

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica
Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem

Lucas Soares Souza

**SOLDAGEM DE TANQUES DE AÇO INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO UTILIZADOS
PARA TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA E LGE**

Belo Horizonte

2025

Lucas Soares Souza

**SOLDAGEM DE TANQUES DE AÇO INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO UTILIZADOS
PARA TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA E LGE**

Monografia apresentada ao curso de pós-graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Reginaldo Matias Nunes

Belo Horizonte

2025

S729s	<p>Souza, Lucas Soares. Soldagem de tanques de aço inoxidáveis austenítico utilizados para transporte e armazenamento de água e LGE [recurso eletrônico] / Lucas Soares Souza. – 2025. 1 recurso online (68 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Reginaldo Matias Nunes.</p> <p>Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.</p> <p>Bibliografia: f. 67-68.</p> <p>1. Soldagem. 2. Tanques de armazenamento. 3. Água – Armazenamento. 4. Espuma. I. Nunes, Reginaldo Matias. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.791</p>
-------	---



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA 02/2025 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 21 de fevereiro de 2025, às 14:00h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: *SOLDAGEM DE TANQUES DE AÇO INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO UTILIZADOS PARA TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA E LGE*

Aluno: LUCAS SOARES SOUZA – Matrícula: 2022687218

Local: Remotamente via plataforma “TEAMS”.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 20 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 60 minutos, é de parecer favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 70,00 e com sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Reginaldo Matias Nunes.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br REGINALDO MATIAS NUNES
Data: 17/03/2025 09:59:50-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Reginaldo Matias Nunes
Esp./UFMG – Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br VANESSA DE FREITAS CUNHA LINS
Data: 14/03/2025 17:50:36-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Vanessa de Freitas Cunha Lins
UFMG - Avaliadora

Documento assinado digitalmente
gov.br ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE
Data: 17/03/2025 10:05:10-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense
UFMG - Avaliador

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCAS SOARES SOUZA
Data: 17/03/2025 12:03:21-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Aluno: Lucas Soares Souza

RESUMO

Este trabalho revela um estudo de caso de soldagem de tanques para transporte de água e LGE (líquido gerador de espuma) em caminhões de combate a incêndio. Tanques fabricados em aço inoxidável 304 que frequentemente apresentam trincas nas regiões soldadas, conseqüentemente vazamento do líquido de seu interior.

Com base em levantamento de dados como espessura, composição do material base, geometria das juntas soldadas e processos de soldagem, foi realizada consultas em diversas literaturas no intuito de demonstrar os principais defeitos e falhas apresentados em tanques de aço inoxidável que se originam devido o processo de soldagem, comprometendo a vida útil do tanque e sua confiabilidade.

Através do estudo de caso real é possível visualizar problemas como corrosões, descontinuidades, inclusões, porosidades da solda que ao longo do tempo resultam na falta de estanqueidade desses reservatórios.

Palavras chaves: EPS; soldagem; norma; AWS; inoxidável 304

ABSTRACT

This work reveals a case study of welding of tanks for transporting water and LGE (foam generating liquid) in firefighting trucks. Tanks made of 304 stainless steel that often present cracks in the welded areas, consequently leaking liquid from inside.

Based on data collection such as thickness, composition of the base material, geometry of welded joints and welding processes, consultations were carried out in various literatures in order to demonstrate the main defects and failures presented in stainless steel tanks that originate due to the process welding, compromising the useful life of the tank and its reliability.

Through the real case study it is possible to visualize problems such as corrosion and weld porosity that over time result in the lack of tightness of these reservoirs.

