

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

EDGAR BERGO COROA

**ENSAIOS 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**

SÃO CARLOS -SP

2023

EDGAR BERGO COROA

ENSAIOS 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

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

2023



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 Edgar Bergo Coroa, realizada em 01/08/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo (UFSCar)

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (UFSCar)

Prof. Dr. Cesar Renato Foschini (UNESP)

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, José Wilson e Darlene,
meus filhos Davi e Lucas,
e à minha esposa Luciana.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado com capacidade de poder estudar, a minha esposa Luciana Rimoldi Coroa e aos meus filhos Davi Rimoldi Coroa e Lucas Rimoldi Coroa por todo amor, entendimento, compreensão, paciência e apoio.

Aos meus pais José Wilson Marques Coroa e Darlene Aparecida Bergo Coroa, minhas irmãs Patrícia Bergo Coroa Rego e Renata Bergo Coroa Pereira e aos demais familiares pelo incentivo e por acreditar nos meus propósitos.

Agradeço aos meus amigos Sandro Cherubim, Thiago Prado, Vera Lúcia de Oliveira e Wesley Camargo que estiveram contribuindo direta ou indiretamente para minha Pós-Graduação.

Aos docentes 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.

Ao 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 / EMBRAPII / 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: Sandro Cherubim (DEMec); Mestrando: Thiago Moraes Prado (DEMec).

“Bem-aventurado aquele que teme ao Senhor e anda nos seus caminhos!”

Salmos 128:1

RESUMO

Os processos de soldagem a gás inerte com eletrodo de tungstênio (TIG) são largamente utilizados na união de materiais metálicos de diferentes espessuras, como os aços inoxidáveis. São processos empregados em diferentes segmentos na indústria, destacando-se na área metalúrgica a solda linear e circunferencial em vasos de pressão aplicados no sistema de aquecimento solar. O presente trabalho de mestrado teve como objetivo principal desenvolver uma metodologia de avaliação através da caracterização dos cordões de solda entre corpo e tampos (solda manual) dos vasos de pressão. Os reservatórios metálicos utilizados no armazenamento de água, geralmente são fabricados com chapas de aço inox AISI 304 ou AISI 316L calandradas e soldadas através do processo TIG. Os parâmetros de soldagem TIG como comprimento do arco, velocidade de soldagem, vazão do gás e corrente de soldagem são críticos, influenciando características de processo como: qualidade da união, lucratividade, custo da soldagem etc. O foco principal, foi buscar informações sobre métodos, processos e análises através de ensaios dos materiais para caracterizações da solda TIG manual em chapas fina de aços inoxidáveis. Os resultados indicaram que a soldagem TIG manual circunferencial do boiler, apresentou cordão de solda com dimensões inaceitáveis conforme norma. Foi realizada a avaliação do cordão de solda e ficou evidenciado que a soldagem TIG manual executada é resistente as funções mecânicas requeridas. Os ensaios realizados foram os ensaios destrutivos e não destrutivos. As amostras do ensaio de líquido penetrante com e sem overlap, o início e fim do cordão carregam uma criticidade com expectativa encontrada de menor porosidade nestas regiões. Os ensaios de partículas magnéticas apresentaram nas amostras com e sem overlap, descontinuidades com mordeduras na margem do cordão de solda. Já nos ensaios de tração, os dados obtidos em relação a resistência mecânica, o cordão de solda possui resistência superior a resistência do próprio material.

Palavras-chave: Vasos de pressão. Chapas finas. Aços inoxidáveis. Ensaio. Parâmetros de soldagem.

ABSTRACT

Inert gas welding processes with tungsten electrode (TIG) are widely used to join metallic materials of different thicknesses, such as stainless steel. These are processes used in different segments of the industry, highlighting in the metallurgical area the linear and circumferential welding in pressure vessels applied in the solar heating system. The main objective of this master's work was to develop an evaluation methodology through the characterization of the weld beads between the body and tops (manual soldering) of pressure vessels. Metallic tanks used for water storage are generally manufactured with AISI 304 or AISI 316L stainless steel plates, calendered and welded using the TIG process. TIG welding parameters such as arc length, welding speed, gas flow and welding current are critical, influencing process characteristics such as: joint quality, profitability, welding cost, etc. The main focus was to seek information about methods, processes and analyzes through material tests for characterizations of manual TIG welding in thin stainless steel plates. The results indicated that the manual circumferential TIG welding of the boiler, presented a weld bead with unacceptable dimensions according to the standard. An evaluation of the weld bead was carried out and it was evident that the manual TIG welding performed is resistant to the required mechanical functions. The tests carried out were destructive and non-destructive tests. The penetrating liquid test samples with and without overlap, the beginning and end of the bead carry a criticality with expectation found of lower porosity in these regions. The magnetic particle tests showed, in the samples with and without overlap, discontinuities with undercuts on the edge of the weld bead. In the tensile tests, the data obtained in relation to mechanical resistance, the weld bead has resistance superior to the resistance of the material itself.

Keywords: *Pressure vessels. Thin plates. Stainless steels. Tests. Welding parameters.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Princípio de funcionamento da soldagem TIG	20
Figura 2 - Processo de soldagem a arco com tungstênio e gás (GTAW).....	21
Figura 3 - Diagrama esquemático da soldagem TIG produzida com fluxo de ativação	22
Figura 4 - – Princípios básicos da inspeção com líquidos penetrantes: (a) peça com trinca superficial, (b) aplicação do líquido penetrante, (c) penetração, (d) remoção do excesso de	24
Figura 5 - Princípios básicos da inspeção com partículas magnéticas: (a) peça com trinca superficial ou sub-superficial, (b) aplicação do campo magnético, (c) aplicação das partículas,	25
Figura 6 – (a) Magnetização circular de uma barra pela passagem direta de corrente e (b) magnetização longitudinal com bobina. Descontinuidades orientadas favoravelmente para.....	26
Figura 7 - Métodos portáteis de magnetização por (a) passagem de corrente e (b) por bobina.	26
Figura 8 - Representação esquemática de Ensaios Mecânicos.....	27
Figura 9 - Figura esquemática a) Máquina de ensaio de tração e (b) gráfico da curva Tensão x Deformação e o resultado do ensaio	28
Figura 10 - Corpo de prova utilizado para ensaio de tração.....	29
Figura 11 - Corpo de prova utilizado para ensaio de tração.....	30
Figura 10 – Foto da visita técnica para entendimento do processo atual da linha de produção de reservatórios de aço inox AISI 304.....	30
Figura 11 – Foto frontal (a) e foto lateral (b) da máquina de solda BALMER modelo MaxxiTIG 300P AC/DC	31
Figura 12 - Amostras do boiler de aço inox AISI 304 para ensaios tecnológicos dos materiais.....	33
Figura 13 - Amostras cordão de solda COM e SEM Overlap de partes da junção do tanque cilíndrico de aço inox AISI 304 com o tampo estampado.	34
Figura 14 - 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	36

Figura 15 - Fluxograma da geração de um programa CNC através do CAM.....	37
Figura 16 - Modelagem da amostra no Autodesk Inventor.....	38
Figura 17 - Simulação do corpo-de-prova após o corte para a realização dos ensaios de tração.	38
Figura 18 - Máquina de corte a fio por eletroerosão GF AgieCharmilles FL 240 SLP	39
Figura 19 - Foto digital dos corpos de prova entre o corpo cilíndrico do tanque de armazenamento de água aquecida (boiler) e o tampo, e da junta entre a solda e o metal de base COM sobreposição (“overlap”)......	40
Figura 20 - Foto digital dos corpos de prova entre o corpo cilíndrico do tanque de armazenamento de água aquecida (boiler) e o tampo, e da junta entre a solda e o metal de base SEM sobreposição (“overlap”).	40
Figura 21 - Fluxograma de ensaios não-destrutivos ENDs por líquido penetrante (LP)	41
Figura 22 - Preparação da superfície para o ensaio de LP	42
Figura 23 - Aplicação do líquido penetrante (LP)	43
Figura 24 - Remoção do excesso LP	44
Figura 25 - Aplicação do revelador.....	45
Figura 26 – Aparelho Yoke Y6	46
Figura 27 – Ensaio de Partículas Magnéticas	46
Figura 28 – Esquema de sobreposição, em forma de cruz ou xis.....	47
Figura 29 - Máquina universal de ensaios modelo: WDW-300E	48
Figura 30 - Parâmetros utilizados nos ensaios de tração.....	49
Figura 31 - Parâmetros utilizados nos ensaios de tração.....	49
Figura 32 - Preparação da máquina de para os ensaios de tração.....	50
Figura 33 - Corpo de prova do tampo com overlap (CSCO) – LP. Amostra 01 com três pontos de descontinuidade (porosidade), Amostra 02 com dois pontos de descontinuidade (porosidade) e Amostra 03 não apresentou nenhuma irregularidade.	52
Figura 34 - Corpo de prova tampo sem overlap (CSSO) – LP. Amostra 01 não apresentou nenhuma irregularidade, Amostra 02 apresentou um ponto de descontinuidade (porosidade) e Amostra 03 apresentou um ponto de descontinuidade (porosidade).	52

Figura 35 - Corpo de prova tampo com overlap (CSSO) – PM. Amostra 01 apresentou muitas mordeduras na margem do cordão de solda, Amostra 02 apresentou mordeduras ao longo do cordão e Amostra 03 apresentou mordeduras ao longo do cordão;	54
Figura 36 - Corpo de prova tampo sem overlap (CSSO) – PM. Amostra 01 apresentou mordeduras ao longo do cordão, Amostra 02 apresentou mordeduras na margem do cordão de solda e Amostra 03 apresentou mordeduras ao longo do cordão;	54
Figura 37 - Amostra com overlap antes do ensaio e depois do ensaio.	55
Figura 38 - Amostra sem overlap antes do ensaio e depois do ensaio.	56
Figura 39 - Amostra metal base (MB) antes do ensaio e depois do ensaio de tração.	56
Figura 40 - Dados dos ensaios de tração - Gráfico – Valores Médios de LE, LRT e AL (%) Metal Base, Cordão de Solda c/ Overlap e Cordão de Solda s/ Overlap.....	59
Figura 41 - Curvas e Dados dos valores médios dos Ensaios de Tração - Gráfico – Metal Base, Cordão de Solda c/ Overlap e Cordão de Solda s/ Overlap	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações e propriedades mecânicas para os aços inoxidáveis	18
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem TIG (solda circunferencial manual).....	31
Tabela 3 - Informações de aplicação de cada modelo de vareta de solda.....	32
Tabela 4 – Amostras para ensaios tecnológicos dos materiais.....	34
Tabela 5 - Dimensões das amostras confeccionadas para realização dos ensaios não-destrutivos (líquido penetrante), destrutivos de resistência mecânica à tração.....	35
Tabela 6 - Divisão das amostras confeccionadas para os respectivos ensaios.....	35
Tabela 7 – Parâmetros dos gráficos nos ensaios de tração das amostras.	58

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	OBJETIVO	16
1.2.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2.	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1.	AÇO INOX PARA VASO DE PRESSÃO DE AQUECEDORES SOLARES	18
2.1.1.	Grau 304 ou Grau 316L	19
2.2.	PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG	19
2.3.	CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA	23
2.3.1.	Ensaio Não-Destrutivo (END)	23
2.3.1.1.	Inspeção com Líquidos Penetrantes	24
2.3.1.2.	Partículas Magnéticas	24
2.3.2.	Ensaio Mecânico Destrutivo	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.	PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DO RESERVATÓRIO AÇO INOX 304	31
3.2.	AVALIAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA DO BOILER DE AÇO INOX AISI 304	32
3.3.	ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE DAS AMOSTRAS DO	
	RESERVATÓRIO DE AÇO INOX AISI 304	41
3.3.1.	Preparação da Superfície para LP nas Amostras	41
3.3.2.	Aplicação do Líquido Penetrante	42
3.3.3.	Remoção do Excesso de Penetrante	43
3.3.4.	Aplicação do Revelador	44
3.4.	ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	45
3.4.1.	Aparelho Yoke Eletromagnético	45
3.5.	ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS DO TANQUE DE AÇO INOX AISI	
	304	47
3.6.	RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES	50
3.6.1.	Resultados e Discussão do Ensaio de LP.....	51
3.6.2.	Resultados dos Ensaio de Partículas Magnéticas.....	53
3.6.3.	Resultados dos Ensaio Mecânico de Tração.....	55
	CONCLUSÕES	61

REFERÊNCIAS.....	63
APENDICE A – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 1 – Cordão de Solda c/ Overlap_CP_01	67
APENDICE B – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 2 – Cordão de Solda c/ Overlap_CP_02	68
APENDICE C – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 3 – Cordão de Solda c/ Overlap_CP_03	69
APENDICE D – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 4 – Cordão de Solda s/ Overlap_CP_01	70
APENDICE E – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 5 – Cordão de Solda s/ Overlap_CP_02	71
APENDICE F – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 6 – Cordão de Solda s/ Overlap_CP_03	72
APENDICE G – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 7 – Cordão de Solda Automatizada_CP_01	73
APENDICE H – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 8 – Cordão de Solda Automatizada_CP_02	74
APENDICE I – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 9 – Cordão de Solda Automatizada_CP_03	75
APENDICE J – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 10 – Metal Base_CP_01.....	76
APENDICE K – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 11 – Metal Base_CP_02.....	77
APENDICE L – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 12 – Metal Base_CP_03.....	78
APENDICE M – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico – Metal Base, Cordão de Solda c/ Overlap e Cordão de Solda s/ Overlap	79
APENDICE N – Programação CNC para o corte dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de tração.	80

1. INTRODUÇÃO

O boiler é um reservatório de água aquecida, pelos coletores solares. Também conhecido como reservatório térmico, são dimensionados de acordo com o volume do consumo diário da residência em que está instalado.

No Sistema de Aquecimento Solar (SAS), o boiler é um dos componentes mais afetados pela qualidade da água, sendo o aço inoxidável e os cordões de solda, itens que merecem atenção, devido à corrosão.

Os boilers são fabricados com cilindro interno de aço inox AISI 304 ou aço inox AISI 316L, de acordo com a região onde será instalado o conjunto do aquecedor solar. O aço inox 304 é recomendado para água tratada pela rede de abastecimento. Já o aço inox 316L é recomendado para “água agressiva” (água com Ph elevado) como sítios, fazendas, poços artesianos, cisternas e regiões litorâneas.

Na linha de montagem de aquecedores solares da empresa Solis, o processo de soldagem é a etapa crítica que define o gargalo na produção atual dos reservatórios térmicos. Para produção dos boilers, utiliza-se processo de soldagem a gás inerte com eletrodo de tungstênio (TIG), em chapas finas de aço inoxidável com adição de material na posição plana e configuração de junta sobreposta, tanto para linha de produtos de alta pressão, quanto baixa pressão.

Esses reservatórios são parte essencial da linha de equipamentos para aquecimento solar, tanto residencial como industrial. Apesar do processo ser certificado, tanto em termos do operador e da especificação do procedimento de soldagem (EPS), os resultados da fabricação dependem, em grande parte, das habilidades do soldador em cada cordão de solda executado. Dessa maneira, um desafio tecnológico a ser vencido reside em garantir a qualidade da junta soldada, especialmente no processo de soldagem de chapas finas (de 0,4 mm a 1,2 mm de espessura) de aço inoxidável, que é complexo do ponto de vista da metalurgia de solidificação da poça de fusão e da formação da zona termicamente afetada (ZTA).

Todos os reservatórios soldados são avaliados por teste hidrostático. Este teste consiste em pressurizar o reservatório com água e passar ar comprimido em todos os pontos de solda, avaliando se há algum ponto de vazamento. Caso haja falha, o operador marca o ponto e encaminha o reservatório de volta para o processo de solda. Após o reparo, o reservatório volta para o teste hidrostático, se aprovado, passa para

a próxima etapa do processo. Há acompanhamento mensal do índice de retrabalho durante esse processo.

Com relação à relevância acadêmica, esta dissertação apresenta desafios de pesquisa, desenvolvimento e inovação no estado da arte na área de materiais, especificamente soldagem de chapas finas de aço inox, corrosão e solidificação de materiais.

Pelo lado social, além do envolvimento de alunos da UFSCar, tiveram a possibilidade de desenvolver pesquisa aplicada em parceria com a indústria, o resultado do projeto ainda pretende reduzir o custo do produto da empresa, tornando a tecnologia de aquecimento solar acessível a um público mais amplo. É intenção, inclusive da empresa, obter soluções e desenvolvimentos a partir do presente projeto de pesquisa para aquecimento solar, de forma competitiva, e com qualidade para "casas populares".

O processo de soldagem em questão está sendo automatizado, porém, existe a necessidade de se avaliar as condições em que os cordões são produzidos pelo processo manual de forma a gerar subsídios para escolhas futuras.

1.1.OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia de avaliação através da caracterização dos cordões de solda entre corpo e tampos (solda manual) dos vasos de pressão. Para o estudo proposto foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Fazer ensaios de resistência à tração dos corpos de prova para verificar as propriedades mecânicas da junta soldada;
- Fazer ensaios de líquido penetrante;
- Realizar ensaio de partículas magnéticas
- Gerar subsídios para a validação de um equipamento com soldagem circunferencial TIG automatizada desenvolvida pela Equipe do Projeto SOLIS / EMBRAPII / UFSCar.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para este trabalho de pesquisa, foram realizadas buscas bibliográficas e consulta as bases de dados disponibilizadas pela CAPES, levando em consideração artigos cujo conteúdo discutido se encaixe dentro do objetivo proposto que é a aplicação do processo de soldagem TIG em chapa fina de inox.

No Capítulo 3 foi abordado sobre materiais e métodos aplicados nos reservatórios térmicos residenciais para a realização de caracterizações e ensaios não-destrutivos e destrutivos.

Os resultados sobre os ensaios foram apresentados no Capítulo 4.

Por fim, as Conclusões tratam a respeito de trabalhos futuros focando no processo de soldagem TIG para reservatórios de aço inox 304 AISI.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão da bibliografia deste presente trabalho foi dividida em três grupos: estudo sobre o aço inox utilizado para fabricação dos vasos de pressão de aquecedores solares, processos de soldagem TIG e caracterização do cordão de solda.

2.1. AÇO INOX PARA VASO DE PRESSÃO DE AQUECEDORES SOLARES

O aço inoxidável austenítico do tipo AISI 304 e 316L, são utilizados na fabricação dos reservatórios térmicos residenciais. Sua composição química está na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações e propriedades mecânicas para os aços inoxidáveis mais comuns

Tipo	Composição Química (%)								
	C máx.	Mn máx.	Si máx	P máx.	S máx	Cr	Ni	Mo	N ₂ máx
304	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5	-	0,1
304L	0,03	2,0	1,0	0,045	0,03	18,0 a 20,0	8,0 a 12,0	-	0,1
308	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	19,0 a 21,0	10,0 a 12,0	-	0,1
316	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	16,0 a 18,0	10,0 a 14,0	2,0 a 3,0	0,1
316L	0,03	2,0	1,0	0,045	0,03	16,0 a 18,0	10,0 a 14,0	2,0 a 3,0	0,1

Fonte: ASTM A276, (2011)

O aço inoxidável de grau 304 contém grande teor de níquel (%Ni), que é tipicamente entre 8 e 10,5% em peso, e uma alta fração de cromo (%Cr), em aproximadamente 18 a 20% em peso. Outros importantes elementos de liga incluem manganês, silício e carbono. O restante da composição química é principalmente de ferro.

As altas quantidades de cromo e níquel dão ao aço inoxidável 304 excelente resistência à corrosão (ROY; YUVARAJ; VIPIN, 2021). Aplicações comuns de aço inoxidável 304 incluem:

- Eletrodomésticos, como geladeiras e lava-louças;
- Equipamento comercial de processamento de alimentos;
- Fixadores;
- Tubulação;
- Trocadores de calor;
- Estruturas em ambientes que corroem o aço carbono padrão.

