

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

LEONARDO CAMARA DE MORAIS
TIAGO JOSÉ DA SILVA

**Estudo da União Dissimilar na Fabricação de Autoclaves utilizando os
Processos de Soldagem GMAW e FCAW**

São Paulo
2024

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

LEONARDO CAMARA DE MORAIS
TIAGO JOSÉ DA SILVA

**Estudo da União Dissimilar na Fabricação de Autoclaves utilizando os
Processos de Soldagem GMAW e FCAW**

Projeto científico elaborado como requisito
parcial para a conclusão do Curso Superior
de Tecnologia; Mecânica – Processo de
Soldagem

Orientador (a): Me. Edgar de Souza Dutra

São Paulo
2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

LEONARDO CAMARA DE MORAIS

TIAGO JOSÉ DA SILVA

Estudo da União Dissimilar na Fabricação de Autoclaves utilizando os Processos de Soldagem GMAW e FCAW

Projeto científico elaborado como requisito
parcial para a conclusão do Curso Superior
de Tecnologia; Mecânica – Processos de
Soldagem

Orientador(a): Me. Edgar de Souza Dutra

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Juliano Neves Panão

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data 30 / 11 / 2024

Prof. Esp. Anderson Santos

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data 30 / 11 / 2024

Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data 30 / 11 /24

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por nos ter concedido a graça e a capacitação para executar o trabalho.

Aos familiares que compreenderam a nossa ausência enquanto nos dedicávamos as pesquisas e execuções práticas, em especial as esposas, filhos e filhas que nos deram muita força e incentivo para a conclusão deste ciclo.

Ao nosso amigo Wyverson pelo apoio e incentivos para a elaboração do projeto e a resolução de trâmites operacionais da parte prática.

Ao nosso professor orientador Edgar Dutra por todo o conhecimento ofertado além de calma e paciência no desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof.^o Marcelo Ferrari pela ajuda e elucidação de dúvidas, sempre prestativo e solícito para com a dupla.

Ao senhor Lucas (Inspetor N2), nos auxiliou muito sanando dúvidas e interpretações de normas.

Aos amigos e professores do Senai (Osasco), Prof.^o Paulo por abrir as portas da escola, a Prof.^a Leila por estreitar os contatos com o professor Bragheto e o Caio do laboratório metalográfico, o professor Rafael com a ajuda nos ensaios de micro dureza, local que demandou bastante tempo.

A Ortosintese por conceder a oportunidade de realizar este incrível trabalho, Felipe com a disponibilidade das execuções, em especial ao soldador senhor Hélio responsável por realizar a soldagem dos corpos de prova com maestria, Fábio e Daniel pela ajuda com os desenhos técnicos, Arian, Ronildo e Jorge com a preparação das chapas teste, também em especial ao meu amigo Evando (Zóio), fera no corte a jato d'água.

Ao senhor Corradini do laboratório Proaqt com a realização dos ensaios de composição química e metalográfica; ao Thiago da empresa Sene na preparação das chapas teste.

Aos amigos Tiago e Ana da faculdade Fatec nos auxílios prestados com os ensaios mecânicos; A todos que contribuíram para esta realização.

RESUMO

Neste trabalho realizamos um comparativo de propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta dissimilar, entre as ligas AISI 316L e ASTM A-36, unidas pelo processo de soldagem GMAW, utilizando o consumível, arame maciço ER309L Si, e o processo de soldagem FCAW com o consumível arame tubular E309L T1 1/4. O desenvolvimento será evidenciado com dados como a identificação de composição químicas dos metais de base, acompanhamento dos processos de soldagem, aplicação da sistemática do código ASME, para a elaboração dos documentos como EPS e RQPS, além da realização dos ensaios mecânicos de tração, dobramento, micro dureza e metalográficos das regiões de solda, comparando os resultados obtidos em ambos os processos.

Tendo em vista essa sistemática vamos elucidar o processo mais adequado para esse tipo união de determinados processos fabricação.

Palavras-chave: Comparativo; Dissimilar; Mecânica; Metalúrgicas, Soldagem

LISTA DE FIGURAS

1 Modelo da 1ª patente na Inglaterra	15
2 Ilustração do arco elétrico	16
3 Aspecto visual dos arames do processo GMAW	16
4 Fonte de soldagem para ambos os processos	17
5 Esquemático do processos de fabricação do arame tubular	18
6 Esquemático dos processos de soldagem FCAW	19
7 Aspecto visual dos consumíveis.....	19
8 Métodos de transferência metálica.....	22
9 Aspectos dos perfis dos cordões de solda e as misturas gasosas em relação	24
10 Junta dissimilar	26
11 Regiões da junta soldada.....	29
12 Esquemático de diluição em juntas soldadas	31
13 Diagrama de Schaeffler.....	32
13 Falhas comuns aos processos de soldagem.....	33
14 Falhas comuns aos processos de soldagem	33
15 Descontinuidades de possíveis causas metalúrgicas.....	33
16 Ilustração do ensaio visual	34
17 Tensão X Deformação	35
18 Regiões do corpo de prova	36
19 Ensaio de dobramento	36
20 Equipamento de teste de dureza.....	37
21 Impressão da carga no metal	38
22 Preparação das chapas jato d'água	41
23 Identificação dos CP para os Ensaios	42
24 CP para o ensaio de micro dureza e micrografias	43
25 Verificação do Chanfro.....	43
26 Chapa teste com fixadas com barras chatas.....	44

27 Equipamento de Soldagem	45
28 Chapa teste processos GMAW	46
29 Controle de temperatura durante a soldagem	47
30 Ensaio visual das chapas teste	49
31 Extração dos CP	50
32 Esquemático do CP para ensaio de tração	51
33 CP para os ensaios de tração	52
34 Equipamento para ensaio de tração.....	52
35 CP para ensaio de dobramento	53
36 Equipamento de ensaios de dobramento	54
37 Resina epóxi e endurecedor	55
38 Aplicação da resina nos moldes.....	56
39 Etapa de lixamento	57
40 Ataques químicos	58
41 Secagem com soprador	58
42 Equipamentos utilizados para a captação de macrografia.....	59
43 Equipamentos utilizados para a captação de micrografia.....	60
44 Pontos de coleta de dureza.....	61
45 ASTM A36 reagente Nital.....	63
46 316L 500X reagentes ; água régia e hidróxido de sódio.....	64
47 Amostras ASTM A36 e AISI 316L para micro dureza	65
48 CP de tração M - 1	69
49 CP de tração M - 2	70
50 CP de tração T - 1	71
51 CP de tração T - 2.....	72
52 CP de dobramentos após ensaio	73
53 Ponto da descontinuidade do CP (T) face	75
54 Ensaio de LP no CP (T) face.....	76
55 Macrografia GMAW (M)	77
56 Macrografia FCAW (T).....	78

57 EPS GMAW FOLHA 1.....	90
58 EPS GMAW FOLHA 2.....	91
59 RQPS GMAW	92

LISTA DE TABELAS

1 Especificação dos consumíveis.....	20
2 Comparação Argônio/Hélio	23
3 Eficiência Térmica dos Processos.....	30
4 Designação e classificação das Chapas Teste e CP.....	41
5 Composição Química do Consumível (M)	45
6 Composição química do Consumível (T).....	48
7 Identificação do Ensaio Visual	49
8 Requisitos dos Ensaios	50
9 Comparativo de Análise Química para o Aço A36.....	62
10 Comparativo de Análise Química para o Aço AISI 316L	63
11 Valores de Dureza para ASTM A36 e AISI 316L	65
12 Inspeção dos Cordões de Solda (M)	66
13 Inspeção dos Cordões de Solda (T).....	67
14 Resultado do Ensaio de Tração M-1	68
15 Resultado do Ensaio de Tração M-2	69
16 Resultado do Ensaio de Tração T-1	70
17 Resultado do Ensaio de Tração T-2	71
18 Resultado do Ensaio de Dobramento (M)	74
19 Resultado do Ensaio de Dobramento (T)	74
20 Regiões da Macro (M).....	77
21 Regiões da Macro (T)	79
22 Tamanho de Grãos para Ambos os Metais de Base	80
23 Tamanhos de Grãos na ZAC.....	81
24 Tamanhos de Grãos para Ambos os Metais	82
25 Tamanhos de Grãos no Metal e ZAC	83
26 Tamanhos Grãos na ZAC 316L (T)	84
27 Valores de Dureza Vickers	85

TABELA DE QUADROS

1 Vantagens e Desvantagens do processo FCAW	20
2 Vantagens e Desvantagens do processo GMAW	21
3 Parâmetros do Processos GMAW	46
4 Parâmetros do Processo FCAW	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C	antes de Cristo
AISI	American Iron and Steel Institute
ASME	American Society Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
CO ₂	Dióxido de Carbono
CME	Centro de Materiais Esterilizados
EPS	Especificação do Procedimento de Soldagem
FCAW	Flux-Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
RQPS Soldagem	Registro de Qualificação do Procedimento de
SF	Specification
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TCC	Trabalhos de Conclusão de Curso
TIG	Tungsten Inert Gas
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Justificativa	12
1.2 Objetivo Geral	13
1.2.1 Objetivo específico	13
2 REVISÃO DA LITERATURA TÉCNICO-CIENTÍFICO	14
2.1 União dos metais	14
2.1.1 Soldagem.....	14
2.1.2 Processos de Soldagem MIG/MAG (Gas Metal Arc Welding - GMAW	15
2.1.3 Processos de Soldagem GMAW	17
2.1.4 Processo de Soldagem Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding – FCAW)	17
2.1.5 Consumíveis Aplicados aos Processos GMAW e FCAW	19
2.1.6 Parâmetros de soldagem GMAW e FCAW.....	21
2.1.7 Gases de proteção	21
2.1.8 Curto-circuito.....	22
2.1.9 Globular	22
2.1.10 Spray.....	23
2.1.11 Gases de Proteção.....	23
2.2 Vasos de pressão	24
2.2.1 Vasos não Sujeitos a Chama	24
2.2.2 Vasos Sujeitos a Chama	24
2.2.3 Trocadores de Calor.....	24
2.3 Características dos Metais para a Fabricação.....	25
2.3.1 Altas Resistências a Temperaturas Elevadas	25
2.3.2 Baixas Temperaturas	25
2.3.3 Boa Resistência a Oxidações e Corrosões	25
2.4 Juntas Dissimilares	25
2.4.1 Aços.....	26
2.4.2 Aços Inoxidáveis	27

2.4.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos	27
2.4.4 Aço A36	27
2.5. Metalurgia da Soldagem	28
2.5.1 Transformações na Junta Soldada.....	29
2.5.2 Aporte Térmico (Heat Input)	30
2.5.3 Diluição	31
2.5.4 Diagrama de Schaeffler.....	31
2.6 Qualidade na Soldagem.....	32
2.6.1 Descontinuidades na Soldagem.....	32
2.7 Ensaios Não Destrutivo (Ensaio Visual)	34
2.7.1 Ensaios Mecânicos	34
2.7.2 Ensaio de Tração	35
2.7.3 Ensaio de Dobramento.....	36
2.7.4 Teste de Dureza.....	37
2.7.5 Ensaio Metalográficos	38
2.8 Código ASME	39
2.8.1 Código ASME Seção II Parte C.....	39
2.8.2 Código ASME Seção VIII Divisão 1	39
2.8.3 Código ASME Seção IX Qualificação dos Processos de Soldagem e Brasagem, (RQPS e EPS)	40
3 Materiais e Métodos	41
3.1 Corte dos Metais de Base	41
3.1.1 Identificação para Envio ao Laboratório Resultados.....	42
3.1.2 Corpos de Prova para Ensaio de Composição Química, Micro Dureza e Micrografias	42
3.2 Preparação das Chapas Teste para os Processos de Soldagem	43
3.3 Execução dos Processos de Soldagem	44
3.3.1 Execução dos Processos de Soldagem GMAW	45
3.3.2 Controle da Temperatura entre Passes.....	47
3.3.3 Execução dos Processos de Soldagem FCAW	47
3.4 Ensaio Visual das Chapas Teste.....	48

3.5 Preparação dos Corpos de Prova a partir da Chapas Teste	49
3.5.1 QW-202.1 Testes Mecânicos	50
3.5.2 QW-150 Teste de Tensão	51
3.5.3 Corpos de Prova para os Ensaio de Tração	51
3.5.4 QW-160 Teste de Dobra Guiada	53
3.5.5 Ensaio Metalográficos	55
3.5.6 Sistema de Ataque Químico das Amostras	57
3.6 Dureza Vickers	60
4 RESULTADOS	62
4.1.1 Análise de Composição Química	62
4.1.2 Análise de Microestrutura das Amostras Pré-Soldagem.....	63
4.1.3 Micro Dureza Pré-Soldagem	64
4.2 Ensaio Visual	66
4.3 Ensaio e Tração	68
4.4 Ensaio de Dobramento.....	72
4.4.1 Apresentação dos Resultados dos Ensaio de Dobramento	75
4.5 Ensaio Metalografia (Macrografia).....	76
4.6 Ensaio Metalográficos (Micrografias).....	79
4.6.1 Micrografias dos CP Soldados do Processo GMAW (M)	79
4.6.2 Micrografias dos CP Soldados do processo FCAW (T)	81
4.7 Dureza Vickers	85
4.8 Elaboração do Documento de Soldagem	89
5 Conclusões	91

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho iremos explorar a possibilidade e aplicações de união entre dois materiais metálicos distintos, um trata-se de um aço inoxidável 316L, material nobre bastante empregado em condições em que deseja-se boa resistência a corrosão. Este material possui uma superfície chamada de camada passiva, ou filme passivo, esta camada é extremamente fina e imperceptível a olho nu, confere ao material elevada resistência a processos corrosivos, um exemplo dentre suas diversas aplicações é a cutelaria e instrumentais utilizados em hospitais uma vez que pode ser facilmente limpo e esterilizado sem danos a superfície do metal.

O outro material empregado é o conhecido A36/ A36M uma liga de ferro e carbono muito empregada em sistemas estruturais devido sua boa resistência mecânica, soldabilidade e baixo custo de mercado.

Tendo em vista as duas ligas que compõem a junta se faz necessário o emprego de um processo de soldagem que seja capaz de unir os metais com aderência que compete com a resistência mecânica e sem causar grandes modificações metalúrgicas ao ponto de reduzir as particularidades.

A compreensão das juntas dissimilares pode contribuir para diversos seguimentos dos ramos industriais como por exemplo; agronomia, estrutural, médico-hospitalares, farmacêutico e alimentício, entre outros.

Para o trabalho em questão já existe uma aplicação prática, trata-se de um equipamento chamado de Autoclave, utilizado em hospitais mais precisamente no setor conhecido como CME (Centro de Materiais Esterilizados), que tem a finalidade de realizar a esterilização de produtos usados em procedimentos médico-cirúrgicos.

A soldagem da porta da Autoclave, mais precisamente na parte externa, usa-se a liga A 36/ A 36M, como reforço estrutural, e o aço inoxidável 316L, na região interna da porta utilizando os consumíveis ASME SFA 5.9 ER 309L Si, (arame maciço), e o ASME SFA 5.22 E 309L T1 1/4, (arame tubular), com isso comparar os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, metalográficos e a elaboração dos documentos EPS e RQPS.

1.1 Justificativa

A soldagem envolve obrigatoriamente o conhecimento das variáveis o conhecimento da composição química dos metais de base, geometria da junta, aplicação e os esforços mecânicos no qual será aplicada. Quando isso ocorre em condições favoráveis com metais composição química similares é possível prever o que poderá acontecer e assim tentar reduzir os danos a junta soldada.

Para materiais com composição química diferente mensurar e controlar as possibilidades existentes na soldagem requer mais domínio e conhecimento, ensaios mecânicos e metalográficos podem ajudar a entender se processo de soldagem atribuído é capaz de unir e garantir os requisitos impostos no projeto.

A importância de estudar qual destas variáveis ou propriedades será mais agredida ou beneficiada pelo processo de soldagem pode viabilizar, e permitir explorar de forma mais abrangente o potencial de juntas dissimilares, com menores impactos na qualidade e resistência mecânica dos cordões de solda.

1.2 Objetivo Geral

Analisar as propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta dissimilar, entre a liga AISI 316L, e o aço baixo carbono ASTM A36, soldadas pelos processos GMAW e FCAW.

1.2.1 Objetivo Específico

- Evidenciar esses resultados por meio de ensaios mecânicos;
- Explanar as condições metalúrgicas das regiões da solda de ambos os metais após serem submetidos aos diferentes consumíveis.
- Elaborar uma EPS e RQPS para os processos.

2 REVISÃO DA LITERATURA TÉCNICO-CIENTÍFICA

Para iniciarmos a explanação das fontes e referências abordaremos temas como; soldagem em uma visão geral, sendo eles, GMAW e o FCAW, gases de proteção, os metais, aços A36, e os inoxidáveis falando brevemente de cada família, (Martensíticos, Ferríticos, Duplex e os Endurecíveis por Precipitação), e posteriormente os aços inoxidáveis Austeníticos e sua soldabilidade.

2.1 União dos Metais

Segundo (Modenesi; Marques, 2012), a união dos metais pode ser feita de duas formas, uma realizada através da utilização de parafusos ou arrebites, e sua comprovação de resistência é dada no limite de rompimento destes quando submetidos a esforços mecânicos, a segunda ocorre pela aproximação das estruturas atômicas resultantes de ligações químicas.

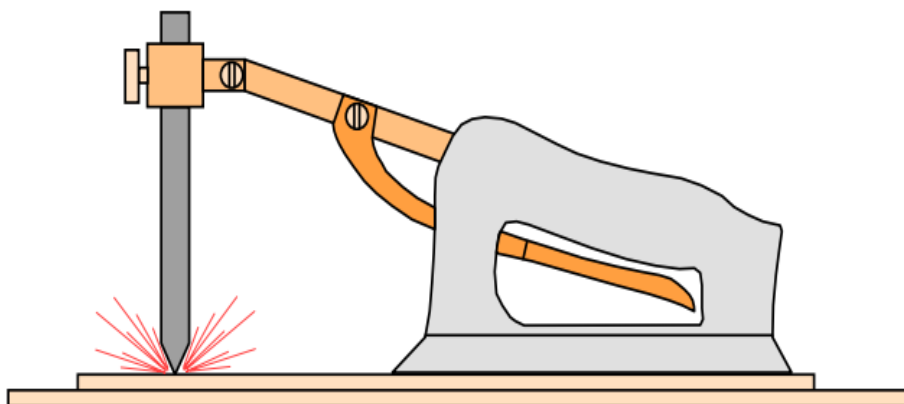
2.1.1 Soldagem

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem a aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo (Brandi, 2013, p.1).

De acordo com (Modenesi; Marques, 2012), a soldagem é um dos processos de fabricação mais importante e críticos dentro da indústria, sendo empregado na fabricação de estruturas metálicas assim como na recuperação de componentes metálicos. Porém não podemos esquecer que a soldagem em muitas das vezes é um processo traumático para os metais deixando os vulneráveis a diversos problemas como fragilidade, mudanças na microestrutura do metal de base, perda de resistências contra oxidações levando o material a corrosão, outro ponto importante é a quantidade de calor aplicada durante o processo empregado na peça que combinado com a composição química do material e o período de exposição podem causar danos consideráveis a junta soldada.

Com base nesta gama de informações se faz necessário o conhecimento teórico, assim como o prático, para o desenvolvimento de um método mais adequado é de extrema importância conhecimentos básicos em química, mecânica, além de conhecer o material metálico que se deseja soldar. O processo de soldagem se perpetua a muitos anos neste formato produzidos atualmente há cerca de 150 anos, porém a soldagem por forjamento que consiste em aquecer os metais e ao aplicar essas fortes tensões em forma de marteladas com a temperatura altíssima e a pressão do impacto os metais se unem, no museu de Louvre possui um pingente que apresenta fortes indícios de forjamento com uma idade estimada em 4000 AC.

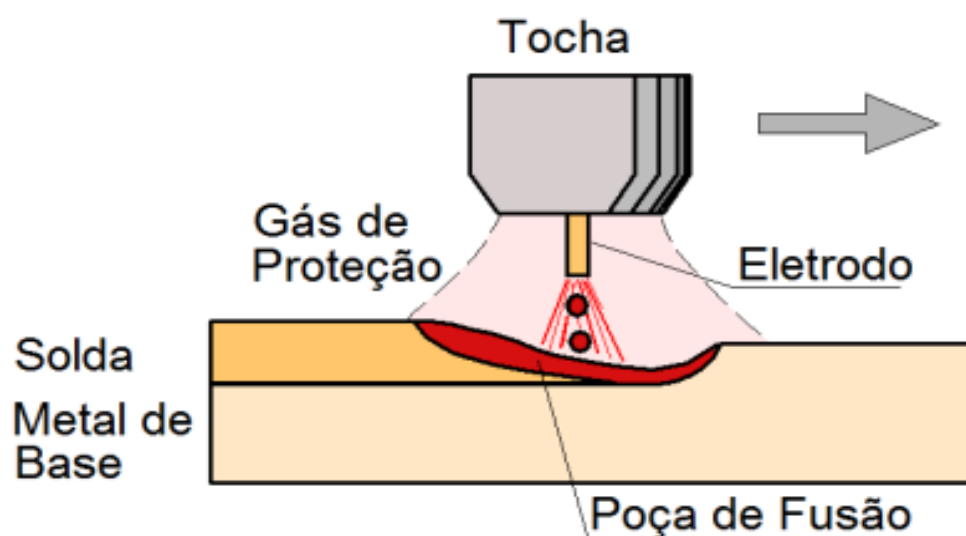
Figura 1 - Modelo da 1ª patente na Inglaterra



Fonte: Modenesi; Marques, Santos, (2012)

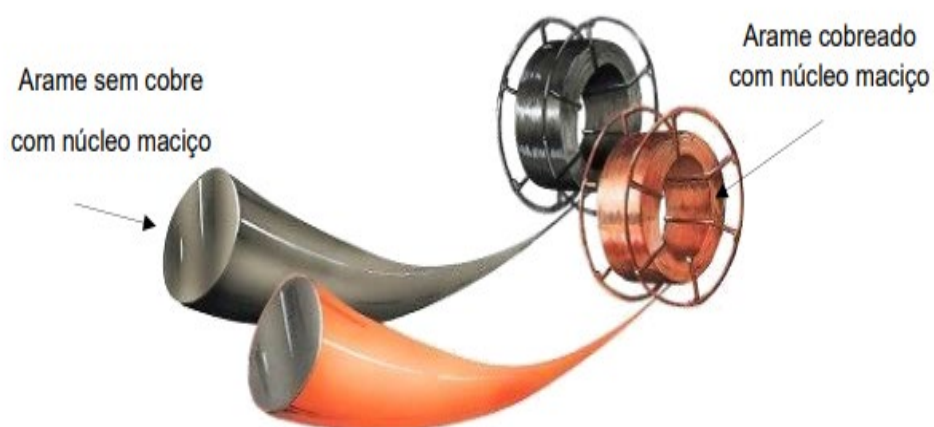
2.1.2 Processos de Soldagem MIG/MAG (Gas Metal Arc Welding – GMAW)

De acordo com (Brandi, 2013), o processo de soldagem a arco elétrico gera uma fonte de calor entre o eletrodo nu que é alimentado continuamente no metal a ser soldado, o que diferencia os processos são os consumíveis e os gases de proteção, para os processos MAG, utiliza-se em sua maioria o gás CO₂ puro ou uma mistura de gases inertes com adição de gases ativos, e no processo MIG, emprega-se o gás argônio ou hélio, podendo ser utilizada a misturas entre eles, Figura 2.

Figura 2 - Ilustração do arco elétrico

Fonte: Modenesi; Santos, (2012)

De acordo com (DUTRA, 2020), os arames maciços utilizados nos processos GMAW, podem conter uma fina camada protetora de cobre que protege contra oxidações provenientes da atmosfera conforme mostrado na Figura 3 , onde são aplicados em diversos materiais como; aços carbono, aços ligados, melhorando sua condutibilidade elétrica quando na passagem pelo bico de contato, sendo produzidos em diversas bitolas que podem variar entre 0,6mm até 1,6mm.

