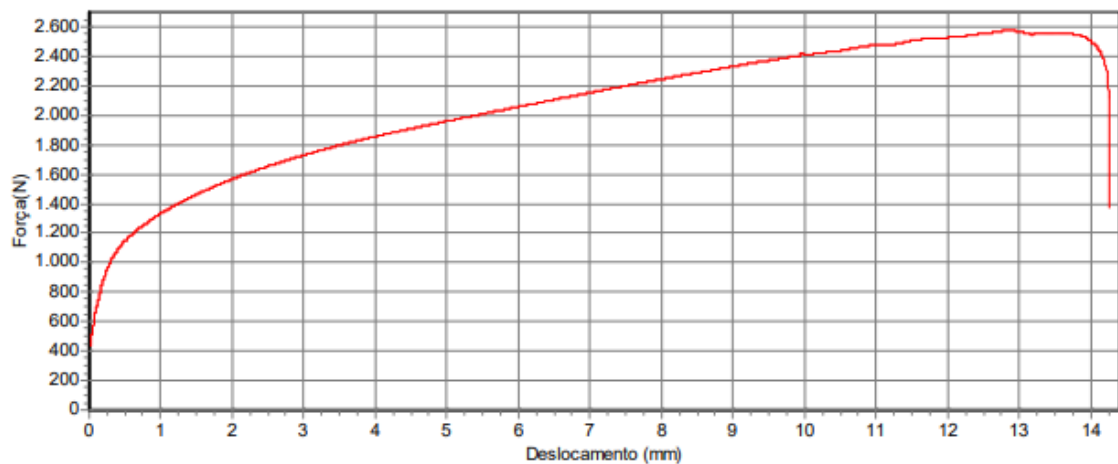
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	LOTE02	Data do lote:	18/05/2024
Nome do método:	CP2_CT_A1	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga:	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizados:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Título	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	■ 4,8000	2574	536,2	14,267	39,630	12,065	500,7	2404	973	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE C – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 3 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A1

A500

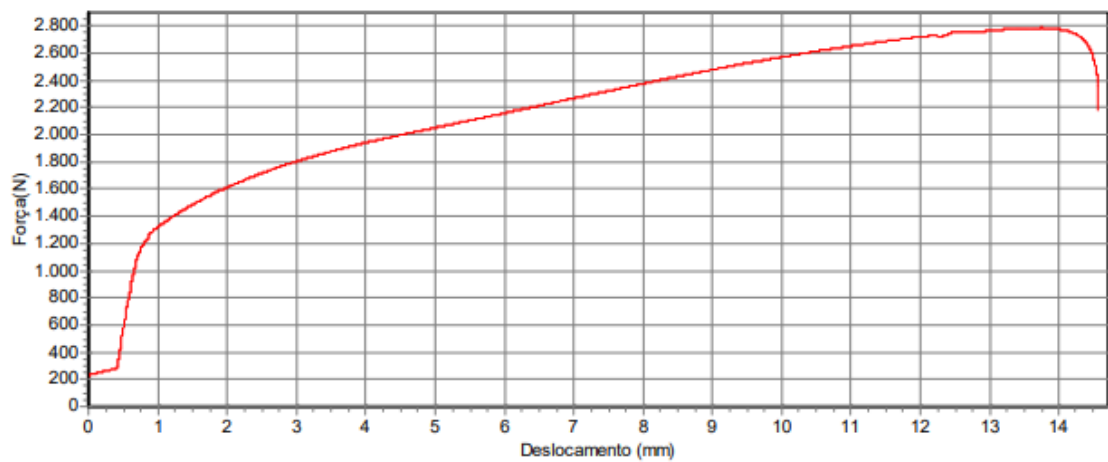
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	A1	Data do lote:	10/06/2024
Nome do método:	CP3_CT_A1	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga:	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizados:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	%	
1	■ 4,8000	2786,4	580,5	14,562	40,449	38,090	257,7	1236,8	15799	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE D – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 4 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A2