Já o aço Inoxidável AISI 316L, é similar ao AISI 304. O aço inoxidável de grau 316L possui grandes quantidades de cromo e níquel. Contém silício, manganês e carbono, sendo a maior parte da composição ferro. A principal diferença entre o aço inoxidável 304 e 316L é a composição química, com o AISI 316L contendo uma quantidade significativa de molibdênio; tipicamente 2 a 3 por cento em peso contra apenas vestígios encontrados no AISI 304. O maior teor de molibdênio resulta em grau 316L possuindo maior resistência à corrosão.

O aço inoxidável AISI 316L é frequentemente considerado uma das escolhas mais adequadas ao selecionar um aço inoxidável austenítico para aplicações marítimas. Outras aplicações comuns do aço inoxidável AISI 316L incluem:

- Equipamento de processamento e armazenamento químico.
- Equipamentos de refinaria
- Dispositivos médicos
- Ambientes marinhos, especialmente aqueles com cloretos presentes

2.1.1. Grau 304 ou Grau 316L

De acordo com Delgado (2021), em algumas situações em que o aço inoxidável AISI 304 pode ser a melhor escolha:

- A aplicação requer excelente conformabilidade. O maior teor de molibdênio no Grau 316L pode ter efeitos adversos na conformabilidade.
- O Grau 304 é normalmente mais acessível que o Grau 316L com relação a custos.

Aqui estão algumas situações em que o aço inoxidável 316L pode ser a melhor escolha:

- O ambiente inclui uma grande quantidade de elementos corrosivos.
- O material será colocado debaixo d'água ou exposto à água de forma consistente.
- Em aplicações onde maior resistência e dureza são necessárias.

2.2. PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG

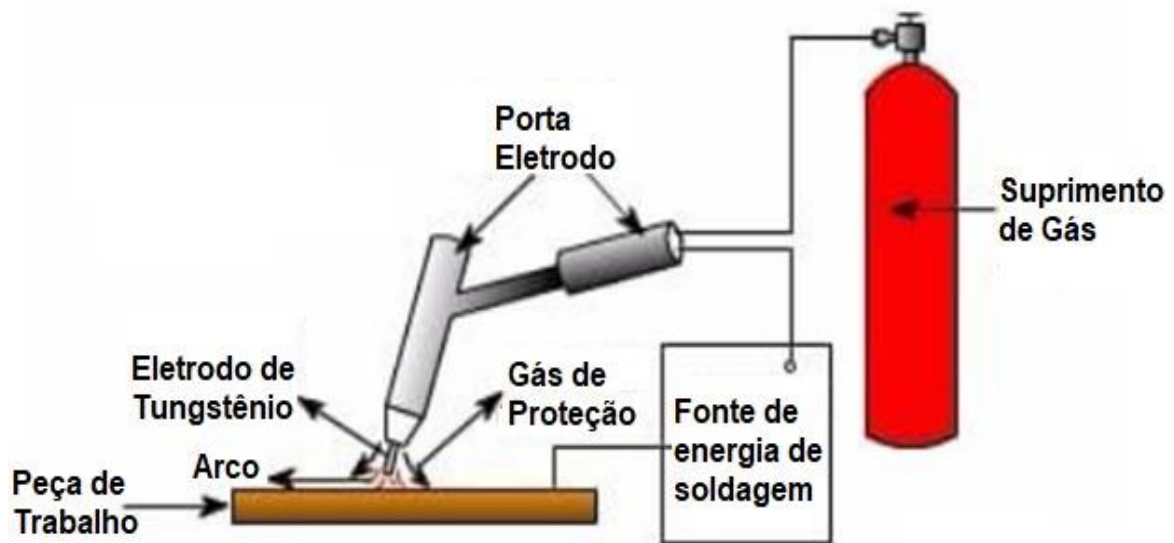
De acordo com Kumar, R; e Sundara Bharathi, S R. (2016), o processo de soldagem TIG (*“tungsten inert gas”*), traduzido como soldagem com gás inerte e eletrodo de tungstênio, é um processo de soldagem a arco criado no final da década

de 1930, quando a urgência de soldar magnésio progrediu e se tornou uma necessidade. Para uma aparência de junta de solda decente, a soldagem TIG foi utilizada como uma alternativa excelente na extensa variedade de aplicações de soldagem.

Os critérios competitivos para a soldagem são a qualidade, o custo e a produtividade dos produtos e processos. Os processos de soldagem são rigorosos para o uso de métodos seguros, alcançando a resistência, confiabilidade e precisão do produto com preços competitivos no mercado (BIEKŠA; MANKUTE; BARGELIS, 2013).

A soldagem TIG é um processo que funde e une metais aquecendo-os com um arco instalado entre os cátodos de tungstênio não consumível e a peça de trabalho sob um gás protetor. A Figura 1 a seguir ilustra um esquemático da soldagem TIG (PATEL; RAHUL; PATEL, 2014).

Figura 1 - Princípio de funcionamento da soldagem TIG



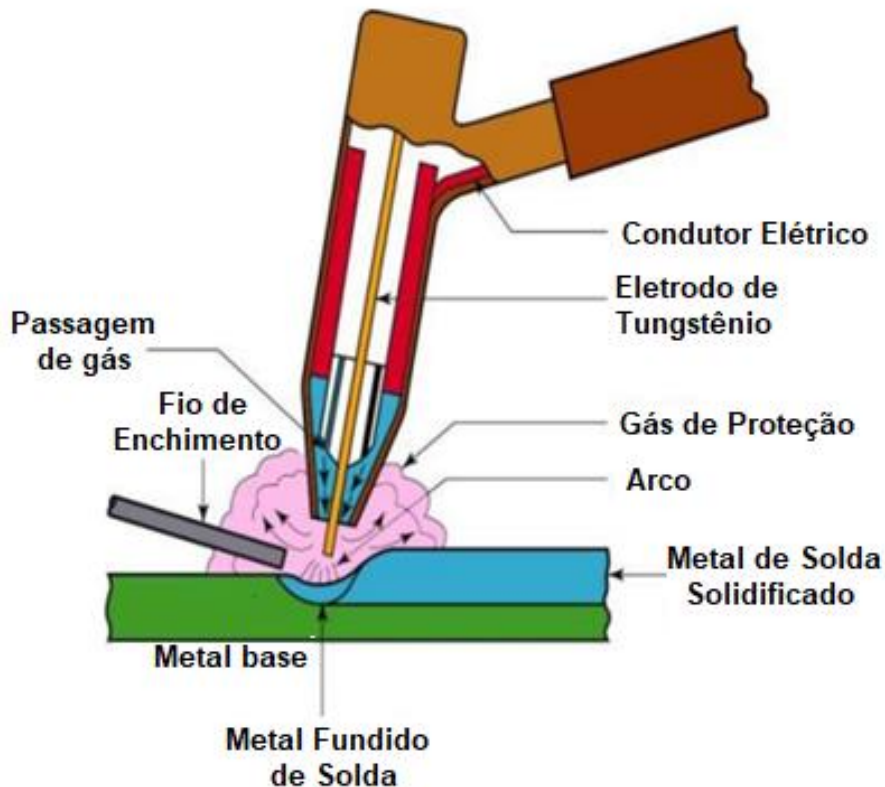
Fonte: Rahul Patel; Naitik Patel, (2014).

Segundo Kumar e Shanmugam (2018), o processo de soldagem com gás inerte e eletrodo de tungstênio (GTAW – “Gas Tungsten Arc Welding”) ou TIG é um processo de soldagem a arco em que um eletrodo de tungstênio não consumível é usado para a soldagem. O gás de proteção, como hélio, argônio ou uma mistura de ambos, é usado para proteger a zona de soldagem da atmosfera.

Atualmente, a soldagem TIG (Fig. 2), é o processo de fabricação muito utilizado. Seu uso foi disseminado para uma variedade de metais como aço inoxidável,

aço carbono entre 0,15 e 0,25%, e aços de alta resistência, liga de alumínio, liga de titânio e metais não ferrosos, uma vez que é versátil e tem uma junta de boa qualidade e baixo custo. No entanto, o processo TIG convencional tem baixa produtividade, causada pela pequena profundidade de penetração e baixa velocidade de soldagem (GHADI; S., 2016).

Figura 2 - Processo de soldagem a arco com tungstênio e gás (GTAW)



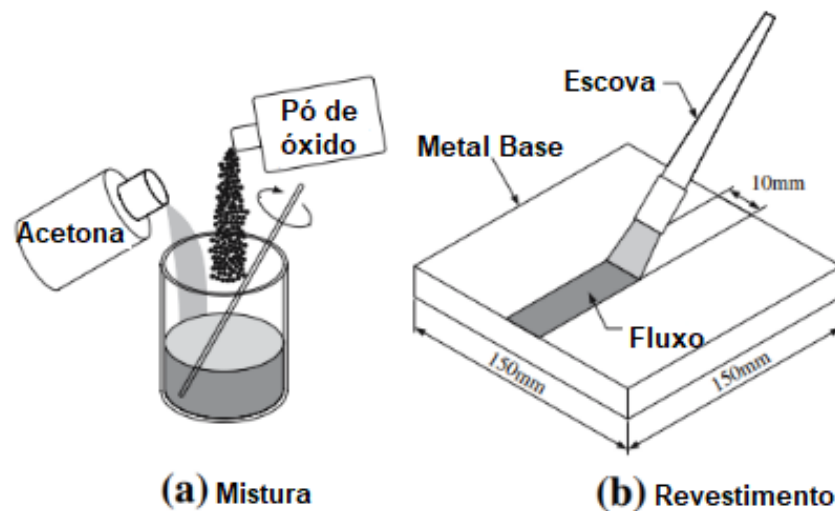
Fonte: GHADI, Gurudatt; S., Dr. Shivakumar. (2016).

No processo de soldagem TIG, a solda manual à arco com tungstênio convencional e gás (GTAW) é considerada uma das mais difíceis de todos os processos de soldagem usados em indústria, já que exige do soldador além de cuidado, habilidade para trabalhar com ambas as mãos visto que, com uma ele adiciona material à poça de fusão e com a outra vai manipulando a tocha de soldagem. Este tipo de soldagem é utilizado para união de materiais de fina e média espessura, como por exemplo, placas de aço inoxidável, placas de aço carbono, e metais não ferrosos como ligas de cobre, alumínio e de magnésio (AHMADI; EBRAHIMI, 2015). É também uma das técnicas de soldagem preferidas pela indústria de manufatura devido ao seu alto desenvolvimento, baixo valor de investimento e baixo custo

operacional. Deve-se dar atenção especial na seleção de metais de adição adequados para ambos os metais (MOHAN KUMAR; SIVA SHANMUGAM, 2018).

O processo de soldagem com gás inerte de tungstênio (TIG) é amplamente utilizado nas indústrias de soldagem de aço inoxidável devido à sua estabilidade de arco, menos contaminação em suas soldas, solda de alta qualidade e aparência lisa. E, uma variedade de TIG é a soldagem com revestimento de fluxo de ativação (A-TIG) na superfície superior das placas que devem ser unidas conforme Figura 3 (DEVAKUMAR; JABARAJ, 2014; JURICA; KOZUH; GARASIC e BUSIC, 2018; OGUNDIMU, AKINKABI e ERINOSHO, 2019).

Figura 3 - Diagrama esquemático da soldagem TIG produzida com fluxo de ativação



Fonte: Garasic E Busic, (2018)

Xu et al. (2019), fez uma observação quanto ao gás de proteção durante a operação de soldagem, que é obrigatório no processo de soldagem a arco convencional e a laser.

As propriedades mecânicas das soldagens são significativamente influenciadas pela oxidação da zona de fusão. As técnicas de soldagem convencionais e de estado sólido também são empregadas para a união de ligas de titânio. No entanto, a soldagem a arco convencional é usada principalmente devido ao baixo custo. Além disso, a soldagem a laser também provou ser eficaz, especialmente para ligas de titânio, devido à sua fonte de calor concentrada e densa e baixa entrada de calor, resultando em uma zona estreita afetada pelo calor.

Outros processos, como: soldagem híbrida combinando TIG com YAG Laser (KIM, 2003); junção de chapas finas de aços inoxidáveis através de processo de arco transferido por micro plasma pulsado (CHAUDHARY, 2019); soldagem GTAW pulsado em modo tandem de alta velocidade para placa finas de aços inoxidáveis (JIANG, 2019), merecem ser citados devido sua importância e aplicações.

2.3. CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

De acordo com Souza (2000), para definir as propriedades mecânicas de um material metálico são realizados vários ensaios sendo eles ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos. Os ensaios não destrutivos são utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como detectar falhas internas. Dentre os não destrutivos, estão os ensaios com raios-X, raio gama, ultrassom, partículas magnéticas, líquido penetrante, outros.

Os ensaios destrutivos provocam a ruptura ou a inutilização do material. São classificados em ensaios de tração, ensaios de dobramento, ensaios de flexão, ensaios de torção, ensaios de fadiga, ensaios de impacto e ensaios de compressão. Os ensaios de dureza, que embora pode não inutilizar a peça ensaiada, entra na categoria de ensaios destrutivos (SOUZA, 2000).

2.3.1. Ensaios Não-Destrutivos (END)

Ensaios não destrutivos são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem destruir ou danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. (MODENESI, 2001).

Segundo Farias (2014), existem diversos fatores que levam a indústria moderna a utilizar os ensaios não destrutivos, dentre eles podem ser citados alguns importantes, tais como: prevenção de acidentes, redução de custos, melhoria da confiabilidade de produtos para ser aceito por uma determinada norma, dar informações para reparo, permitir o controle da propriedade dos materiais com economia de tempo e dinheiro, o material testado volta intacto para o local de trabalho após a inspeção. São indispensáveis para indicar a presença de fissuras, trincas, reduções de espessura de parede, defeitos internos, vazamentos, porosidades e

outras formas de danos.

Os ensaios não destrutivos envolvem todos os métodos para a medição e detecção de propriedades, capacidade de desempenho dos materiais metálicos, partes e peças de equipamentos e estruturas, por meio de energias físicas que não danificam as mesmas.

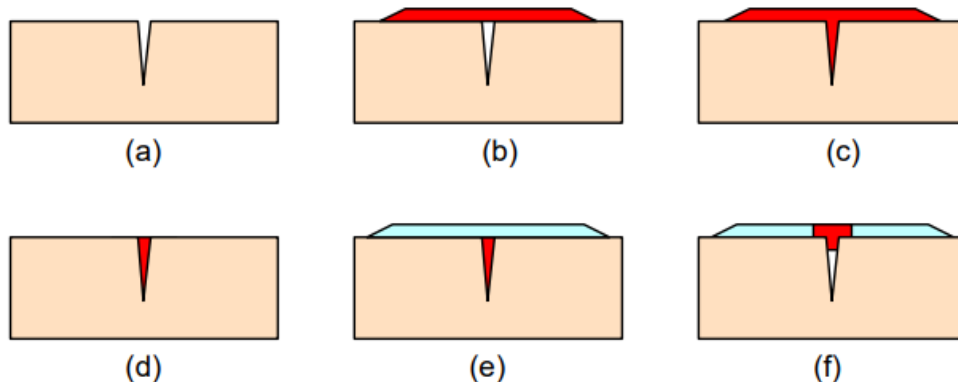
Os Ensaios Não Destrutivos (END) são ensaios realizados em materiais acabados ou semiacabados, para verificar a existência (ou não) de descontinuidades e/ou defeitos (FARIAS, 2014).

2.3.1.1. Inspeção com Líquidos Penetrantes

Este método de END é usado para a revelação de descontinuidades superficiais e é baseado na penetração destas por um líquido apropriado e na sua posterior remoção pela aplicação de um material absorvente (revelador) na superfície sendo examinada conforme Figura 4 (FARIAS, 2014).

No caso de soldas, essa inspeção tem como objetivo detectar poros, cavidade ou fissuras que chegam até a superfície.

Figura 4 - – Princípios básicos da inspeção com líquidos penetrantes: (a) peça com trinca superficial, (b) aplicação do líquido penetrante, (c) penetração, (d) remoção do excesso de líquido, (e) aplicação do revelador e (f) formação da indicação da trinca



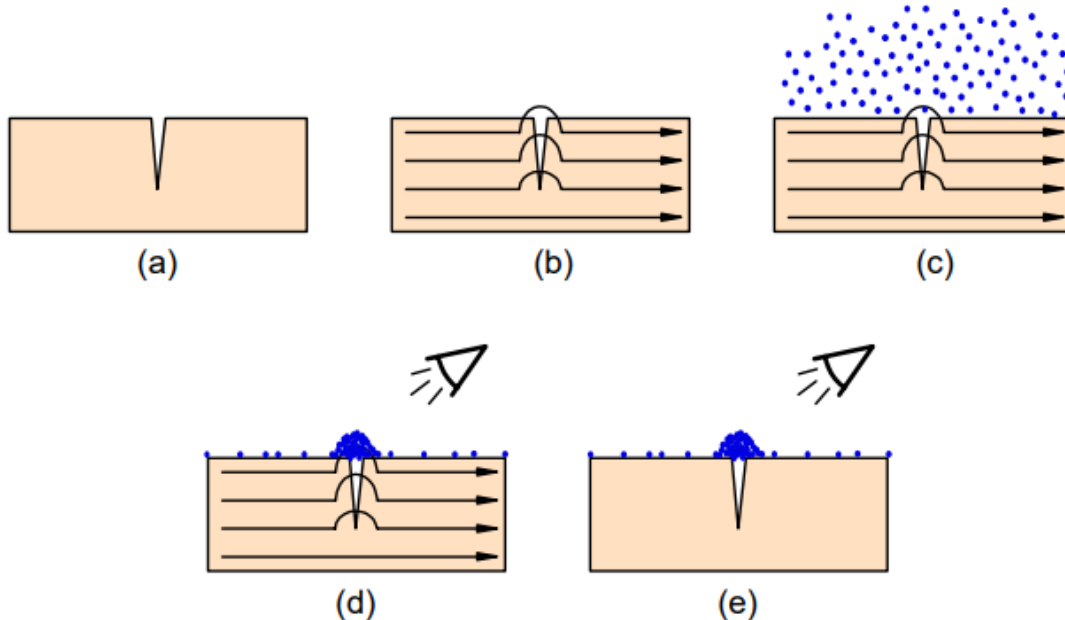
Fonte: Farias, (2014)

2.3.1.2. Partículas Magnéticas

Segundo a NBR NM 328 (ABNT, 2011) este método de END é usado para revelar descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos pela aplicação de um campo magnético e deposição de um pó capaz de ser atraído

para as regiões em que este campo magnético escapar do interior da peça (Fig. 5).

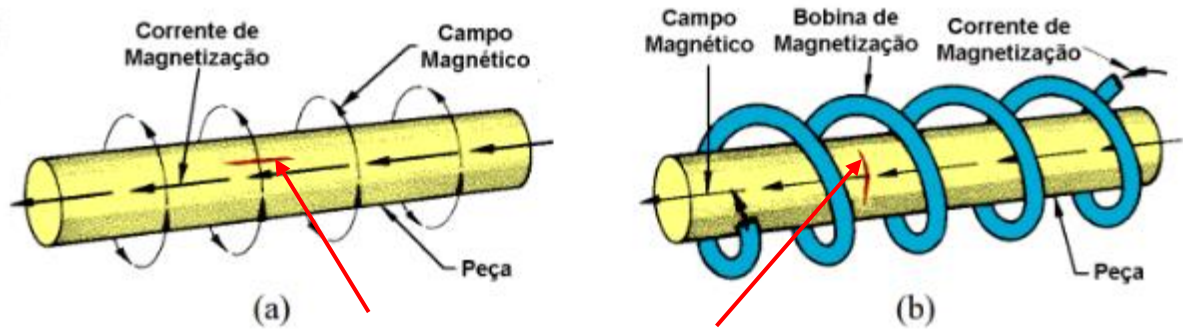
Figura 5 - Princípios básicos da inspeção com partículas magnéticas: (a) peça com trinca superficial ou sub-superficial, (b) aplicação do campo magnético, (c) aplicação das partículas, (d) formação da indicação e inspeção com campo magnético e (e) sem o campo.