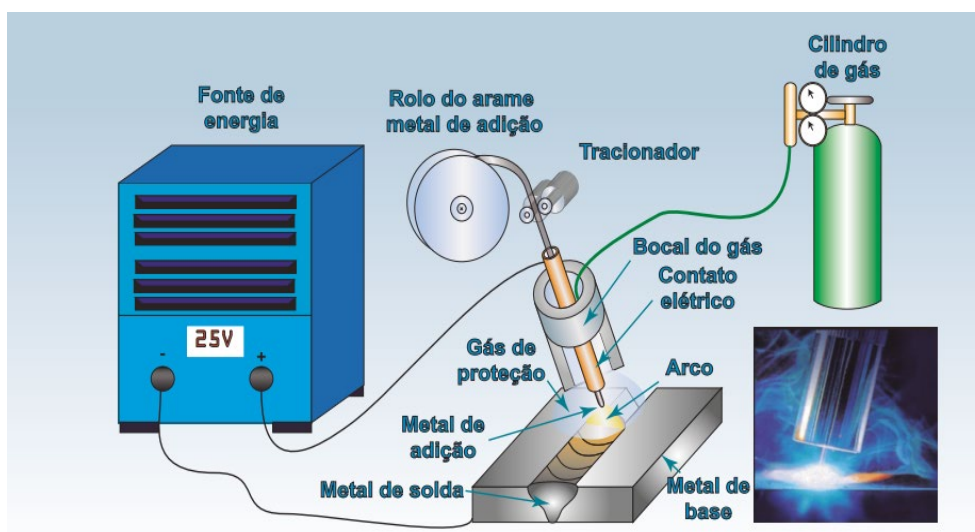
Figura 3 - Aspecto visual dos arames do processo GMAW

Fonte: Dutra, Souza, Júnior, (2020)

2.1.3 Equipamento de Soldagem GMAW

O equipamento de soldagem para o processo GMAW é basicamente composto por uma fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem, cabos e uma fonte protetora de gás que pode ser fornecido por cilindros ou de fornecimento através de tanques por tubulações. Cada um desses componentes desempenha uma função específica e são de suma importância para o funcionamento do equipamento de soldagem, não serão tratados neste trabalho em detalhes cada funcionalidade das partes do equipamento, na Figura 4 apresenta

Figura 4 - Fonte de soldagem para ambos os processos



Fonte: Rodrigues, *et al.*, (2022)

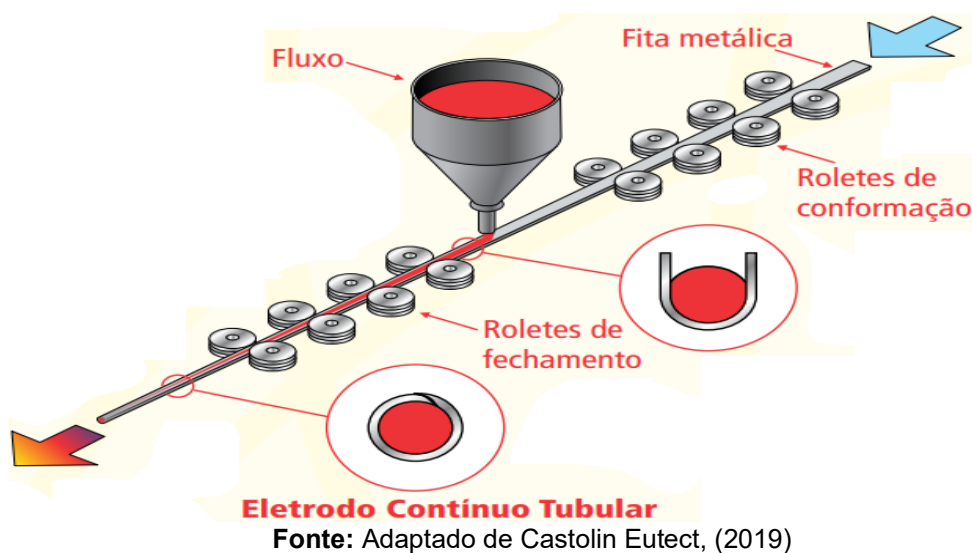
2.1.4 Processo de Soldagem Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding - FCAW)

Neste processo o arco elétrico ocorre entre o contato do arame tubular cujo interior é formado por um fluxo e sua área externa é composta por um invólucro metálico e a peça a ser soldada, dessa forma ocorrendo o aquecimento localizado e assim fazendo com que a temperatura de fusão seja atingida e resulte na poça de fusão. A proteção ocorre pela resultante queima do fluxo formando gases de proteção contra a atmosfera podendo ser adicionado gases

de proteção de forma externa que flui pelo bocal da tocha através de cilindros para complementar a proteção da poça de fusão.

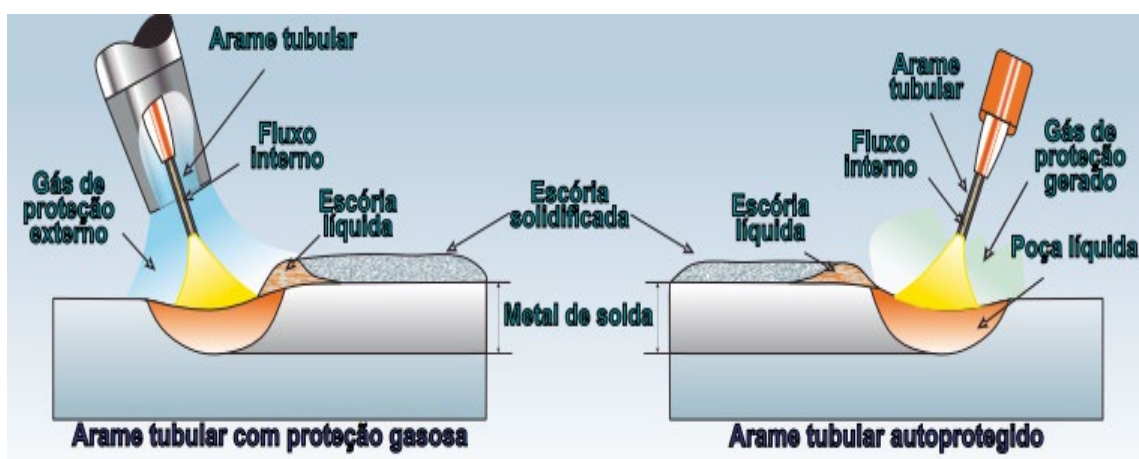
Este fluxo em decomposição além de gerar gases de proteção atmosférica contribui benéficamente em reações metalúrgicas no metal de solda, desoxidantes e formadores de escoria. (FORTES,2004), a fabricação do arame tubular é feita a partir de uma tira de composição química semelhante ou compatível com o metal que será soldado, esta tira é inserida em uma sequência de roletes conformando-as em "U" para receber o fluxo, após a inserção do fluxo continua no processo de fabricação que continuará a conformação até se fecharem formado um tubo, Figura 5.

Figura 5 - Esquemático do processo de fabricação do arame tubular



Segundo (Rodrigues. *et al.*), a duas formas de proteção da poça de fusão para o processo FCAW, onde elementos de liga e estabilizadores de arco são adicionados ao fluxo para este tipo de consumível é classificado como (FCAW-G), e quando é necessário um gás de proteção de origem externa como nos cilindros. Já para os consumíveis que contém no fluxo elementos que são capazes de proteger a poça de fusão sem a adição de gases externos, são denominados como (FCAW-S), Figura 6.

Figura 6 - Esquemático dos processos de soldagem FCAW

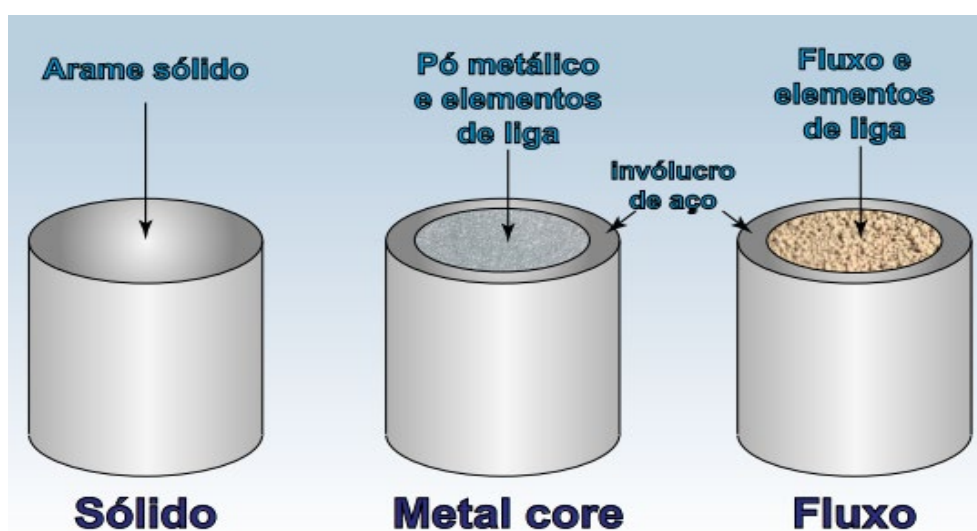


Fonte: Rodrigues *et al.*, (2022)

2.1.5 Consumíveis Aplicados aos Processos GMAW e FCAW

A soldagem realizada pelo processo FCAW, assim como o GMAW, são processos que utilizam fontes semelhantes o que os diferencia são os consumíveis, e ambos os processos podem ser projetados para realizarem soldagem mecanizada, onde os consumíveis que os caracterizam são distintos, o arame sólido ou maciço utilizado nos processos (GMAW), e o processo de soldagem arame tubular (FCAW), Figura 7.

Figura 7 - Aspecto Visual dos Consumíveis



Fonte: Rodrigues, *et al.*, (2022)

Alguns fatores influenciam na escolha dos consumíveis de soldagem, a composição química do metal de base, espessura da chapa, a posição de soldagem, os custos e a habilidade do soldador. Os consumíveis são especificados de acordo com o seu tipo, composição química ou processo de soldagem como pode ser observado na Tabela 1. A norma AWS exige que os consumíveis atendam à requisitos específicos como propriedades mecânicas do metal depositado, composição química, entre outros, como por exemplo a fabricação, embalagens, identificação etc.

Tabela 1 – Especificação dos consumíveis

Classificação	Descrição/ Consumível
ASME SFA 5.9	Arames e varetas para soldagem de aço inoxidável
ASME SFA 5.18	Metais de adição de Aço ao Carbono para Soldagem a Arco com proteção Gasosa
ASME SFA 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
ASME SFA 5.22	Arames tubulares para soldagem de aços inoxidáveis
ASME SFA 5.29	Arames de aço de baixa liga com fluxo interno

Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi, Bracarense, (2011)

Quadro 1 Vantagens e desvantagens do processo FCAW

Vantagens	Desvantagens
✓ Automatização do sistema	✓ limpeza após soldagem.
✓ A alimentação continua arame	✓ Comparado ao SMAW seu equipamento é mais caro.
✓ Várias posições de soldagem	✓ Elevada quantidade de fumos.
✓ Maiores taxas de deposição do metal se comparado com o processo de eletrodo revestido (SMAW)	
○	
✓ Operar na presença de pequenas correntes de ar	

Fonte: Modenesi, (2012)

Quadro 2 Vantagens e desvantagens do processo GMAW

Vantagens	Desvantagens
✓ Alta taxa de deposição se comparado com o processo SMAW (Eletrodo Revestido)	✓ Sensível a correntes de Ar
✓ Ausência na operação de remoção de escoria	✓ Requer conhecimentos específicos na regulação dos parâmetros
✓ Soldagem em todas as posições	✓ Equipamento de soldagem de custo maior se comparado com o processo SMAW
✓ Pode ser automatizado	

Fonte: Modenesi, (2012)

2.1.6 Parâmetros de Soldagem GMAW e FCAW

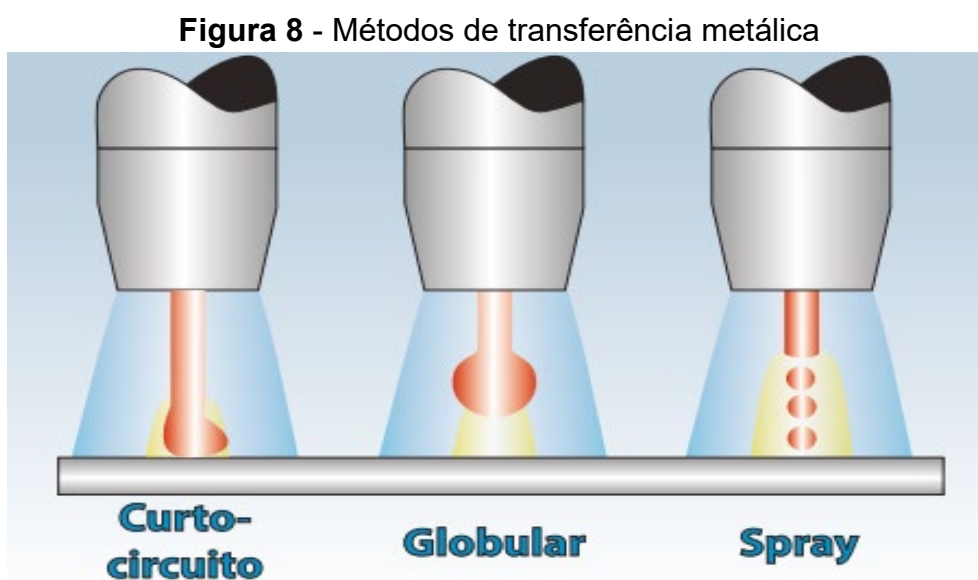
De acordo com (Poepcke, 2013), para que se tenha um cordão de solda com qualidade é necessário que os parâmetros de soldagem estejam muito bem ajustados e controlados ao processo isso envolve variáveis.

Algumas dessas variáveis são; intensidade de corrente, tensão e comprimento do arco, velocidade de soldagem, a altura entre bocal e metal base (stick-out), o gás utilizado, ou misturas em suas devidas proporções, assim como a vazão e diâmetro do arame entre outras,

Estas variáveis quando mal dimensionadas podem causar descontinuidades ou efeitos nos cordões de solda, como porosidades, excesso de respingos e mordeduras, caso essas descontinuidades ou defeitos sejam apontados como superior ao permitido pode-se requerer retrabalhos nos cordões de solda.

2.1.7 Transferências Metálicas Processo GMAW/FCAW.

São basicamente 3 modos de transferência metálicas que estes dois processos incluem, Curto-circuito, Globular e Spray. Podemos afirmar que os dois processos se comportam de modo semelhante em quesito transferência metálica, mas o que são esses modos de transferência metálica? São as maneiras que o metal de solda é transferido para a poça de fusão influenciando no aspecto do cordão, taxa de deposição, estabilidade do arco. A posição de soldagem e na quantidade de respingos, outros fatores que determinam esses modos são os gases de proteção, corrente de soldagem além de diâmetro do eletrodo, comprimento do arco e característica da fonte, (SCOTTI, PONOMAREV, 2008) como observado na Figura 8.



Fonte: Rodrigues. *et al.*, (2022)

2.1.8 Curto-circuito

Ocorre em baixas tensões de soldagem, nesse modo a gota de metal líquido que se forma na extremidade do arame toca a poça de fusão, gerando assim um curto circuito elétrico e uma extinção momentânea do arco, aplicável em chapas de pequena espessura, permite a soldagem fora da posição plana em chapas grossa pode haver falta de fusão mas pode ser utilizado em passes de raiz, também observa-se neste método um aumento significativo no número de respingos causados pela dissipação das gotas, porém com ajustes mais

precisos adicionados ao equipamentos em relação ao metal de adição e metal de base pode-se reduzir.

2.1.9 Globular

Este método de transferência acontece também com correntes mais baixas, utilizados com processo que utilizam do gás CO₂, ou misturas ricas em CO₂ e hélio. Caracterizado por um sequenciamento de gotas que se formam na ponta do arame e ao atingir um diâmetro maior que o próprio arame se desprendem atingindo assim a poça de fusão pela ação da gravidade. Neste método é necessário que se mantenha um *stick-out*, mais curto em virtude da variação de energia entre a ponta do bocal e o metal de base. Gera uma maior quantidade de respingos e deve ser evito tanto nos arames sólidos como nos tubulares (FORTES,2004).

2.1.10 Spray

Com correntes de soldagem elevadas ocorre a transferência metálica por spray, que se caracteriza por pequenas gotas de metal fundido em alta frequência e de pequeno diâmetro sendo transferida para a poça de fusão melhorando significativamente a taxa de deposição, estabilidade do arco e a quantidade de respingos se comparado ao modo curto-circuito. Ocorre em misturas ricas em argônio e misturas com CO₂ não ultrapassando 12% pois suas características aumentam a corrente de transição. Dificultando assim a corrente mínima de transição necessária para atingir esse modo de transferência.

2.1.11 Gases de Proteção

Segundo (Brandi, 2013), os gases de proteção têm grande participação no modo de transferência e formato do cordão de solda, nos processos GMAW, a proteção pode ser feita através dos gases inertes como argônio ou hélio e misturas. A utilização do gás incorreto para o processo pode ser a existência de

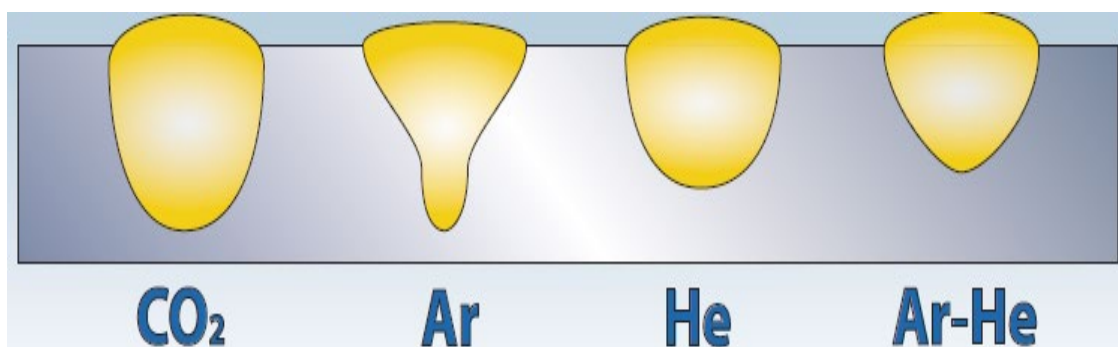
incompatibilidade entre a composição química dos gases e os metais de base, na Tabela 2, apresenta-se algumas características de cada gás.

Tabela 2 Comparação Argônio/Hélio

Características	Argônio	Hélio
Condutividade Térmica	Baixa	Elevada
Tensão do Arco	Menor	Maior
Calor Gerado no Arco	Menor	Maior
Aplicações	Chapas finas, metais de baixa condutividade térmica	Chapas grossas metais de elevada condutividade térmica
Largura do Cordão	Mais estreito	Mais largo
Transferência Metálica	Todos os tipos	Globular ou curto-circuito

Fonte: Soldagem – Processos e Metalurgia (2013)

Figura 9 - Aspectos dos perfis dos cordões de solda e as misturas gasosas em relação



Fonte: Rodrigues, Cersosimo. *et al.*, (2022)

2.2 Vasos de Pressão

De acordo com (Telles), os equipamentos denominados vasos de pressão são de grande importância para a indústria devido as condições e ciclos de trabalho as quais estes serão condicionados, muitas das vezes possuem tamanhos significativos, os projetos são de responsabilidade das engenharias, possuem grande potencial de acidentes colocando vidas em risco. Um dos

processos envolvidos na fabricação dos vasos de pressão é a soldagem, os processos assim como os profissionais que executaram a soldagem devem ser qualificados para a demanda, previstos no código ASME seção VIII, vejamos abaixo algumas classes e finalidades.

2.2.1 Vasos não sujeitos a chama

Vasos de armazenamentos, acumulação, torres de destilação fracionada, retificação, absorção e esferas de armazenamento de gases.

2.2.2 Vasos sujeitos a chama

Caldeiras e fornos.

2.2.3 Trocadores de calor

Trocadores de calor propriamente ditos, aquecedores, resfriadores, condensadores, refulveradores e resfriadores de ar.

2.3 Características dos Metais para Fabricação

Segundo (Telles), materiais que suportem os regimes de trabalho denominado em; armazenamento dos gases sob pressão, processamento de gases e líquidos, intermediários entre gases, líquidos dos processos industriais.

2.3.1 Altas resistência a temperaturas elevadas

Os aços inoxidáveis costumam se comporta relativamente bem a elevadas temperaturas o que pode ser necessário para o bom funcionamento dos vasos de pressão.

2.3.2 Baixas temperaturas

Mais em específico aos aços inoxidáveis austeníticos se destacam por suportarem temperaturas baixas que os demais aços.

2.3.3 Boa resistência a oxidações e corrosões

Mesmo em condições de altas ou baixas temperaturas, elevando o tempo de uso do equipamento.

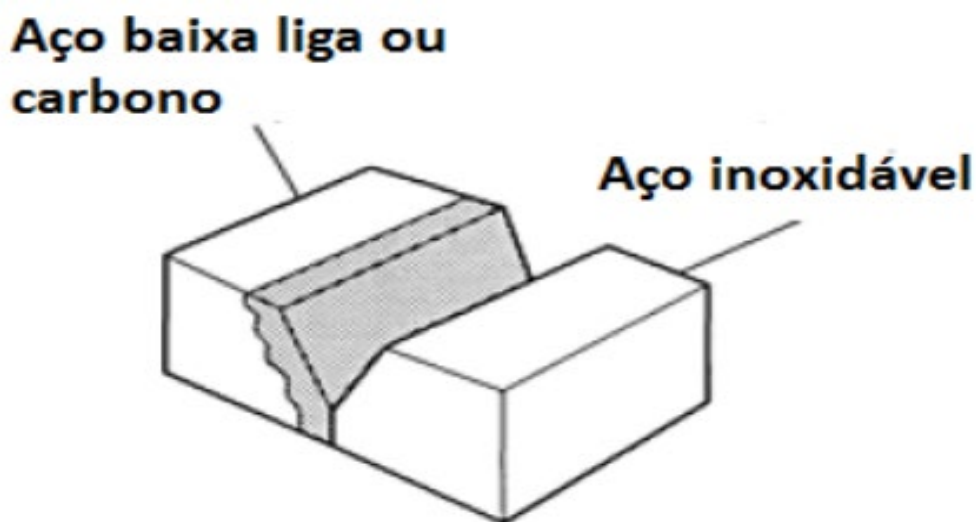
2.4 Juntas dissimilares

De acordo com (Lazzari, *et al* 2013), a soldagem de juntas dissimilares refere-se a materiais que possuem composições químicas e metalúrgicas diferentes, como o aço carbono e os aços inoxidáveis, é necessário que seja feita uma avaliação das propriedades mecânicas de ambos os metais, com o intuito de encontrar um ponto de aceitação e equilíbrio entre os metais e os consumíveis.

A probabilidade de descontinuidades surgirem devido os diferentes tempos de solidificação dos metais, a diferença coexistente do ponto de fusão dos metais pode ocasionar trincas de solidificação ou até mesmo aprisionar no metal de solda compostos provenientes da queima dos elementos químicos existente no consumível o que pode ser prejudicial para o cordão de solda (LAZZARI, *et al*; 2013).

Para atender e buscar um equilíbrio entre o metal de adição e os metais de base utiliza-se um método conhecido na indústria chamada de “amanteigamento” que adiciona a junta de materiais dissimilares um consumível que possa buscar um ponto mais próximo do equilíbrio.

Figura 10 - Junta dissimilar



Fonte: Lazzari, *et al*, (2013)

2.4.1 Aços

De acordo com (Togni, Xavier, Cazado,2015), na produção das indústrias este material é bastante empregado, pois trata-se de um aço estrutural de boa resistência mecânica, se comporta bem quando a necessidade de serviços de conformação e estamparias, além de ter uma boa soldabilidade, podemos encontrá-lo produzidos de várias formas, laminado a quente e a frio, forjados e fundidos.

Podemos encontra-lo também como resultado de tratamentos térmicos aplicado quando se deseja uma determinada propriedade mecânica, podem ser encontradas em diversas geometrias como chapas, barras, chatos, a necessidade do projeto uma certa resistência mecânica e metalúrgica devido sua composição química que pode variar desde a adição de carbono ou até elementos que fazem com que o metal possa migrar para uma linha de ligas mais específicas, os aços são classificados de forma diferentes, e são relacionados com sua composição química e instituição que catalogou, a seguir temos alguns exemplos:

- ABNT NBR 6006, que os classifica de acordo com sua composição química e resistência mecânica.
- AISI (American Iron and Steel Institute), ou Instituto Americano de Ferro e do Aço.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), ou Sociedade Americana de Testes de Materiais.
- SAE (Society Automotive Engineers), ou Sociedade de Engenheiros Automotivos.

2.4.2 Aços Inoxidáveis

De acordo com (Silva, 2008), a adição de elementos como o Cromo (Cr), em ligas de aço melhoram algumas propriedades mecânicas e metalúrgicas, quando uma liga contém em sua fórmula um teor superior a 12% de cromo esta pode-se considerar inoxidável, seu desempenho em ambientes hostis onde a probabilidade de um princípio de oxidação e evolução para a corrosão é retardada quanto atingisse teores de 12%, ou acima desse. Estas ligas também apresentam boas características como trabalhos a frio, assim como a elevada resistência a elevadas temperaturas sem que se perca propriedades, lembrando que, essas aplicações são bem toleradas a trabalhos em temperaturas até aproximadamente 450°C. A eficácia de um aço inoxidável não depende apenas do ambiente de emprego do metal, mas também, do processo de fabricação no qual este será submetido para a obtenção do produto, atualmente existem cinco classes de aços inoxidáveis.

2.4.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Apresentado como “18/8”, devido sua composição química mais conhecida onde tem 18% de Cromo e 8% de Níquel, ótima resistência a corrosão, em relação aos citados anteriormente apresenta baixos teores de carbono que situa-se até 0,08% característica que favorecem a bom desempenho quando aplicados a temperaturas mais altas, possui estrutura (CFC), cúbica de face centrada, devido a adição de níquel essa fase é predominante, o que também possibilita a aplicação em ambientes onde a temperaturas baixas.

2.4.4 Aço A36

Este aço é considerado de média resistência mecânica, muito empregado onde se requer resultados satisfatórios, não necessita de grandes investimentos devido, seu baixo custo de fácil acessibilidade encontrados em diversas geometrias como chapas, perfis, tubos entre outros, pode ser facilmente retrabalhado para acabamento como o emprego de tratamentos superficiais, como pinturas ou revestimentos pois sua composição torna o susceptível à

oxidações ou corrosões principalmente nas regiões onde ocorrem retrabalhos, em geral é amplamente utilizado na metalmecânica.

Para as aplicações estruturais apresenta boa soldabilidade sem requer muitos cuidados com consumíveis especiais, geralmente não necessita de tratamentos de pré ou pós aquecimentos para trabalhos na soldagem, ao menos que esteja especificado em projeto, sua composição química o carbono até 0,28%, o Manganês varia de 0,6 até 1,20.