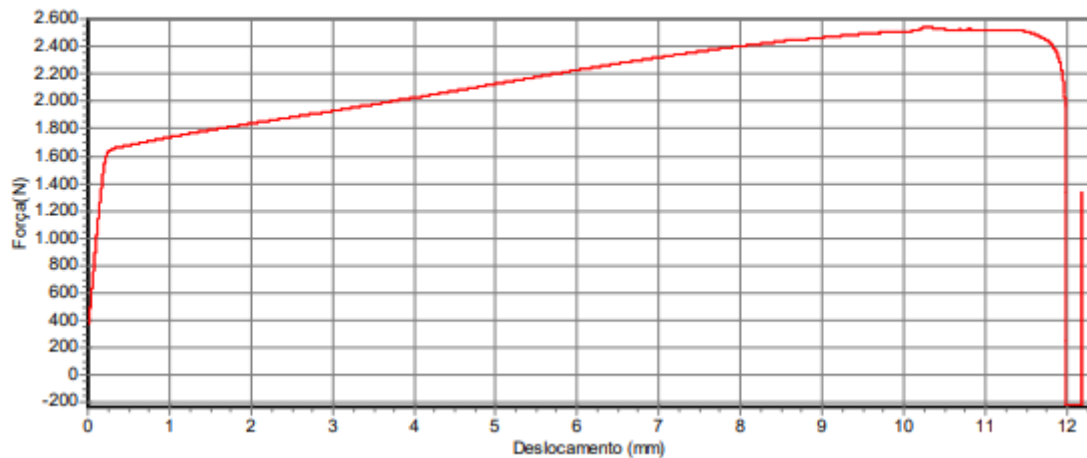
A500

Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote: LOTE01 Data do lote: 21/05/2024
Nome do método: CP01_CT_A2 Tipo do extensômetro: Nenhum
Tipo do equipamento: Versat-100 Célula de carga: 100 KN
Velocidade de ensaio: 0,5 mm/min Sentido do ensaio: Tração
Ensaios realizados: 1
b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	■ 4,8000	2542	0,0	12,181	33,835	0,000	0,0	0	0	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE E – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 5 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A2

A500

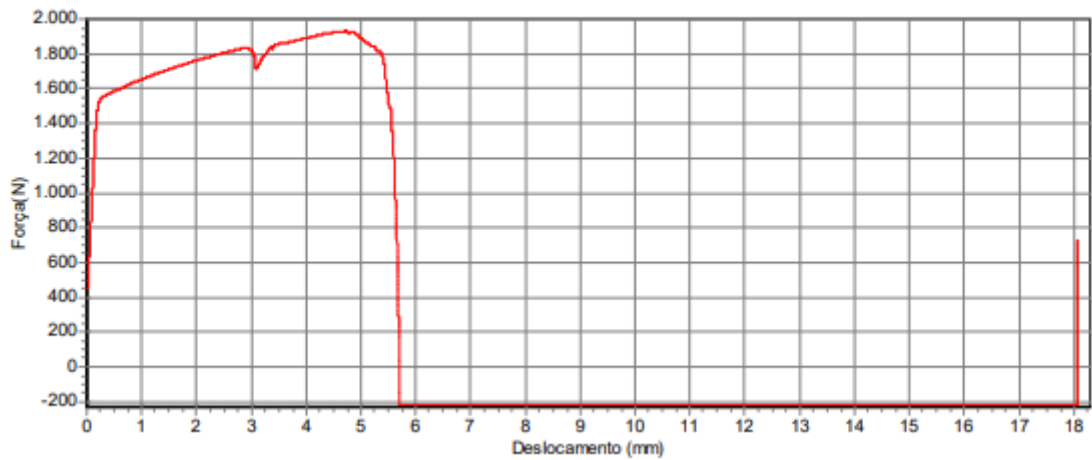
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	LOTE03	Data do lote:	21/05/2024
Nome do método:	CP02_CT_A02	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga:	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizado:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Título	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	4,8000	1932	0,0	18,078	50,217	0,000	0,0	0	0	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE F – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 6 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A2