Fonte: Farias, (2014)

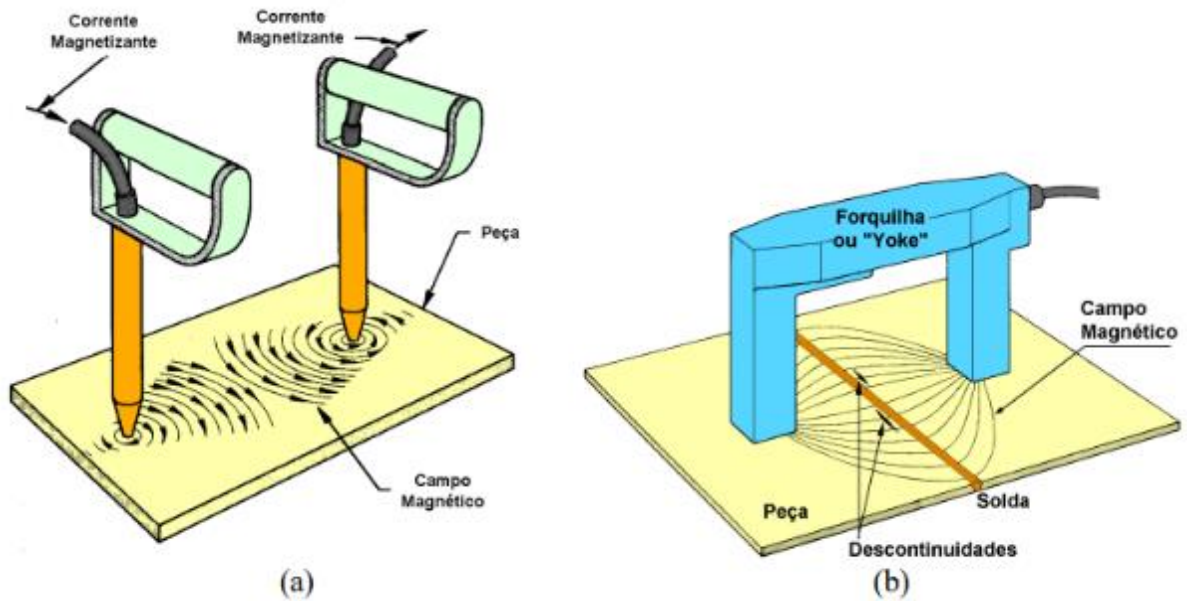
O campo magnético pode ser aplicado pela passagem direta de uma corrente elétrica pela peça ou pela imersão desta no campo magnético gerado, em geral, por um eletroímã (Fig. 6). No primeiro caso, as regiões de contato elétrico para a passagem da corrente para a peça podem ser superaquecidas caso o contato não seja suficiente, o que pode danificar a peça. Para ambas as técnicas existem dispositivos portáteis (Fig. 7) que permitem o exame no campo, por exemplo, de regiões de estruturas de grandes dimensões. Para ocasionar o escape do campo magnético, uma descontinuidade deve interromper as linhas de campo magnético. Assim, a orientação de trincas em relação ao campo magnético é fundamental para a sua detecção: trincas orientadas paralelamente ao campo tendem a não produzir indicações neste ensaio. Este ensaio só é aplicável para materiais ferromagnéticos como, os aços estruturais comuns.

Figura 6 – (a) Magnetização circular de uma barra pela passagem direta de corrente e (b) magnetização longitudinal com bobina. Descontinuidades orientadas favoravelmente para detecção são mostradas em marrom.



Fonte: Farias, (2014)

Figura 7 - Métodos portáteis de magnetização por (a) passagem de corrente e (b) por bobina.



Fonte: Farias, (2014)

O tempo de avaliação é de alguns minutos. A amostra deve ser ferromagnética e, portanto, esta técnica não pode ser utilizada na maioria dos aços inoxidáveis. Este método tem menor custo, quando comparado à radiografia, ao ultrassom e ao ensaio de líquido penetrante, mas só pode ser utilizado em materiais ferromagnéticos.

2.3.2. Ensaio Mecânicos Destrutivos

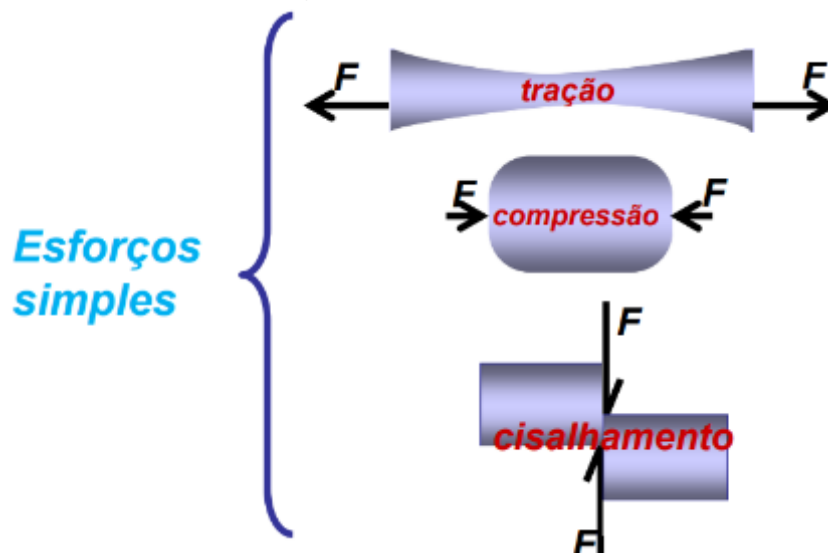
São ensaios mecânicos utilizados nas indústrias na análise de falhas. Ao ensaiar um componente deve-se levar em consideração que os materiais possuem falhas e que as microestruturas podem ser heterogêneas.

Conforme Zolin (2011), ensaios destrutivos são ensaios mecânicos que necessitam de procedimentos que provocam inutilidade nos materiais ou nos corpos de prova, mesmo que o dano seja pequeno. O ensaio de dureza, em certos casos, produz um pequeno dano. Esse efeito (marcas) não chega a destruir a peça ensaiada, porém deixa sinais que serão pontos de concentração de tensão e fonte de possíveis falhas.

Os Ensaio Mecânicos dividem-se em (Fig.8):

- ✓ Ensaio de tração;
- ✓ Ensaio de compressão;
- ✓ Cisalhamento

Figura 8 - Representação esquemática de Ensaio Mecânicos.



Fonte: Zolin, (2011)

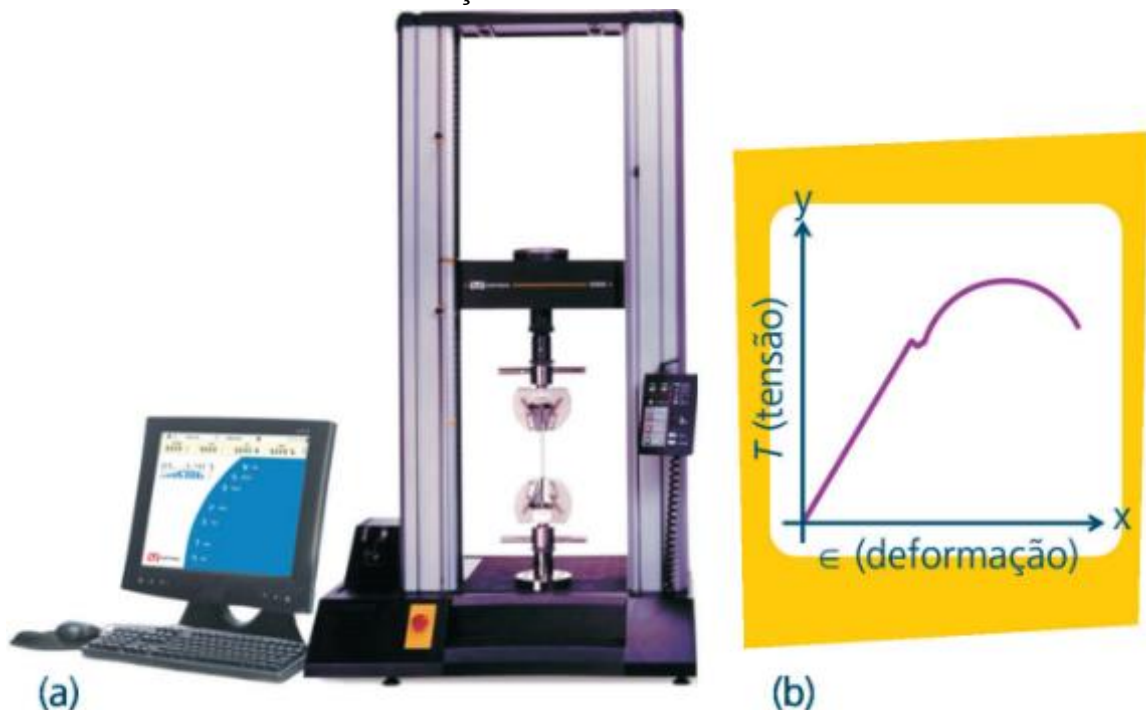
O objetivo principal deste estudo é identificar o comportamento dos corpos de prova em relação à exposição de uma carga de tração. De acordo com Zolin (2011), o ensaio de tração consiste na aplicação de uma força, que, ao agir sobre uma

superfície de um corpo sólido, provoca uma deformação na direção do esforço produzindo uma tensão. Quando essa força tende ao alongamento, acontece o que chamamos de tensão de tração. Há uma relação entre tensão aplicada (carga sobre 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 9(b). Os valores para construir o gráfico (diagrama) Tensão x 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 mesma máquina de ensaio de tração também tem capacidade para realizar ensaios de compressão, pois esse esforço é uma “tração negativa”. A Figura 9(a) representa uma máquina de ensaio de tração (ZOLIN, 2011)

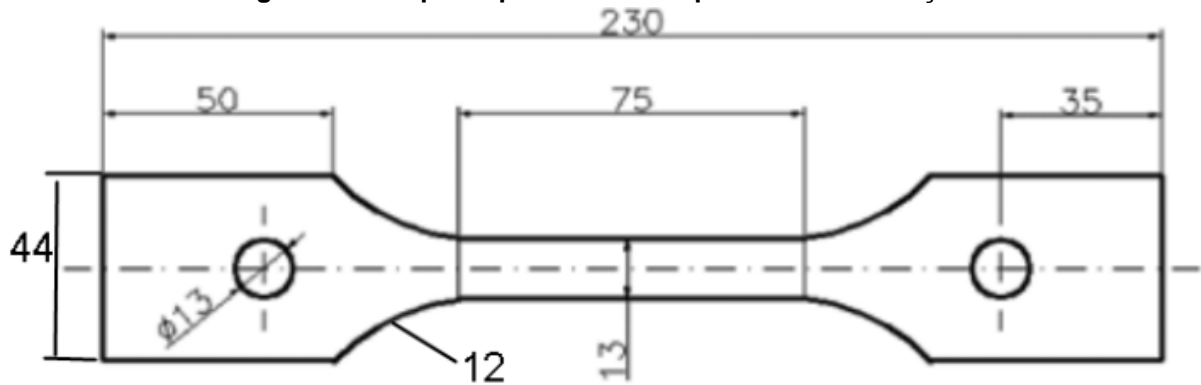
Figura 9 - Figura esquemática a) Máquina de ensaio de tração e (b) gráfico da curva Tensão x Deformação e o resultado do ensaio



Fonte: Zolin, (2011)

No ensaio mecânico de tração, o corpo de prova é instalado nas extremidades das garras da máquina universal de ensaio de tração e aplica-se uma tensão crescente. A máquina registra as medições de tensão x deformação do corpo de prova até seu rompimento (SOUZA, 2000). Na Figura 10 pode-se observar a geometria do corpo de prova selecionado para realizar o ensaio.

Figura 10 - Corpo de prova utilizado para ensaio de tração

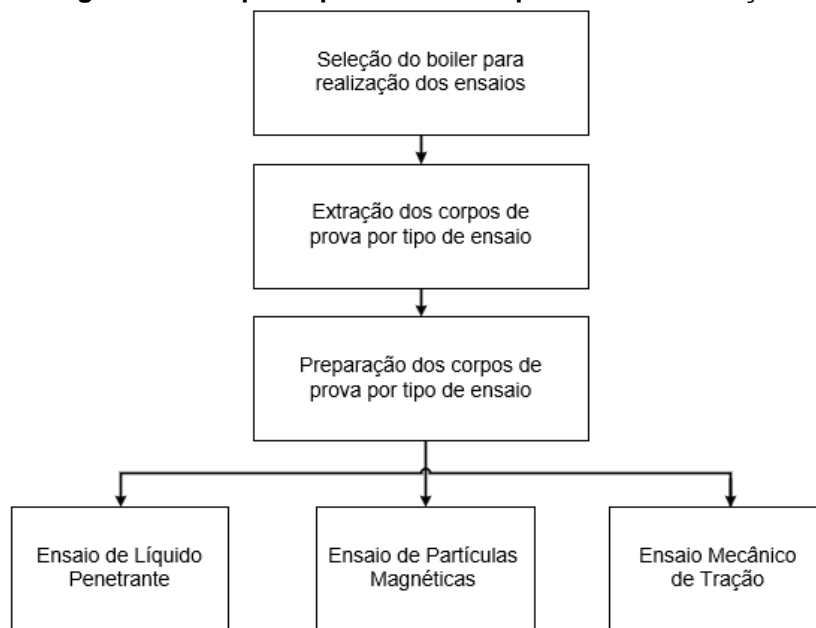


Fonte: Garcia; Spim; Santos, 2012, p. 71.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos realizados para o desenvolvimento do estudo, sendo detalhados aspectos como procedimento de soldagem circunferencial TIG manual, avaliação do cordão de solda, corpos de prova, equipamentos e métodos. No fluxograma apresentado na Figura 11, têm-se as etapas básicas deste capítulo.

Figura 11 - Corpo de prova utilizado para ensaio de tração



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para caracterização da solda manual da Solis, foram realizadas algumas atividades como a visita técnica na empresa (Fig.12) com o intuito do entendimento do processo atual da linha de produção de reservatórios aplicados no sistema de aquecimento solar.

Figura 12 – Foto da visita técnica para entendimento do processo atual da linha de produção de reservatórios de aço inox AISI 304.

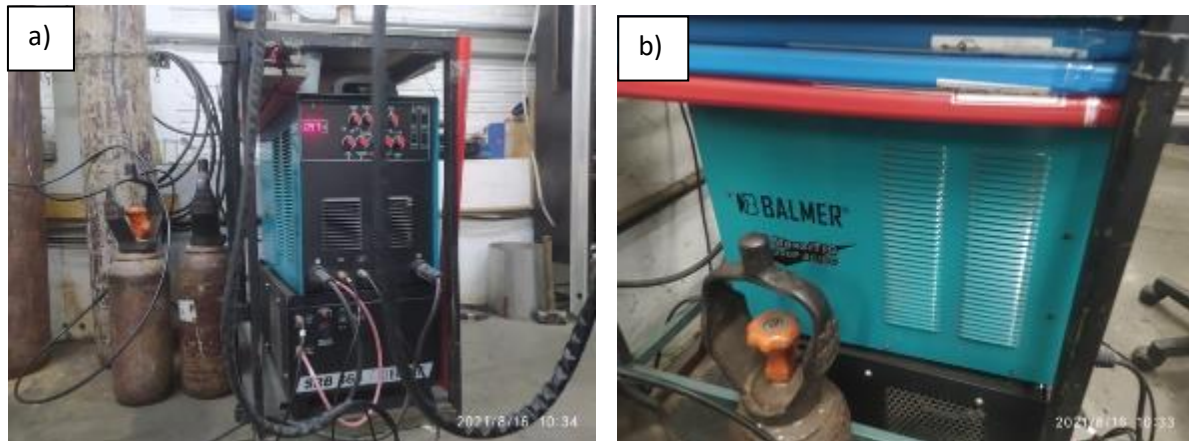


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1. PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DO RESERVATÓRIO AÇO INOX 304

O equipamento utilizado para a soldagem TIG (solda circunferencial manual) foi a máquina de solda BALMER modelo MaxxiTIG 300P AC/DC (Fig.13), conforme parâmetros de soldagem na Tabela 2.

Figura 13 – Foto frontal (a) e foto lateral (b) da máquina de solda BALMER modelo MaxxiTIG 300P AC/DC



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem TIG (solda circunferencial manual)

Parâmetros de Soldagem	Chapa
Chapa (mm)	1 corpo c/ 1,5 de tempo
Corrente (CCEN) (A)	80
Diâmetro do eletrodo mm	2,4
Tipo do Eletrodo	WT20 (Thório – Ponta Vermelha)
Ângulo de afiação	$\leq 30^\circ$
Material do bocal	cerâmica
Diâmetro do bocal mm (tocha WT 20)	7
Gás de proteção	Argônio puro
Vazão do gás de proteção (Na tocha WT 20) (litros / minuto)	≥ 7 e ≤ 10
Vareta consumível	316L
Diâmetro da vareta mm	1,6
Velocidade de soldagem aproximada mm/s	5,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 3, pode-se observar que as varetas de solda utilizadas são das marcas WELD-INOX e varetas da marca WELD QUALITY.

Tabela 3 - Informações de aplicação de cada modelo de vareta de solda

Marca	Modelo	Espessura	Aplicação
Weld Quality	INX 308L-T	1,2 mm	Solda coletores
Weld Quality	INX 308L-T	1,6 mm	AISI 304 - Baixa e Alta pressão
Weld Quality	INX 308L-T	2,0 mm	AISI 304 - Alta pressão
Weld Quality	INX 308L-T	2,4 mm	AISI 304 - Alta pressão OGP
Weld Quality	INX 308L-T	3,25 mm	AISI 304 - Alta pressão OGP
Weld-Inox	WI T 308 L	1,2 mm	Solda coletores
Weld-Inox	WI T 308 L	1,6 mm	AISI 304 - Baixa e Alta pressão
Weld-Inox	WI T 308 L	2,0 mm	AISI 304 - Alta pressão
Weld-Inox	WI T 308 L	2,4 mm	AISI 304 - Alta pressão OGP
Weld-Inox	WI T 308 L	3,25 mm	AISI 304 - Alta pressão OGP
Weld-Inox	WI T 308 L	1,6 mm	AISI 316L - Baixa e Alta pressão
Weld-Inox	WI T 308 L	2,0 mm	AISI 316L - Alta pressão
Weld-Inox	WI T 308 L	2,4 mm	AISI 316L - Alta pressão OGP
Weld-Inox	WI T 308 L	3,25 mm	AISI 316L - Alta pressão OGP

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2. AVALIAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA DO BOILER DE AÇO INOX AISI 304

A avaliação do cordão de solda consiste em constatar se a soldagem executada resistirá as funções mecânicas requeridas é de suma importância. Os principais testes encarregados para essa constatação são os ensaios destrutivos e não destrutivos.

Os ensaios não destrutivos têm como meta encontrar defeitos que podem colocar em risco a região soldada, relacionando medições indiretas, qualitativas e poucas vezes quantitativas (CUPPARI e NOSE, 2008).

Os ensaios destrutivos segundo Souza (2000), são aqueles que provocam inutilização parcial ou total da peça, analisando suas características até que ocorra a ruptura.