2.5 Metalurgia da Soldagem

De acordo com (Lazzari, *et al* 2013), o processo de soldagem requer habilidades práticas, mas é indispensável o conhecimento metalúrgicos, com o intuito de prever ou antecipar-se a possíveis problemas ocasionados pelo aquecimento e o gradiente de resfriamento que muitas das vezes não é proporcional.

Noções de fundição, interpretação dos resultados dos ensaios mecânicos, assim como os ensaios não destrutivos, ajudam a tomar iniciativas que serão benéficas para junta soldada.

De acordo com (Taniguchi, 2013), o calor é um dos elementos essenciais para a poça de fusão e fará com os metais venham a se unir, porém é necessário o controle deste calor localizado na junta, e envolve outros fatores como; composição química dos metais de base e o comportamento particular de cada um deles quando submetido a altas temperaturas, a exemplo disto temos as regiões de solda que são as resultantes do aquecimento e contração dos metais durante a solidificação do metal de adição e em alguns casos podem ser favoráveis para a junta soldada, pois nestas regiões ocorrem transformações metalúrgicas que podem comprometer a aplicação.

2.5.1 Transformações na Junta Soldada

De acordo com (Gimenes, *et al* 2013), antes de passar pelo processo soldagem a junta apresenta uma microestrutura quase que uniforme, porém com a aplicação do calor imposto pela soldagem, esta microestrutura é modificada e sofre ações de tração durante o resfriamento seguido da solidificação do metal

de adição, podemos considerar que as juntas soldadas podem ser afetadas por fatores como elementos da composição química dos metais de base e o gradiente de resfriamento do metal de adição. Contrações e distorções durante a solidificação causam alterações metalúrgicas nas áreas adjacentes aos cordões de solda, ao analisar estas regiões observamos que os tamanhos dos grãos assim como sua morfologia também indicam uma mudança de estrutura em relação a temperatura, conforme Figura 11.

Em alguns casos essas alterações metalúrgicas podem contribuir para redução na resistência do material e consecutivamente a inutilização para qual a junta foi dimensionada, para casos em que a resistência a corrosão é imprescindível como no caso dos aços inoxidáveis esse aporte térmico pode fazer com que ocorra uma mudança na composição química em regiões específicas deixando o material desprotegido ou descaracterizando sua aplicação original.

Figura 11 - Regiões da junta soldada



Fonte: Brandi, (2013)

2.5.2 Aporte Térmico (*Heat Input*)

A soldagem emprega uma alta e intensa energia localizada podendo causar modificações microestruturais. O entendimento ajuda a reduzir efeitos indesejáveis, como por exemplo transformações metalúrgicas, tensões residuais

e nas propriedades mecânicas da junta soldada (BRANDI 2004). Expressada como a quantidade de energia empregada por unidades de comprimento chamada de aporte térmico e no Inglês podemos ler como (Heat Input). Para cálculo dessa energia utilizamos a equação (1), detalhada na Tabela 3. Baseado no Código ASME IX QW- 409.1 para soldagem a arco elétrico como estudado nesse trabalho o calor foi determinado conforme equação (1).

$$H = \frac{V.I}{Vel.de Soldagem} .60 \quad (1)$$

Determinada por cada processo soldagem, o arco submerso tem uma alta taxa de energia transferida para a peça, em comparação o processo TIG, possui uma baixa taxa transferida para a junta, ressalta ainda que quanto maior a energia designada para o processo maior será a caloria transferida, denominada ZAC (zona afetada pelo calor), a Tabela 4, apresenta a eficiência térmica para os processos.

Tabela 3 - Eficiência térmica dos processos

Processo	Eficiência
TIG	20 – 50%
MIG/MAG	70 – 85%
Eletrodo Revestido	70 – 80%
Arame Tubular	65 – 85%
Arco Submerso	90 – 99%

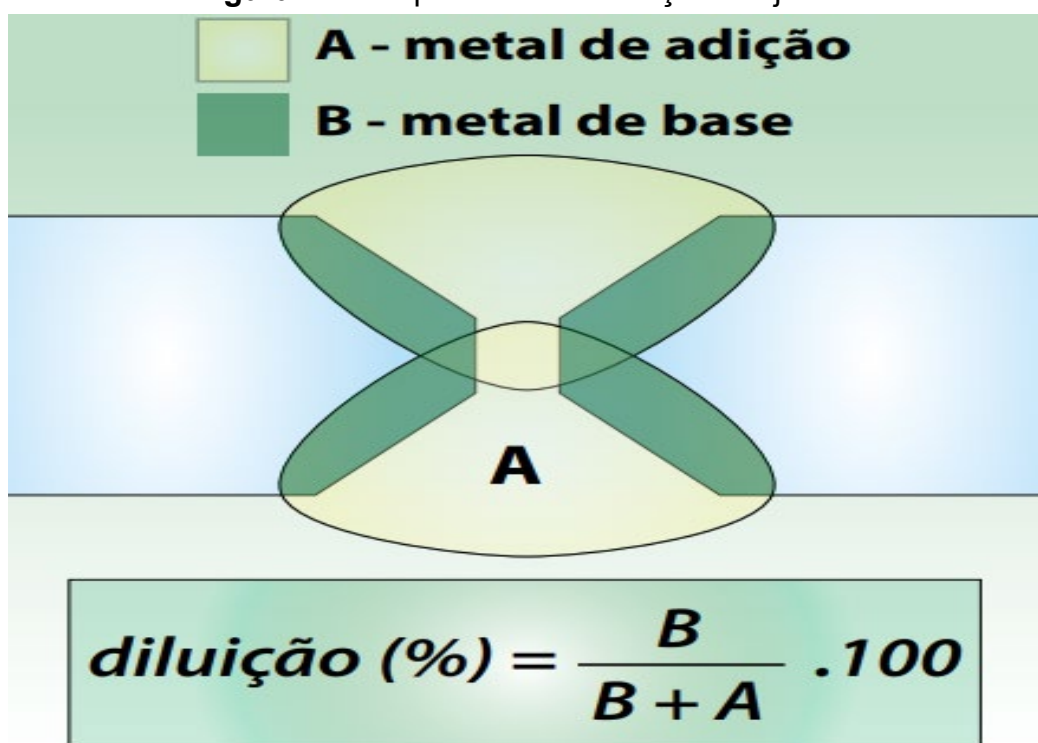
Fonte: Metalmecânica – Metalurgia, (2013)

2.5.3 Diluição

Segundo (Modenesi et al.,2005, p.94), diluição é o percentual do metal de base que entra na junta, ou seja, a quantidade de metal de base que se fundiu juntamente com o metal de adição depositado na junta soldada, o controle desse percentual é de suma importância em juntas dissimilares, em deposições de revestimentos, em soldas de matérias de bases desconhecidos e com altos

teores de elementos que prejudicam a zona fundida exemplos esses o carbono e o enxofre, na Figura 13.

Figura 12 - Esquemático de diluição em junta soldada



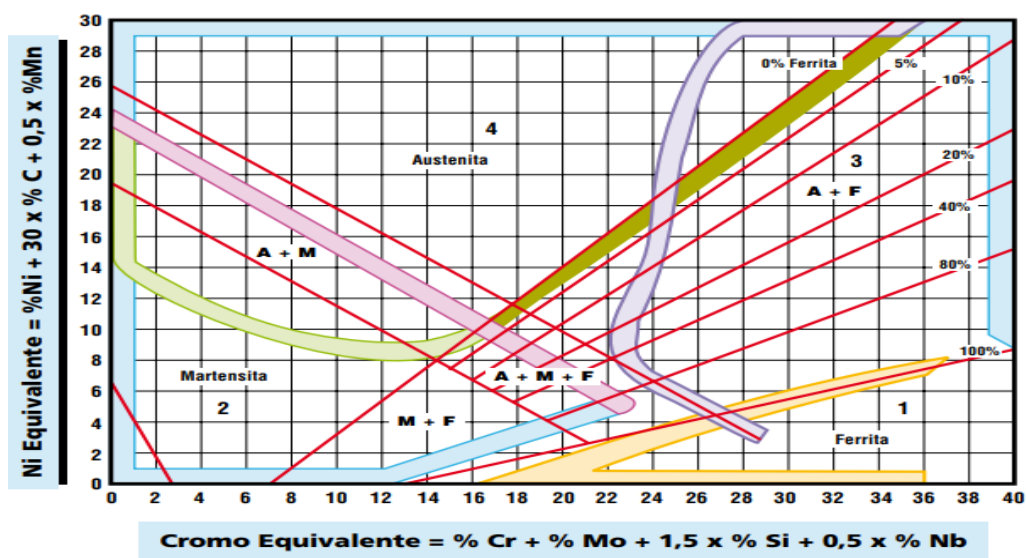
Fonte: Rodrigues, *et al.*, (2022)

2.5.4 Diagrama de Schaeffler

Segundo (Padilha, Guedes, 2004), as observações dos diagramas de equilíbrio proporcionam uma orientação a respeito de possíveis regiões ou fases que o possam ocorrer para um determinado tipo de aço inoxidável, abaixo temos do diagrama de Schaeffler, muito utilizado para determinara algumas regiões, que caracterizam determinadas fases indesejadas, nos aços inoxidáveis.

Na soldagem é comum que a fase do resfriamento do metal de base não necessariamente seja a mesma da configuração inicial, portanto com a utilização do diagrama é possível prever em qual fase será a resultante utilizando-se de dados do tipo do aço inoxidável e dos consumíveis.

Figura 13- Diagrama de Schaeffler



Fonte: Rodrigues. *et al.*, (2022)

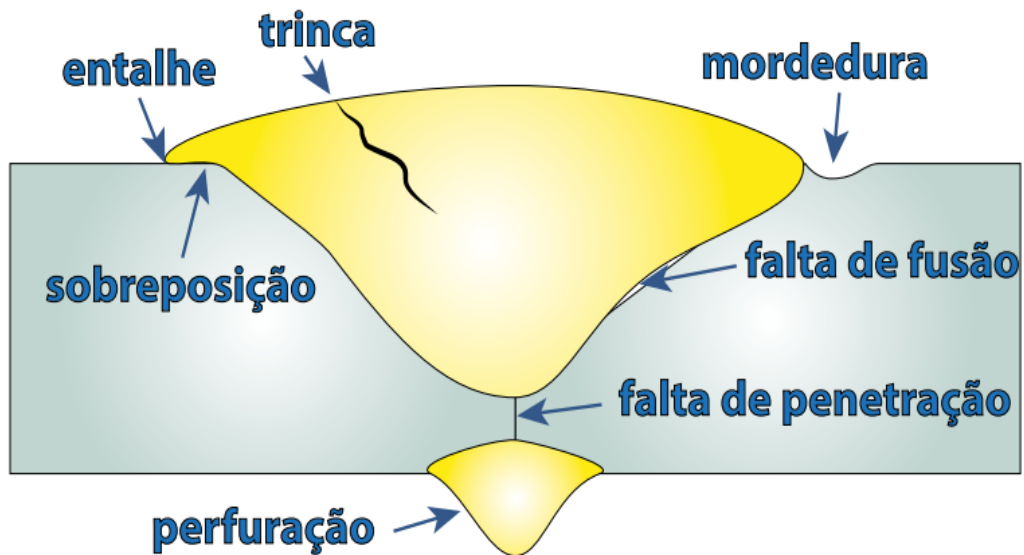
2.6 Qualidade na Soldagem

De acordo com (Branchini, 2013), os processos de soldagem estão em constantes evolução, visando as diversidades com opções de aço existentes no mercado e as demandas por aplicações que requerem cada vez mais precisam. A soldagem é um dos processos mais críticos na indústria, por este motivo se faz necessário a buscar por aprimoramento, regida pela ASME seção IX, as documentações, testes, certificações e qualificações devem fazer parte do processo, bem aplicada pode reduzir os riscos. Manter a documentação dos processos de soldagem é de extrema importância, os operadores de soldagem quando qualificados consegue manter um padrão de qualidade para o processo.

2.6.1 Descontinuidades na Soldagem

De acordo com (Rodrigues. *et al.*, 2022), os materiais metálicos podem apresentar alguns tipos de defeitos ou descontinuidades e ao serem submetidos a processos de fabricação críticos, como a soldagem aumentam a probabilidade desses defeitos se propagarem ocasionando danos, retrabalhos ou até mesmo inutilizando a junta e fazendo com que o processo e técnica sejam revistos, na Figura 14, podemos acompanhar alguns defeitos que são comuns e intrínsecos aos processos de soldagem.

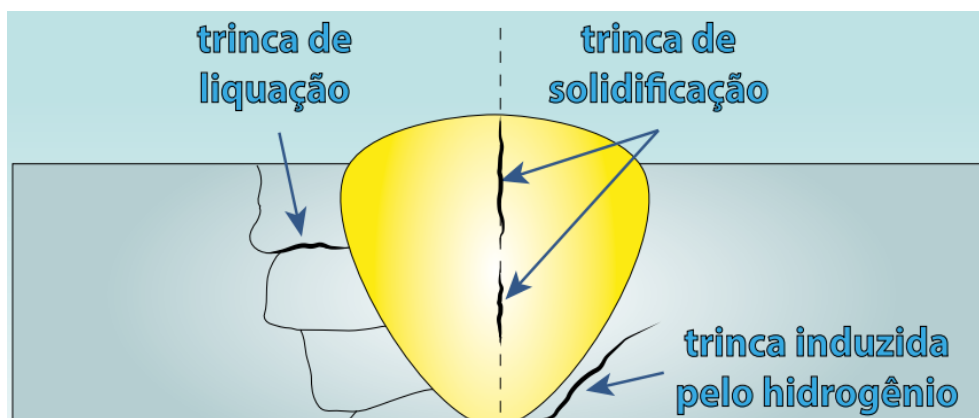
Figura 14 - Falhas comuns aos processos de soldagem



Fonte: Rodrigues, *et al.*, (2022)

Já as discontinuidades apresentadas na Figura 15, têm uma relação muito próxima a adventos metalúrgicos como mostrado a trinca por hidrogênio pode estar relacionada a escolha do consumível errado, à composição química do metal de base, armazenamento e acondicionamento dos consumíveis, mesmo sem que haja falhas de origens no metal.

Figura 15 - Descontinuidades de possíveis causas metalúrgicas

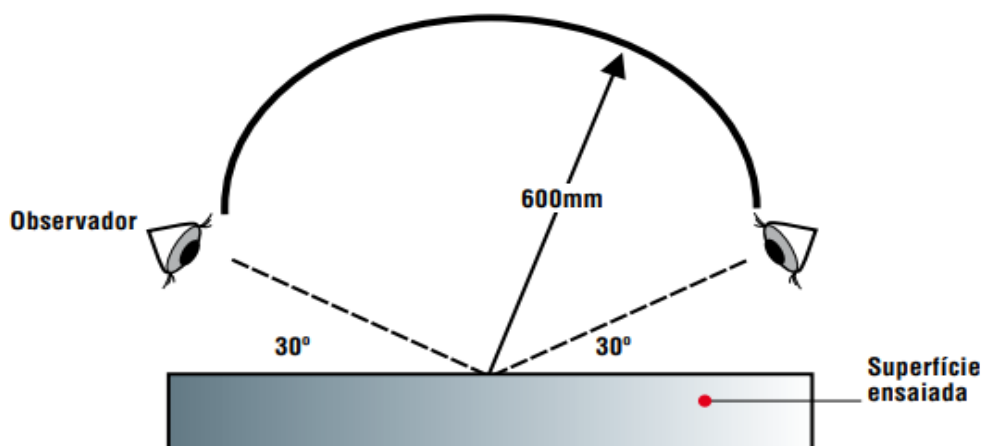


Fonte: Rodrigues, *et al.*, (2022)

2.7 Ensaios Não Destrutivo (Ensaio Visual)

De acordo com o artigo 9º do código ASME V, que as juntas devem ser inspecionadas afim de eliminar quais quer resíduos. Define-se como um ensaio não destrutivo a avaliação de equipamentos ou peças sem que haja a necessidade de remoção de parte delas para a sua observação, o ensaio visual pode ser feito de duas maneiras de forma direta com a visualização em uma distância de até 600mm, entre a peça e os olhos do examinador tendo um ângulo de 30º, ou de forma indireta com a utilização de instrumentos como fibras óticas ou lupas, Figura 16.

Figura 16 - Ilustração do ensaio visual



Fonte: Adaptado de Mendonça *et al*, (2012)

2.7.1 Ensaios Mecânicos

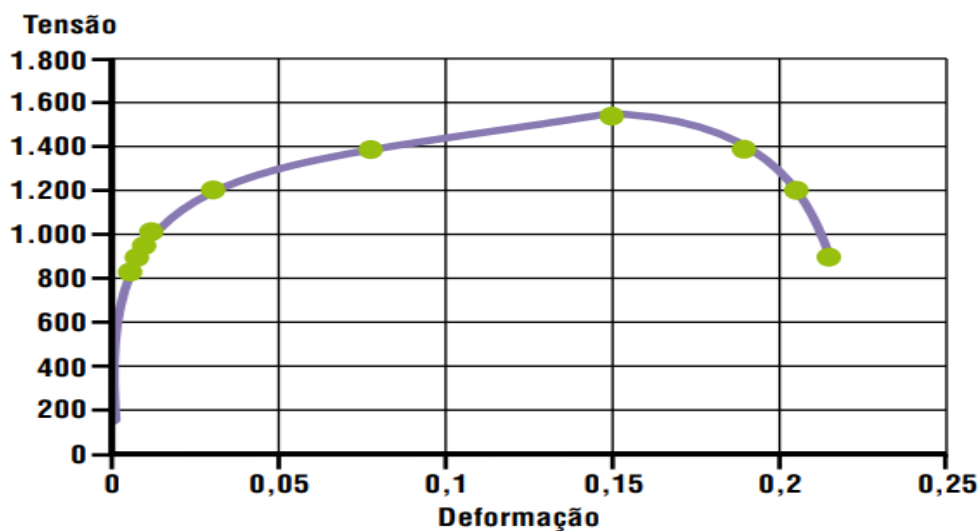
De acordo com (Mendonça *et al* 2012), os ensaios mecânicos são um dos primeiros pontos a serem analisados nos projetos de engenharia, pois eles são capazes de nortear e dar parâmetros para o desenvolvimento, assim como comprovar e certificar que determinado processo de fabricação foi capaz de exercer características semelhantes ao metal base. Certos ensaios mecânicos simulam situações ou condições em que o metal será condicionado durante seu

funcionamento, mensurando o quanto é capaz de suportar sem que haja um colapso, ou um dano irreversível, como o modo de elasticidade seja excedido, chegando a regiões conhecidas como regime elástico onde o metal não voltará a sua forma inicial.

2.7.2 Ensaio de Tração

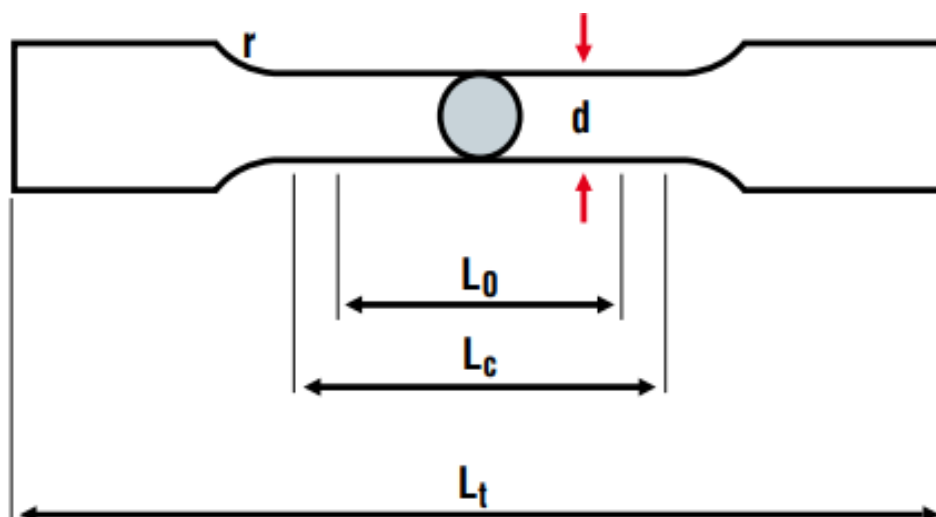
Bastante empregado na área de metalmecânica, pois pode-se observar propriedades mecânicas como, resistência à tração, elasticidade, e o limite de resistência, este ensaio consiste em aplicar cargas no material com força trativa, e através de um gráfico é possível acompanhar qual o comportamento do material, Figura 17.

Figura 17 - Tensão X Deformação



Fonte: Adaptado de Mendonça *et al*, (2012)

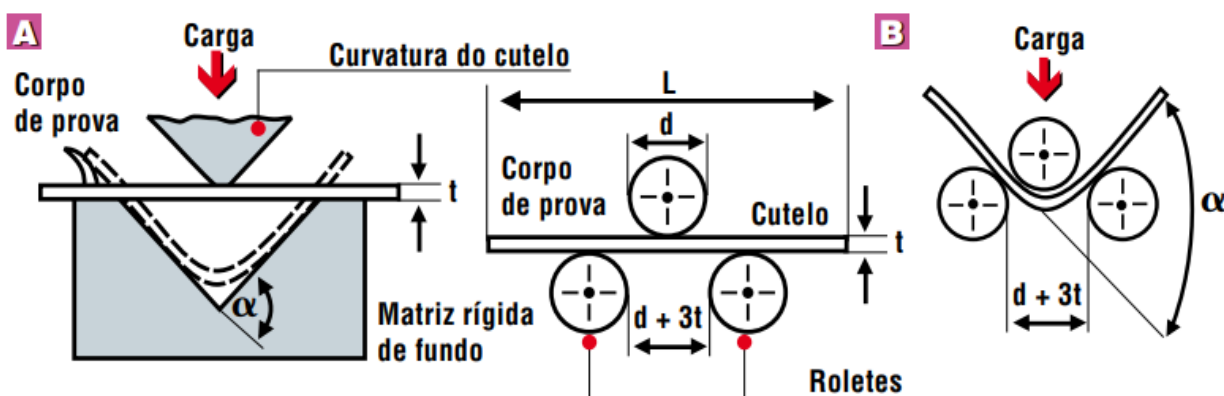
Na Figura 18, apresenta um CP, do modelo chato assim como suas regiões, neste tipo de ensaio também costuma-se fazer a utilização de um outro instrumento extensômetro, que ajuda a coletar dados mensurando a diferença de comprimento a (alongamento), das regiões que estão sendo submetidas a forças trativa de toda a área útil do CP.

Figura 18 - Regiões do corpo de prova

Fonte: Adaptado de Mendonça *et al*, (2012)

2.7.3 Ensaio de Dobramento

O ensaio baseia-se na condição de que o material suporta ser dobrado sem que haja aberturas ou trincas, basicamente consiste em apoiar o CP em suportes que podem fixos ou roletes, com um determinado espaçamento entre eles, quanto menor o espaço, maior é a severidade do ensaio. A carga é aplicada no sentido oposto aos roletes, até que o metal se adeque ao formato do sentido contrário a aplicação da carga, neste ensaio geralmente não são mensuradas cargas e sim o aspecto visual, como rachaduras ou trincas, conforme Figura 19.

Figura 19 - Ensaio de dobramento

Fonte: Adaptado de Mendonça *et al*, (2012)

2.7.4 Testes de Dureza

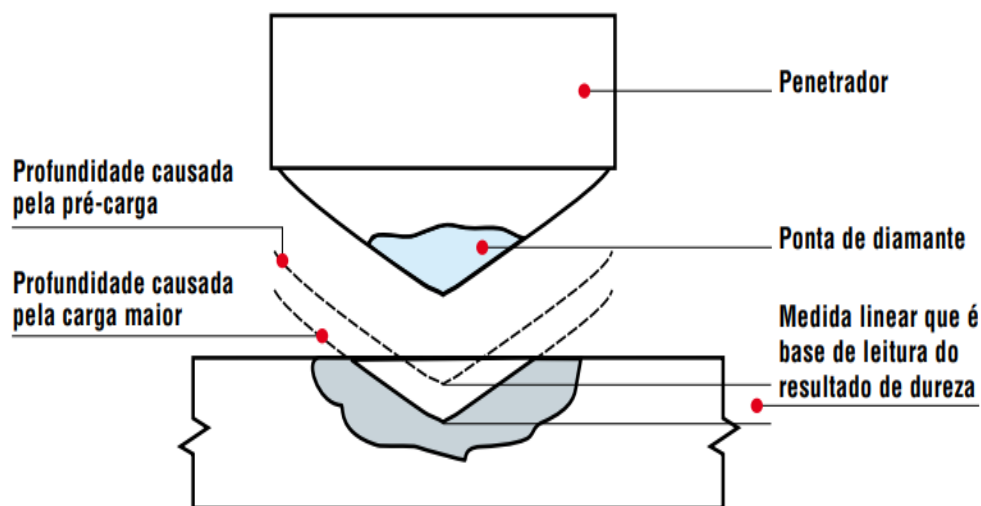
Trata-se de um método no qual aplica-se uma carga sobre uma região específica, já determinada, a fim de extrair dados de dureza, seja por diversos motivos, podendo ser após os processos de soldagem para entender se as regiões da junta soldada sofreram alterações devido as colorias aplicadas, ou a eficácia dos processos de tratamento térmico onde é possível mensurar a dureza superficial, como por exemplo as engrenagens que tem seus dentes com camadas superficiais mais resistentes em relação ao núcleo. A Figura 20, apresenta dois modelos de durômetros com escalas diferentes assim como suas interpretações variam de acordo com a sensibilidade dos penetradores.