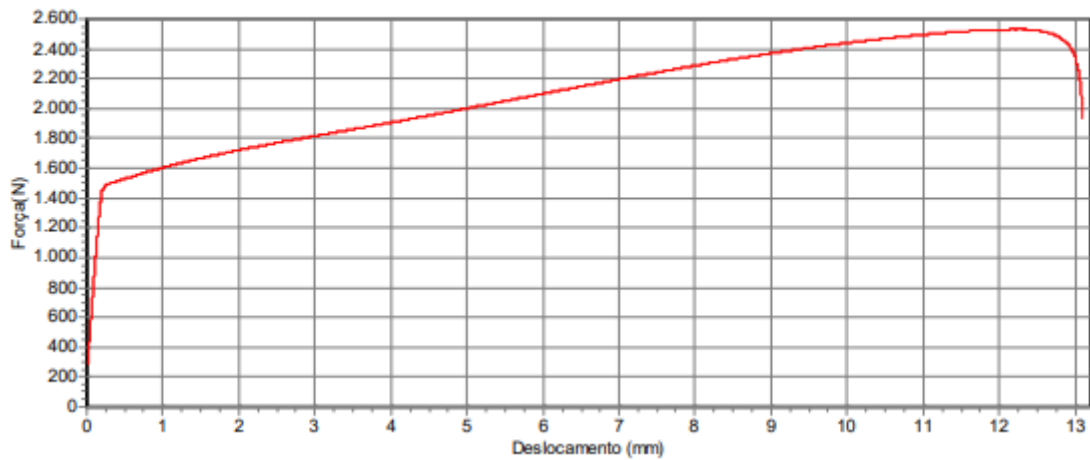
A500

Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote: 11 Data do lote: 10/06/2024
Nome do método: CP3_CT_A2 Tipo do extensômetro: Nenhum
Tipo do equipamento: Versat-100 Célula de carga: 100 KN
Velocidade de ensaio: 0,5 mm/min Sentido do ensaio: Tração
Ensaio realizado: 1
b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	4,8000	2531,0	527,3	13,093	36,369	35,767	304,0	1459,2	51851	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE G – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 7 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A3

A500

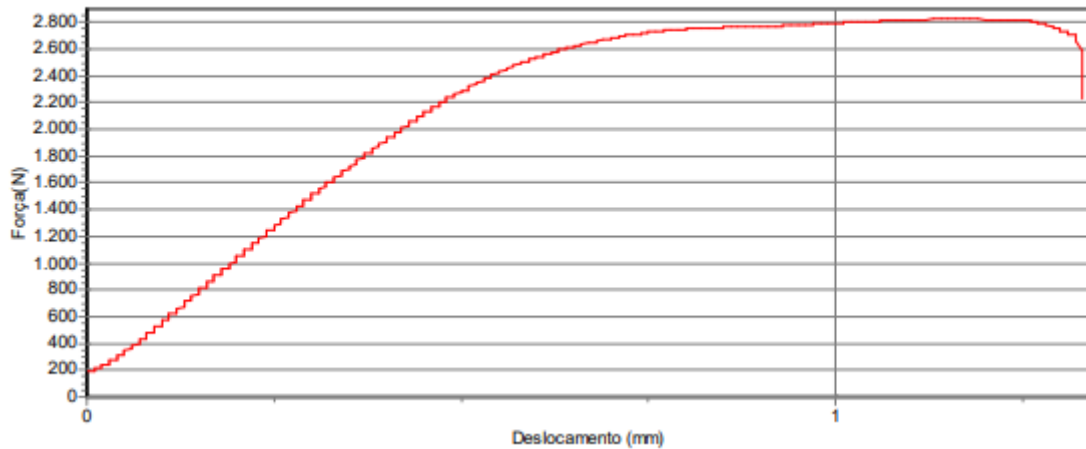
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	12	Data do lote:	10/06/2024
Nome do método:	CP1_CT_A3	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga:	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizado:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	4,8000	2825,9	588,7	1,328	3,688	2,316	472,4	2267,6	36011	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE H – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 8 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A3