Tendo em vista as circunstâncias do processo atual que a soldagem se apresenta, foram propostas as seguintes técnicas de ensaios não destrutivos e destrutivos do cordão de solda:

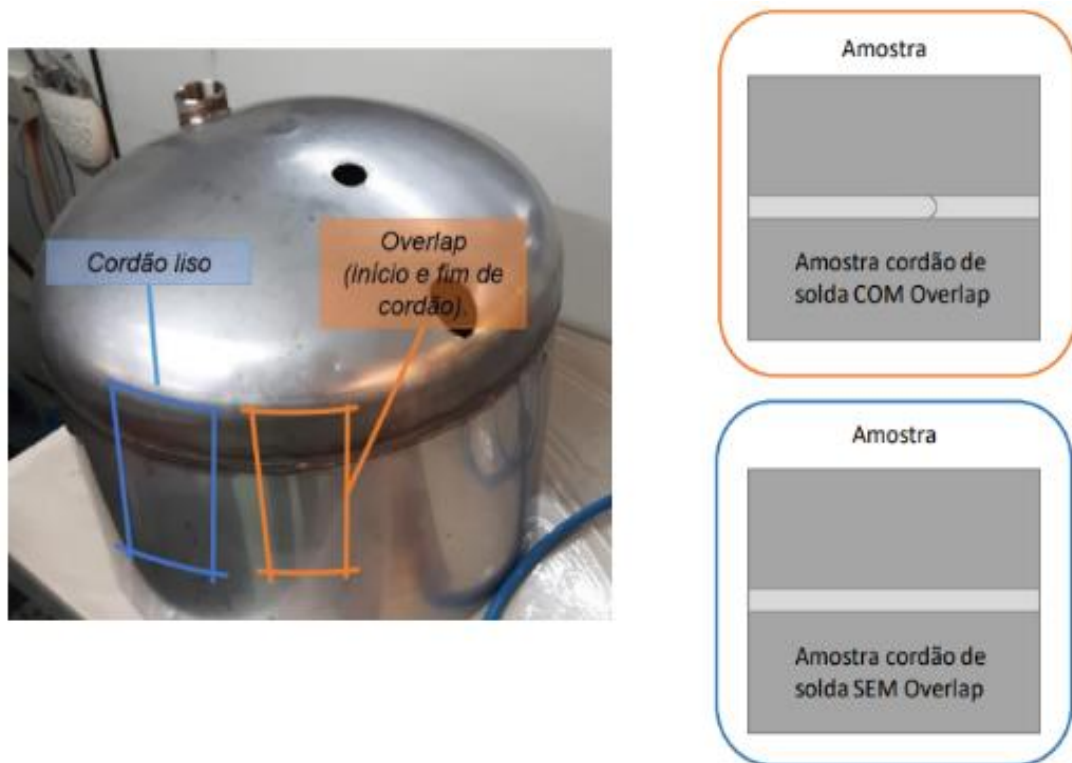
- a) Líquido penetrante conforme a norma ASME seção VIII divisão 1 apêndice 8 para soldas de vaso de pressão e tanques de armazenamento. Teve como objetivo detectar poros, cavidade ou fissuras que chegam até a superfície em análise;
- b) Partículas Magnéticas de acordo com a norma ASTM-E709: Esse ensaio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

soldagem;

c) Ensaio Mecânico de Tração baseada na norma ASTM E8M: Por ser um material isotrópico as propriedades elásticas em um plano são independentes da orientação. Foram realizados os ensaios para se retirar a média dos resultados com intuito de se verificar as propriedades mecânicas da junta soldada, estudo do cordão de solda a gás inerte com eletrodo de tungstênio em chapa de aço inox 304 de espessura reduzida e metal base.

A amostra bruta para os corpos de prova, relativa à metade de um tanque, conforme a Figura 14, foi enviada para a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para preparação e corte das amostras para a realização de caracterizações e ensaios não-destrutivos e destrutivos.

Figura 14 - Amostras do boiler de aço inox AISI 304 para ensaios tecnológicos dos materiais



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os ensaios, foram utilizadas três amostras de aço inox AISI 304 de cada item listado a seguir (Tab. 4):

- Cordão de solda com overlap (CSCO);
- Cordão de solda sem overlap (CSSO);
- Metal base (MB).

Tabela 4 – Amostras para ensaios tecnológicos dos materiais

Teste	Cordão c/ Overlap	Cordão s/ Overlap	Metal Base
Líquido Penetrante	3	3	0
Partícula Magnética	3	3	0
Ensaio Mecânico	3	3	3
Total	9	9	3

Fonte: Elaborada pelo autor.

As amostras dos cordões de solda TIG (“tungsten inert gas”) COM (CSCO) e SEM Overlap (CSSO), que podem ser visualizadas na Fig.15, foram cortadas no LPF/DEMec/UFSCar conforme as dimensões da Tabela 5.

Figura 15 - Amostras cordão de solda COM e SEM Overlap de partes da junção do tanque cilíndrico de aço inox AISI 304 com o tampo estampado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 - Dimensões das amostras confeccionadas para realização dos ensaios não-destrutivos (líquido penetrante), destrutivos de resistência mecânica à tração.

Teste	Cordão c/ Overlap	Cordão s/ Overlap	Metal Base	Dimensões
Líquido Penetrante	3	3	0	250 mm (L) x 100 mm (A)
Partícula Magnética	3	3	0	
Ensaio Mecânico	3	3	3	100 mm (L) x 200 mm (A)
Total	9	9	3	-----

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os ensaios de líquido penetrante e partículas magnéticas, foram divididas as amostras de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Divisão das amostras confeccionadas para os respectivos ensaios.

Líquido Penetrante e Partícula Magnética		
Nome do Grupo de Amostras	Característica	Quantidade
Amostra Tipo 1	Sobre o Overlap	Amostra T1.1
		Amostra T1.2
		Amostra T1.3
Amostra Tipo 2	Sobre o Cordão	Amostra T2.1
		Amostra T2.2
		Amostra T2.3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o ensaio de líquido penetrante, foram verificadas as descontinuidades superficiais.

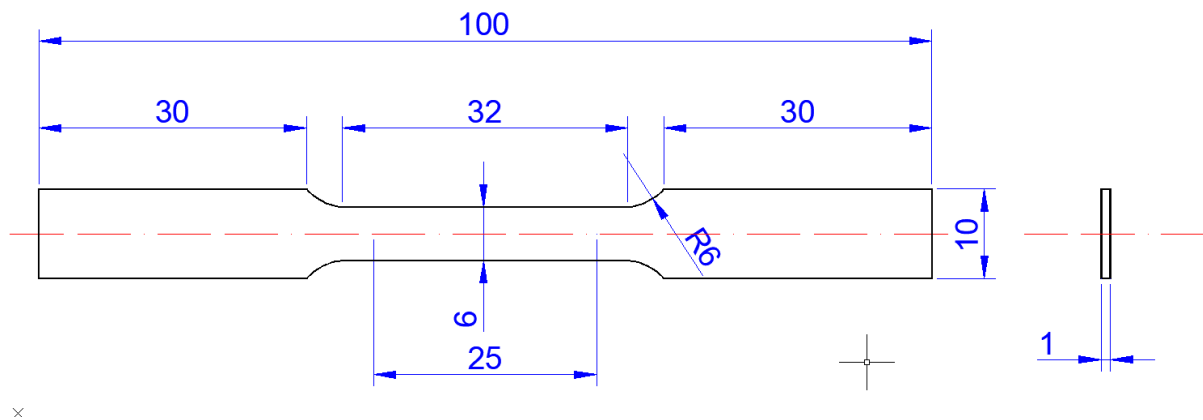
O ensaio de partículas magnéticas teve como objetivo verificar possíveis trincas ou outros defeitos providos do processo de soldagem. O foco é verificar descontinuidades superficiais e subsuperficiais.

Já o objetivo dos ensaios mecânicos 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 as juntas soldadas. O ensaio mecânico 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 mecânicos de tração foram realizados segundo a norma ASTM E8M, seguindo as recomendações:

- a) Medir Carga x Deformação;
- b) Dimensional da amostra deve ser realizado e padronizado:
 - Espessura do cordão e comprimento;
 - Dimensões da chapa (largura e comprimento);
 - Padronizar distância mordente do cordão.
- c) Definir velocidade de tração: sugestão 5mm/min.
- d) Realizar teste com material sem solda nas mesmas dimensões das amostras com cordão;
- e) Confrontar os dados da chapa soldada COM e SEM overlap e o material sem solda.

As amostras para a realização dos ensaios de tração precisaram ser remodelados e foram fabricados de acordo geometria padrão e as dimensões recomendadas pela norma ASTM E8M-13a (Fig.16).

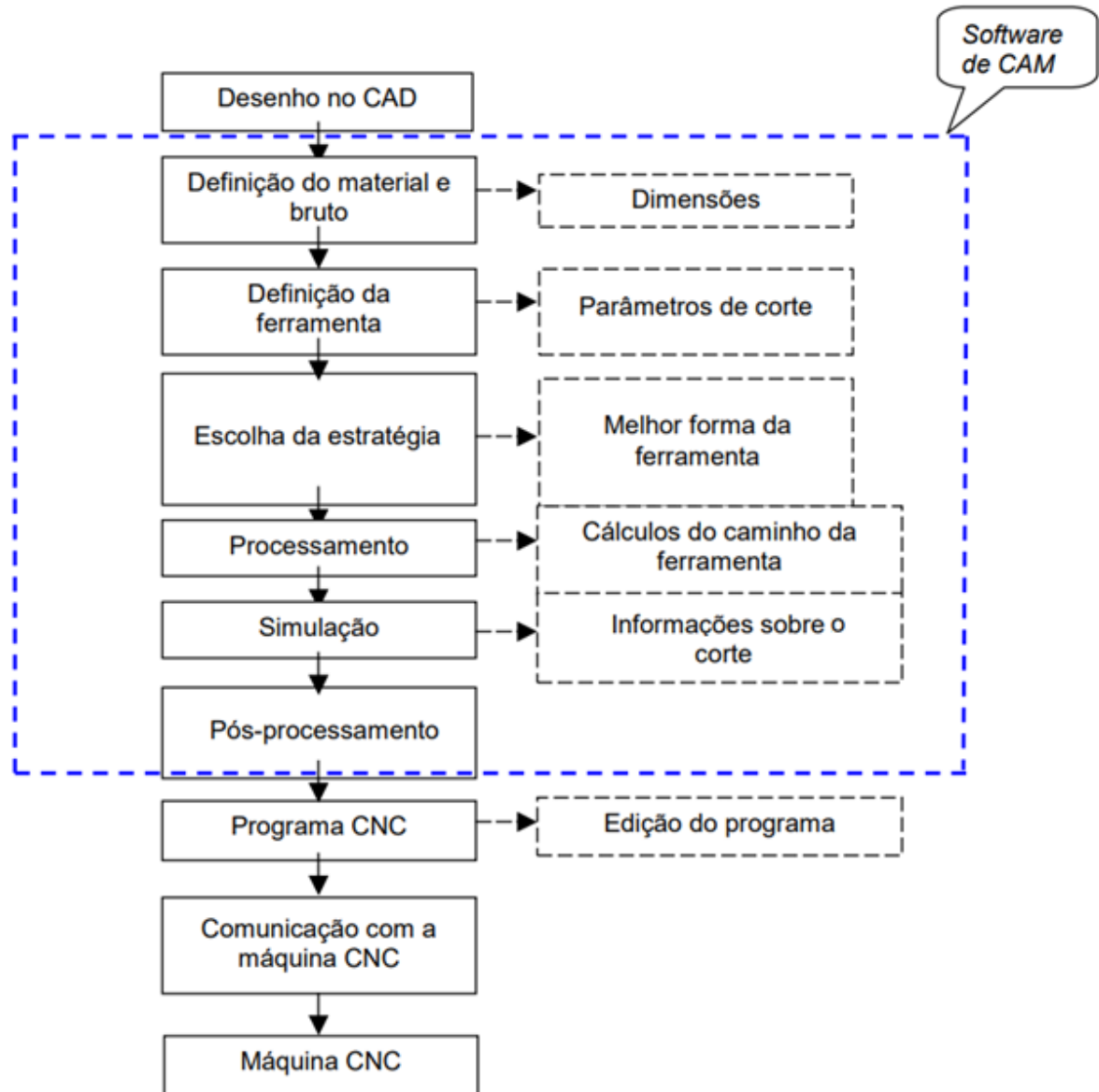
Figura 16 - Desenho esquemático e dimensões recomendadas para as amostras dos ensaios mecânicos de tração uniaxial segundo a norma ASTM E8M-13^a. Estão marcadas em azul, as dimensões adequadas pela norma para posicionar os cordões de solda no ponto



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

O processo para elaboração das amostras será descrito a seguir e foi projetado em etapas de acordo com a Figura 17:

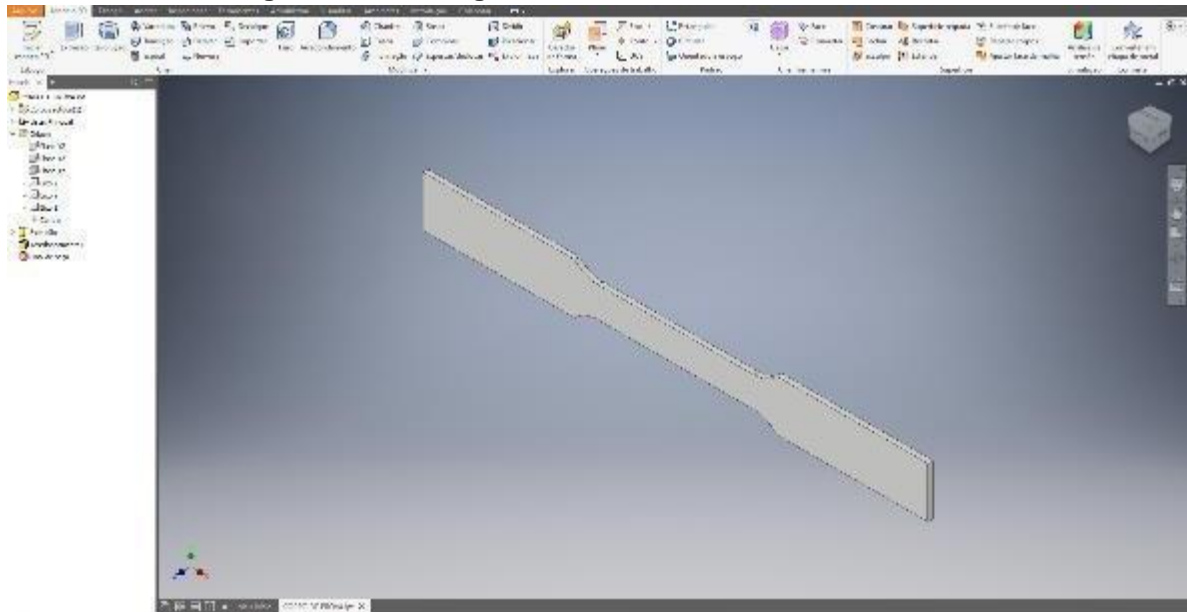
Figura 17 - Fluxograma da geração de um programa CNC através do CAM.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Etapa1: Foi desenvolvido o projeto do corpo de prova no software Autodesk Inventor v2019 como pode ser verificado na Figura 18.

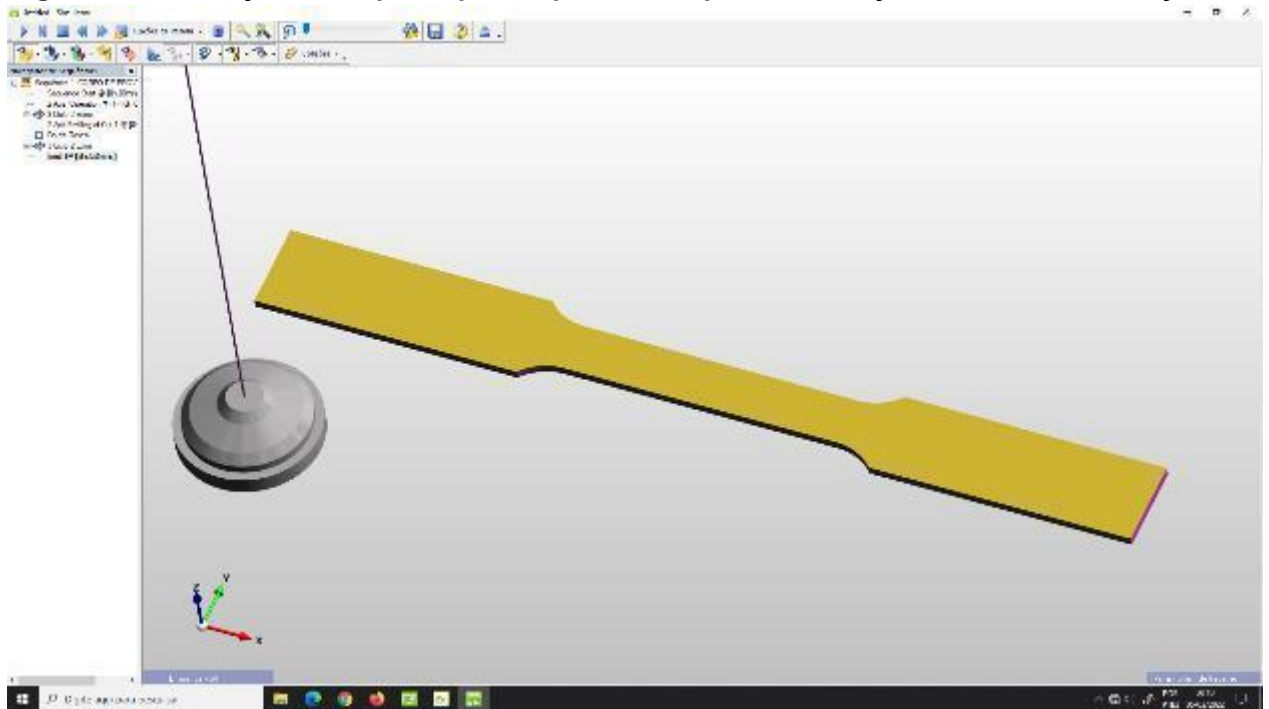
Figura 18 - Modelagem da amostra no Autodesk Inventor



Fonte: Elaborada pelo autor.

Etapa 2: Com o software EdgeCam v2021, foi possível fazer uma simulação da peça a ser cortada e gerar a programação CNC conforme Figura 19.

Figura 19 - Simulação do corpo-de-prova após o corte para a realização dos ensaios de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Etapa 3: Na máquina de corte por eletroerosão, utiliza-se um fio metálico (eletrodo) para recortar um contorno programado em uma peça de trabalho. Assim, foi inserida a programação para o corte das amostras de acordo com as Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 - Máquina de corte a fio por eletroerosão GF AgieCharmilles FL 240 SLP



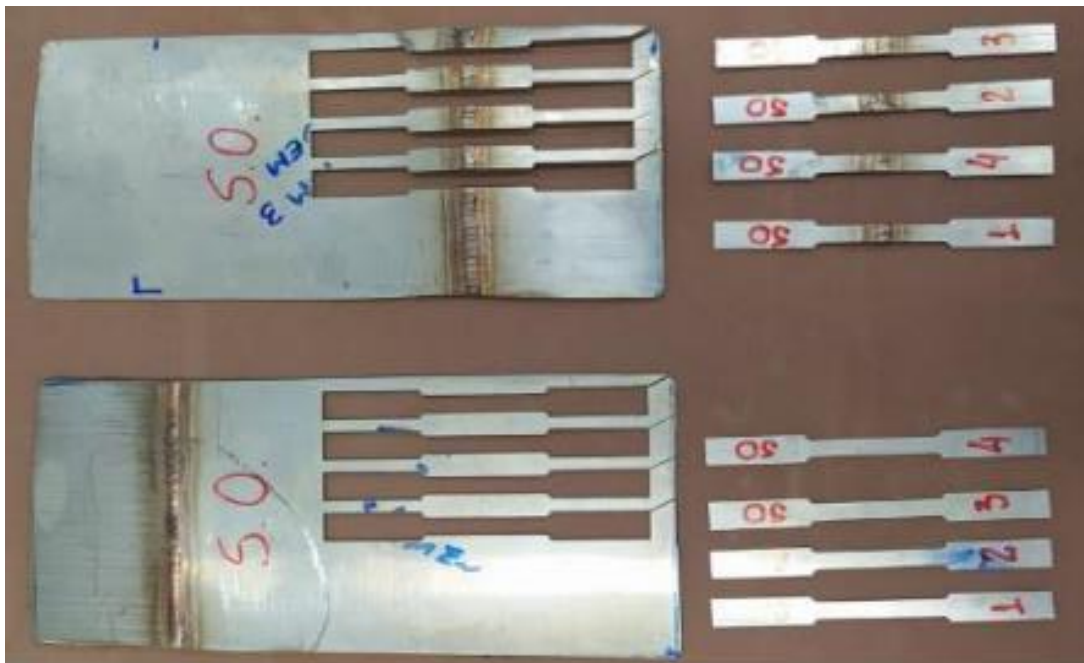
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 - Foto digital dos corpos de prova entre o corpo cilíndrico do tanque de armazenamento de água aquecida (boiler) e o tampo, e da junta entre a solda e o metal de base COM sobreposição (“overlap”).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 - Foto digital dos corpos de prova entre o corpo cilíndrico do tanque de armazenamento de água aquecida (boiler) e o tampo, e da junta entre a solda e o metal de base SEM sobreposição (“overlap”).