Figura 20 - Equipamento de teste de dureza



Fonte: Adaptado de Filho, (2019)

Ainda segundo (Mendonça *et al* 2012), o ensaio é feito com inserção de penetradores na superfície do metal e a resistência que os penetradores encontram para marcar ou criar irregularidades no metal é convertida em leitura através de carga. Os penetradores para o teste de dureza Rockwell são do tipo esférico (com uma liga tratada termicamente a fim de obter maior dureza), e o cônico de diamante, conforme Figura 21.

Figura 21 - Impressão da carga no metal

Fonte: Adaptado de Mendonça *et al*, (2012)

2.7.5 Ensaios de Metalográficos

Segundo (Silva, 2004), a macrografia é dada através de exame visual com o auxílio de microscópio específico para o ensaio e alguns processos realizados na peça a ser inspecionada, para a realização de uma macrografia é necessário seguir uma etapa de preparação na peça, para que esteja isenta de riscos ou imperfeições, em boas condições. É considerado um ensaio destrutivo pois é necessário utilizar partes do metal ou até mesmo de peças que falharam durante o seu funcionamento, materiais que sofreram aporte térmico como na soldagem, o ensaio macroscópico faz jus ao nome pois neste é permitido observar apenas estruturas maiores, com até (10X), a proporção real da peça.

Assim como a macrografia a micrografia, também necessita de um microscópio e preparação, e que as etapas de preparação sejam respeitadas como a, escolha da região a ser analisada, para visualização das microestruturas é feito o ataque químico através de reagentes específicos para cada material, com tempo de exposição da peça ao reagente químico, seguido de interrupção com soluções específicas, a secagem é feita com um soprador térmico, seguido de observação via microscópio, para a micrografia os aumentos vão de 50X até 1000X, neste ensaio é possível observar os tamanhos de grãos do metal.

2.8 Código ASME

Segundo o código (ASME, 2019), foi elaborado com base em procedimentos certificados e testados, seguindo critérios padrões americanos, sendo revisado e com a adição dos comentários de profissionais que contribuíram para os melhores padrões industriais, porém o código ASME não aprova, certifica, avalia ou endossa qualquer item de construção de produtos de atividades próprias, nem toma posições com as patentes de itens mencionados em seus documentos.

2.8.1 Código ASME Seção II Parte C

ASME II, traz normativas para os materiais ferrosos e não ferrosos, já em sua PARTE C, apresenta consumíveis de soldagem como a SFA-5.9/SFA-5.9M, para soldagem de aço inoxidáveis, eletrodos e varetas, assim como os teores de cromo. Para esses consumíveis as adições não podem ser inferiores a 10,5%, assim como outros elementos serão considerados em seus valores mínimos.

A composição química dos metais de adição é feita com uma série de números e letras. A título de exemplo temos o, "L e H", onde o L, identifica um teor de carbono baixo e o H, um teor mais elevado do carbono, já os números se assemelham as características do metal de base como por exemplo o 309, classe austenítica.

Podemos verificar nas embalagens dos consumíveis a sigla AWS (American Welding Society), ou Sociedade Americana de Soldagem, demonstram que o produto atende aos requisitos da instituição que demanda diversos padrões para o seguimento da soldagem.

2.8.2 Código ASME Seção VIII Divisão 1

Nesta divisão 1 do código ASME VIII, esclarece que os vasos de pressão são considerados equipamentos para armazenamento de pressão com fontes internas ou externas, além disso a pressão pode ser gerada também por fontes de calor, ou até mesmo a combinação destes, este código foi desenvolvido com base de procedimentos acreditados atendendo as normas de padrões americanos, a instituição ainda ressalva que não aprova ou certifica qualquer

item ou construção, apenas apresenta diretrizes de boas práticas de fabricação, advertindo sobre as obrigações e proibições, assim como as inspeções e testes de certificação que devem ser realizados nos vasos de pressão e também na qualificação dos procedimentos críticos e os operadores desses processos.

2.8.3 Código ASME Seção IX Qualificação dos Processos de Soldagem e Brasagem, (RQPS e EPS)

De acordo com código ASME seção IX, uma EPS (especificação do procedimento de soldagem), é aplicada na área fabril e obrigatoriamente deve ser aprovada através de uma RQPS (registro de qualificação do procedimento de soldagem), servindo como um roteiro de soldagem, com o metal de base, consumível, e quais testes serão escolhidos para a validação do processo.

Na elaboração da EPS, devem constar os dados do processo de soldagem e consumíveis, além de parâmetros de soldagem, fluxo de gases de proteção, controles de temperatura de interpasses e temperatura de armazenamentos dos consumíveis.

Para a soldagem de um vaso de pressão o soldador ou operador de soldagem deve ser qualificado conforme esta norma de acordo com o material a ser utilizado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A produção da porta da autoclave utiliza chapas de 8mm de aço inoxidável AISI 316L, e cantoneiras com espessura de 6mm do aço ASTM A 36/A 36M.

As chapas teste **(M)**, foram soldadas no processo GMAW, utilizado o consumível ER 309L (Si), arame maciço.

As chapas teste **(T)**, será aplicado o processo FCAW, com o consumível E309L T1 1/4, arame tubular, as designações são elucidadas na tabela 5.

Tabela 4 - Designação e classificação das chapas testes e CP

Processo de Soldagem	Consumível	Gás de Proteção	Classificação
GMAW	ER309L Si (Maciço)	Ar 96% e CO ₂ 4%	(M) Maciço
FCAW	E309L T1 1/4	CO ₂ 100%	(T) Tubular

Fonte: Os autores, 2024

3.1 Corte dos Metais de Base

Serão realizados os ensaios de espectrometria, micro dureza e micrografia com o objetivo de caracterizar o material antes da execução dos procedimentos de soldagem. Foram extraídas tiras das chapas teste por meio de corte no jato d'água, conforme a Figura 23 abaixo.

Figura 22 Preparação das chapas para o corte jato d'água

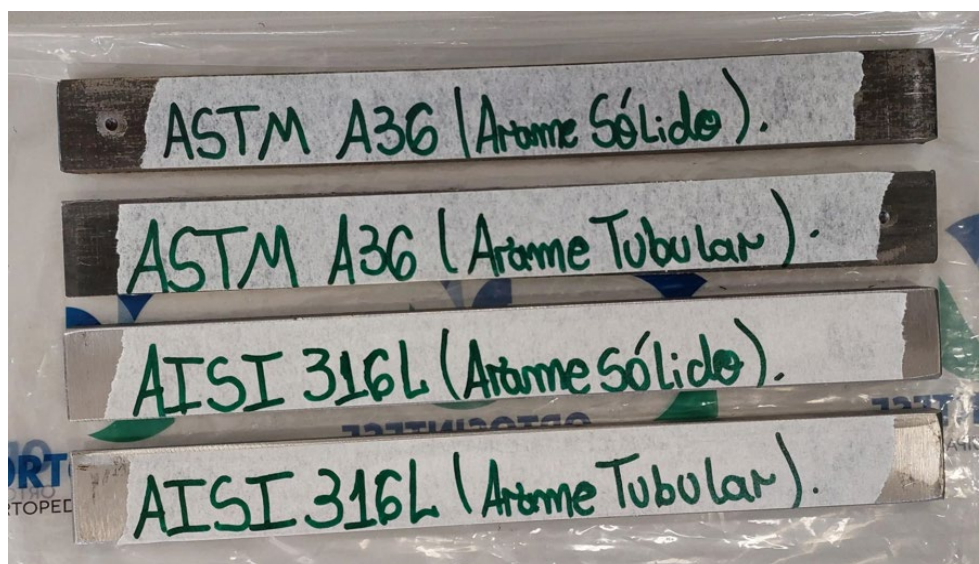


Fonte: Os autores (2024)

3.1.1 Identificação para envio ao laboratório

A identificação terá a adição das letras que antecedem os processos de soldagem que as chapas serão submetidas, processo GMAW (**M**), e as chapas que forem soldadas no processo FCAW (**T**), conforme Figura 24.

Figura 23 Identificação dos CP para os ensaios



Fonte: Os autores (2024)

3.1.2 Corpos de Prova para Ensaio de Composição Química, Micro dureza e Micrografias

De cada um dos metais de base foi retirada uma tira longitudinal onde serão executados os cordões de solda, com aproximadamente 250 mm de comprimento e 25 mm de largura e foram delimitados três pontos; para micro dureza, traçados de verde, como mostra na Figura 25 abaixo.

Depois da execução dos processos soldagem será feito um novo ensaio de micro dureza em CP para comparar os dados de dureza antes e depois da soldagem e verificar se houve alguma alteração significativa.

Destes CP também serão extraídas amostras para a análise de composição química com o objetivo de caracterizar os metais de base além de micrografias com tamanhos de grãos, que serão comparados antes e após os processos de soldagem.

Figura 24 CP para ensaio de micro dureza e micrografias

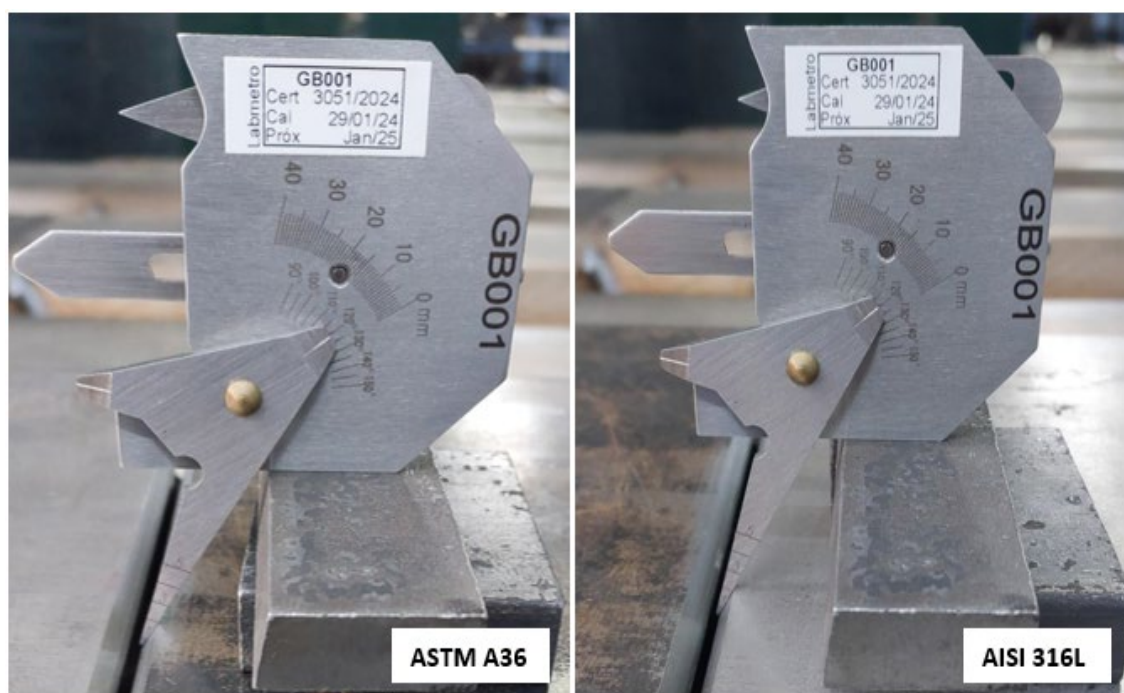


Fonte: Os autores (2024)

3.2 Preparação das Chapas Testes para os Processos de Soldagem

Foram realizados chanfros de 30° nos metais de base, com uma face de raiz de 2mm, na longitudinal, onde serão executados os cordões de solda, este chanfro foi feito com o equipamento fresadora e os chanfros foram dimensionados com o calibrador de solda GB001, conforme Figura 26.

Figura 25 Verificação do chanfro



Fonte: Os autores (2024)

Com o propósito de manter a abertura de raiz e reduzir o empenamento na execução da soldagem, as chapas testes foram ponteadas com quatro barras chatas com um recorte central em forma de “V” na parte inferior (lado da raiz), conforme Figura 27, o pontejamento foi feito com arame maciço 309L (Si), em ambos os metais de base.

Figura 26 Chapas testes fixadas com barras chatas



Fonte: Os autores (2024)

3.3 Execução dos Processos de Soldagem

A empresa Ortosintese, nos concedeu alguns recursos para realização deste estudo, como os metais de base, consumíveis, gases de proteção, local apropriado para a realização da soldagem, profissional soldador, equipamento de soldagem da marca KEMPPI, modelo (X3 WF 300), Figura 28, corte das chapas testes para a extração dos corpos de prova além do custeio de alguns ensaios.

Ambos os processos de soldagem (GMAW e FCAW), utilizaram o mesmo equipamento mencionado acima, (KEMPPI, modelo X3 WF 300), fazendo a substituição dos carretéis de arames de consumíveis, o equipamento permite ajuste conforme os parâmetros necessários para o processo.

Figura 27 - Equipamento de soldagem



Fonte: Os autores, (2024)

3.3.1 Execução dos Processos de Soldagem GMAW

O consumível utilizado para a soldagem das chapas testes, (M), no processo GMAW, foram baseados no código ASME II, PARTE C, com as seguintes especificações; SFA-5.9/SFA-5.9M ER 309L Si, bitola do arame 1.2 mm, conforme Tabela 6 abaixo, o gás de proteção utilizado para esse processo foi a mistura de (96% argônio e 4% de CO₂).

Tabela 5 - Composição química do consumível (M)

SFA A5.9/SFA-5.9M								
% em	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
peso	0,02	23,8	13,6	0,78	1,9	0,73	0,02	0,03
Propriedades mecânicas do consumível								
Resistência a Tração (Ksi)			Resistência a Tração (MPa)			Alongamento (%)		
75			520			30		

Fonte: Adaptado do certificado do consumível (2024).

Os parâmetros monitorados durante a execução da soldagem foram: Corrente (A), tensão (V), vazão de gás de proteção, velocidade de soldagem e temperatura, conforme descrito no Quadro 3 abaixo.

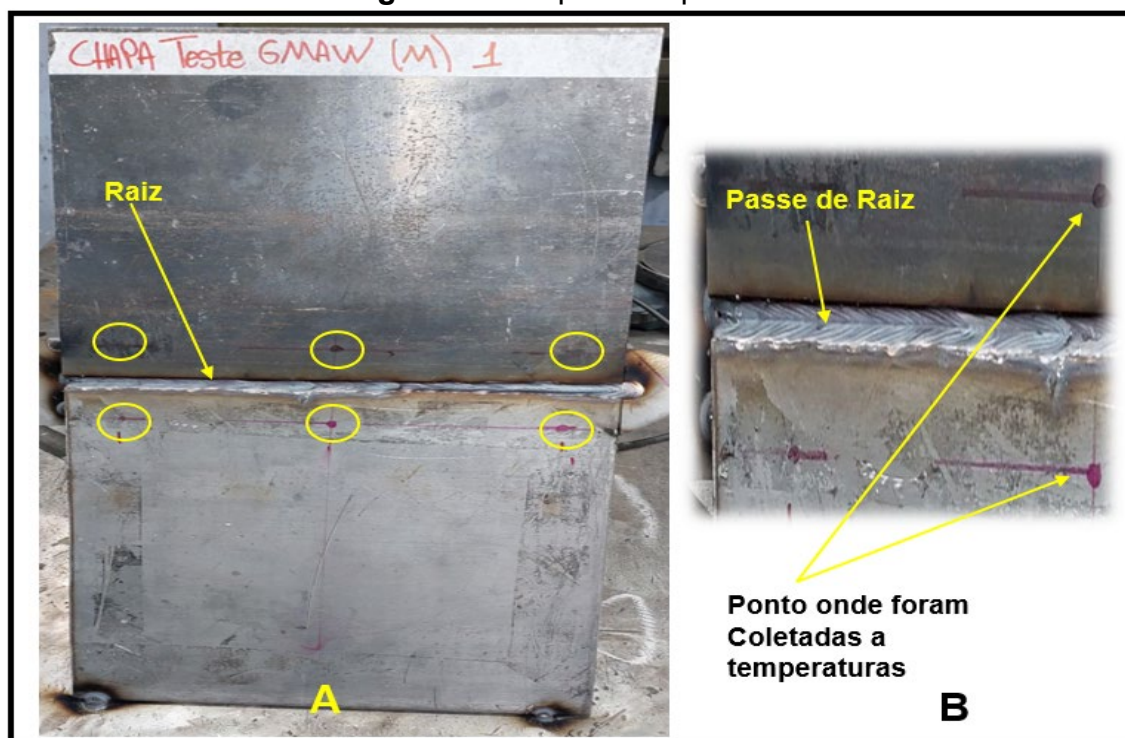
Quadro 3 Parâmetros do processos GMAW

✓ Corrente: 221 A	✓ Tensão: 20,4 V
✓ Fluxo de gás de 13l/min.	✓ 59 segundos em 310mm
✓ Temperatura	

Fonte: Os autores (2024).

A Figura 28, apresenta a chapa teste após o passe de raiz, do lado esquerdo (A), a identificação do passe de raiz com os pontos onde foram coletadas as temperaturas, e do lado direito (B), temos uma ampliação das regiões. Para o processo GMAW foi executado um passe de raiz, posteriormente mais quatro passes de preenchimento na face da chapa teste, por fim fizemos a goivagem da raiz com esmerilhadeira e discos abrasivos para o passe de preenchimento, totalizando 6 passes

Figura 28 Chapa teste processo GMAW



Fonte: Os autores (2024)

3.3.2 Controle da Temperatura entre Passes

Para monitoramento foi utilizado um termômetro digital infravermelho devidamente calibrado e parametrizado, conforme manual do fabricante que especifica para aços a emissividade (ϵ), de 0,93, medida em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), conforme Figura 29 apresentada abaixo. Esta sistemática foi realizada nos dois processos de soldagem.

Figura 29 Controle de temperatura durante a soldagem



Fonte: Os autores (2024)

3.3.3 Execução dos Processos de Soldagem FCAW

Posteriormente, foi soldada a chapa teste (T), também seguindo a mesma sistemática, um passe inicial de raiz, mais três passes de preenchimento, goivagem da raiz de forma mecânica com esmerilhadeira, seguido de preenchimento. O consumível utilizado para a soldagem das chapas teste, (T), no processo FCAW, foram baseados na norma ASME II, PARTE C, com as seguintes especificações: SFA-5.22/SFA-5.22M E 309L T1 1/4, bitola do arame 1.2 mm, conforme apresentado na Tabela 7, o gás de proteção utilizado para esse processo foi o (100% CO_2).

Tabela 6 - Composição química do consumível (T)

SFA A5.22/SFA-5.22M								
% em peso	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
	0,03	23,6	12,8	0,79	1,25	...	0,02	0,01
Propriedades mecânicas do consumível								
Resistência a Tração (Ksi)			Resistência a Tração (MPa)			Alongamento (%)		
75			520			30		

Fonte: Adaptado do certificado (2024)

Os parâmetros monitorados durante a execução da soldagem foram: corrente (A), tensão (V), vazão de gás de proteção, velocidade de soldagem e temperatura, conforme descrito no Quadro 4 abaixo.

Quadro 4 Parâmetros do processo FCAW

✓ Corrente: 184 A	✓ Tensão: 21,8 V
✓ Fluxo de gás de 13l/min.	✓ 52 segundos em 310mm
✓ Temperatura	

Fonte: Os autores

3.4 Ensaio Visual das Chapas Teste

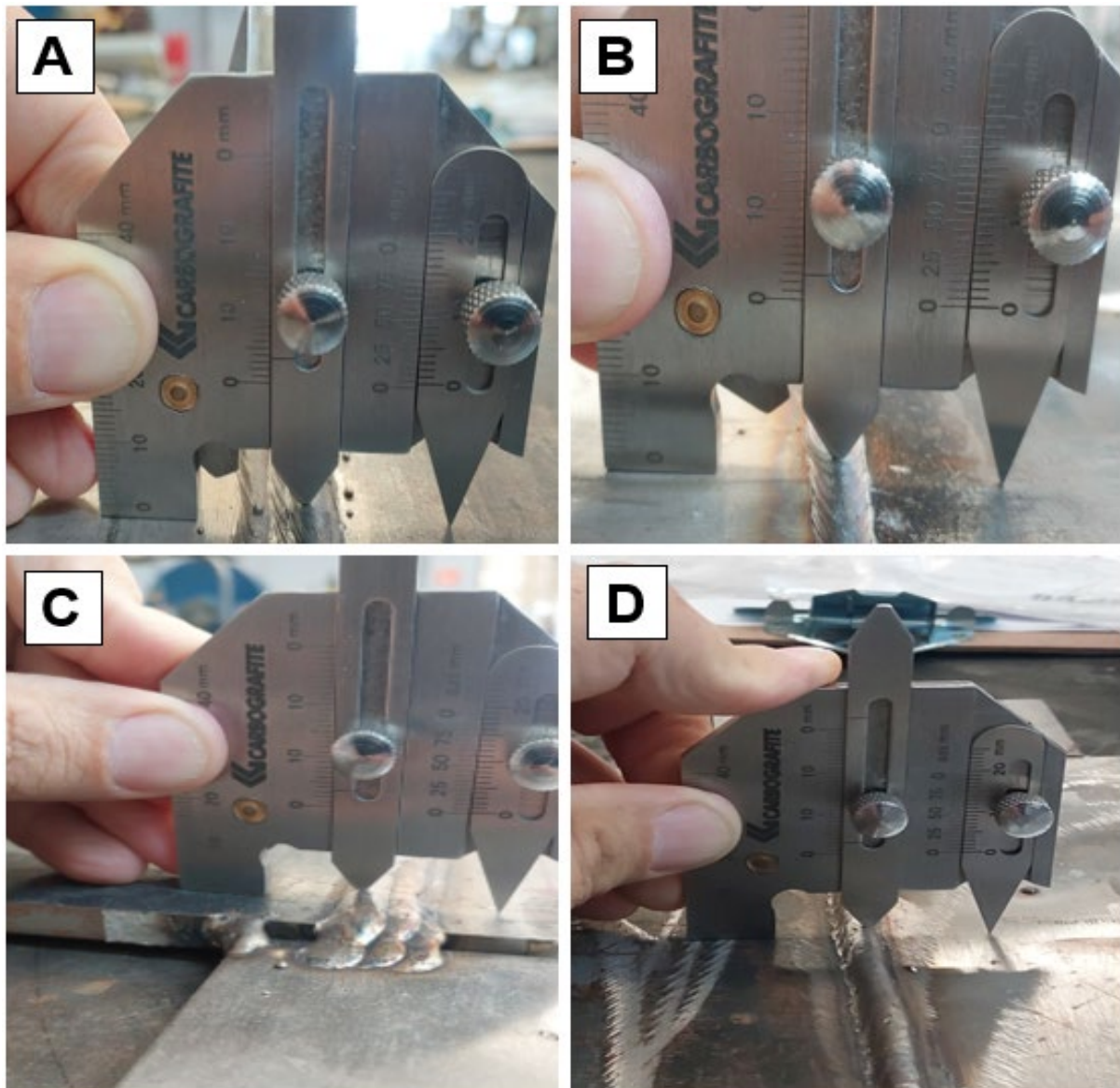
O ensaio visual das chapas teste foi realizado com o auxílio de um calibrador de soldagem (GB 001), para mensurar a altura dos cordões de solda, também foi utilizada a luz ambiente, este ensaio teve o propósito de identificar alguma descontinuidade visível a olho “nu”.

O ensaio visual foi realizado nas duas chapas testes (M), e (T), em ambos os lados na face e na raiz, para este ensaio não foram aplicados métodos complementares como líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom ou radiografia.

Tabela 7 Identificação do ensaio visual

Chapa Teste (M)	Chapa Teste (T)
Face da solda lado esquerdo (A)	Face da solda lado esquerdo (C)
Raiz da solda lado direito (B)	Raiz da solda lado direito (D)

Fonte: Os autores

Figura 30 Ensaio visual das chapas teste

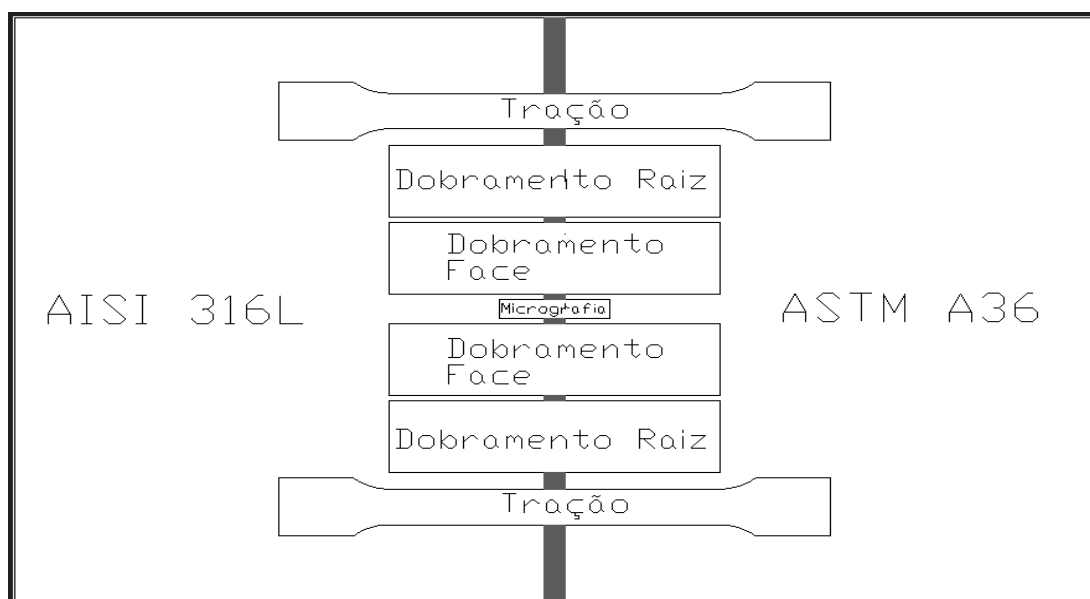
Fonte: Os autores (2024)

3.5 Preparação dos Corpos de Prova a Partir das Chapas Teste

Os corpos de prova foram preparados de acordo com a ASME IX, 2023, seguindo o QW-202 Tipos de ensaios necessários, o QW-463.1(a), fornece a

disposição que os CP devem ser extraídos da chapa teste, baseados nessas orientações elaboramos um plano de corte no jato d'água e a obtenção dos corpos de prova, essa disposição apresentamos na Figura 31.