A500

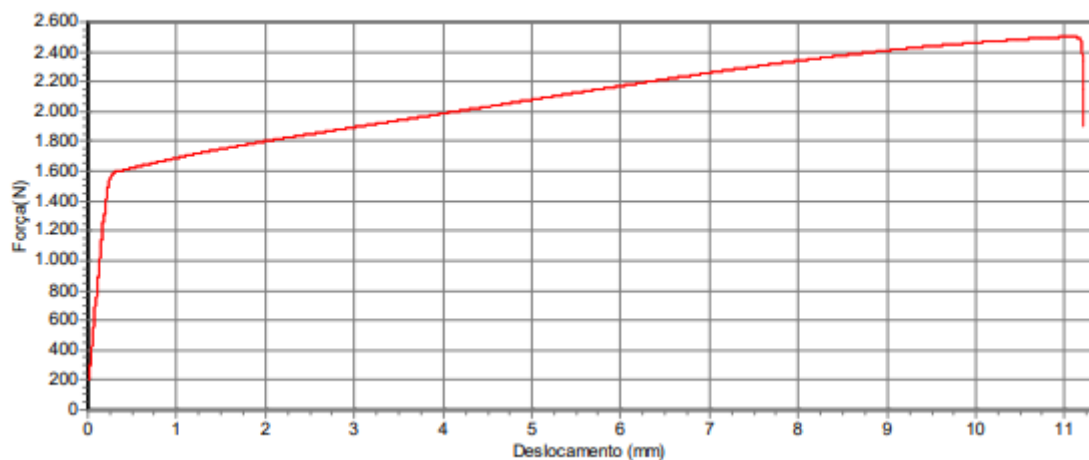
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	12	Data do lote:	11/06/2024
Nome do método:	CP2_CT_03	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga:	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizado:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	%	
1	4,8000	2500,5	520,9	11,210	31,139	30,425	324,6	1557,9	48126	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE I – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 9 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A3

A500

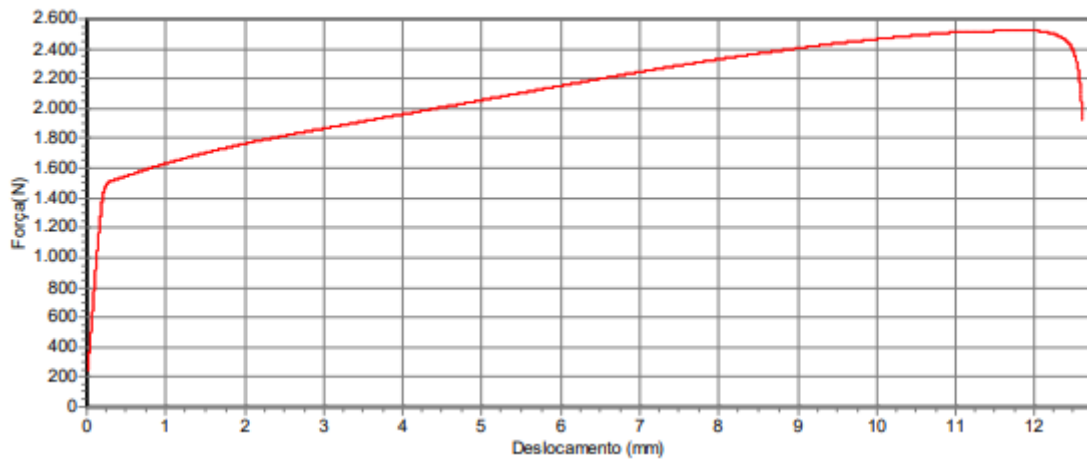
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	13	Data do lote:	11/06/2024
Nome do método:	CP3_CT_03	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizado:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	■ 4,8000	2526,2	526,3	12,596	34,989	34,325	307,7	1476,9	49053	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE J – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 10 – Cordão de Solda sem adição de material CP1_CT_A4