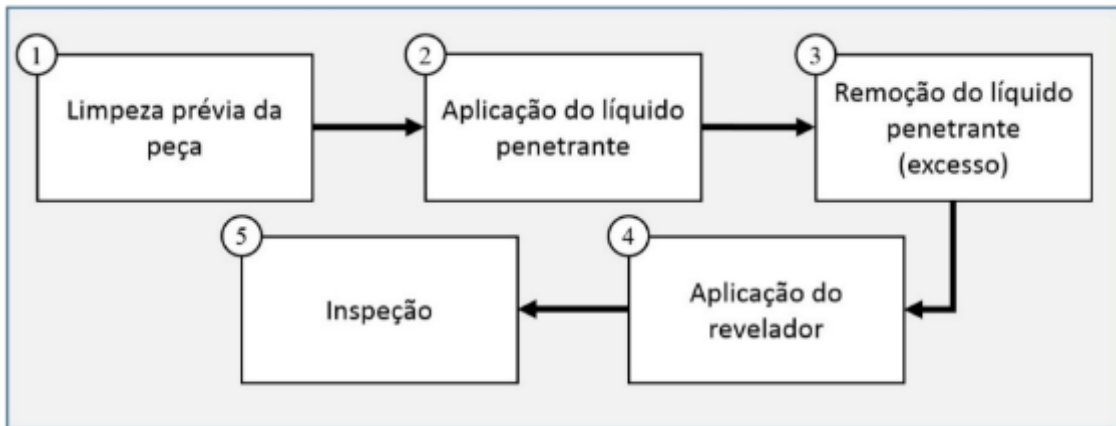


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3. ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE DAS AMOSTRAS DO RESERVATÓRIO DE AÇO INOX AISI 304

Os ensaios de líquido penetrante foram realizados nos corpos de prova soldados e metal base do tanque (aquecedor solar) antes do ensaio de tração. A análise dos aspectos relacionados aos ENDS por LPs em peças soldadas do tanque (aquecedor solar) baseou no fluxograma da Figura 23 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 23 - Fluxograma de ensaios não-destrutivos ENDS por líquido penetrante (LP)



Fonte: Pais Filho e Fujiyama, (2014)

3.3.1. Preparação da Superfície para LP nas Amostras

Utilizou-se o solvente que faz parte dos “kits” de ensaio. É importante lembrar que produtos como thinner é difícil obter um certificado isento 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 foi natural aguardando-se um tempo mínimo de 5 minutos (Fig.24).

Figura 24 - Preparação da superfície para o ensaio de LP



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2. Aplicação do Líquido Penetrante

Possui uma cor visível vermelha intensa e contrastante para identificação de descontinuidades, com características excepcionais de penetração. Por ser facilmente removível com água, gera menos efluente e é ecologicamente correto, além de ser biodegradável (MAGNAFLUX, 2022).

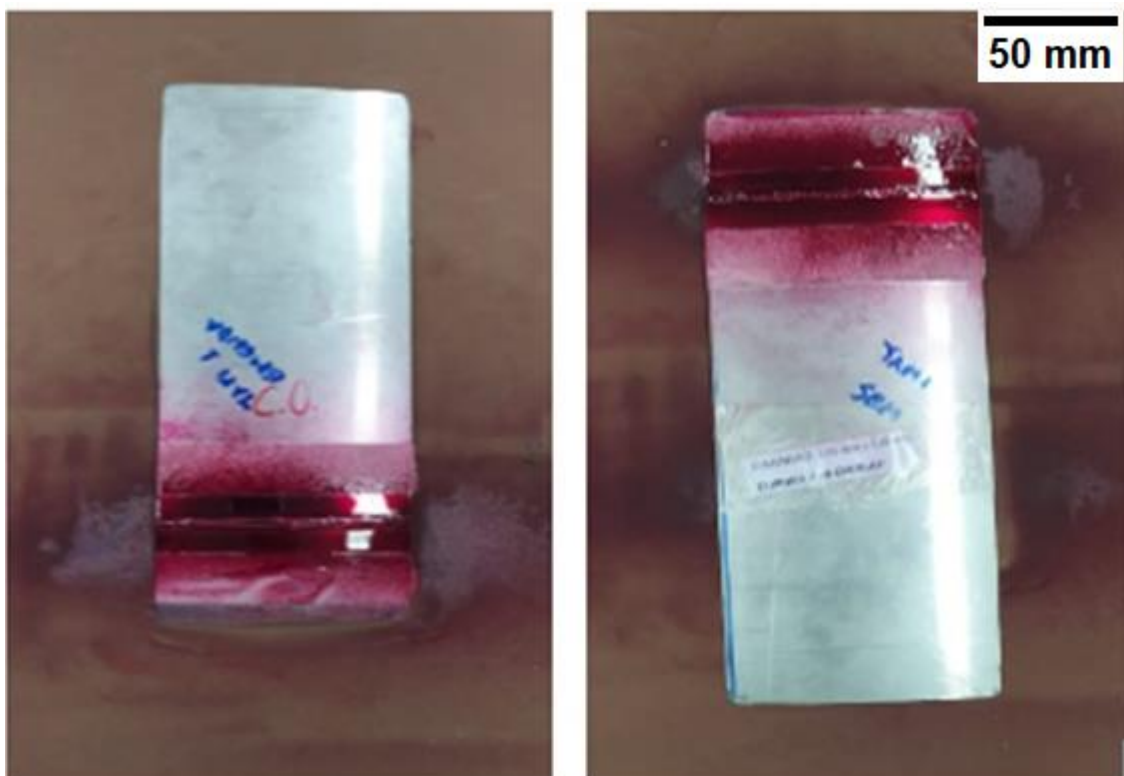
Costuma ser utilizado em soldas, forjados, vasos de pressão, fundidos, metalurgia geral e é adequado a um ambiente de produção em que muitas peças são inspecionadas todos os dias.

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

Conforme Figura 25, foi aplicado o líquido penetrante em aerossol (SKL-WP2) de 20 a 30 cm da peça. Este é um penetrante lavável a água que elimina a necessidade de solventes ou emulsificantes para a remoção do excesso de penetrante da superfície da área inspecionada.

O tempo de penetração foi de no mínimo 15 minutos e no máximo 30 minutos.

Figura 25 - Aplicação do líquido penetrante (LP)



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.3. 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 pano limpo conforme Figura 26.

Figura 26 - Remoção do excesso LP



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.4. Aplicação do Revelador

Foi utilizado o revelador SKD-S2, MAGNAFLUX. Trata-se de um produto 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 (MAGNAFLUX, 2022). O seu uso é adequado para avaliações de solda. O SKD-S2 consta na Lista de Produtos Qualificados (QPL) SAE AMS 2644.

O revelador foi aplicado imediatamente após a secagem / limpeza da superfície, seguindo as recomendações do fabricante. O produto foi aplicado na forma de spray, sendo pulverizado à uma distância de 20 a 30 cm da peça (Fig.27). A camada precisa ser de espessura uniforme. O excesso, ou a falta do revelador, pode gerar falhas na interpretação das indicações. Após o revelador secar, observou-se o aparecimento de indicações de pontos de descontinuidades.

Figura 27 - Aplicação do revelador



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4. ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

A preparação da superfície da amostra do corpo do reservatório para o ensaio de partículas magnéticas, foi o mesmo adotado no item 3.2.1.

3.4.1. Aparelho Yoke Eletromagnético

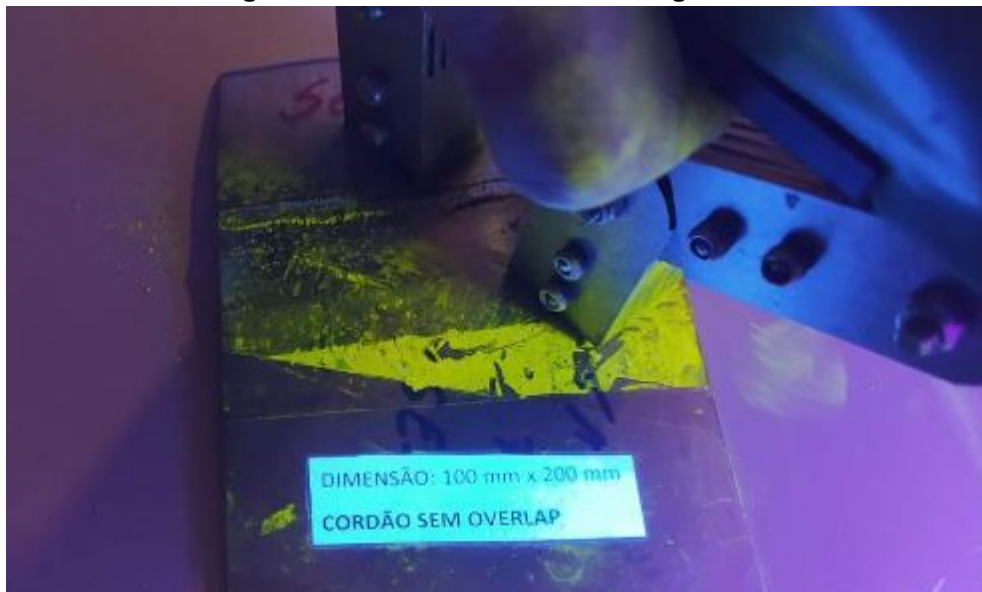
O equipamento utilizado para a realização do ensaio de partículas magnéticas foi o modelo Yoke eletromagnético de corrente alternada 220 V (Y-6 Slim).

Com aproximadamente 3,0 kg pode ser considerado um dos mais leves e ergonômicos Yokes do mercado e possui design ergonômico (Fig.28). 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, 2022).

Figura 28 – Aparelho Yoke Y6

Fonte: Elaborada pelo autor.

No momento em que o Yoke é acionado com as sapatas posicionadas sobre a superfície das amostras dos corpos de prova de solda com overlap e sem overlap, gerou-se um campo magnético que foi induzido no sentido longitudinal entre as sapatas, na superfície da peça conforme Figura 29.

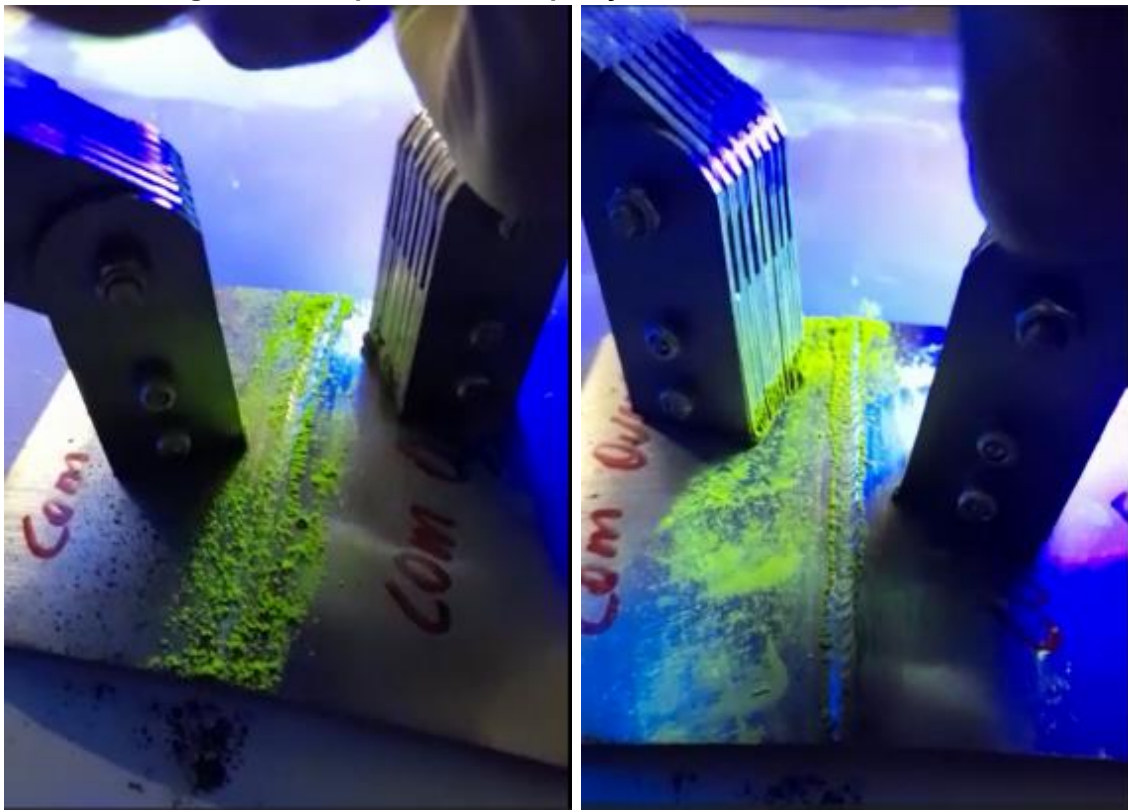
Figura 29 – Ensaio de Partículas Magnéticas

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi utilizada uma luminária portátil de luz de led ultravioleta para verificar as descontinuidades superficiais ou levemente subsuperficiais localizadas perpendicularmente ao sentido do fluxo magnético aplicado. Assim, gerou-se um campo de fuga de fluxo magnético atraindo as partículas magnéticas. Foi este acúmulo de partículas que deu forma as indicações.

Ao inspecionar toda a região, foi realizado em sobreposição as áreas do cordão de solda, em forma de cruz ou xis (Fig.30), sendo que cada área foi verificada duas vezes, a procura de descontinuidades perpendiculares ao sentido do fluxo aplicado.

Figura 30 – Esquema de sobreposição, em forma de cruz ou xis



Fonte: Elaborada pelo autor.

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

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 (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2012).

Por conta da pandemia de Covid 19, os ensaios de tração foram realizados no

Laboratório de Ensaios Mecânicos 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 (Fig.31).

Figura 31 - Máquina universal de ensaios modelo: WDW-300E



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o controle dos parâmetros de ensaios foi utilizado o software VERSA-Software V01-08. Os parâmetros utilizados durante os ensaios de tração estão descritos nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 - Parâmetros utilizados nos ensaios de tração

Controle de Ensaio Mecânico

Métodos

Métodos | Passo a passo | Configurações | Ensaio | Relatórios

Localizar Método: CP01_MB

Ordenar por: Data

Data: 18/03/202

Quantidade de lote: 1

Força: N KN Kgf Tf

Carga máxima prevista: 6000 N

Sentido: Tração Compressão Flexão

Tipo de velocidade: Por deslocamento 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 % Distancia 0,1 %

Tipo do extensômetro: Pequenas deformações Grandes deformações Nenhum

Zerar a tara: Nunca Opcional Sempre

Salvar Cancelar

Novo Alterar Excluir

(415/0) OK! Pacote: 1B 06 C0 90 01 18 1B FD 01 00 D2 87 00 36 01 00 00 0A 0E 00 1C 00 DC 09 00 00 01 C6 FF FF 1B 03 07 (0)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 - Parâmetros utilizados nos ensaios de tração

Controle de Ensaio Mecânico

Configurações

Métodos | Passo a passo | Configurações | Ensaio | Relatórios

Senha do sistema: Protegido por senha Troca da senha

Informações sobre o banco de dados: Nome: PosiLab-V4.Fdb Tamanho: Mbytes Total de métodos: 35 Total de lotes: 25 Total de ensaios: 32 Total de pontos dos gráficos: 165675

Cópia de segurança: Backup automático Período em horas: 0 Backup manual Nome padrão: Restaura arquivos: Banco de dados Arquivo de calibração Arquivo de inicialização Restaurar backup

Porta de comunicação utilizada: Porta: COM1

Célula de carga conectada: Célula: 1 Capacidade: 100 Unidade: KN Status: OK

Informações do Sistema: Proprietário: Modelo da máquina: Versat-100 Células de carga disponíveis: Célula 1 100 KN Pasta de trabalho: C:\Program Files\MUE ETEC MATAO Arquivo calibra: CalibraNs1077.Versat-100.Cal Versão da placa: Versão do software da placa: Versão OK: "Panambra00cA 05/07/13 LX" Pasta do FireBird: C:\Program Files\Firebird\Firebird_2_5\bin Data da última calibração: 15/09/2012 Coloca data de calibração no relatório: Versão do software Panambra: PosiLab/V4/0/0-01.A.D.0

Salvar Cancelar

(306/0) OK! Pacote: 1B 06 C0 90 01 18 26 FE 00 00 36 50 02 36 01 00 00 0A 08 00 28 00 FC 09 00 00 01 18 01 00 1B 03 4F (16)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 34 apresenta a montagem utilizada nos experimentos da máquina de ensaios mecânicos de tração.

Figura 34 - Preparação da máquina de para os ensaios de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Nesta etapa foram analisadas as amostras do reservatório do aquecedor solar da Empresa Solis contendo componentes soldados e metal base.

3.6.1. 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.

A título de exemplo, o critério de aceitação que segue, é uma tradução livre do Código ASME Sec. VIII Div.1 Apêndice 8 que é igual à Sec. I

✓ 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);

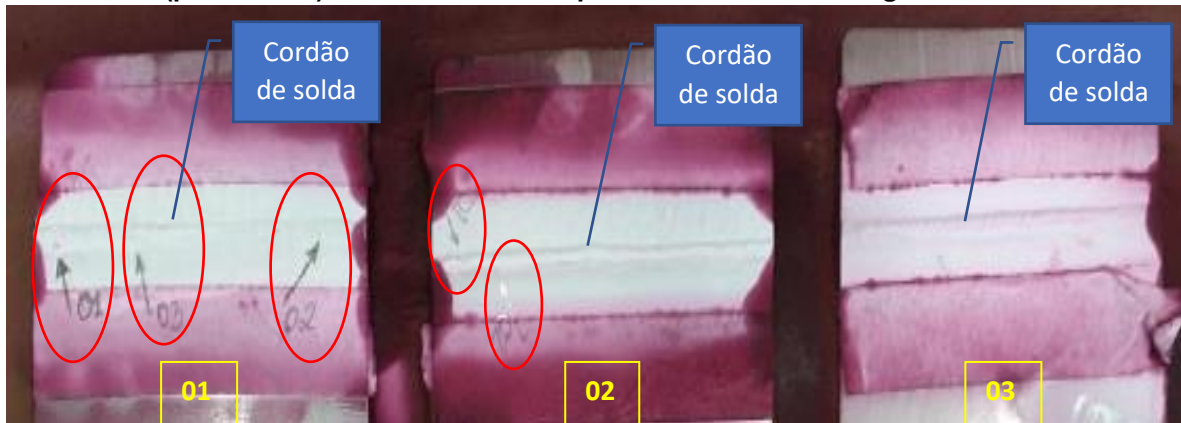
c) quatro ou mais indicações relevantes arredondadas em linha separadas por 1/16 pol. (1,5 mm) ou menos (de borda a borda);

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.

a) Corpo de prova do tampo com overlap (Fig.35)

- Amostra T1.1 apresentou três pontos de descontinuidade (porosidade);
- Amostra T1.2 apresentou dois pontos de descontinuidade (porosidade).
- Amostra T1.3 não apresentou nenhuma irregularidade.

Figura 35 - Corpo de prova do tampo com overlap (CSCO) – LP. Amostra 01 com três pontos de descontinuidade (porosidade), Amostra 02 com dois pontos de descontinuidade (porosidade) e Amostra 03 não apresentou nenhuma irregularidade.