Figura 31 Extração dos CP



Fonte: Os autores (2024)

3.5.1 QW-202.1 Testes Mecânicos.

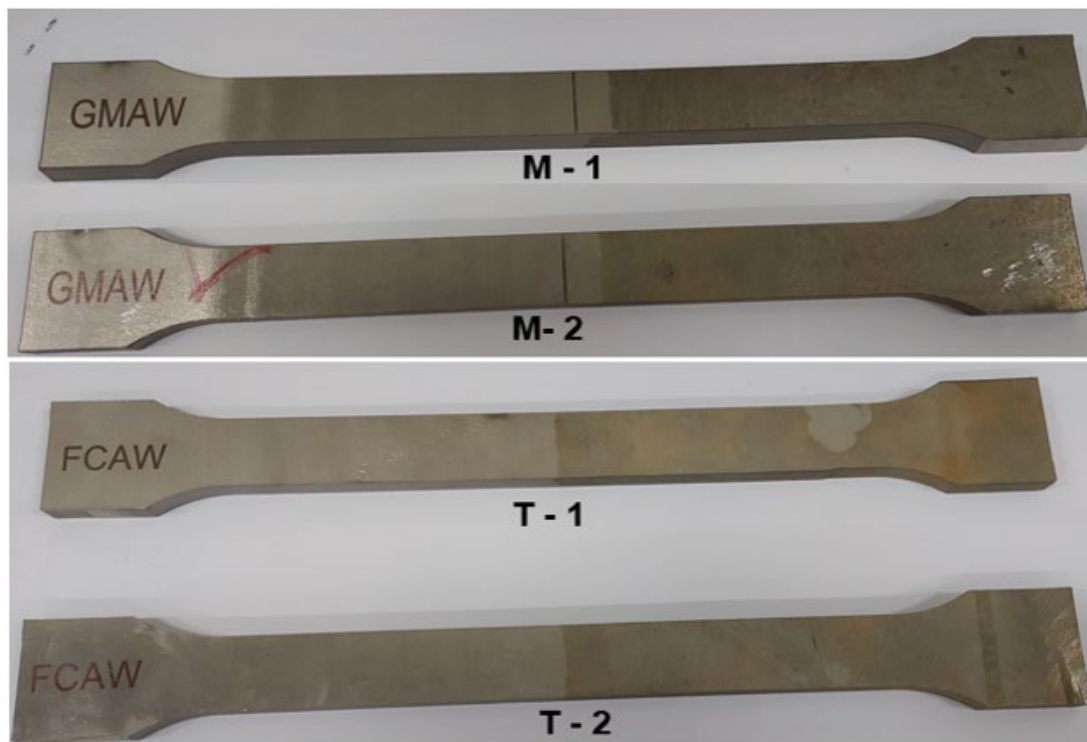
De acordo com a (ASME IX, 2023), para a qualificação de um procedimento de soldagem assim como o soldador é necessário um número mínimo de CP, estas especificações estão descritas em QW-451, conforme pode ser verificado na Tabela 8, para a espessura da chapa de estudo. Porém neste trabalho não será utilizada a espessura “T”, pois o metal de base possui a espessura de 7,93 mm (5/16”), dessa forma serão realizados dois ensaios de dobramento de face, dois dobramentos de raiz e dois ensaios de tração.

Tabela 8 - Requisitos dos ensaios

Ensaio	Tração	Dobramento de Face	Dobramento de Raiz
Artigo	QW-150	QW-160	QW-160
Quantidade	2	2	2

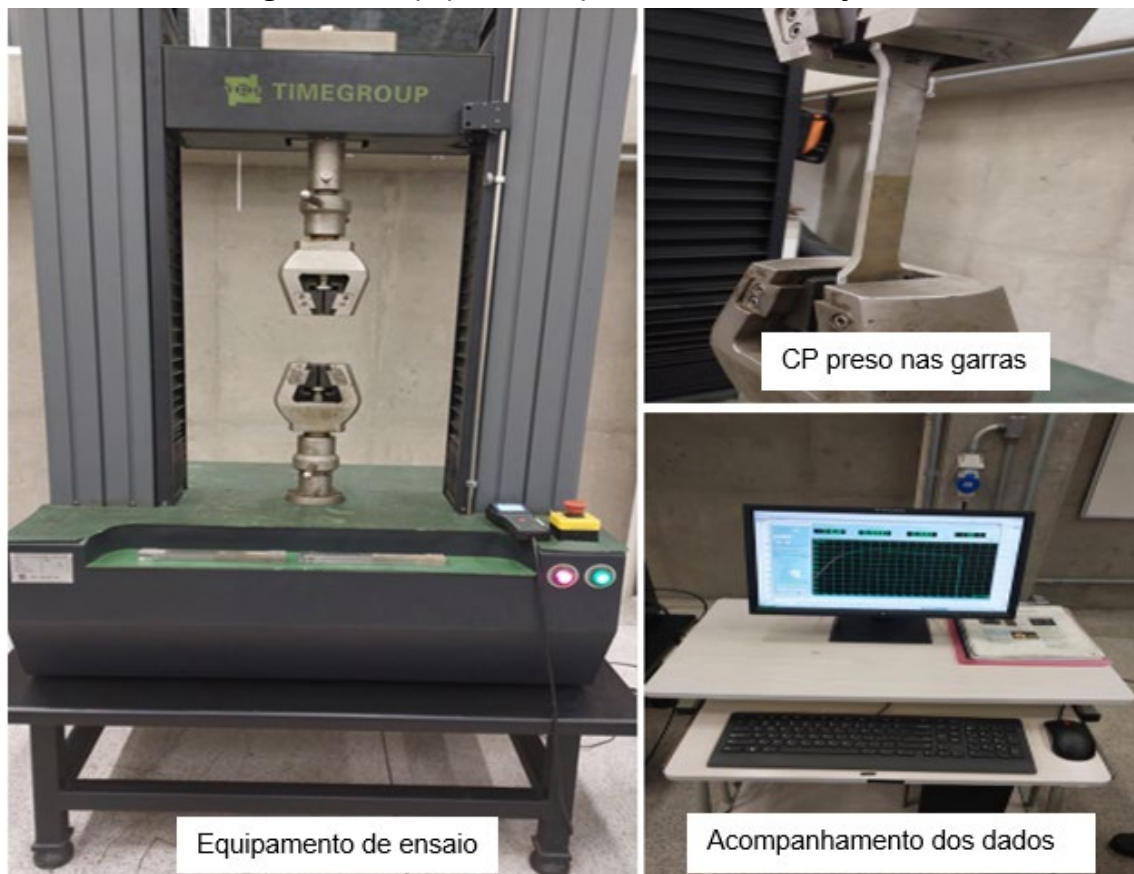
Fonte: Adaptado de ASME IX, (2023)

Figura 33 CP para os ensaios de tração



Fonte: Os autores, (2024)

Figura 34 Equipamento para ensaio de tração



Fonte: Os autores, (2024)

3.5.4 QW-160 Testes de Dobra Guiada

Os ensaios de dobramento foram realizados conforme descrito no código ASME IX 2023, adotando os testes necessários conforme a QW-451, a disposição para a remoção conforme a QW-463.1(a), e dimensionados como a QW-462.3(a).

Como já visto na Tabela 9 neste trabalho foram realizados 2 ensaios de dobramento de face transversal e 2 dobramentos de raiz, para cada um dos processos estudados, o corte foi realizado no jato d'água, como na Figura 35.

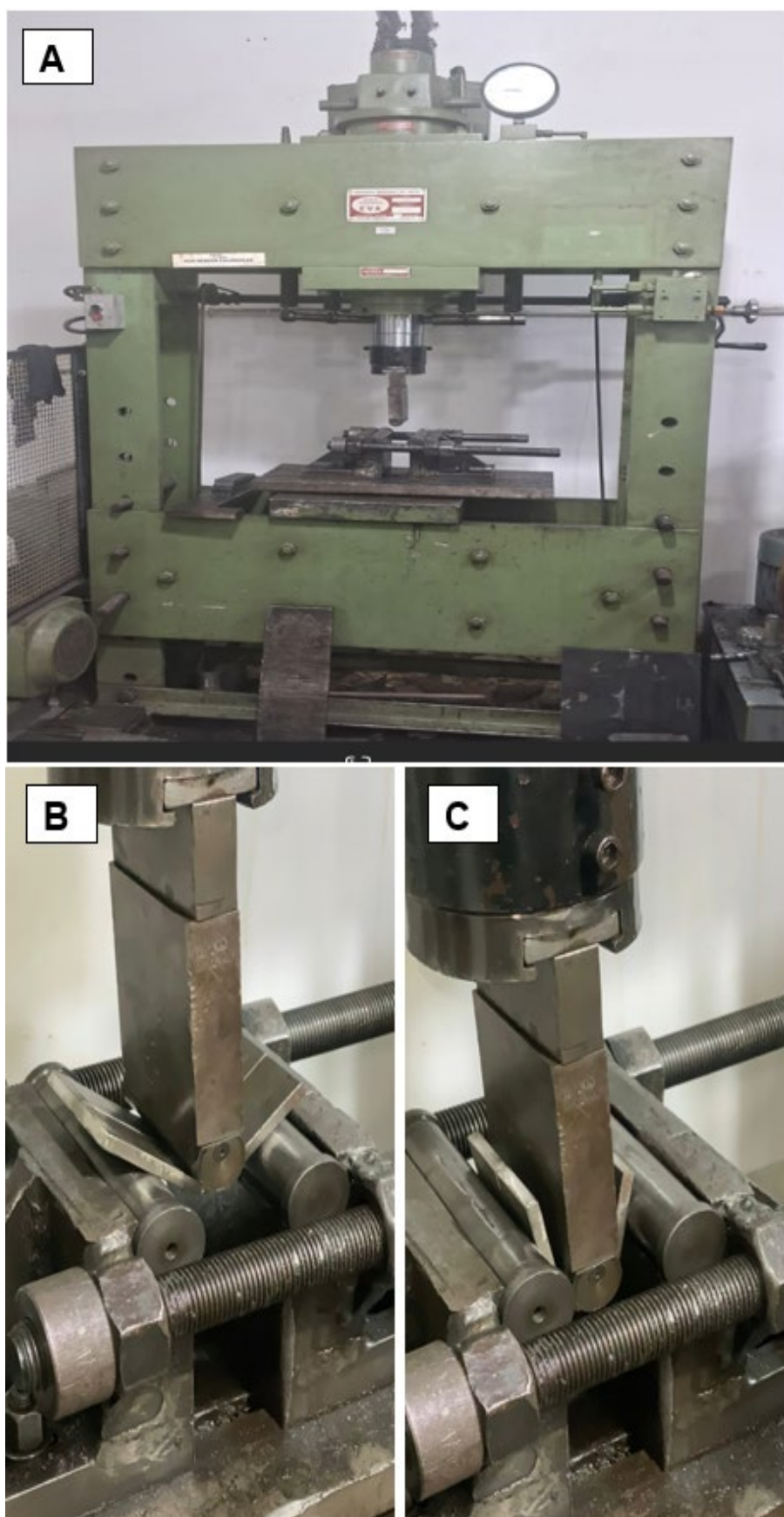
Figura 35 CP para ensaio de dobramento



Fonte: Os autores, (2024)

Para realizar os ensaios de dobramento dos CP (M e T), equipamento prensa hidráulica da marca EVA, modelo TIPO 100, com capacidade de até 100 toneladas, na Figura 36 temos (A) a prensa hidráulica, (B e C), os CP em fase de testes.

Figura 36 Equipamento de ensaio de dobramento



Fonte: Os autores, (2024)

3.5.5 Ensaios metalográficos

As etapas de preparação das amostras (M), e (T), divididas em duas etapas; a primeira no laboratório de ensaios mecânicos onde realizamos o embutimento líquido com resinas epóxi e endurecedor. O preparo foi feito em uma balança calibrada, colocando-se em um copo descartável 30 ml de resina epóxi, mais 15 ml de endurecedor epóxi, esta mistura foi homogeneizada suavemente por cinco minutos com palitos de plástico, conforme figura 37.

Figura 37 Resina epóxi e endurecedor



Fonte: Os autores, (2024)

Essa mistura foi colocada em moldes circulares até que cobrissem as amostras, conforme Figura 38.

Figura 38 Aplicação da resina nos moldes



Fonte: Os autores, (2024)

Após o período de secagem da resina, que durou aproximadamente 48 horas iniciou-se o lixamento das amostras, realizado no equipamento Lixadeira e politriz metalográfica modelo; PLF marca Fortel, conforme Figura 39.

Utilizam-se lixas com granulometrias crescentes iniciando da menor para a maior sendo as; 150, 240, 320, 400, 600 e finalizamos com a lixa 1200, o método de lixamento seguiu da seguinte sistemática, para passar para a próxima etapa de lixamento observava-se se os riscos da granulometria anterior já não estavam mais aparentes passávamos para a próxima, sempre que iniciávamos uma nova granulometria mudávamos, a posição da amostra em 90° em relação a etapa anterior.

Figura 39 Etapa de lixamento

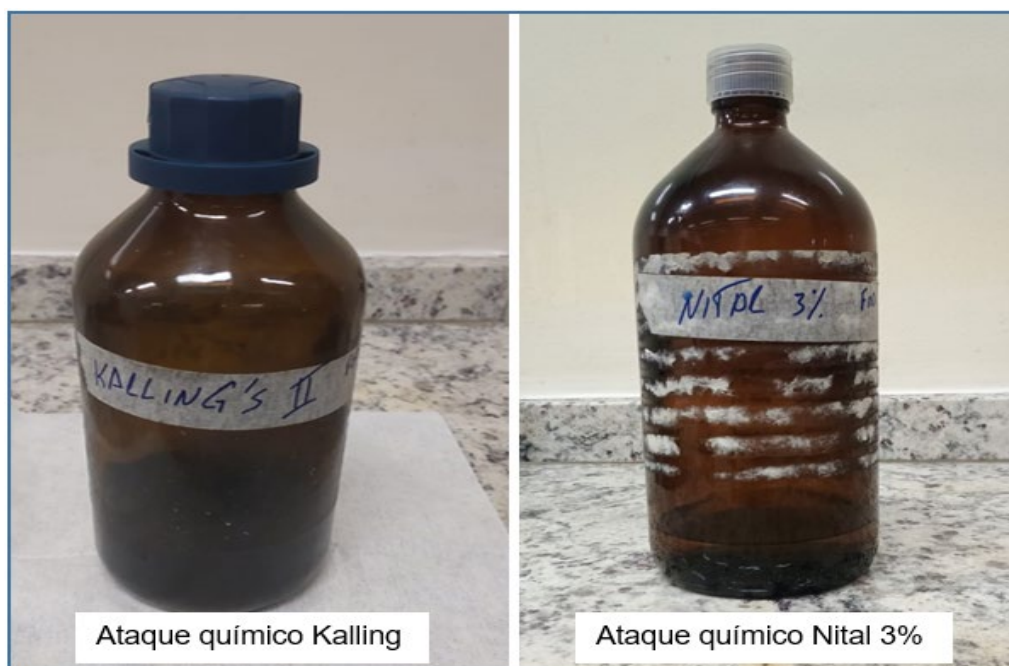


Fonte: Os autores, (2024)

Posteriormente, realizamos a segunda etapa no laboratório de microscopia, que inclui o polimento, ataque com reagentes químicos e visualização nos microscópios disponíveis em laboratório, também sobre orientação do professor Edgar Dutra. O polimento foi realizado com o equipamento Lixadeira e politriz metalográfica, modelo PLF marca Fortel, utilizando o pano para polimento metalográfico os abrasivos foram a pasta de diamante de 6 μ , finalizando com 1 μ antes do ataque químico.

3.5.6 Sistemática de Ataque Químico das Amostras

Após o polimento as amostras foram atacadas quimicamente primeiro com o Nital a 3%, para revelar a macroestrutura do aço A36, o ataque durou aproximadamente 7 segundos. Posteriormente o aço 316L utilizamos o ataque químico Kalling com duração de aproximadamente 6 minutos e a neutralização dos ataques realizada com álcool aspergido ambos os ataques, conforme apresentado na Figura 40.

Figura 40 Ataques químicos

Fonte: Os autores, (2024)

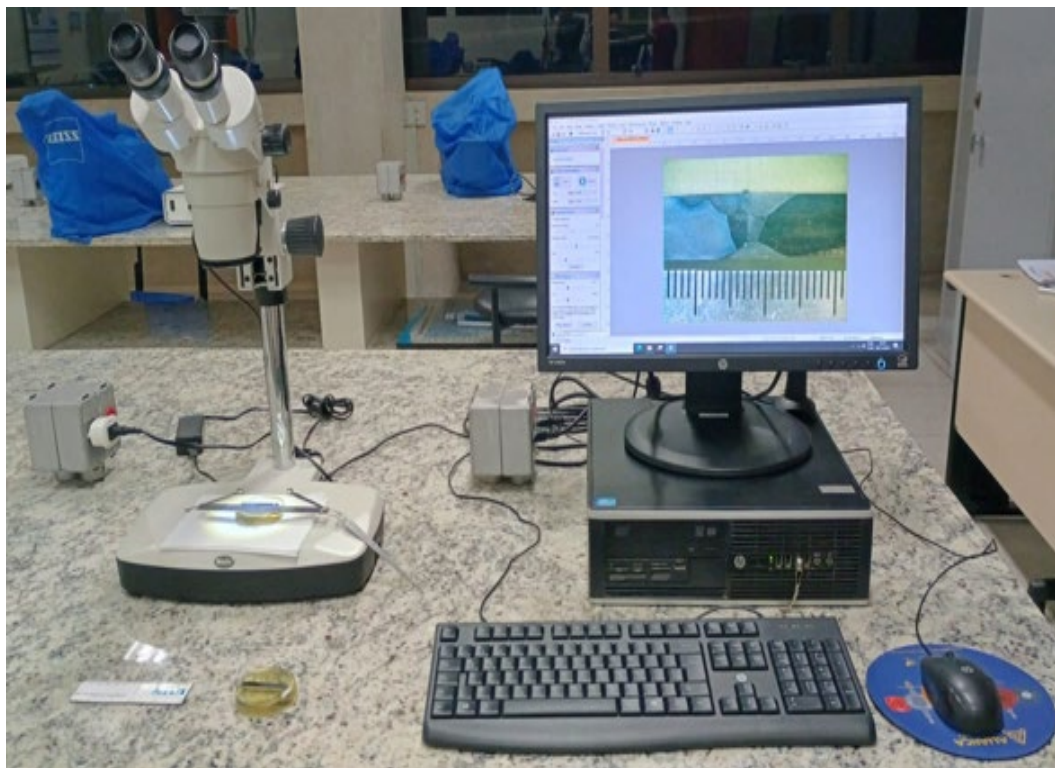
A secagem foi feita com o jato de ar quente proveniente de um soprador térmico, que o laboratório disponibiliza e algodão embebido em álcool, conforme Figura 41.

Figura 41 Secagem com soprador

Fonte: Os autores, (2024)

Para a visualização das macroestruturas utilizamos o equipamento disponível no laboratório de microscopia, o Estereoscópio, sobre a orientação do professor Edgar, com este equipamento foram realizadas as análises de macrografia utilizando o software Top View 64, observamos na Figura 42.

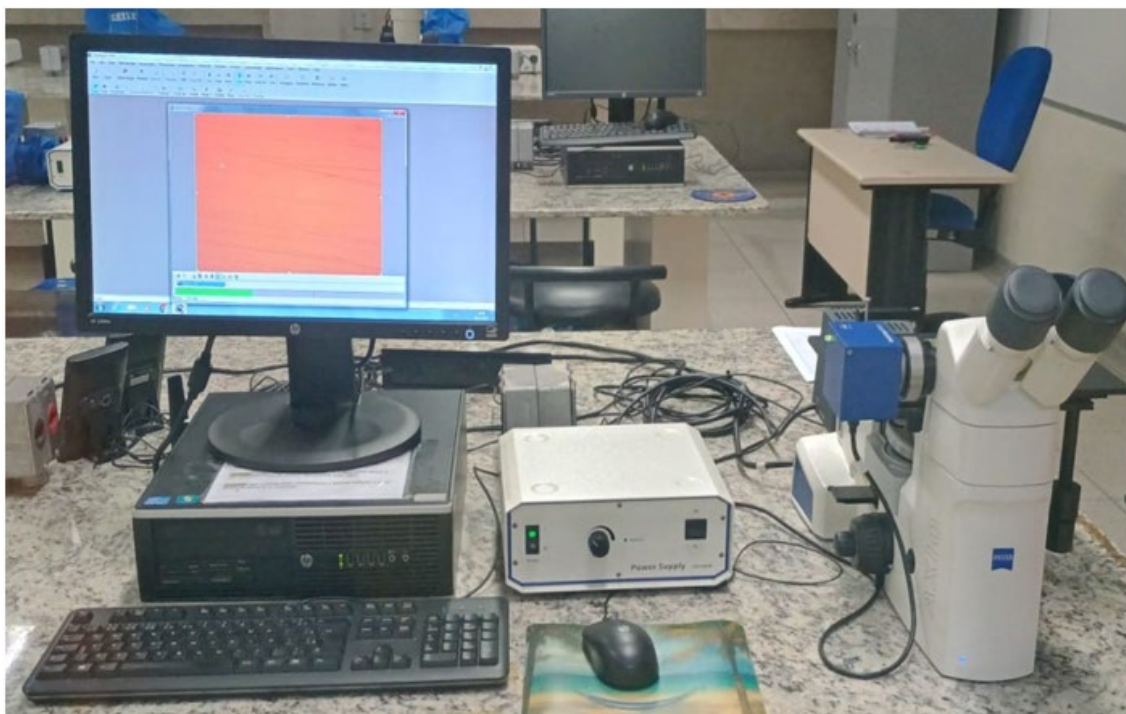
Figura 42 Equipamentos utilizados para captação de macrografias



Fonte: Os autores, (2024)

A captação das micrografias seguiu a mesma sistemática de preparação das amostras de macrografia, com o polimento e ataque químico, porém o microscópio utilizado nesta etapa foi, da marca ZEISS, modelo AXIO Vert.1A, software Action Vision com as resoluções 10X (100 vezes), e 20X (200 vezes), de aumento conforme Figura 43. Para as extrações das micrografias das três regiões escolhidas para o estudo; metal de base, zona afetada pelo calor e zona fundida, iremos colher dados de morfologias e tamanhos de grãos com o auxílio do software ImageJ, posteriormente serão correlacionadas após os processos de soldagem GMAW e FCAW.

Figura 43 Equipamentos utilizados para a captação de micrografias



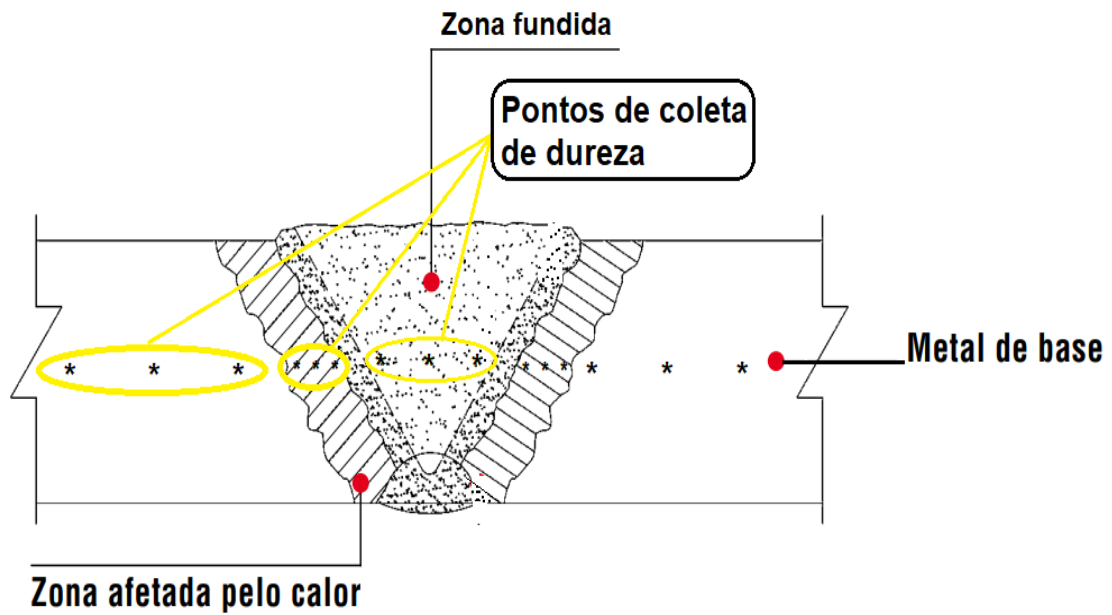
Fonte: Os autores, (2024)

3.6 Dureza Vickers

Iremos coletar os dados de micro dureza nas regiões do metal de base, zona afetada pelo calor e na zona fundida e com isso compará-los com os dados de dureza referente a cada material ASTM A36 e AISI 316L, na região afetada pelo calor iremos comparar qual dos dois materiais apresentou maior dureza, assim como na zona fundida de ambas as juntas dos dois processos.