A500

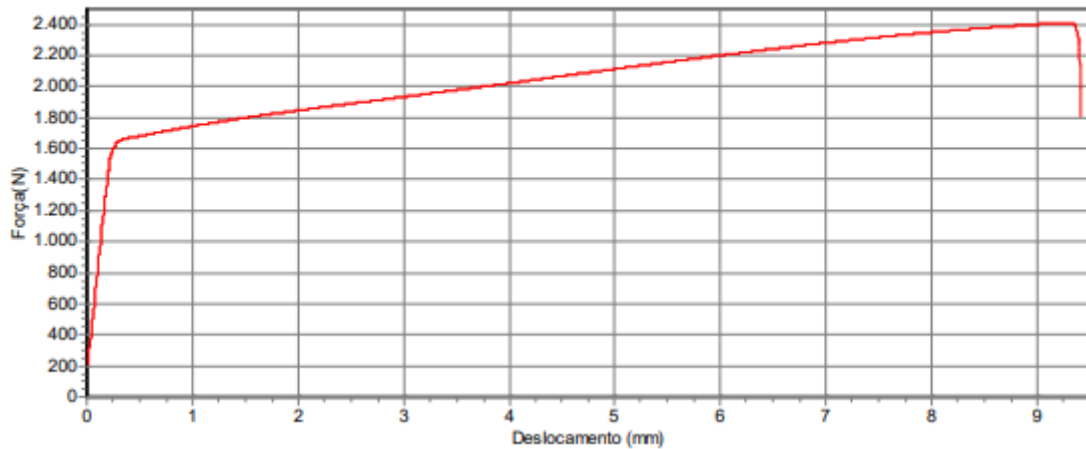
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	14	Data do lote:	11/06/2024
Nome do método:	CP1_CT_A4	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga:	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizado:	1		

b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	■ 4,8000	2408,3	501,7	9,408	26,134	25,424	334,7	1606,4	50164	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE K – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 11 – Cordão de Solda sem adição de material CP2_CT_A4

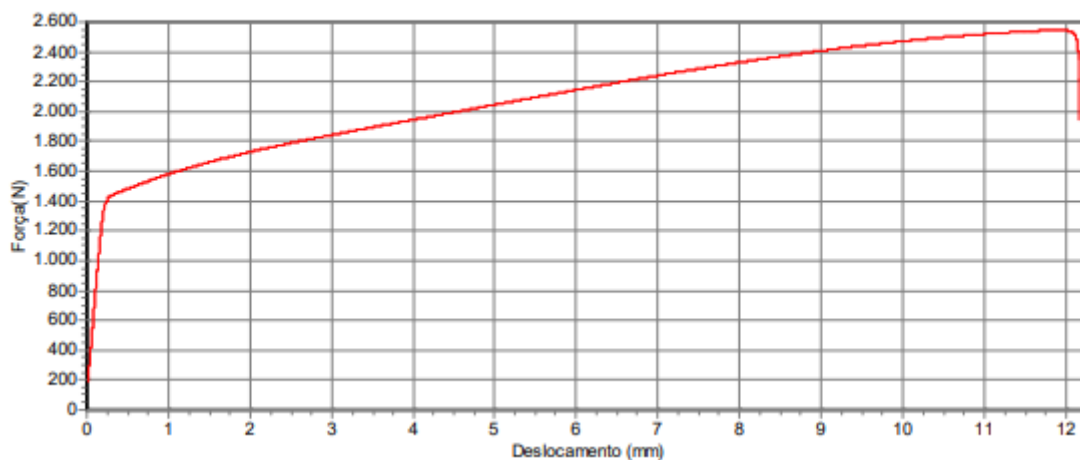
A500

Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote: 15 Data do lote: 11/06/2024
Nome do método: CP2_CT_A4 Tipo do extensômetro: Nenhum
Tipo do equipamento: Versat-100 Célula de carga: 100 KN
Velocidade de ensaio: 0,5 mm/min Sentido do ensaio: Tração
Ensaio realizado: 1
b333

Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	■ 4,8000	2543,9	530,0	12,170	33,804	33,136	291,2	1397,7	45370	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE L – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 12 – Cordão de Solda sem adição de material CP3_CT_A4