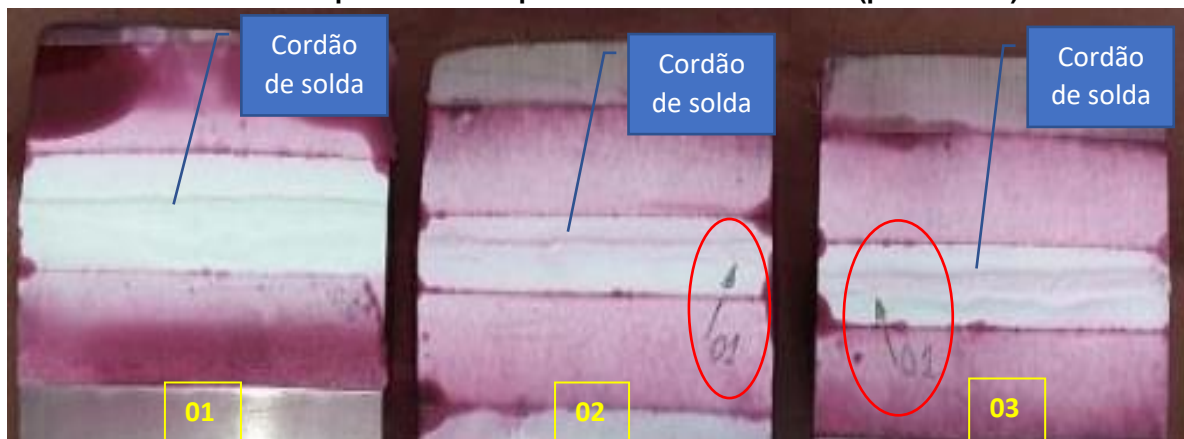


Fonte: Elaborada pelo autor.

b) Corpo de prova tampo sem overlap (Fig.36)

- Amostra T2.1 não apresentou nenhuma irregularidade;
- Amostra T2.2 apresentou um ponto de descontinuidade (porosidade).
- Amostra T2.3 apresentou um ponto de descontinuidade (porosidade);

Figura 36 - Corpo de prova tampo sem overlap (CSSO) – LP. Amostra 01 não apresentou nenhuma irregularidade, Amostra 02 apresentou um ponto de descontinuidade (porosidade) e Amostra 03 apresentou um ponto de descontinuidade (porosidade).



Fonte: Elaborada pelo autor.

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

3.6.2. Resultados dos Ensaios de Partículas Magnéticas

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

➤ 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.

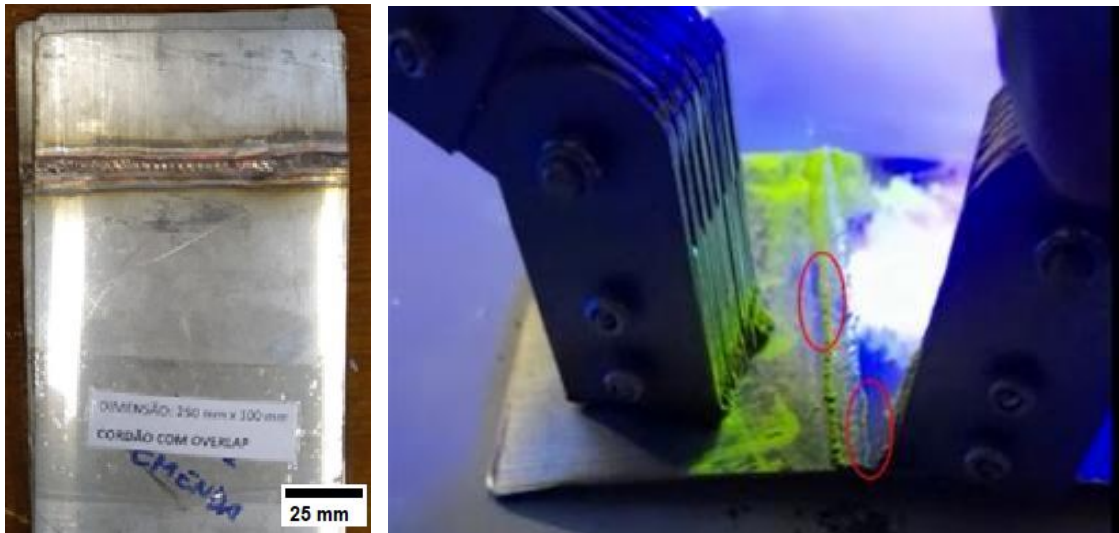
- ✓ Técnica de magnetização;
- ✓ Tipo ou amperagem de corrente elétrica para magnetização;
- ✓ Preparação da superfície;
- ✓ Tipo de partículas magnéticas usadas;
- ✓ Método de aplicação das partículas;
- ✓ Método de remoção do excesso de partículas da superfície.
- ✓ Intensidade mínima de iluminação;
- ✓ 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.

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 atrairão as partículas magnéticas dando forma às indicações.

a) Corpo de prova do tampo com overlap (Fig.37)

- Amostra T1.1 apresentou muitas mordeduras na margem do cordão de solda;
- Amostra T1.2 apresentou mordeduras ao longo do cordão;
- Amostra T1.3 apresentou mordeduras ao longo do cordão;

Figura 37 - Corpo de prova tampo com overlap (CSSO) – PM. Amostra 01 apresentou muitas mordeduras na margem do cordão de solda, Amostra 02 apresentou mordeduras ao longo do cordão e Amostra 03 apresentou mordeduras ao longo do cordão;

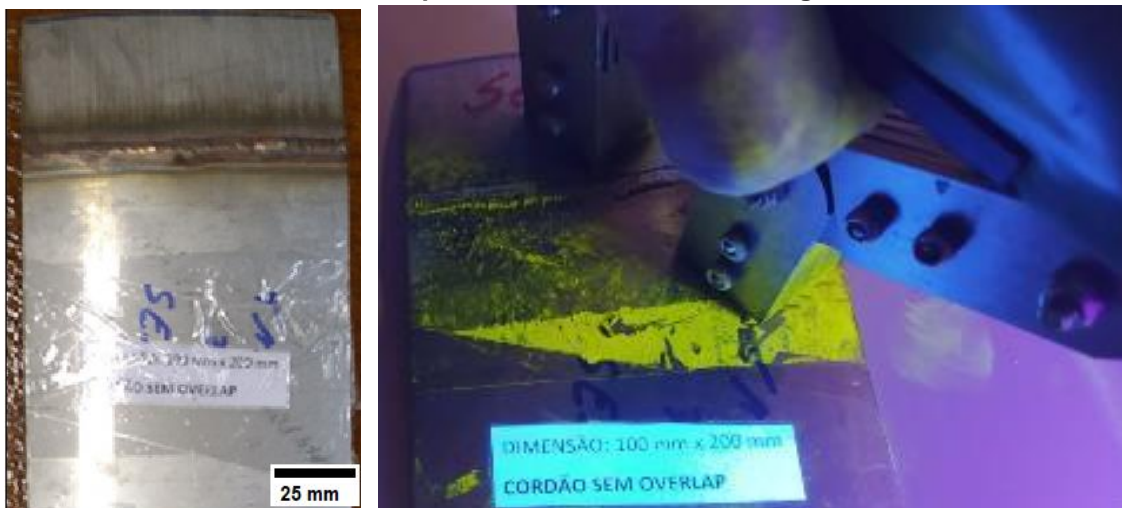


Fonte: Elaborada pelo autor.

b) Corpo de prova tampo sem overlap (Fig.38)

- Amostra T2.1 apresentou mordeduras ao longo do cordão;
- Amostra T2.1 apresentou mordeduras na margem do cordão de solda;
- Amostra T2.1 apresentou mordeduras ao longo do cordão;

Figura 38 - Corpo de prova tampo sem overlap (CSSO) – PM. Amostra 01 apresentou mordeduras ao longo do cordão, Amostra 02 apresentou mordeduras na margem do cordão de solda e Amostra 03 apresentou mordeduras ao longo do cordão;



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.3. Resultados dos Ensaio Mecânicos de Tração

Após o corte e preparação das amostras, notou-se que as mesmas têm espessuras diferentes devido ao processo de fabricação dos reservatórios. O corpo do reservatório possui espessura de 1mm e o tampo do reservatório 1,5 mm.

A amostra do Metal Base (MB) que foi retirada da chapa do corpo do reservatório, possui 1 mm de espessura. Já as amostras de Cordão de Solda com Overlap (CSCO) e Cordão de Solda sem Overlap (CSSO), no mesmo corpo de prova, de um lado da união da chapa soldada possui 1 mm - correspondente ao corpo do reservatório e do outro lado da amostra, a chapa possui 1,5 mm de espessura que corresponde tampo do reservatório. Para o cálculo da área, foi adotada a de menor espessura sendo a chapa de 1 mm e largura 6 mm, ou seja, 6 mm² com intuito de padronizar as medidas das amostras.

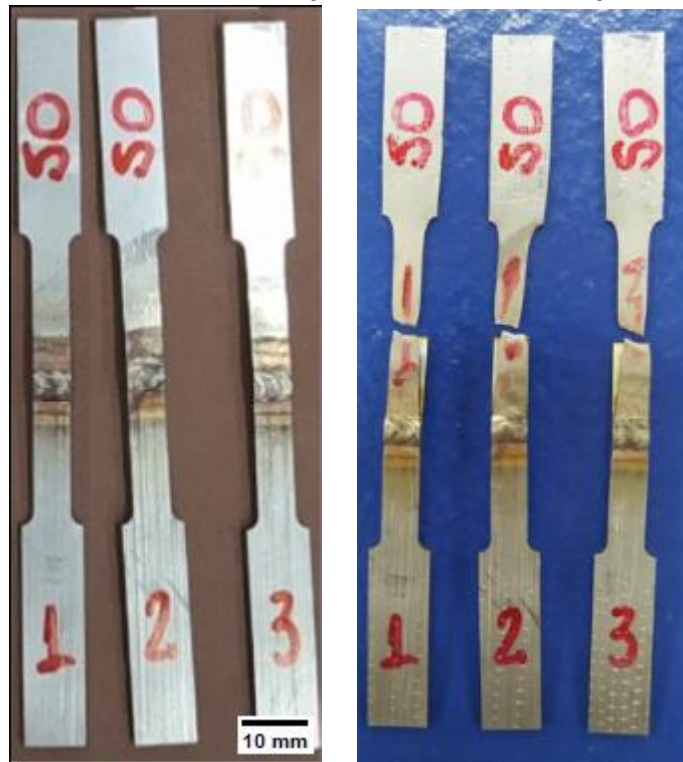
As imagens a seguir, ilustraram o antes e depois do ensaio de tração (Fig. 39, 40 e 41).

Figura 39 - Amostra com overlap antes do ensaio e depois do ensaio.



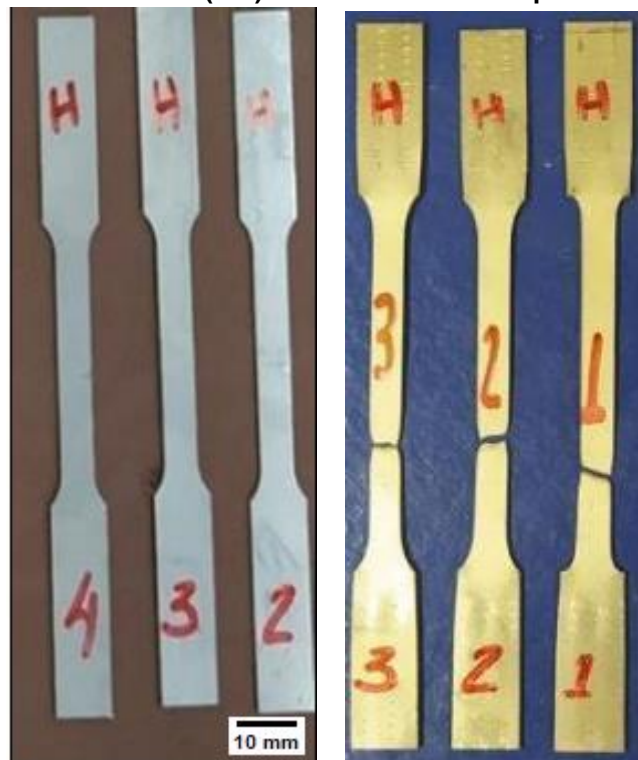
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 - Amostra sem overlap antes do ensaio e depois do ensaio.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 - Amostra metal base (MB) antes do ensaio e depois do ensaio de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para efeito comparativo, os valores especificados segundo a norma AISI para o Metal Base aço inox 304 laminado possuem os seguintes dados:

- a) limite de escoamento (LE) de 234 MPa;
- b) limite de resistência (LRT) de 586 MPa;
- c) alongamento (%AL) de 60%.

A seguir serão apresentados na Tabela 7, os parâmetros principais capturados nos ensaios mecânicos de tração:

- a) Limite de escoamento;
- b) Limite de resistência;
- c) Alongamento.

Tabela 7 – Parâmetros dos gráficos nos ensaios de tração das amostras.

METAL BASE										
Amostra	t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)	
CP1_MB	1,0	6,0	36,0	1306,2	3837,5	25,0	217,7	639,6	69,6	
CP2_MB	1,0	6,0	36,0	1374,7	4029,3	27,1	229,1	671,5	75,4	
CP3_MB	1,0	6,0	36,0	2442,0	3243,0	27,5	407,0	540,5	76,5	
							Média	284,6	617,2	73,8
							Desvio padrão	106,2	68,3	3,7
CORDÃO DE SOLDA C/ OVERLAP										
Amostra	t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)	
CP1_CSCO	1,0	6,0	36,0	1320,0	2728,6	10,5	220,2	454,8	29,1	
CP2_CSCO	1,0	6,0	36,0	1605,1	3875,1	10,9	267,5	645,9	30,2	
CP3_CSCO	1,0	6,0	36,0	1455,4	2919,7	9,1	242,6	486,6	25,3	
							Média	243,4	529,1	28,2
							Desvi	23,7	102,4	2,6
CORDÃO DE SOLDA S/ OVERLAP										
Amostra	t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)	
CP1_CSSO	1,0	6,0	36,0	1211,1	2402,5	13,7	201,9	400,4	38,2	
CP2_CSSO	1,0	6,0	36,0	1211,4	2623,2	14,8	201,9	437,2	41,0	
CP3_CSSO	1,0	6,0	36,0	1681,6	3748,8	18,3	280,3	624,8	50,8	
							Média	228,0	487,5	43,3
							Desvio padrão	45,3	120,3	6,6

t0 (mm)	w0 (mm)	L0 (mm)	Fy (N)	Fu (N)	dL (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	AI (%)
Espessura da chapa	Largura	Comprimento Total	Força	Força Máxima	Deformação Linear	Limite de Escoamento	Limite de Resistência a Tração	Alongamento

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 7, pode-se observar os seguintes resultados do ensaio mecânico de tração:

1) A resistência à tração do MB - Metal de Base (chapa de aço inox 304 laminada de 1 mm de espessura) apresentou os seguintes valores médios:

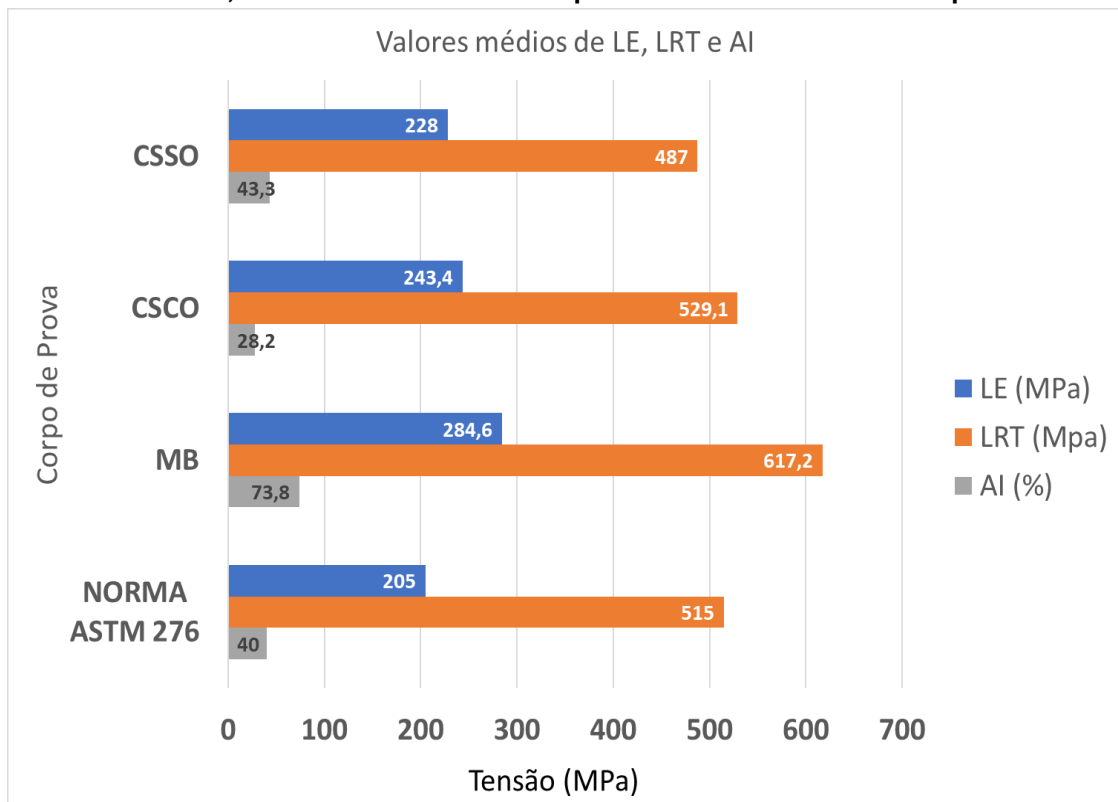
- a) limite de escoamento (LE) de 284,6 MPa;
- b) limite de resistência (LRT) de 617,2 MPa;
- c) alongamento (%AL) de 73,8%.

2) O corpo de prova CSCO - Cordão de Solda com Overlap, possui as seguintes características: chapa de aço inox 304 laminada de 1 mm de espessura no corpo do reservatório e união (solda TIG) na chapa de aço inox 304 laminada de 1,5 mm de espessura no tampo. A resistência à tração do ensaio apresentou os seguintes valores médios: a) limite de escoamento (LE) de 243,4 MPa; b) limite de resistência (LRT) de 529,1 MPa; c) alongamento (%AL) de 28,2%.

3) O corpo de prova CSSO - Cordão de Solda sem Overlap, possui as seguintes características: chapa de aço inox 304 laminada de 1 mm de espessura no corpo do reservatório e união (solda TIG) na chapa de aço inox 304 laminada de 1,5 mm de espessura no tampo. A resistência à tração do ensaio apresentou os seguintes valores médios: a) limite de escoamento (LE) de 228,0 MPa; b) limite de resistência (LRT) de 487,5 MPa; c) alongamento (%AL) de 43,3%.

A Figura 42 mostra o gráfico com os valores médios obtidos nos ensaios mecânicos de tração sobre LE, LRT e AL (%) do Metal Base, Cordão de Solda c/ Overlap e Cordão de Solda s/ Overlap com relação a norma ASTM 276.