Com as imagens de microestruturas correlaciona-las com tamanhos de grãos para cada processo de soldagem executado, e com os resultados obtidos dos ensaios mecânicos, o quanto a região de maior dureza influenciou nos testes mecânicos ou que possa ter fragilizado o material.

Para a realização do ensaio utilizamos o durômetro da marca Future – Tech modelo FM, a carga utilizada foi 0,5 kgf com penetrador prismático.

Figura 44 Pontos de coleta de dureza

Fonte: adaptado da apostila de inspetor de soldagem Senai, (2024)

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir dos testes e análises que foram executadas no decorrer deste trabalho. Os materiais utilizados neste estudo foram o aço ASTM A36 e o aço AISI 316L, analisando as propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta dissimilar soldada pelos processos GMAW e FCAW. A partir dos resultados elaborar a qualificação do procedimento através dos documentos EPS e RQPS.

4.1.1 Análise de Composição Química

Para comprovar que os metais de base utilizados nas chapas teste do estudo estão dentro das especificações submetemos amostras a ensaios de análise composição química, de ambos os metais o aço ASTM A36 e o aço inoxidável AISI 316L, essa análise foi executada por laboratório externo.

Segue abaixo as Tabelas 9 e 10 com os dados do código ASME II Parte A- Material Ferroso, e os dados obtidos na análise para os respectivos aços.

Tabela 9 Comparativo de análise química para o aço A36

ASME II Parte - A					
ASTM A36	C	Mn	Si	P	S
% em peso	0,25	0,98	0,40	0,04	0,05
Valores da Análise					
Amostra (M)	0,13	0,76	0,20	0,02	0,002
Amostra (T)	0,13	0,76	0,19	0,02	0,002

Fonte: Os autores, (2024)

De acordo com os dados obtidos podemos afirmar que os metais de base utilizados para os estudos estão em conformidade com as exigências previstas para o material ASTM A36.

Tabela 10 Comparativo de análise química para aço AISI 316L

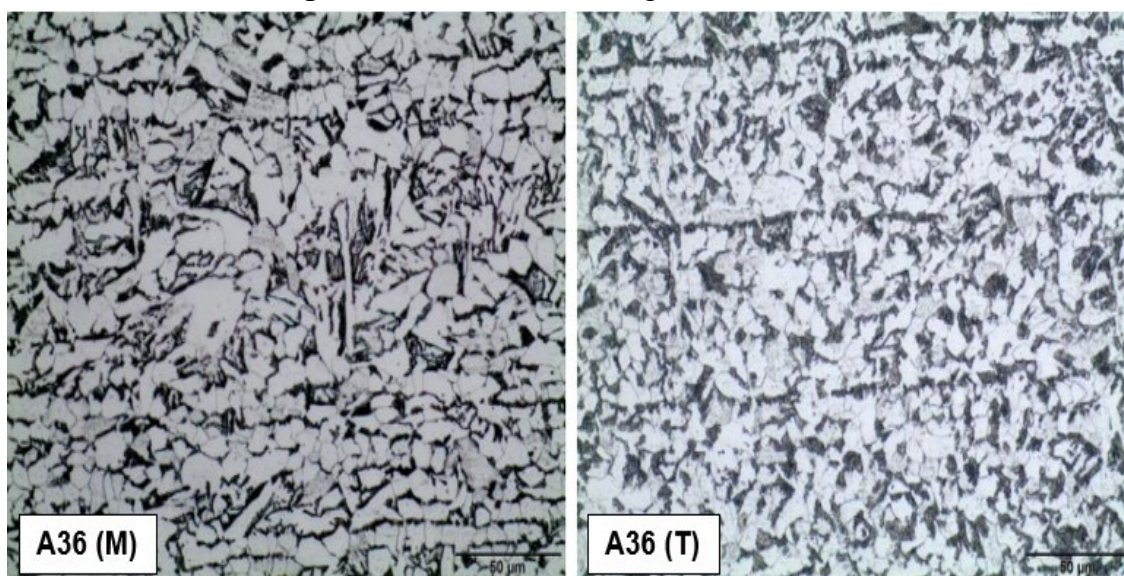
ASTM A240								
AISI 316L	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
% em peso	0,03	2,00	0,75	0,04	0,03	16-18	10-14	2-3
Valores da Análise								
Amostra (M)	0,028	1,39	0,53	0,04	0,001	16,56	10,05	2,00
Amostra (T)	0,027	1,40	0,54	0,04	0,001	16,54	10,01	2,00

Fonte: Os autores, (2024)

Os valores encontrados nas amostras AISI 316L analisadas também estão em conformidade com o do código ASME II Parte – A na tabela 1 (Requisitos de composição química), ASTM A240/A240M.

4.1.2 Análise de Microestrutura das Amostras Pré-soldagem

Com a finalidade de verificar alguma mudança na microestrutura e fases presentes nos metais de base e ZAC previamente solicitamos uma análise nas amostras, Figura 45, apresenta micrografias do material ASTM A36 com 500X de aumento.

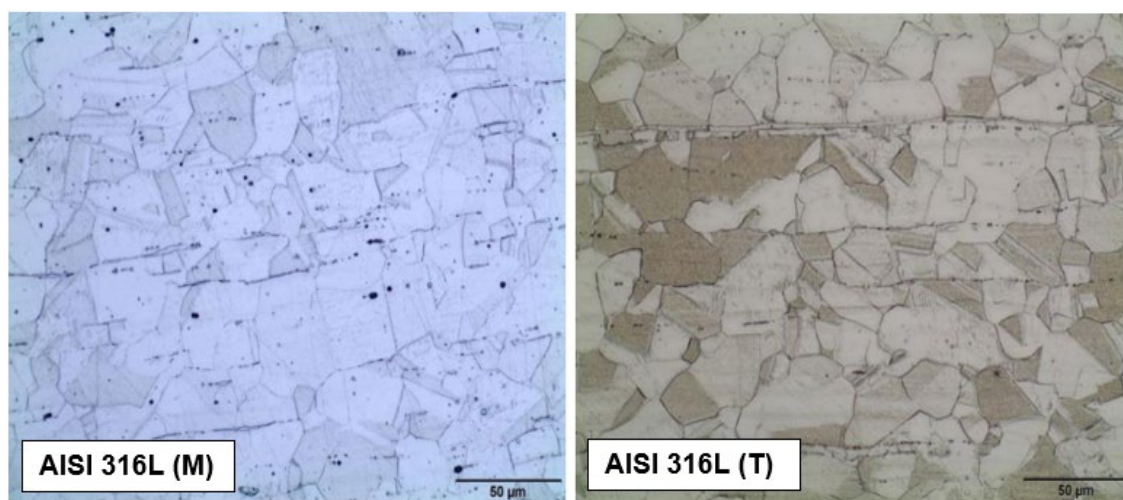
Figura 45 ASTM A36, reagente Nital

Fonte: Adaptado de Proaqt, (2024)

Os resultados para o aço A36 (M) estão apresentados, do lado direito e (T) do lado esquerdo, ambos com matriz ferrítica, grãos alongados poligonais e aciculares, com lamelas de perlita fina.

Os mesmos ensaios de micrografia foram realizados com as amostras do material AISI 316L, para comparar do metal de base e a zona afetada pelo calor (ZAC), a Figura 46 apresenta micrografias do material AISI 316L com 500X de aumento.

Figura 46 316L 500X, reagentes; Água Régia e Hidróxido de Sódio



Fonte: Adaptado de Proaqt, (2024)

Resultados para o aço inoxidável AISI 316L (M), do lado direito e (T), lado esquerdo, ambos com estrias de ferrita delta dispersas aleatoriamente em matriz austenítica. Foram utilizados dois tipos de reagentes químicos; para revelar a austenítica água régia, e para revelar a ferrita delta hidróxido de sódio.

4.1.3 Micro dureza Pré-soldagem

Nas mesmas amostras que fizemos análise de composição química, tamanhos de grãos, microestrutura, solicitamos também micro dureza, foram coletados dados em três pontos que estão traçados de linha verde, conforme

Figura 47 abaixo, que posteriormente os dados serão comparados na ZAC, o propósito deste ensaio é verificar um possível aumento na dureza, e quais dos processos esse é mais significativo.

Estas medições foram realizadas para as duas amostras dos materiais ASTM A36 e AISI 316L “M e T”, os três resultados são divididos e obtém-se a média apresentada para ambos os metais na Tabela 11.

Figura 47 Amostras ASTM A36, e AISI 316L, para micro dureza



Fonte: Os autores, (2024)

Tabela 11 Valores de dureza para ASTM A36 e AISI 316L

Material	Amostra	Região	Valores em HBW	Média
ASTM A36	(M)	Superfície	140 – 133 - 143	139 HBW
Material	Amostra	Região	Valores em HBW	Média
ASTM A36	(T)	Superfície	148 – 143 - 152	148 HBW
Material	Amostra	Região	Valores em HBW	Média
AISI 316L	(M)	Superfície	163 – 165 – 165	164 HBW
Material	Amostra	Região	Valores em HBW	Média
AISI 316L	(T)	Superfície	158 – 161 - 156	158 HBW

Fonte: Os autores, (2024)

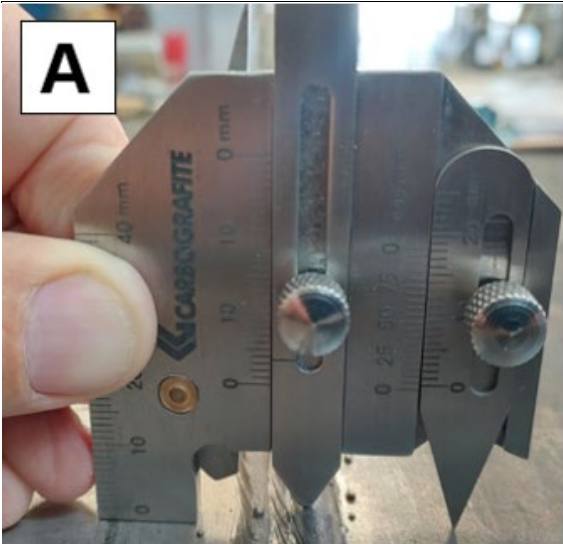
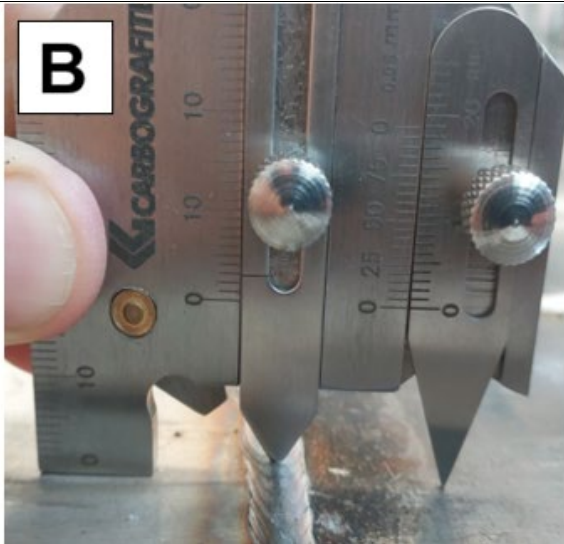
O resultado médio para a micro dureza para o material ASTM A36 é de, **(M) 139 HBW**, e na amostra **(T) 148 HBW**.

O resultado médio para a micro dureza para o material AISI 316L é de, **(M) 164 HBW**, e na amostra **(T) 158 HBW**.

4.2 Ensaio Visual

O ensaios foram realizados conforme código ASME seção IX em QW-194 Exame Visual e Desempenho e preconiza que, as chapas teste não devem apresentar rachaduras e penetração completa da junta com fusão completa de metal de solda e metal de base, na Tabela 12 a localização dos cordões.

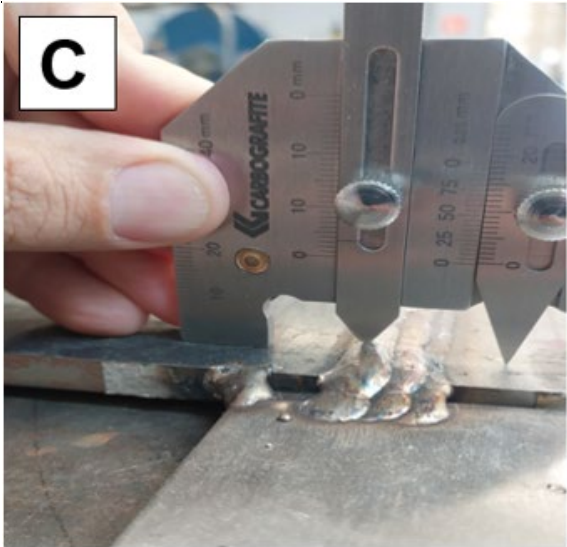
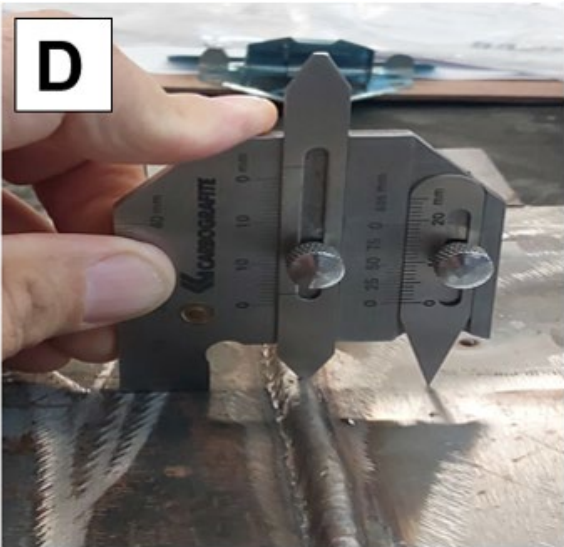
Tabela 12 Inspeção dos cordões de solda (M)

Chapa Teste (M)	Chapa Teste (M)
Face da solda lado esquerdo (A) Realizados três passes na face com altura de 3mm, e aspecto visual com respingos.	Raiz da solda lado direito (B) Na raiz foi realizada a goivagem, e passe de preenchimento com altura de 3mm.
	

Fonte: Os autores, (2024)

O resultado dos cordões de solda realizados na face Figura (A), da chapa teste “M”, apresentou uma altura com valores aproximados a 4 mm, também foi observado a presença de respingos nos cordões e adjacências. No cordão de solda aplicado na raiz Figura (B), observa-se uma altura aproximada a 3 mm, isenta de respingos, para ambos os cordões de solda face e raiz não foram observadas outras descontinuidades.

Tabela 13 Inspeção dos cordões de solda (T)

Chapa Teste (T)	Chapa Teste (T)
Face da solda lado esquerdo (C) Realizados três passes na face com altura de 3mm, e aspecto visual com respingos.	Raiz da solda lado direito (D) Na raiz foi realizada a goivagem, e passe de preenchimento com altura de 3mm, com respingo.
	

Fonte: Os autores, (2024)

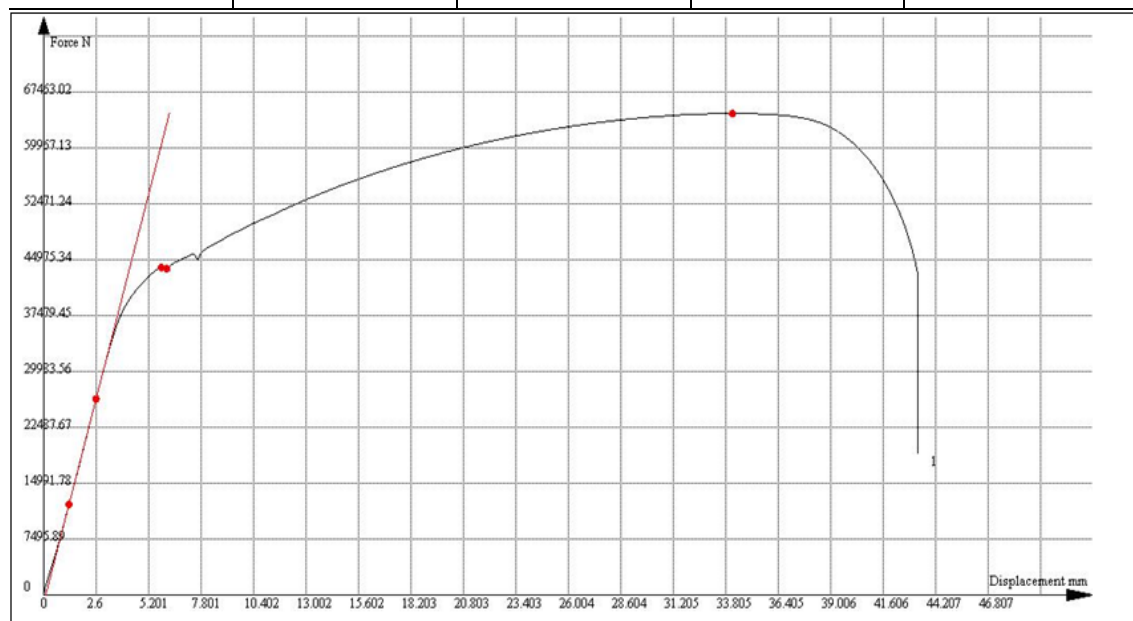
O resultado da Tabela 13 dos cordões de solda na face figura (C), da chapa teste “T”, apresentou uma altura com valores aproximados a 4 mm, não foram observados a existência de respingos nos cordões e adjacências. No cordão de solda da raiz Figura (D), observou-se uma altura aproximada a 3 mm, com um ponto de respingo nas adjacências do cordão de solda, para ambos os cordões de solda face e raiz não foram observadas outras descontinuidades.

4.3 Ensaio de Tração

De acordo com requisito do código ASME seção IX em QW-153, Resistência à Tração valores mínimos para aceitação e qualificação do procedimento contido na tabela QW-422 para ambos os materiais, CP “M” e posteriormente os CP “T”, para o aço ASTM A36 valor mínimo de 400 MPa, e para o aço AISI 316L um a valor mínimo 485 MPa.

Tabela 14 Resultado do ensaio de tração M-1

Tração CP M - 1				
Limite de Resistência	Limite de Escoamento	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	Local da Ruptura ($\cong$)
650 MPa	430 Mpa	16	36	Fora da solda



Fonte: Os autores, (2024)

Na Figura 48 abaixo temos o CP M-1, após o ensaio de tração, apresentando o local da ruptura no metal de base ASTM A36, sendo este o material mais frágil da junta soldada com $\cong 33\text{mm}$ do centro do cordão de solda, e aspecto visual de fratura dúctil.

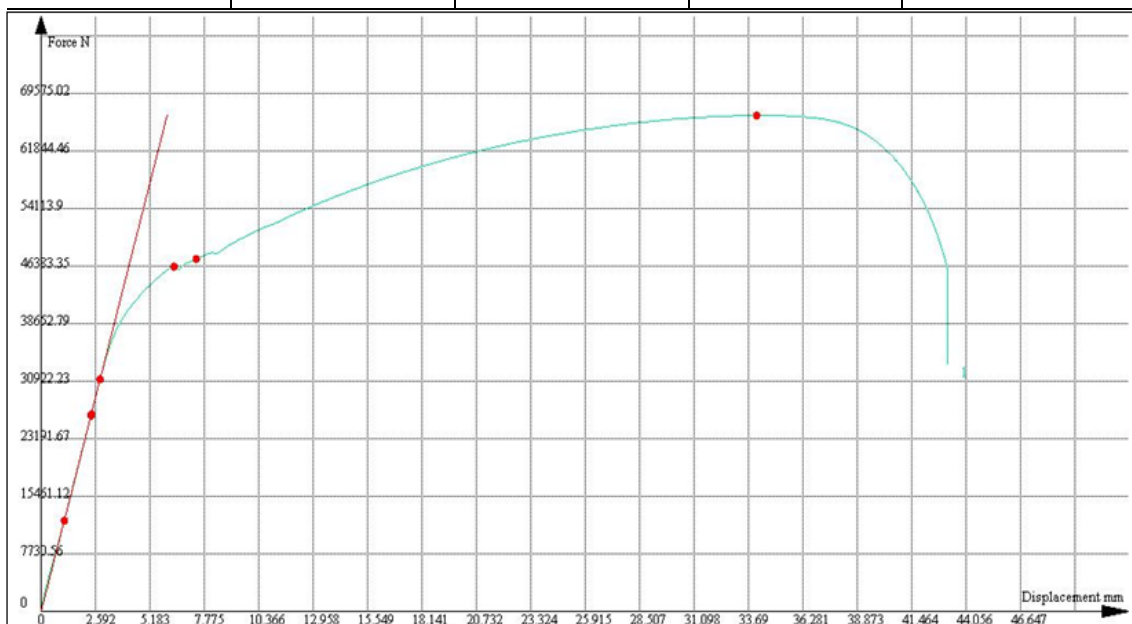
Figura 48 CP de Tração M-1

Fonte: Os autores, (2024)

O CP M-1, atendeu os requisitos estipulados no código ASME IX em QW-153.

Tabela 15 Resultado do ensaio de tração M-2

Tração CP M - 2				
Limite de Resistência	Limite de Escoamento	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	Local da Ruptura
675 MPa	485 Mpa	16	36	Fora da solda



Fonte: Os autores, (2024)

Na Figura 49 abaixo, temos o CP M-2, após o ensaio de tração, apresentando o local da ruptura no metal de base ASTM A36, sendo este o material mais frágil da junta soldada com $\cong 38$ mm do centro do cordão de solda, e aspecto visual de fratura dúctil.

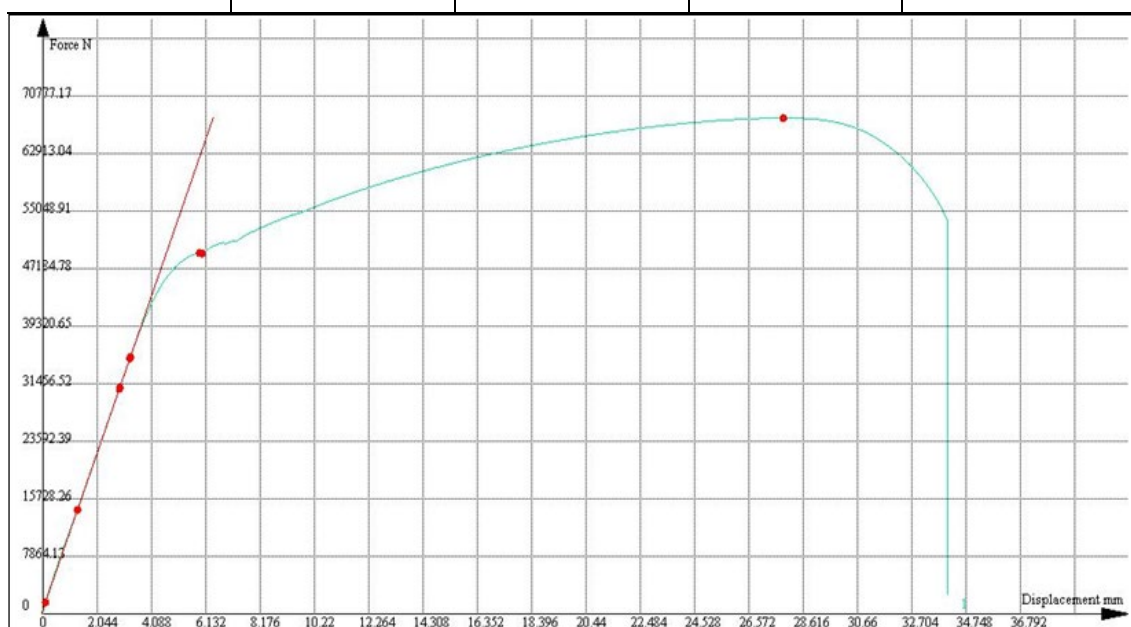
Figura 49 CP de tração M-2

Fonte: Os autores, (2024)

O CP M-2, atendeu os requisitos estipulados no código ASME IX em QW-153.

Tabela 16 Resultado do ensaio de tração T-1

Tração CP T - 1				
Limite de Resistência	Limite de Escoamento	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	Local da Ruptura
686 MPa	493 Mpa	12,8	31	Fora da solda



Fonte: Os autores, (2024)

Na Figura 50 abaixo, temos o CP T-1, após o ensaio de tração, apresentando o local da ruptura no metal de base ASTM A36, sendo este o material mais frágil da junta soldada com $\cong 28$ mm do centro do cordão de solda, e aspecto visual de fratura dúctil.