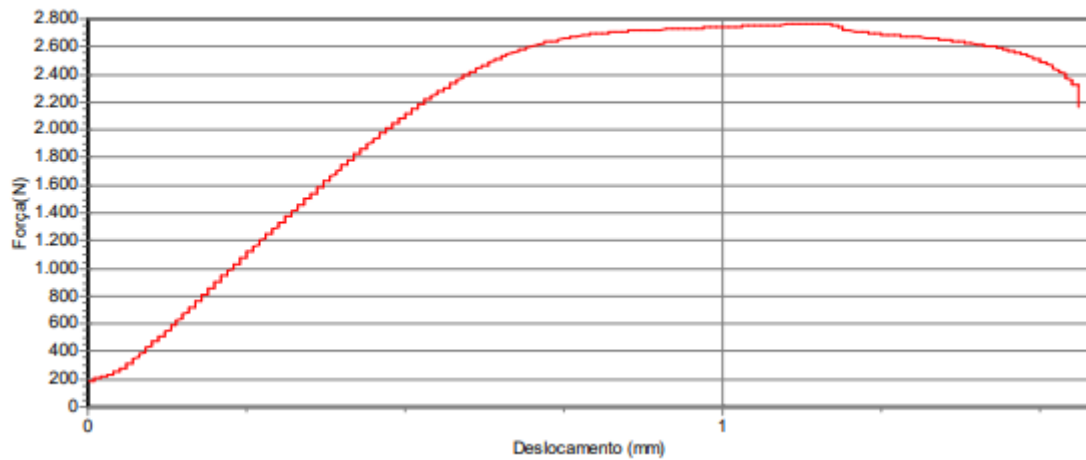
A500 **Relatório de ensaios destrutivos**

Nome do lote:	16	Data do lote:	11/06/2024
Nome do método:	CP3_CT_A4	Tipo do extensômetro:	Nenhum
Tipo do equipamento:	Versat-100	Célula de carga:	100 KN
Velocidade de ensaio:	0,5 mm/min	Sentido do ensaio:	Tração
Ensaio realizado:	1		