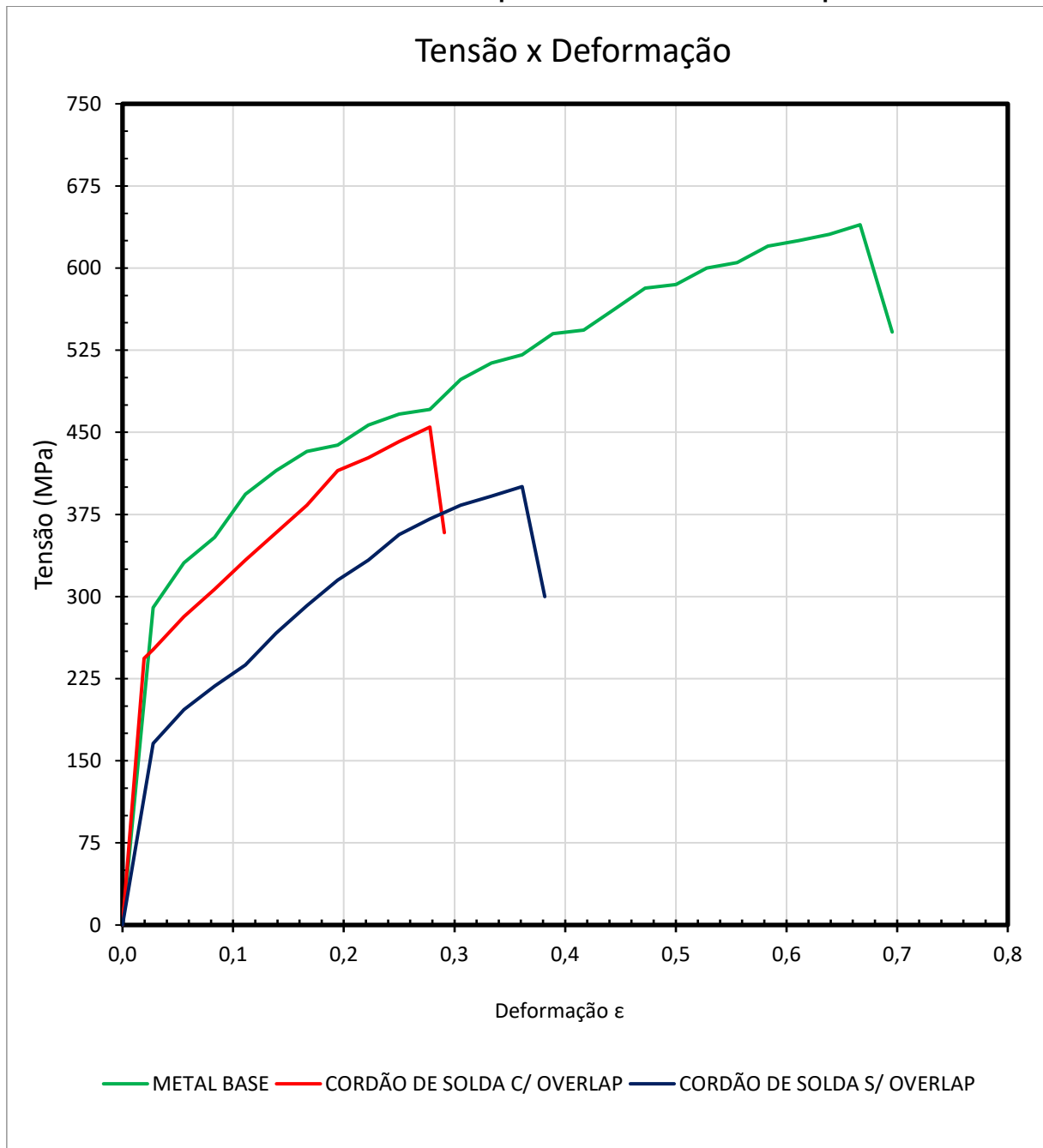
Figura 42 - Dados dos ensaios de tração - Gráfico – Valores Médios de LE, LRT e AL (%) Metal Base, Cordão de Solda c/ Overlap e Cordão de Solda s/ Overlap



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 43 mostra o gráfico de curvas e dados com os parâmetros obtidos nos ensaios mecânicos de tração. Optou-se por uma figura com as curvas intermediárias para efeito de comparação visual entre os resultados.

Figura 43 - Curvas e Dados dos valores médios dos Ensaios de Tração - Gráfico – Metal Base, Cordão de Solda c/ Overlap e Cordão de Solda s/ Overlap



Fonte: Elaborada pelo autor.

CONCLUSÕES

Na fabricação de vasos de pressão para utilização em aquecedores solar, identificou-se que é necessária uma junta de solda de boa resistência devendo suportar alta resistência à tração. Os resultados obtidos com os testes realizados foram satisfatórios.

No ensaio de líquido penetrante, três amostras de soldagem TIG manual com overlap houve uma dispersão pequena nos resultados. Obteve-se juntas soldadas com porosidade e sem porosidade podendo indicar potenciais pontos de vazamentos no reservatório em questão.

Já nas três amostras do ensaio de líquido penetrante para a soldagem TIG manual sem overlap, o início e fim do cordão carregam uma criticidade com expectativa encontrada de menor porosidade nestas regiões.

O ensaio de partículas magnéticas apresentou nas seis amostras de soldagem TIG manual com e sem overlap, descontinuidades apresentando mordeduras na margem do cordão de solda e mordeduras ao longo do cordão ilustrando uma redução da espessura da junta podendo ocasionar falta de fusão ou de inclusão de escória.

No ensaio de tração, os dados obtidos para o limite de escoamento não tiveram influência por ser um material isotrópico sendo que as propriedades elásticas em um plano são independentes da orientação.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 7, pode-se concluir que a resistência à tração do Metal de Base apresentou os valores médios: limite de escoamento (LE) de 284,6 MPa, ou limite de resistência a tração (LRT) de 617,2 MPa, e alongamento (%AL) de 73,8%, são maiores que os valores o Cordão de Solda com Overlap com valores de limite de escoamento LE = de 243,4 MPa, limite de resistência a tração (LRT) de 529,1 MPa, e alongamento (%AL) de 28,2%, maiores também que os valores o Cordão de Solda sem Overlap com valores de limite de escoamento LE = de 228,0 MPa, tensão de resistência a tração (LRT) de 487,5 MPa, e alongamento (%AL) de 43,3%

Nas amostras Cordão de Solda com Overlap (CSCO) e Cordão de Solda sem Overlap (CSSO) onde as chapas possuem espessuras diferentes – 1,5 mm para o tampo e 1 mm para o corpo do reservatório, como já era esperado, visualmente a ruptura da chapa ocorreu na espessura menor (1 mm). Por este motivo, foi considerado o valor de tensão da chapa de menor espessura.

Em relação a resistência mecânica a tração, o cordão de solda tem resistência superior a resistência do próprio material comparando os dados dos ensaios de tração. Os dados demonstram que o cordão de solda é resistente a tração sendo superior a resistência do próprio material base.

Desta forma, com os valores analisados pode-se concluir que a solda possui resistência maior que o material da chapa indicando que na região da ZTA da chapa de inox AISI 304 laminada foi alterada, modificando suas propriedades mecânicas e conferindo maior ductilidade.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME - **Boiler and Pressure Vessel Code**, section VIII, division 1 and 2. New York, 2013.

AHMADI, E.; EBRAHIMI, A. R. **Welding of 316L Austenitic Stainless Steel with Activated Tungsten Inert Gas Process**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 24, n. 2, p. 1065–1071, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1336-6>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 276**: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. West Conshohocken. 04 p., 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E709-95**: Standard Guide for Magnetic Particle Examination. West Conshohocken, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 16 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2021. 30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM-ISO12707** - Ensaio não destrutivo - Partículas magnéticas - Terminologia (ISO 12707:2016, IDT). Rio de Janeiro, 2019. 15p.

BIEKŠA, E.; MANKUTE, R.; BARGELIS, A. **Influence of stainless steel circular pipes welding methods and parameters to the process accuracy and productivity**. *Mechanika*, v. 19, n. 2, p. 229–235, 2013. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.19.2.4161>.

CHAUDHARY, Jigar; JAIN, Neelesh Kumar; PATHAK, Sunil; KORIA, S. C. **Investigations on thin SS sheets joining by pulsed micro-plasma transferred arc process**. Journal of Micromanufacturing, p. 1–10, 2019.

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.

DEVAKUMAR, D; JABARAJ, DB. **Research on Gas Tungsten Arc Welding of Stainless Steel—An Overview**. International Journal of Scientific & Engineering Research, v. 5, n. 1, p. 1612, 2014. .

DOKME, Fatih; KULEKCI, Mustafa Kemal; ESME, Ugur. **Microstructural and mechanical characterization of dissimilar metal welding of inconel 625 and aisi 316l**. Metals, v. 8, n. 10, 2018. <https://doi.org/10.3390/met8100797>.

FARIAS, Evander Luiz Abreu. **ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE: APLICADO EM CHAPAS SOLDADAS POR ARAME TUBULAR, ELETRODO REVESTIDO E PROCESSO MIG**. 2014. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Construção Naval, Tecnólogo em Construção Naval, Universidade Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.uezo.rj.gov.br/tcc/cn/Evander-Luiz-Abreu-Farias.pdf>. Acesso 16 mar. 2022.

GARCIA, A.; Spim, AJ.; Santos, AC. **Ensaio dos Materiais**. 1ªEd. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GHADI, Gurudatt; S., Dr. Shivakumar. **Analysis of TIG Welding Process Parameters for Stainless Steel (SS202)**. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, v. 3, n. 10, p. 66–70, 2016. <https://doi.org/10.22161/ijaers/3.10.13>.

JIANG, Haihong; QIN, Guouang; FENG, Chao; MENG, Xiang. **High-speed tandem pulsed gtaw of thin stainless steel plate**. Welding Journal, v. 98, n. 8, p. 215S-226S, 2019. <https://doi.org/10.29391/2019.98.019>.

JURICA, M.; KOŽUH, Z.; GARAŠIĆ, I.; BUŠIĆ, M. **Optimization of the A-TIG welding for stainless steels**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 329, n. 1, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/329/1/012012>.

KIM, Taewon; SUGA, Yasuo; KOIKE, Takashi. **Welding of Thin Steel Plates by Hybrid Welding Process Combined TIG Arc with YAG Laser**. JSME Internacional Journal, v. 46, n. 3, p. 202–207, 2003.

KUMAR, R; SUNDARA BHARATHI, S R. **A Review Study on A-TIG Welding of 316 L Austenitic Stainless Steel**. International Journal of Emerging Trends in Science and Technology, v. 02, n. 03, p. 2066–2072, 2016

MAGNAFLUX. **Líquido Penetrante**. Disponível em: <https://magnaflux.com.br/produtos/liquidos-penetrantes/consumiveis/skl-wp2/>. Acesso em: 17 mar. 2022.

MODENESI, PAULO J. **Descontinuidade e inspeção em juntas de solda**. Apostila. Belo Horizonte, UFMG, 2001.

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.

MOHAN KUMAR, S.; SIVA SHANMUGAM, N. **Studies on the weldability, mechanical properties and microstructural characterization of activated flux TIG welding of AISI 321 austenitic stainless steel**. Materials Research Express, v. 5, n. 10, 2018. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad99f>.

OGUNDIMU, E. O.; AKINLABI, E. T.; ERINOSHO, M. F. **Comparative Study between TIG and MIG Welding Processes**. Journal of Physics: Conference Series, v. 1378, n. 2, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022074>.

PATEL, Naitik S; RAHUL, Prof; PATEL, B. **A Review on Parametric Optimization of Tig Welding**. International Journal of Computational Engineering Research||Vol, v. 04, n. 1, p. 27–31, 2014.

ROY, J. G.; YUVARAJ, N.; VIPIN. **Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Cold Metal Transfer Welded Thin AISI 304 Stainless-Steel Sheets.**

Transactions of the Indian Institute of Metals, v. 74, n. 9, p. 2397–2408, 2021.

SAE AMS 2644 H: 2020 **Inspection Material Penetrant.** Disponível em: <https://www.sae.org/standards/content/ams2644h/preview/>. Acesso em: 07 set. 2023.

SOUZA A. S. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos.** 5 ed. São Paulo, 2000.

XU, H. et al. **Residual stress and deformation of ultra-thin 316 stainless steel plate using pulsed laser welding process.** Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution, v. 40, n. 8, p. 50–54, 2019.

ZOLIN, Ivan. **Ensaaios Mecânicos e Análises de Falhas.** 2011. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Acesso em: 19 mar. 2022.

Disponível em: http://redeetec.mec.gov.br/ensaaios_mec/161012_ens_mec_an_fal.pdf.

APÊNDICE A – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 1 – Cordão de Solda c/ Overlap_CP_01

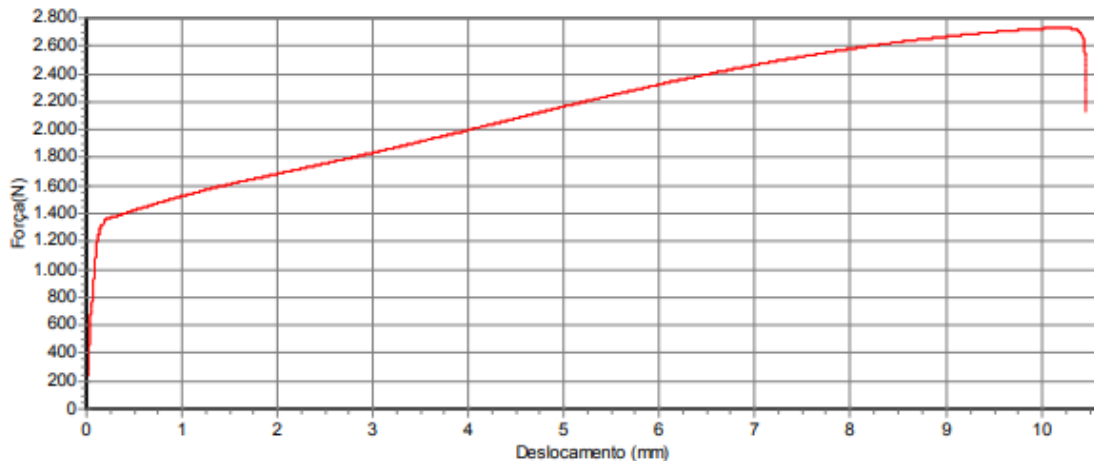
ETEC MATÃO

Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote: CP01 Data do lote: 18/03/2023
Nome do método: CP01_CO 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 Data de calibração: 15/09/2012
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	9,0000	2728,6	303,18	10,471	29,085	28,624	146,76	1320,9	31412,6	0,000

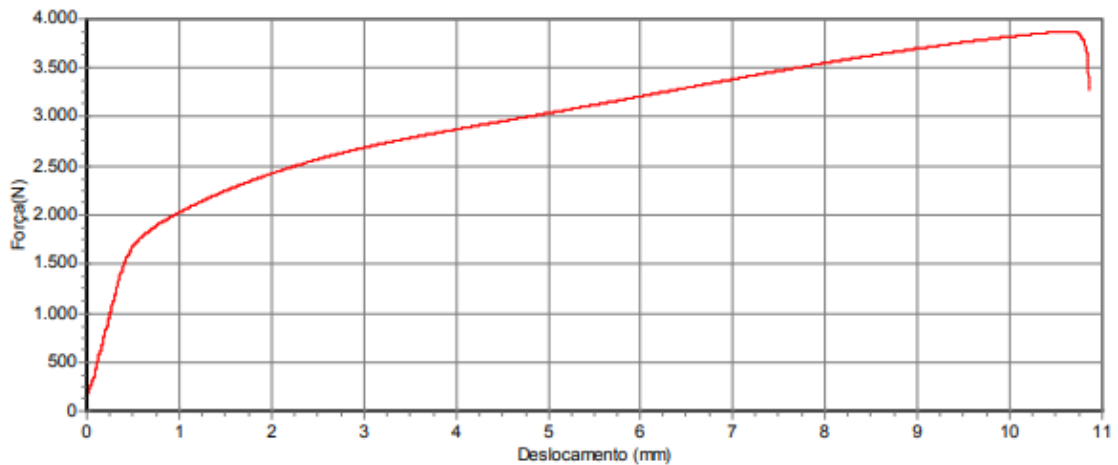


Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 2 – Cordão de Solda c/ Overlap_CP_02

Etec MATÃO				Relatório de ensaios destrutivos			
Nome do lote:	CP02	Data do lote:	18/03/2023				
Nome do método:	CP02_CO	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	Data de calibração:	15/09/2012				
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	9,0000	3875,1	430,57	10,861	30,169	28,906	178,34	1605,1	14460,8	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE C – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 3 – Cordão de Solda c/ Overlap_CP_03

ETEC MATÃO

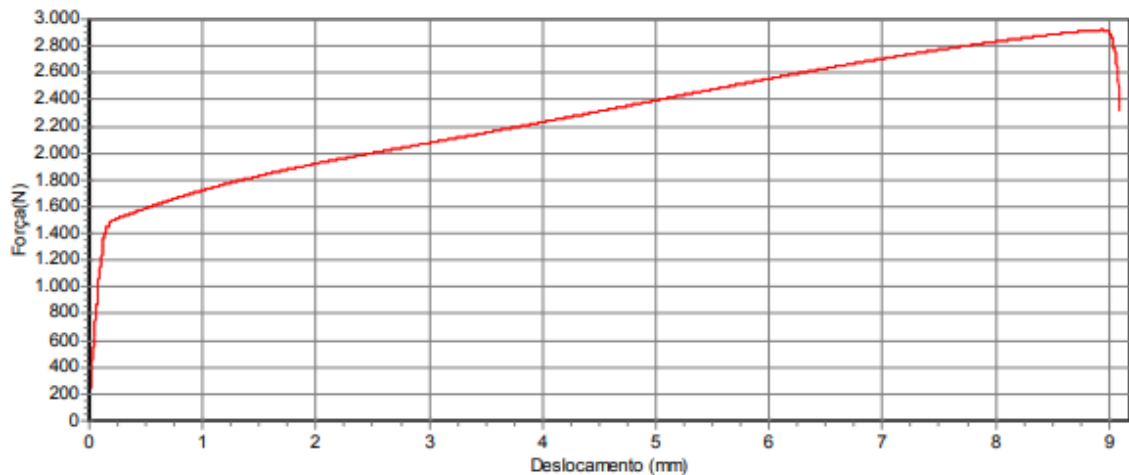
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CP03	Data do lote:	18/03/2023
Nome do método:	CP03_CO	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	Data de calibração:	15/09/2012

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	■ 9,0000	2919,7	324,41	9,093	25,258	24,804	161,71	1455,4	38750,0	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE D – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 4 – Cordão de Solda s/ Overlap_CP_01

ETEC MATÃO

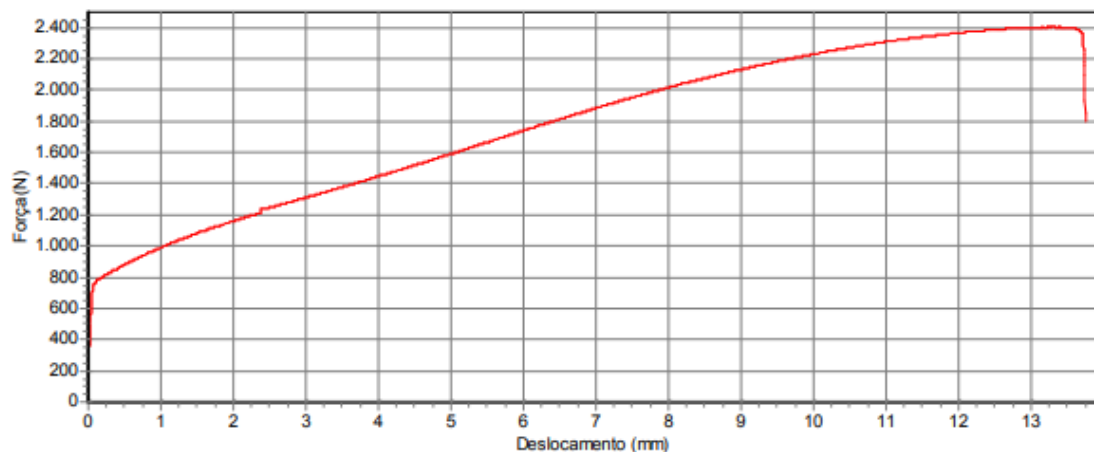
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CP01_SO	Data do lote:	18/03/2023
Nome do método:	CP01_SO	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	Data de calibração:	15/09/2012

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	■ 9,0000	2402,5	266,95	13,738	38,161	31,599	134,56	1211,1	1068,8	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE E – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 5 – Cordão de Solda s/ Overlap_CP_02

ETEC MATÃO

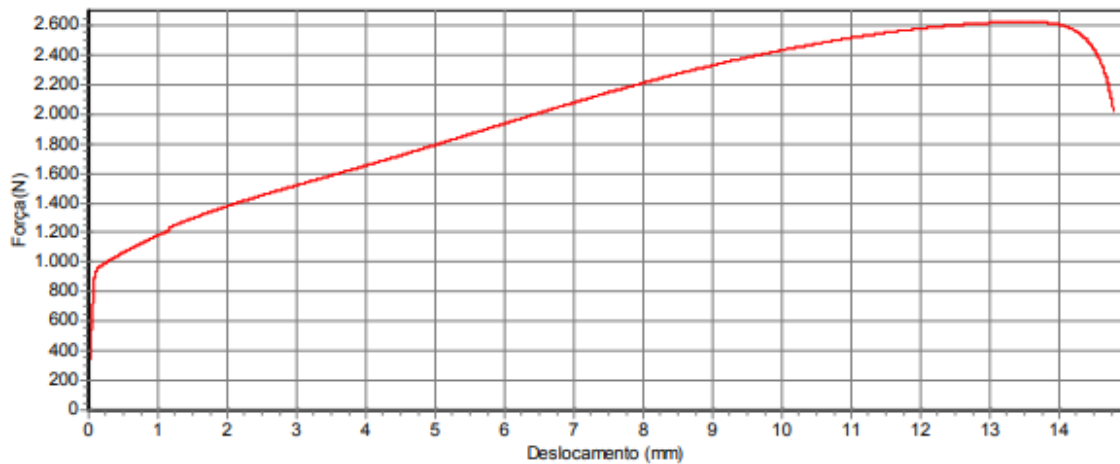
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CP02_SO	Data do lote:	18/03/2023
Nome do método:	CP02_SO	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	Data de calibração:	15/09/2012