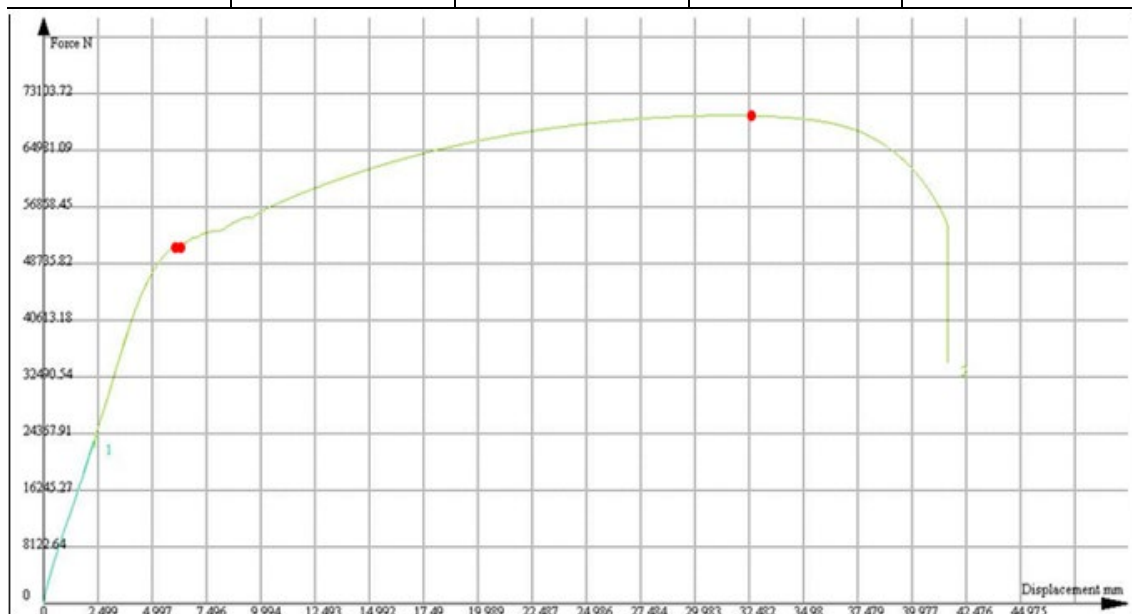
Figura 50 CP de tração T-1

Fonte: Os autores, (2024)

O CP T-1, atendeu os requisitos estipulados no código ASME IX em QW-153.

Tabela 17 Resultado do ensaio de tração T-2

Tração CP T - 2				
Limite de Resistência	Limite de Escoamento	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	Local da Ruptura
699 MPa	514 Mpa	14,4	31	Fora da solda



Fonte: Os autores, (2024)

Na Figura 51 abaixo, temos o CP T-2, após o ensaio de tração, apresentando o local da ruptura no metal de base ASTM A36, sendo este o material mais frágil da junta soldada com $\cong 39$ mm do centro do cordão de solda, e aspecto visual de fratura dúctil.

Figura 51 CP de tração T-2



O CP T-2, atendeu os requisitos estipulados no código ASME IX em QW-153

Para os cálculos de alongamento nos CP do ensaio de tração utilizamos a formula, descrita abaixo.

Os dados são;

lr e *lo* são respectivamente, os comprimentos

lr comprimento depois da carga

lo: comprimento inicial

Equação 1 Fórmula para obtenção do alongamento

$$\text{Deformação percentual} = 100 \frac{lr - lo}{lo}$$

Fonte: Ferdinand P. Beer. et al., (2011)

4.4 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento são feitos para análises qualitativas dos processos de soldagem, este tem como objetivo avaliar se o cordão de solda assim como as áreas adjacentes e ele apresentaram algum tipo de descontinuidade, como a aparecimento de trincas, atendendo ao requisito do código ASME seção IX para qualificação de procedimentos de soldagem, soldadores e operadores aplicamos este ensaio.

Em QW-163 apresenta critérios de aceitação para testes de dobra, alerta para que a dobra na solda ou zona afetada pelo calor não obtenham como resultado descontinuidades que excedam 3mm em qualquer que seja a direção na região de dobra.

Em QW- 451.1 apresenta a quantidade de CP para cada espessura de material, para este estudo o material tem 7,93mm de espessura sendo então aplicado dois ensaios de dobramento de face e dois ensaios de dobramento de raiz, que serão realizados de acordo com QW-466.1 dimensões do gabarito para teste.

Os ensaios seguiram a sistemática, primeiro o dobramento dos CP “M” e posteriormente os CP “T”.

Figura 52 CP de dobramento após o ensaio



Fonte: Os autores, (2024)

Tabela 18 Resultado do ensaio de dobramento (M)

Dobramento (M)			
Ensaio	Condição	Ensaio	Condição
Dobramento Face	Aprovado	Dobramento Raiz	Aprovado
Dobramento Face	Aprovado	Dobramento Raiz	Aprovado



Fonte: Os autores, (2024)

Tabela 19 Resultado do ensaio de dobramento (T)

Dobramento (T)			
Ensaio	Condição	Ensaio	Condição
Dobramento Face	*Reprovado*	Dobramento Raiz	Aprovado
Dobramento Face	Aprovado	Dobramento Raiz	Aprovado



Fonte: Os autores, (2024)

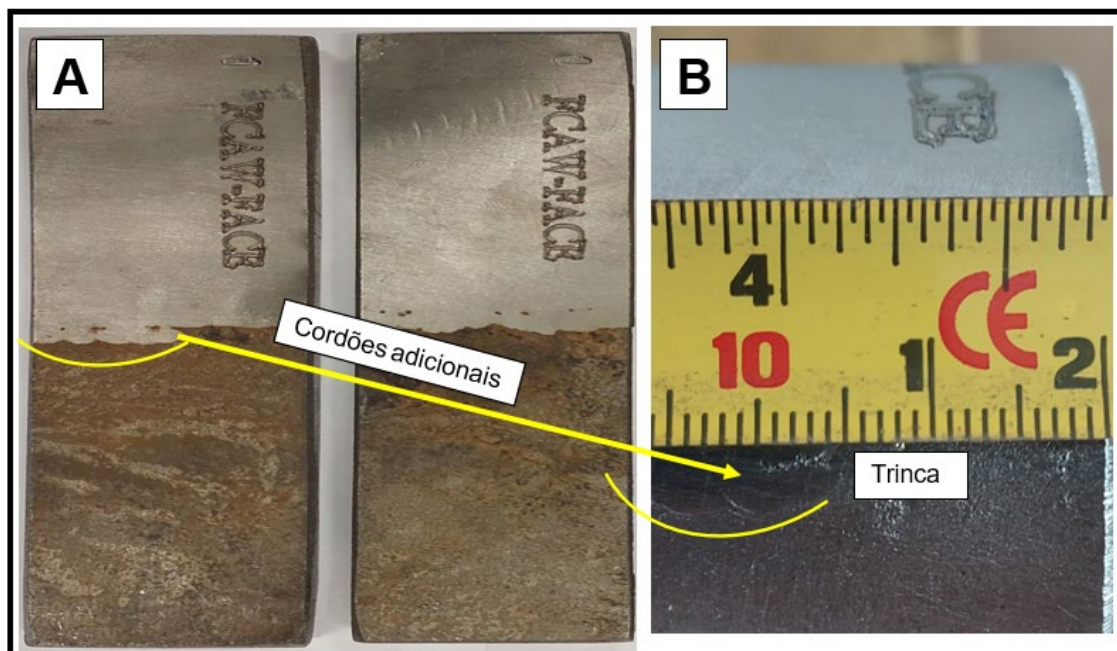
4.4.1 Apresentação dos Resultados dos Ensaio de Dobramento

Os resultados CP (M), foram aprovados no ensaio visual mediante a comprovação no ensaio de líquido penetrante

Em avaliação os CP de dobramento identificamos um uma diferença de tonalidade dos CP (T), processo FCAW, que se assemelhava a um cordão de solda feito superficialmente, este só foi percebido após o nivelamento dos lados durante a etapa de preparação dos CP.

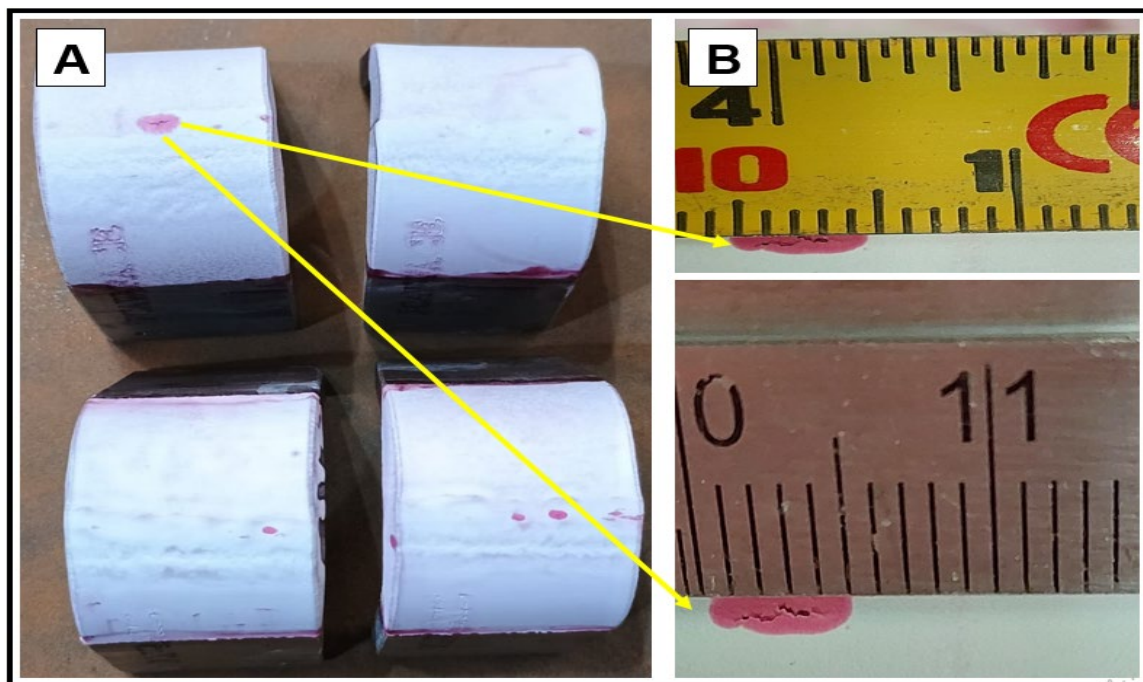
No ensaio visual realizado sobre esses CP é possível observar uma trinca longitudinal ao cordão de solda, também é possível observar pontos de solda que pareciam ter sidos feitos após o processo de acabamento da face. A trina encontra-se ao final dos pontos de solda adicionais, conforme Figura 53 **A**, e com a ampliação no lado **B**.

Figura 53 Ponto da descontinuidade no CP (T) Face



Fonte: Os autores, (2024)

Após o ensaio de líquido penetrante efetuado no CP (T), a descontinuidade é mais visível e sua mensuração é mais nítida, conforme Figura 54 **A**, e a ampliação da trinca no lado **B**

Figura 54 Ensaio de LP no CP (T) Face

Fonte: Os autores, (2024)

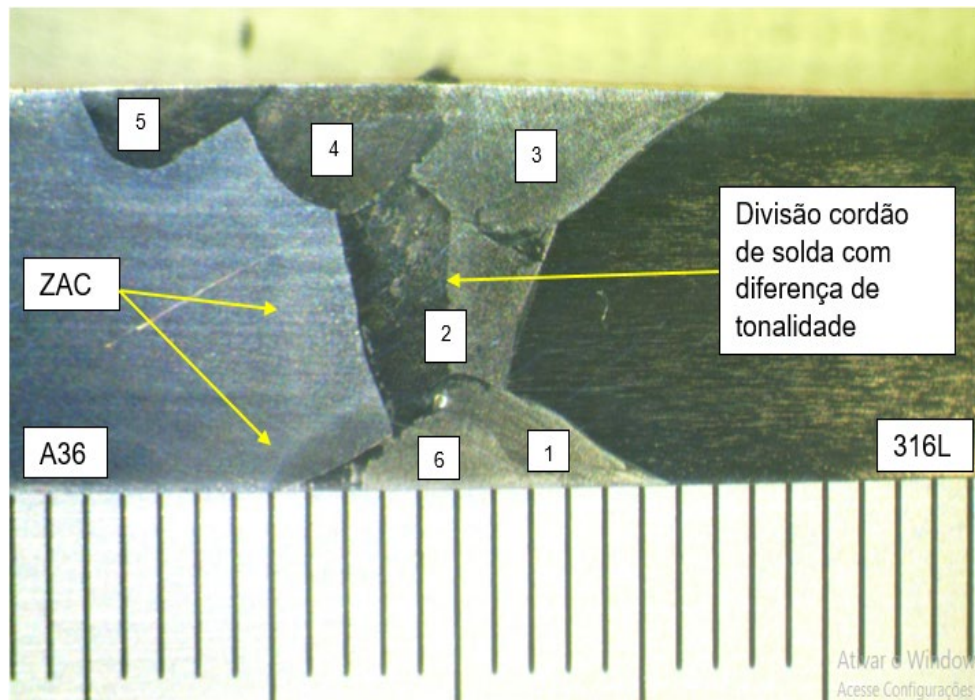
Com base nas imagens e ensaios realizados nos CP “M e T”, podemos dizer os CP (M), estão aprovados, por não apresentarem descontinuidades em ambos os lados.

Os CP (T), de dobramentos estão reprovados por apresentarem trincas superficiais maiores que 3mm, além de pontos adicionais de solda e um determinado trecho da face da solda.

4.5 Ensaios Metalográficos (Macrografia)

Foram realizados ensaios metalográficos com os CP “M e T”, nas regiões do metal de base, ZAC e imagens na região de transição entre a ZAC e zona fundida, esses ensaios têm a finalidade de evidenciar as regiões de soldagem.

Na macrografia realizada na junta soldada pelo processo GMAW (M), observa-se ao lado direito o metal de base 316L. No centro, a zona fundida, que está dividida por uma diferença de tonalidade, já esquerda, o metal de base A36 com cor mais clara com a ZAC revelada e bem definida conforme Figura 55.

Figura 55 Macrografia GMAW (M)

Fonte: Os autores, (2024)

Com a macrografia é possível verificar as regiões de soldagem descritas na Tabela 20.

Tabela 20 Regiões da macro (M)

Local	Designação
AISI 316L	Lado esquerdo
ASTM A36	Lado direito
Região 1	Passe de raiz
Região 2	Preenchimento do meio para face
Região 3	Preenchimento paralelo ao 316L
Região 4	Preenchimento do centro para o A36
Região 5	Fechamento
Região 6	Goivagem da Raiz
ZAC	Contorno da ZAC, região mais clara

Fonte: Os autores, (2024)

O resultado da macrografia da junta soldada no processo GMAW (M), podemos verificar que foram realizados os passes de soldagem (1 a 6), incluindo a raiz que foi goivada, nota-se também que o passe de número 2, apresenta uma

diferença de cores, o lado direito do cordão que faz ligação com o A36 está mais claro, e o lado esquerdo fazendo junção com o 316L um cordão com aspecto mais escuro.

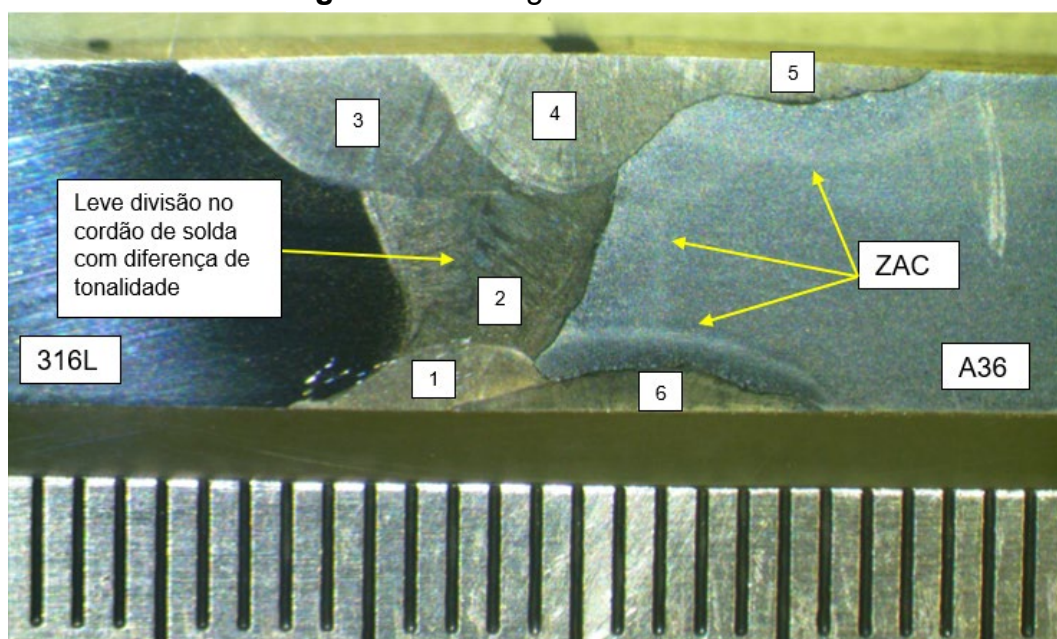
No cordão de número “3” observa-se que o mesmo não adotou a característica semelhante que os demais que tiveram o contato com o metal de base A36.

Ao lado esquerdo no A36 verifica-se um contorno entre os cordões de solda de cor mais clara, desde a raiz até o passe de preenchimento, possivelmente a ZAC

Para a realização desta macrografia foi utilizado o reagente Nital 3%, a amostra ficou submersa nesta solução por aproximadamente 7 segundos, o corte do ataque químico foi feito com álcool a 99,9%, ambos estavam disponíveis no laboratório de análise microestrutural da Fatec.

A macrografia realizada na junta do processo FCAW (T), temos ao lado esquerdo o aço AISI 316L e, no centro da junta a zona fundida, e do lado direito o aço A36, é possível verificar a sombra da ZAC contornando os cordões de solda.

Figura 56 Macrografia FCAW



Fonte: Os autores, (2024)

Com a macrografia é possível verificar as regiões de soldagem descritas na Tabela 22.

Tabela 21 Regiões da macro (T)

Local	Designação
AISI 316L	Lado esquerdo
ASTM A36	Lado direito
Região 1	Passe de raiz
Região 2	Preenchimento do meio para face
Região 3	Preenchimento paralelo ao 316L
Região 4	Preenchimento do centro para o A36
Região 5	Fechamento
Região 6	Goivagem da Raiz
ZAC	Contorno da ZAC, região mais clara

Fonte: Os autores, (2024)

O resultado da macrografia da junta soldada no processo FCAW (T), podemos verificar que foram realizados os passes de soldagem (1 a 6), incluindo a raiz que foi goivada, nota-se também que o passe de número 2, ainda que menos intenso que no processo anterior, porém é possível verificar uma diferença de tonalidades na divisão dos lados dos metais de base.

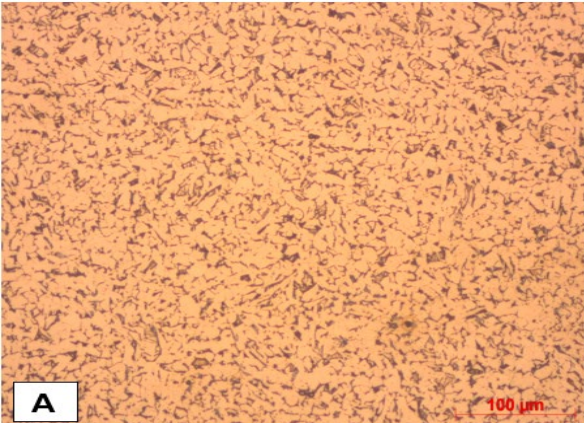
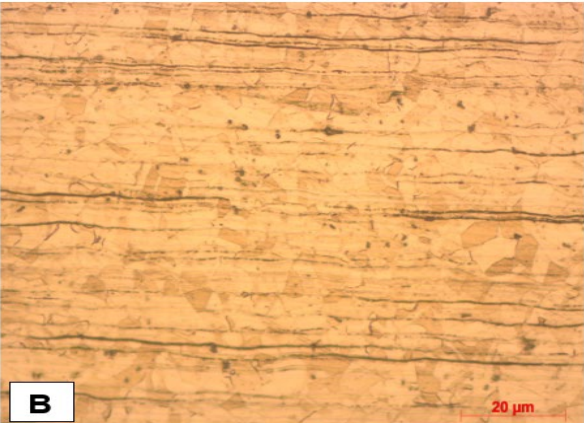
Ao lado esquerdo no A36 verifica-se um contorno entre os cordões de solda de cor mais clara, possivelmente a ZAC, o processo de ataque químico seguiu o padrão do processo anterior.

4.6 Ensaaios Metalográficos (Micrografias)

4.6.1 Micrografias dos CP soldados do processo GMAW (M)

A **Tabela 23**, abaixo refere-se a micrografia da região do material A36 figura (A) a esquerda, e 316L figura (B) a direita, referência utilizada para tamanho de grão foi a Norma ASTM E112.

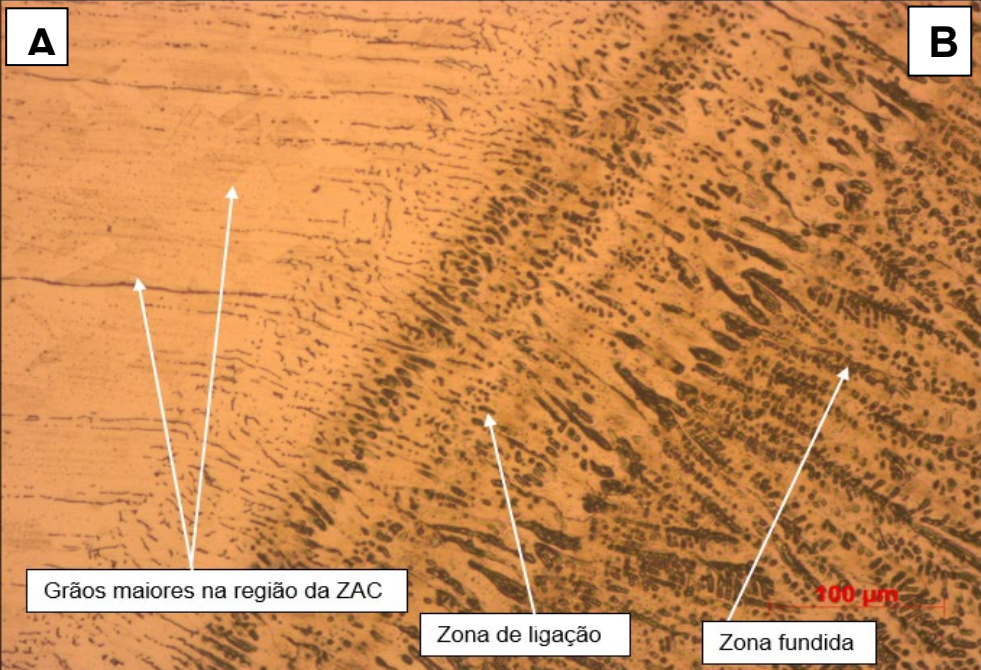
Tabela 22 Tamanhos de grãos para ambos os metais de base

CP (M) GMAW			
Metal de base A36	Resultado	Metal de base 316L	Resultado
	9,5		8
			

Fonte: Os autores, (2024)

A Tabela 25, abaixo refere-se a micrografia da região de transição da ZAC do material 316L, lado (A), à esquerda e a zona fundida lado (B), à direita, com 200X de aumento, soldado pelo processo GMAW (M), a referência utilizada foi a Norma ASTM E112.

Tabela 23 Tamanhos de grãos na ZAC

CP (M) GMAW		
ZAC do 316L	Resultado	Zona Fundida
	7,5	
		

Fonte: Os Autores, (2024)

Observamos a zona de ligação entre a ZAC e ZF, com grãos em formatos mais irregulares com possível precipitados de ferrita, que ao se aproximarem da ZAC que se assemelha a ferrita vermicular.

Na zona fundida os grãos de ferrita são maiores, pontiagudas e assemelham a cristais que pode ser ferrita de Widmanstätten.

A Tabela 24, abaixo refere-se a micrografia da região de transição da ZAC do material A36 lado (A), à esquerda e o metal de base (B), à direita, com 200X de aumento, soldado pelo processo GMAW (M), a referência utilizada foi a Norma ASTM E112

Tabela 24 Tamanhos de grãos no metal base e na ZAC

CP (M) GMAW		
ZAC do A36	Resultado	Metal de base
	8,0	

A micrografia mostra a interface entre a ZAC (lado A) e o metal de base (lado B). A ZAC apresenta grãos maiores e mais irregulares, enquanto o metal de base apresenta grãos menores e mais uniformes. As setas indicam a transição entre as duas regiões. A escala de 100 µm é mostrada no canto inferior direito.