b333

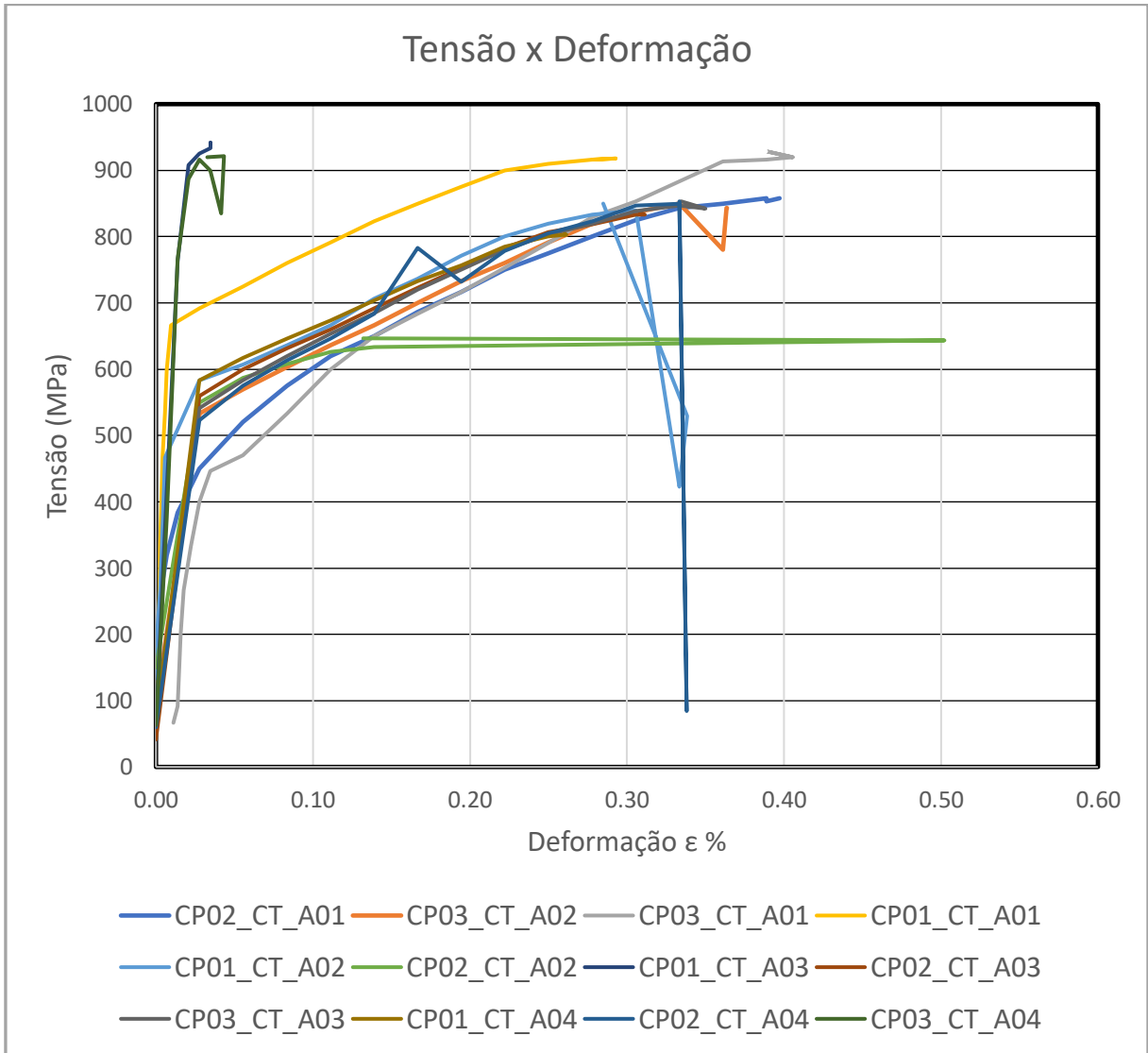
Dados técnicos do lote

Titulo	Área da amostra	Força máxima	Resistência máxima	Deformação linear	Deformação específica	Deformação permanente	Patamar de escoamento	Módulo de elasticidade	Redução da área	
Unidade	mm ²	N	MPa	mm	%	%	MPa	N	MPa	%
1	4,8000	2764,6	576,0	1,558	4,328	2,790	474,1	2275,8	33052	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE M – Gráfico Tensão x Deformação



Fonte: Elaborada pelo autor.

ANEXO A – A título de exemplo, o critério de aceitação que segue abaixo, é uma tradução livre do Código ASME Sec. VIII Div.1

ASME SEC.VIII DIV.1 AP.8 e ASME SEC. I

Avaliação das indicações

Uma indicação é uma evidência de uma imperfeição mecânica. Somente indicações com dimensões maiores que 1/16 pol. (1,5 mm) devem ser consideradas como relevantes.

- a)** Uma indicação linear é aquela tendo um comprimento maior que três vezes a largura.
- b)** Uma indicação arredondada é aquela na forma circular ou elíptica com comprimento igual ou menor que três vezes a largura.
- c)** Qualquer indicação questionável ou duvidosa, deve ser reinspecionada para determinar se indicações relevantes estão ou não presentes.

Critério de Aceitação:

Toda as superfícies devem estar livres de:

- a)** indicações relevantes lineares;
- b)** indicações relevantes arredondadas maiores que 3/16 pol. (5,0 mm);
- c)** quatro ou mais indicações relevantes arredondadas em linha separadas por 1/16 pol. (1,5 mm) ou menos (de borda a borda);
- d)** uma indicação de uma imperfeição pode ser maior que a imperfeição, entretanto, o tamanho da indicação é a base para a avaliação da aceitação.

ANEXO B - Critério de Aceitação conforme ASME Sec. VIII Div.1 e 2

Os requisitos mínimos para um procedimento escrito para aplicação do ensaio por partículas magnéticas seguem as recomendações do ASME Sec. V Art. 7.

- ✓ Técnica de magnetização;
- ✓ Tipo ou amperagem de corrente elétrica para magnetização;
- ✓ Preparação da superfície;
- ✓ Tipo de partículas magnéticas usadas;
- ✓ Método de aplicação das partículas;
- ✓ Método de remoção do excesso de partículas da superfície.
- ✓ Intensidade mínima de iluminação;
- ✓ Espessura de revestimentos, se não removidos;
- ✓ Demonstração do procedimento, se aplicável;
- ✓ Temperatura da superfície;
- ✓ Forma e tamanho das peças a serem inspecionadas.
- ✓ Equipamentos;
- ✓ Técnica de desmagnetização;
- ✓ Limpeza após o ensaio;
- ✓ Requisitos de qualificação de pessoal.