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	9,0000	2623,2	291,47	14,776	41,044	37,854	134,61	1211,4	2283,3	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE F – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 6 – Cordão de Solda s/ Overlap_CP_03

ETEC MATÃO

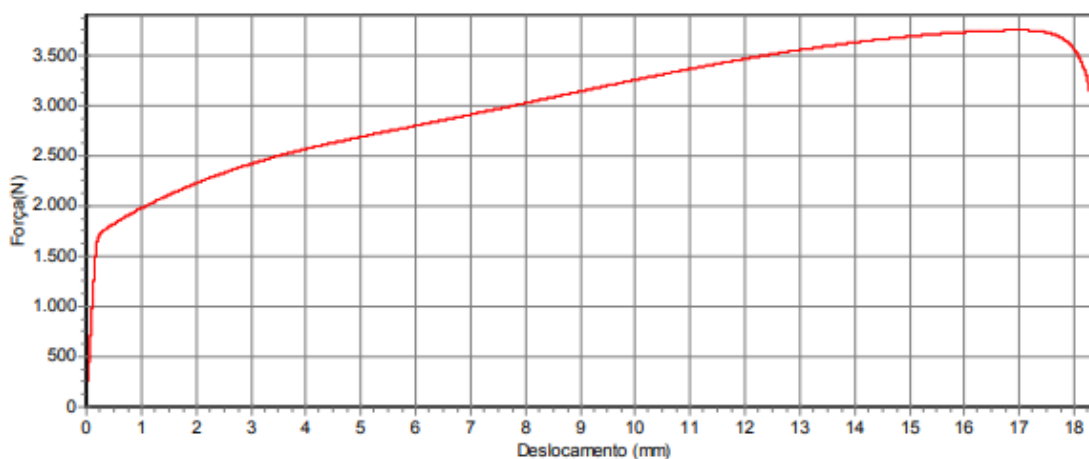
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote: CP03_SO
Nome do método: CP03_SO
Tipo do equipamento: Versat-100
Velocidade de ensaio: 0,5 mm/min
Ensaios realizados: 1
b333

Data do lote: 18/03/2023
Tipo do extensômetro: Nenhum
Célula de carga: 100 KN
Sentido do ensaio: Tração
Data de calibração: 15/09/2012

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	■ 9,0000	3748,8	416,54	18,273	50,759	50,152	186,84	1681,6	36027,4	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE G – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 7 – Cordão de Solda Automatizada_CP_01

ETEC MATÃO

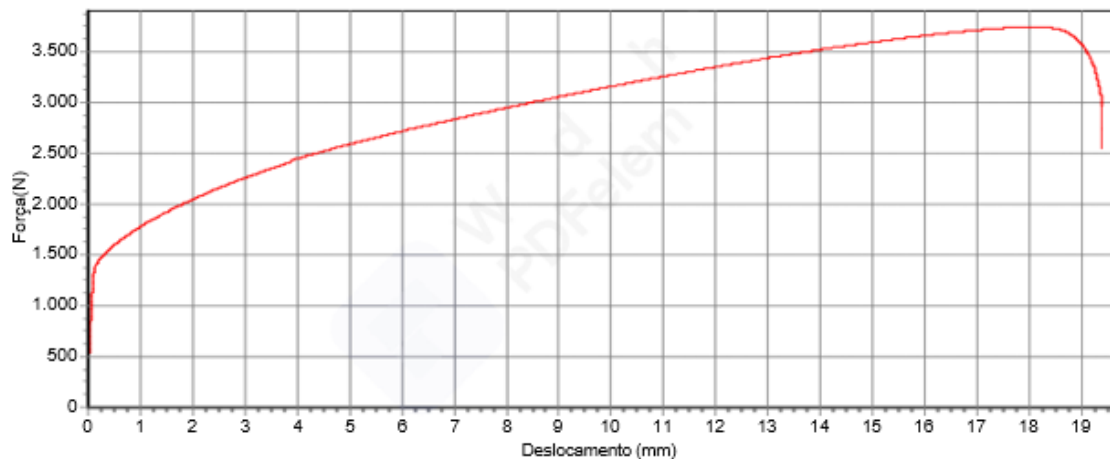
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CORDÃO DE SOLDA	Data do lote:	15/03/2022
Nome do método:	HELENA_CS_AM_01	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	Data de calibração:	15/09/2012

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	■ 6,0000	3742	623,7	19,395	53,87	43,12	401,7	2410	1935,0	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE H – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 8 – Cordão de Solda Automatizada_CP_02

ETEC MATÃO

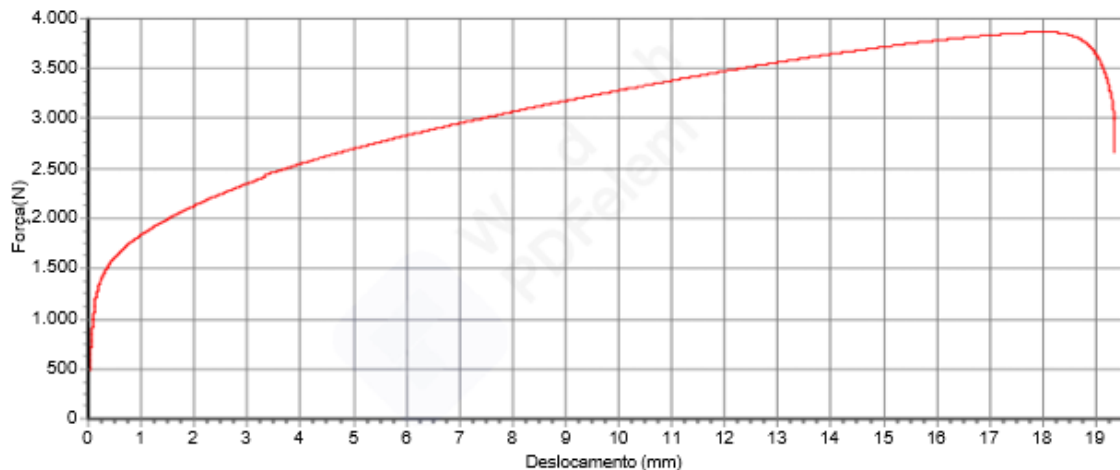
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CORDÃO DE SOLDA 02	Data do lote:	15/03/2022
Nome do método:	HELENA_CS_AM_02	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	Data de calibração:	15/09/2012

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	■ 8.0000	3866	644,3	19,345	53,74	44,52	402,1	2412	2319,1	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE I – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 9 – Cordão de Solda Automatizada_CP_03

ETEC MATÃO

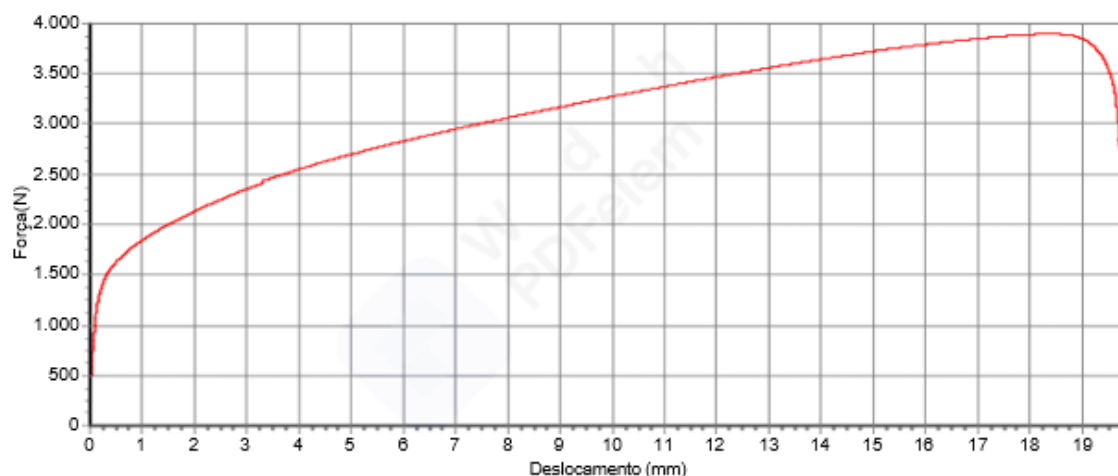
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CORDÃO SOLDA 03	Data do lote:	15/03/2022
Nome do método:	HELENA_CS_AM_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	Data de calibração:	15/09/2012

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	■ 6,0000	3898	649,3	19,725	54,79	45,62	402,1	2412	2325,8	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE J – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 10 – Metal Base_CP_01

ETEC MATÃO

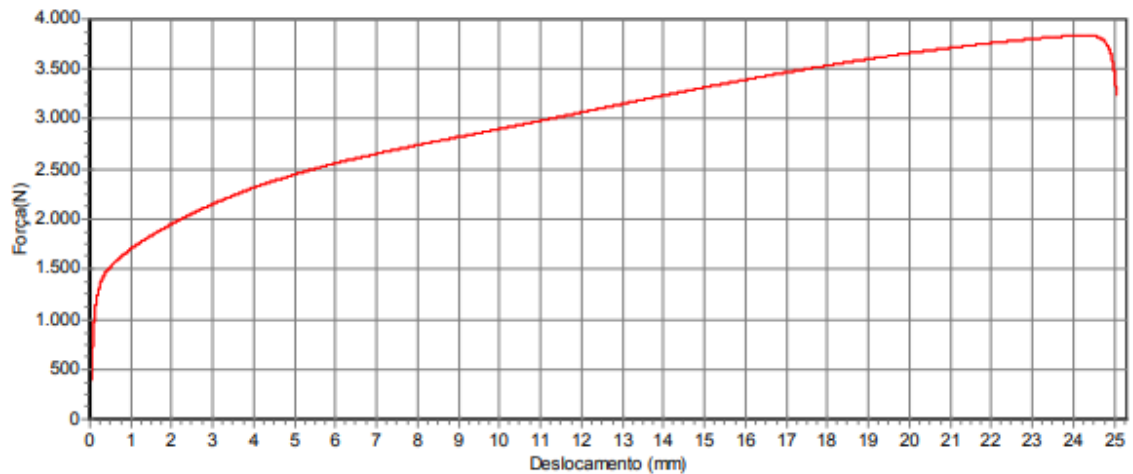
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CP01_MB	Data do lote:	18/03/2023
Nome do método:	CP01_MB	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	Data de calibração:	15/09/2012

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	■ 6,0000	3837,5	639,6	25,039	69,552	68,937	217,7	1306,2	31501	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE K – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 11 – Metal Base_CP_02

ETEC MATÃO

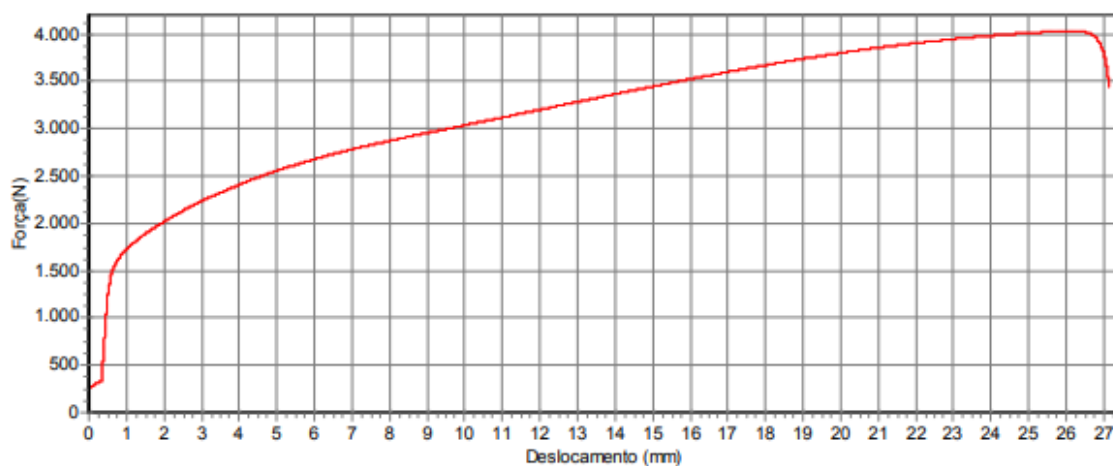
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CP02_MB	Data do lote:	18/03/2023
Nome do método:	CP02_MB	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	Data de calibração:	15/09/2012

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	■	6,0000	4029,3	671,5	27,131	75,364	73,822	229,1	1374,7	34872	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE L – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico 12 – Metal Base_CP_03

ETEC MATÃO

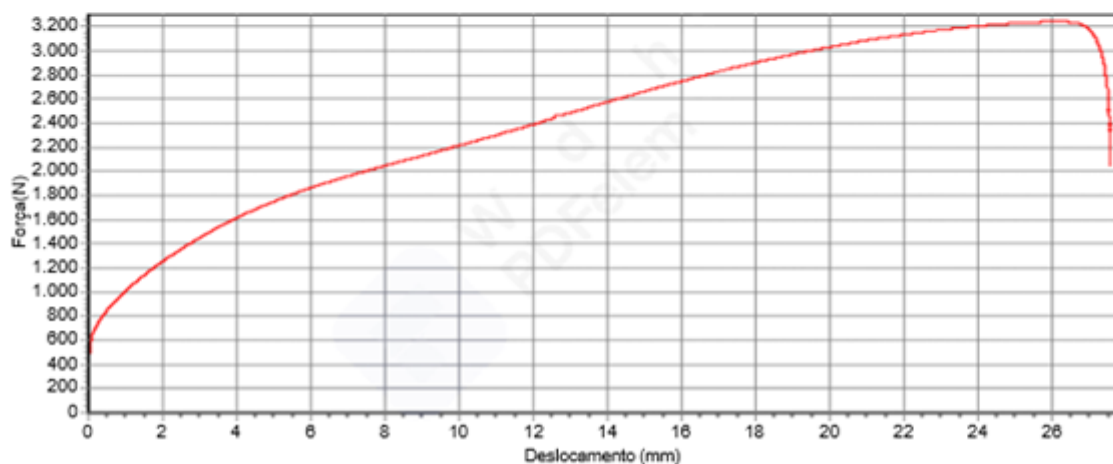
Relatório de ensaios destrutivos

Nome do lote:	CP03_MB	Data do lote:	12/03/2022
Nome do método:	CP03_MB	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	Data de calibração:	15/09/2012

b333

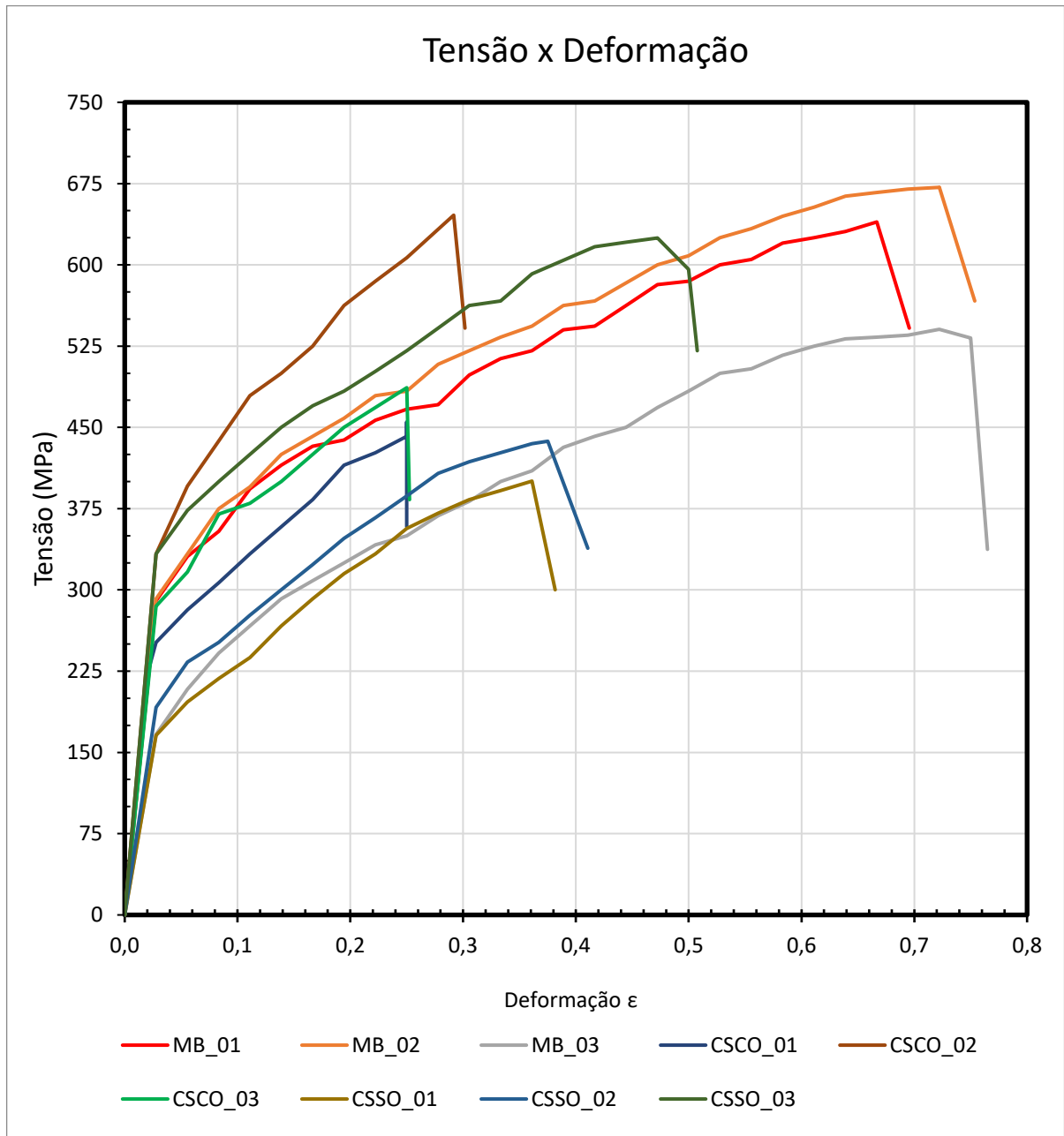
Dados técnicos do lote

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	6,0000	3243	540,4	27,535	27,535	14,976	407,0	2442	1933	0,000



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE M – Curvas e Dados dos Ensaios de Tração - Gráfico – Metal Base, Cordão de Solda c/ Overlap e Cordão de Solda s/ Overlap



APÊNDICE N – Programação CNC para o corte dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de tração.

Programação, linguagem ISO

O0002 (CORPO DE PROVA ELENA);	N80 G02 X83.0 Y5.0 I0.0 J-6.0;
N10 G21;	N90 G01 X113.0;
N20 G90;	N100 G01 Y15.0;
N30 G92 X0.0 Y0.0 I1.0 J-1.0;	N110 G01 X83.0;
N35 M15 P0;	N120 G02 X78.528 Y13.0 I-4.472 J4.0;
N40 G01 G40 X13.0 Y5.0;	N130 G01 X47.472;
N50 G01 X43.0 Y5.0;	N140 G02 X43.0 Y15.0 I0.0 J6.0;
N60 G02 X47.472 Y7.0 I4.472 J-4.0;	N150 G01 X13.0;
N70 G01 X78.528;	N160 G01 Y5.0;
	N170 G01 X0.0 Y0.0