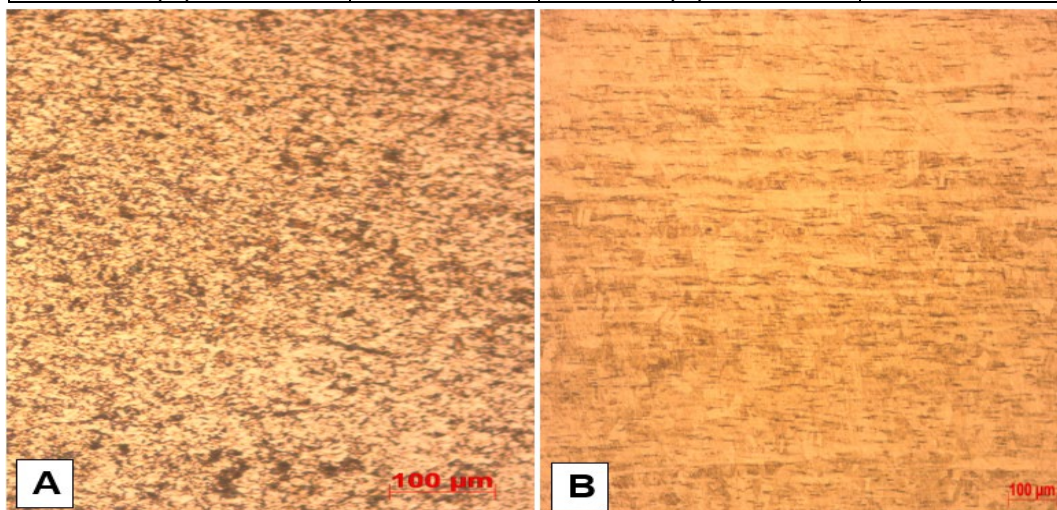
Fonte: Os autores, (2024)

4.6.2 Micrografias dos CP soldados do processo FCAW (T)

A Tabela 25 refere-se a micrografia da região do material de A36 figura (A), a esquerda com 100X e AISI 316L, figura (B), lado direito, com 200X de aumento, que foram designados para o processo FCAW (T) a referência utilizada foi a Norma ASTM E112

Tabela 25 Tamanhos de grãos para ambos os metais

CP (T) FCAW			
Metal de base A36	Resultado	Metal de base 316	Resultado
CP (T) A36	10	CP (T) 316L	5



Fonte: Os autores, (2024)

A Tabela 26 refere-se a micrografia da região de transição da ZAC do material A36 (A), à esquerda e o metal de base (B), a direita, com 100X de aumento, soldado pelo processo FCAW (T), a referência utilizada foi a Norma ASTM E112.

Tabela 26 Tamanhos de grãos no metal de base e ZAC

CP (T) FCAW		
ZAC do A36	Resultado	Metal de base
	6	

Fonte: Os autores, (2024)

A Tabela 27 refere-se a micrografia da região de transição da ZAC do material 316L, lado (B) à esquerda, e a zona fundida lado (A), à direita, com 200X de aumento, nota-se uma região de ligação, soldado no processo FCAW (T), a referência utilizada foi a Norma ASTM E112.

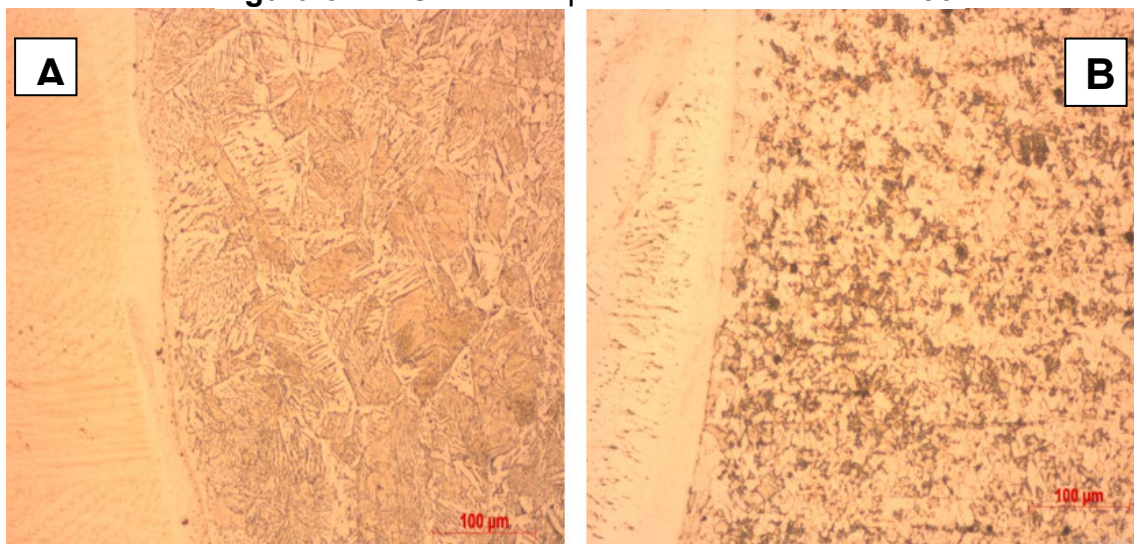
Tabela 27 Tamanhos de grãos na ZAC 316L (T)

CP (T) FCAW		
Zona Fundida	ZAC do 316L	Resultado
		5

Fonte: Os autores, (2024)

A Figura 57 apresenta, as regiões da ZAC dos dois processos, lado direito (A), GMAW e lado esquerdo (B), FCAW, ambos para o mesmo material A36.

Figura 57 ZAC dos dois processos no material A36



Fonte: Os autores, (2024)

É possível verificar que na região de transição entre a ZAC do material A36 e ZF do processo FCAW (T), lado esquerdo (B), não houve penetração.

4.7 Dureza Vickers

Foram coletados pontos de dureza Vickers no metal de base, na zona afetada pelo calor e na zona fundida para verificar o nível de dureza do material após sofrer aquecimento e do metal depositado.

Resultado: As regiões de maiores durezas capturada foram a ZAC do processo FCAW com 205 HV e na Zona fundida com 228 HV para o processo GMAW.

Tabela 28 Dureza Vickers

GMAW CP (M) A36			
Metal de Base	ZAC	ZF	Média
161- 185-174	211-176-192	239-202-198	193
GMAW (M) 316L			
Metal de Base	ZAC	ZF	Média
181-188-172	189-183-194	206-266-212	199
FCAW CP (T) A36			
Metal de Base	ZAC	ZF	Média
147-149-143	206-208-202	199-223-213	187
FCAW (T) 316L			
Metal de Base	ZAC	ZF	Média
166-172-168	171-165-164	189-183-211	176

Fonte: Os autores, (2024)

4.8 Elaboração da documentação de Soldagem

As Figura 58 até 61, demonstram a EPS e RQPS, documentos elaborados conforme aprovação dos corpos de prova do processo GMAW.

Figura 58 EPS GMAW folha 1

Fatec Faculdade de Tecnologia Raquel Muelheide	ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) (WELDING PROCEDURE SPECIFICATION – WPS)		DATA: 30/11/2024			
			EPS Nº: 003/2024			
			FOLHA: 1/2			
QUALIFICADO PELO REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO (RQPS) Nº: 271216-31						
(QUALIFIED BY PROCEDURE QUALIFICATION RECORD No)						
			REVISÃO (REVISION)	DATA (DATE)		
PROCESSO DE SOLDAGEM: GMAW		TIPOS (¹QW-410.25): SEMI-AUTOMATICO				
JUNTA (QW-402) (JOINTS)		DETALHES (DETAILS)				
TIPO DE JUNTA: JUNTA DE TOPO (JOINT DESIGN)		TIPO DE CHANFRO: V				
ESPAÇO DA RAIZ: 2,5 mm		Qualificação 60° 1,51 mm 1,5 mm 6 PASSOS DE SOLDA CONVEXEM				
MATAJUNTA: N.A.					MATERIAL: N.A.	
RETENTORES (²QW-402.11): Sim					MATERIAL: 1- A-36 (MATERIAL) 2- AISI 316L (MATERIAL)	
OBSERVAÇÕES: (REMARKS)					APÊNDICE	
METAIS BASE (QW-403) (BASE METALS)						
MATERIAL 1		MATERIAL 2				
PNº (¹QW-403.11): 1	Gr Nº (²QW-403.5):	PNº (¹QW-403.11): 8	Gr Nº (²QW-403.5):			
ESPECIFICAÇÃO: (SPECIFICATION) ASTM- A-36		ESPECIFICAÇÃO: (SPECIFICATION) AISI 316L				
PROPRIEDADES QUÍMICAS E MECÂNICAS: (CHEMICAL ANALYSIS/MECHANICAL PROPERTIES) N/A						
COM: (WITH)						
FAIXA ESP. METAL BASE (³QW-403.6) (¹QW-403.11) (THICKNESS RANGE OF BASE METAL)		CHANFRO: (GROOVE) 8mm	FILETE: (FILLET)			
FAIXA DE TUBOS: (PIPE DIAMETER RANGE)		CHANFRO: (GROOVE) N/A	FILETE: (FILLET)			
OBSERVAÇÕES: (REMARKS)						
METAIS DEPOSITADOS (QW-404) (FILLER METALS)						
F Nº (¹QW-404.4): 6		A Nº (¹QW-404.5): 8				
ESPECIFICAÇÃO ASME II PART C SFA: SFA-5.9/SFA-5.9M (SPECIFICATION)						
CLASSIFICAÇÃO AWS A: ER 309L (Si) (CLASSIFICATION AWS No.)						
DIMENSÕES: (SIZES OF FILLER METAL) 1,2 mm						
FORMA DE PRODUTO (¹QW-404.23): ELETRODO DE FIO (Wire Electrode) (FILLER METAL PRODUCT FORM)						
METAL DE ADIÇÃO SUPLEMENTAR: (SUPPLEMENTAL FILLER METAL) N.A.						
ELEMENTOS DE LIGA (¹QW-404.27): (ALLOY ELEMENTS) N.A.						
FAIXA DE ESP. DO MAT. DEPOS. (¹QW-404.30) (¹QW-404.32): (THICKNESS RANGE OF DEPOSITED WELD METAL)		CHANFRO: EM V 8mm	FILETE: (FILLET)			
MARCA COMERCIAL: WELD-INOX SOLDAS ESPECIAIS						
CERTIFICAMOS QUE OS DADOS DESTES REGISTROS SÃO CORRETOS E QUE AS SOLDAS FORAM PREPARADAS, SOLDADAS E TESTADAS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DO CÓDIGO ASME SEÇÃO IX EDIÇÃO 2023.						
(WE CERTIFY THAT THE STATEMENTS IN THIS RECORD ARE CORRECT AND THAT THE TEST WELDS WERE PREPARED, WELDED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF SECTION IX OF THE ASME CODE EDITION 2019).						

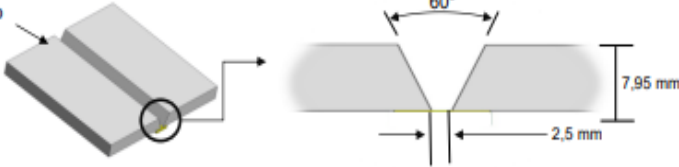
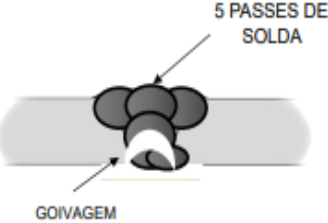
Fonte: adaptado de Dutra (2024)

Figura 59 EPS GMAW folha 2

Fatec Faculdade de Tecnologia Rua Quera Miguel Reis		ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) (WELDING PROCEDURE SPECIFICATION - WPS)		REVISÃO (REVISION)	DATA (DATE)	DATA: (DATE)	30/11/2024			
						EPS Nº: (WPS No.)	003/2024			
						FOLHA: (SHEET)	2/2			
POSIÇÕES (QW-405) (POSITION)				TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM (QW-407) (POSTWELD HEAT TREATMENT)						
POSIÇÃO DO CHANFRO (°QW-405.1) (°QW-405.2): 2G				FAIXA DE TEMPER. (°QW-407.1) (°QW-407.2): N/E						
POSIÇÃO DO FILETE (°QW-405.1) (°QW-405.2):				FAIXA DE TEMPO (°QW-407.1) (°QW-407.2): N/E						
SENT. DE PROG. SOLDA VERTICAL (°QW-405.3): N/E				OBSERVAÇÕES:						
PREAQUECIMENTO (QW - 406) N/E				GAS (QW - 408)						
PREAQUECIMENTO MÍNIMO (°QW-406.1): N/A				GÁS DE PROTEÇÃO (°QW-408.2) (°QW-408.3) (°QW-408.10):		TIPO: Argônio, CO2				
OBS.: (REMARKS)						COMPOSIÇÃO: C4%				
MANU. PREAQ. (°QW-406.2): N/E				GAS DE PROTEÇÃO AUXILIAR (°QW-408.1) (°QW-408.10):		VAZÃO: 13 l/min				
INTERPASSE MÁXIMO (°QW-406.3): N/E						TIPO: N.A.				
CONTROLE:				GAS DE PROTEÇÃO DO LADO DA RAIZ (°QW-408.5) (°QW-408.9):		COMPOSIÇÃO: N.A.				
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409) (ELECTRIC CHARACTERISTICS)						VAZÃO: N.A.				
ENTRADA DE CALOR (°QW-409.1): 858,74 J/mm						TIPO: N.A.				
MODO DE TRANSF. (°QW-409.2): GLOBULAR						COMPOSIÇÃO: N.A.				
OBS. (°QW-409.4) (°QW-409.8): N.A.				OBSERVAÇÕES:		VAZÃO: N.A.				
						TIPO: N.A.				
TÉCNICA (QW-410) (TECHNIQUE)										
RETILÍNEO OU OSCILANTE (°QW-410.1): RETILÍNEO										
DIMENSÕES DO BOCAL DE GAS (°QW-410.3): N/E										
METODO DE LIMPEZA INICIAL E INTERPASSE (°QW-410.5): N.A.										
METODO DE GOIVAGEM DA RAIZ (°QW-410.6): ESMERILHAMNETO										
DISTÂNCIA DO TUBO DE CONTATO À PEÇA (°QW-410.8): N.A.										
PASSOS SIMPLES OU MÚLTIPLOS POR LADO (°QW-410.9): MÚLTIPLOS										
ELETRODOS SIMPLES OU MÚLTIPLOS (°QW-410.10): N/E										
OSCILAÇÃO (°QW-410.7): N.A.				MARTELAÇÃO (°QW-410.26): N.A.						
ELECTRODE SPACING (°QW-410.15): N.A.				USO DE PROCESSO TÉRMICO (°QW-410.64): N.A.						
TABELA1: PARÂMETROS DE SOLDAGEM (WELDING PARAMETERS)										
Passe N°	Camada N° (WELD LAYER No.)	Processo	Metal de Adição		Características Elétricas CORRENTE CONTINUA			Velocidade de Alimentação do Arame [m/min] (WIRE FEED RANGE)	Velocidade de Trabalho [mm/min] (TRAVEL SPEED)	Outros (OTHER)
			Class. (CLASSIFIC.)	Ø [mm] (DIAMETER)	Tipo/Pol. (TYPE/POLARITY)	Corrente [A] (CURRENT)	Tensão [V] (VOLTS)			
1	1	GMAW	ER-309L(Si)	1,2	CC+	190-200	20-24,5	N/A	300	N/A
2	2	GMAW	ER-309L(Si)	1,2	CC+	190-210	20-24,5	N/A	315	N/A
3	2	GMAW	ER-309L(Si)	1,2	CC+	190-220	20-24,5	N/A	315	N/A
4	2	GMAW	ER-309L(Si)	1,2	CC+	200-225	20-24,5	N/A	315	N/A
5	1	GMAW	ER-309L(Si)	1,2	CC+	200-225	20-24,5	N/A	315	N/A
OBSERVAÇÕES: 1 VARIÁVEL ESSENCIAL / 2 VARIÁVEL SUPLEMENTAR ESSENCIAL / 3 VARIÁVEL NÃO ESSENCIAL (REMARKS) (1 ESSENTIAL VARIABLE / 2 SUPPLEMENTARY ESSENTIAL VARIABLE / 3 NONESSENTIAL VARIABLE)										
CERTIFICAMOS QUE OS DADOS DESTA REGISTRO SÃO CORRETOS E QUE AS SOLDAS FORAM PREPARADAS, SOLDADAS E TESTADAS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DO CÓDIGO ASME SEÇÃO IX EDIÇÃO 2023. (WE CERTIFY THAT THE STATEMENTS IN THIS RECORD ARE CORRECT AND THAT THE TEST WELDS WERE PREPARED, WELDED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF SECTION IX OF THE ASME CODE EDITION 2019)										
EMITIDO POR (ISSUED BY)			APROVADO POR (APPROVED BY)			CONTROLE DE QUALIDADE (QUALITY CONTROL)				
LEONARDO CAMARA			TIAGO JOSÉ			EDGAR DE SOUZA DUTRA				

Fonte: Adaptado de Dutra, (2024)

Figura 60 RQPS GMAW folha

		REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORD)				RQPS: GMAW (PQR): 271216-31 Norma: ASME IX 2023		
EPS: (WPS) - 003/2024		PROCESSO (PROCESS)		AT (FCAW): ☐	MIG (GMAW): ☒	SEMI-AUTOM: ☒	MANUAL: ☐	
				TIG (GTAW): ☐	MAG (GMAW): ☐	AUTOMATICO: ☐	MECAN: ☐	
Qualificação  								
POSIÇÃO: 2G L= 310mm								
METAIS		Especificação (spec): ASTM A 36			Especificação (spec): AISI 316L			
BASE		P nº, Tipo ou grau (type or grade): 1			P nº, Tipo ou grau (type or grade): 8			
(BASE		Espessura (thickness) mm: 7,95			Espessura (thickness) mm: 7,95			
METAL)		Certificado (certificate): 014382			Certificado (certificate): 217251			
Preaquec. (preheating) °C: NA		Metodo: Chama		Alívio de tensões (PWHT): NA		Norma (code): NA		
Interpasse max. °C: NA		Controle:		Patamar (soaking temp.) °C: NA		Tempo (soaking time.) NA		
Pos-aquec. (pos-heating) °C:		Tempo (time) min. h: NA		Aquec. (heating rate.) °C/h: NA		Resfr. (cooling rate) °C/h: NA		
Obs:				Início (start) °C: NA		Fim (end) °C: NA		
METAL DE ADIÇÃO (filler metal)		CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (electrical characteristic): ver tabela abaixo (see below)						
Espec. (specification): A5.9		Fonte (font): KEMP						
Classific. : ER309L(Si)		Eletrodo de Tungstenio (tungsten electrode) NA						
F Number : 6 A Number: 8		Transferência (transfer mode) (MIG-MAG): GLOBULAR						
Marca (brand): WELD-INOX		Distância bico-peça (stick out) mm: NA						
Certif.: 193557		Diametro do bocal (gas cup size) mm: NA						
Obs:								
GÁS : Proteção (shielding) : SG -AC-4		Vazão (flow rate) l/min: 13		SOLDADOR: HELIO				
Auxiliar (trailing) : NA		Vazão (flow rate) l/min: --		SINETE (stamp nr): E27				
Da raiz (baking) : NA		Vazão (flow rate) l/min: --		CHAPA (clock nr):				
TECNICA (technique) : Preparação da junta (joint preparation): N.A.								
Limpeza inicial (initial cleaning) : Esmerilhamento, Escova								
Limpeza entre passes (interpass cleaning) : Esmerilhamento, Escova								
Remoção da raiz (back gouging) : ESMERILHAMENTO								
Passe por lado (per side pass) : X simples (single): X múltiplo (multiple):								
Cordão (bead) : RETILÊNIO (string): X Oscilado (weave): Largura max. (max. bead size) mm: NA								
Martelamento (peening): SEM								
Obs:								
CAMADA/ PASSE (Layer/pass)	PROCESSO (process)	METAL DE ADIÇÃO (Filler metal) CLASSIFIC. DIAM. mm		CORRENTE (current) POLAR. AMPÉRAGEM (A)		VOLT V	VELOCID (travel speed) mm/min	OBS.
1 - 1	GMAW	AWS A5.9	1,2	CCEP	190	20	315	
2 - 2	GMAW	AWS A5.9	1,2	CCEP	210	23	300	
2 - 3	GMAW	AWS A5.9	1,2	CCEP	220	22	315	
2 - 4	GMAW	AWS A5.9	1,2	CCEP	220	21	315	
2 - 5	GMAW	AWS A5.9	1,2	CCEP	220	24	315	

Fonte: Adaptado de Dutra, (2024)

Figura 61 RQPS GMAW folha 2

[illegible]

Fonte: Adaptado de Dutra, (2024)

5 CONCLUSÕES

Caracterização do material

Os ensaios realizados nas amostras para a caracterização química e metalográfica apresentaram-se compatíveis com os metais de base.

Ensaio Visual

O ensaio visual dos cordões de solda nas chapas teste não apresentaram descontinuidades ou defeitos aparentes.

Ensaio de Tração

Os CP submetidos ao ensaio de tração apresentam-se compatíveis com o mínimo de resistência exigido para os metais, em ambos os processos de soldagem.

Todos romperam fora da região da solda, as características das fraturas do tipo dúctil e no material de menor resistência o ASTM A36.

O melhor desempenho foi encontrado no CP (T1), com 699 MPa.

Ensaio de Dobramento

Os resultados CP (M), foram aprovados no ensaio visual mediante a comprovação no ensaio de líquido penetrante, os quatro dobramentos não apresentaram defeitos ou descontinuidades.

Os resultados dos CP (T), foram “REPROVADOS”, pois um dos CP de face apresentou uma trinca superior a 3 mm, conforme permitido no Código ASME seção IX, QW-163.

Macrografias

Nos ensaios macrográficos é possível encontrar as três regiões da solda.

Para o CP (M), é possível verificar uma divisão do cordão de solda com 2 tonalidades onde o metal depositado se comporta diferente em cada lado dos materiais dissimilares.

Micrografias e Dureza

O material que mais sofreu com o aquecimento foi o AISI 316L, nos dois processos, podendo verificar um tamanho de grão na ZAC de N° 5, quando seu tamanho em condições normais, a média aproximadamente de N° 8.

A ZAC que apresentou a maior dureza foi a do CP (T), na transição com o metal de base A36, com média de 205 HV

A ZF que apresentou a maior dureza foi a do CP (M), na transição com o metal de base 316L, com média de 228 HV.

Energia

Calculando-se os valores de energia imposta nos processos de soldagem é possível verificar, que o processo de soldagem GMAW imputa mais energia a junta com aproximadamente 858,74 (J/mm), contra 674 (J/mm) do processo FCAW.

Motivo da Trinca

Com a micrografia apresentada na figura 57, é possível verificar que não houve penetração entre o metal de base (A36), e a ZF, também é nítido identificar o chanfro que foi realizado no material.

De acordo com o resultado dos cálculos de aporte térmico também verificamos que o processo FCAW foi o menor 674 (J/mm), favorece a um resfriamento mais rápido e regiões de grãos grosseiros, levando a menor ductilidade.

Outro fator que leva a favorecer o motivo da trinca é que; a ZAC deste processo FCAW no A36, foi a de maior dureza 205 HV a mesma região da trinca.

REFERÊNCIAS

ASME SECTION II PARTE (A) MATERIALS BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE AN INTERNACIONAL CODE. 2023

ASME SECTION II PARTE (C) MATERIALS BOILERS AND PRESSURE VESSEL CODE AN INTERNACIONAL CODE. 2023

ASME SECTION IX BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE AN INTERNACIONAL CODE. 2023.

BEER, Ferdinand P; RUSSELL, Jhounston E, Jr *et al.* **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BRANDI, Sérgio; WAINER, Emílio; MELLO, Fábio. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 9.ed. São Paulo. Blucher. 2013.

CASTOLIN EUTECTIC – Catálogo de consumíveis. **Arames Tubulares**. Indaiatuba – SP. S.d. Disponível em:

FORTES, Cleber. **Apostila Arame Tubulares Ok**. ESAB BR, 2004. 103p.

HANDBOOK OF COMPARATIVE WORLS STANDARDS.THIRD EDITION. Capítulo 4, **Pressure Vessel Steel Plates**.

<https://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-arame-tubular.pdf>. Acesso em: 29.out.2023

LAZZARI, Claudio Parra. FERNANDIS, Paulo Eduardo Alves. GIMENES, Luís. *et al.* **Metalurgia: Soldagem** Capítulo 5, **Metalurgia da Soldagem**. São Paulo. Senai-SP. 2013.

LAZZARI, Claudio. FERNANDES, Paulo. GIMENES, Luiz *et al.* **Metalurgia: Soldagem**. São Paulo. Senai-SP. 2013.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas**: Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MARQUES, Paulo; MODENESI, Paulo, BRACARENSE, Alexandre. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte. UFMG. 2011.

MODENESI, Paulo José. **Estimativa de Custos em Soldagem**: Jan. 2001. 29 e 30 Figura.

MODENESI, Paulo José. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**: São Paulo: SENAI -SP, 2001.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; SANTOS, Dagoberto Brandão. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 2012. Capítulo 1. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 04 out. 2023.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; SANTOS, Dagoberto Brandão. **Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão de acordo com a patente de Bernados**: Jan. 2012. 1 Figura.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; SANTOS, Dagoberto Brandão. **Ilustração do arco elétrico**. Jan. 2012. 2 Figura.

N-133 NORMA PETROBRÁS. Capítulo 5.5 Aços **Inoxidáveis Austeníticos**. Capítulo 5.13 **Soldagem Similar**.

PADILHA, Angelo Fernando. FILHO, Francisco Ambrozio. **Técnicas de Análise Micro Estrutural. Prefácio e Apresentação**. Hemus. 2004.

PADILHA, Angelo Fernando. GUEDES, Luis Carlos. **Aços Inoxidáveis Austeníticos**. Capítulo 4. **Solidificação das Ligas do Sistema Fe-Cr-Ni-C**. Hemus. Londres. 2004.

PEREIRA, Marcelo Marciel. **Curso de Inspetor de Soldagem 1**. Capítulo 2.2 **Preparação da Junta**. Rio de Janeiro. FBTS. 2012.

PETROBRAS – **Concursos públicos. Engenharia de Equipamentos e Inspeção**. Rio de Janeiro – RJ. S.d. Disponível em: <https://www.teconconcursos.com.br/questoes/1562591> . Acesso em: 03.nov.2023

POEPCKE, José. et al. **Metalurgia: Soldagem**. São Paulo. Senai-SP. 2013.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento Melhor desempenho**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

TELLES, Pedro. **Vasos de Pressão**. 2. ed. São Paulo. LTC. 1996.