Keywords: EPS; welding; standard; AWS; 304 stainless

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – procedimento de soldagem (AWS D1.6/2017, p. 273/277, anexo H)	19
Figura 2 – Representação esquemática do processo de soldagem GMAW	23
Figura 3 – Maquinário processo GMAW e esquema de soldagem	24
Figura 4 – Geometria típica do cordão de solda feito com diferentes gases de proteção	27
Figura 5 – Transferência por curto-circuito	29
Figura 6 – Transferência globular	29
Figura 7 – Transferência por aerosol	31
Figura 8 – Transferência arco pulsado	32
Figura 9 – Divisão dos aços inoxidáveis austeníticos, série 300 e seus respectivos elementos básicos.....	33
Figura 10 – Velocidade de corrosão do aço carbono quando expostos a meios corrosivos	34
Figura 11 – Velocidade do aço inoxidável quando expostos a meios corrosivos	34
Figura 12 – Velocidade de corrosão durante o ano com em relação a adição de Cr....	35
Figura 13 – Algumas soluções utilizadas como gel decapante, passivante para limpeza e descontaminação dos aços inoxidáveis austeníticos, bem como acelerador do processo de autopassivação	36
Figura 14 - Corrosão por pites em aço 304 (provocada por uma solução ácida com presença de cloretos).	41
Figura 15 - Corrosão em frestas em um aço inoxidável.	42
Figura 16 - Corrosão sob tensão em uma autoclave de aço 304	43
Figura 17 - Iniciação: Precipitação de Carbonetos de Cromo	44
Figura 18 - Precipitação de Carbonetos e diminuição local do Cromo	44

Figura 19 - Efeito do carbono: Sensitização e Corrosão intergranular (Norma ASTM A262)	44
Figura 20 – Fratura intergranular	45
Figura 21 – Curva de tempo e temperatura de sensitização dos aços inoxidáveis.....	46
Figura 22 - Corrosão intergranular em torno da solda, na zona termicamente afetada	47
Figura 23 – Desenho esquemático do arco elétrico no processo GMAW.....	49
Figura 24 – fotos do tanque com as escotilhas superiores abertas.....	51
Figura 25 - Fotos do 1º tanque e seus defeitos de fabricação.....	52
Figura 26 – defeitos vinculados ao excesso de aporte térmico e falta de regulagem da máquina	54
Figura 27 – Falta de fusão na junta entre chapas.....	55
Figura 28 - Descontinuidade do cordão de solda e falta de solda	55
Figura 29 – Figura 29 - Falta de soldagem.....	56
Figura 30 - Diversas imagens dos defeitos constatados.	56
Figura 31 – Ensaio EVS após soldagem.	57
Figura 32 – Ensaio LP após procedimento de soldagem.....	58
Figura 33 – Cordões de solda após aplicação do decapante.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Procedimento de soldagem em relação à espessura da chapa a serem soldadas.	24
Tabela 02 – Características físicas dos principais gases de proteção usados em soldagem.	26
Tabela 03 - Corrente de transição globular “spray para diferentes diâmetros de eletrodo	30
Tabela 04 – Efeitos dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos.....	37
Tabela 05 – Classificação AISI dos aços austeníticos, composição química (% em peso) e aplicações	38
Tabela 06 - consumíveis recomendados para aços inoxidáveis austeníticos	48
Tabela 07 – resumo de procedimento de soldagem para aço inoxidável 304L no processo GMAW (MIG) e GTAW (TIG)	50

LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

AWS – American Welding Society

GMAW – Gas Metal Arc Welding

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding

END – Ensaio não destrutivos

EPS – Especificação do procedimento de soldagem

RQPS – Registro de qualificação de procedimento de soldagem

CP – Corpo de prova

EVS – Ensaio Visual de Solda

LP – Ensaio de Líquido penetrante

LGE – Líquido Gerador de Espuma

CST- Corrosão sob Tensão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO	13
2.1. Objetivo específico	13
3. JUSTIFICATIVA.....	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1. Soldagem e sua definição.....	15
4.2. Contexto histórico.....	16
4.3. Processos de soldagem e a Norma AWS D 1.6/2017.....	17
4.4. Processo de soldagem: GMAW (MIG/MAG).....	23
4.5. Proteção gasosa.....	25
4.5.1. Condutividade térmica dos gases.....	27
4.6. Modo de transferência	28
4.6.1. Curto circuito	28
4.6.2. Transferência globular	29
4.6.3. Transferência aerosol ou spray.....	30
4.6.4. Transferência por arco pulsado:	31
4.7. Metal Base – AÇO INOXIDÁVEL.....	32
4.8. Propriedades relevantes aos aços inoxidáveis e soldabilidade	38
4.9. Fissuração a quente e as consequências do metal de adição	39
4.10. Corrosão nos aços inoxidáveis AISI 304	40
4.10.1. Corrosão por pites.....	41
4.10.2. Corrosão em frestas.....	41
4.10.3. Corrosão sob tensão.....	42
4.10.4. Corrosão intergranular	43
4.11. Consumíveis de solda recomendados para os aços inoxidáveis austeníticos	47
4.12. Procedimento de soldagem GMAW para os inoxidáveis austeníticos.....	49
5. ESTUDO DE CASO	51
5.1. Contexto.....	51
5.2. Etapa 1 - Sugestões de controle de qualidade.....	51
5.3. Etapa 2 - Análise de informações e discussão após acionamento da garantia.	52
5.4. Etapa 3 - Substituição do tanque, análise e discussão de resultados.....	53
5.5. Etapa 4 - Reparos no tanque substituído, análise e discussão	57
6. CONCLUSÃO	60

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
-------------------------------------	----

1. INTRODUÇÃO

Tendo sua provável origem por volta de 2.000 a.C. com os avanços da metalurgia e o forjamento de espada de Damasco a soldagem é hoje um dos principais processos de fabricação na indústria moderna, sendo fundamental na produção e recuperação de peças, através da união de superfícies, recobrimento de peças e aplicação de revestimentos com características especiais, ou mesmo utilizada para produzir peças a partir do zero, através da deposição de material em camadas, então chamado por manufatura aditiva, ou impressão 3D (ROTT, 2023).

Conquistando uma maior confiabilidade após a primeira guerra mundial e demonstrando melhor exequibilidade que os processos anteriormente utilizados como a fundição, a soldagem é atualmente empregada para união de diversos materiais como metais e ligas e mais recentemente em plásticos e compósitos (BELGO, 2023).

Por não ser o produto final e sim parte do processo construtivo a soldagem exige um controle de qualidade para que padrões previamente estabelecidos sejam seguidos, garantindo ao produto suas funcionalidades e propriedades mecânicas.

O alto aporte térmico gerado durante o processo de soldagem a arco elétrico pode gerar mudanças nas propriedades físicas e químicas dos materiais e podem causar fragilidade, trincas e corrosões nas zonas soldadas. A qualificação de procedimentos de soldagem e seus devidos testes minimizam esses defeitos que podem se tornar falhas comprometendo toda a peça fabricada.

A presente pesquisa, com base em análise prática de um tanque em serviço, fabricado em Aço Inoxidável 304L, investiga as principais causas de defeitos em juntas soldadas, corroborando com a literatura técnica especializada. Através de uma peritagem, foram identificados os principais defeitos metalúrgicos e geométricos associados à execução inadequada de procedimentos de soldagem. Os resultados obtidos demonstram que a falta de qualificação de procedimentos e dos soldadores e a ausência de um controle de qualidade podem gerar defeitos como porosidade, falta de fusão, falta de penetração, corrosão intergranular e inclusões, comprometendo a integridade estrutural do tanque, falta de estanqueidade, retrabalhos e, conseqüentemente comprometendo a vida útil e a falha em uso.

2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é demonstrar as falhas ocorridas em tanques soldados de transporte de líquidos (água e LGE) em veículos de emergência e combate a incêndio que pela natureza do serviço necessitam estar sempre prontos para o emprego imediato, livre de qualquer eventualidade que comprometam seu pronto atendimento.

A partir do estudo das falhas e suas prováveis causas estabelecer dentro das diretrizes normativas suas consequências e pontos de melhoria no processo de fabricação.

2.1. Objetivo específico

Apresentar o desenvolvimento da soldagem a arco elétrico desde sua origem, suas variações conforme estabelecidas pela norma AWS D1.6 que regulamenta e especifica os padrões e métodos para soldagem estrutural de aços inoxidáveis, dando ênfase ao processo GMAW por ser o mais utilizado pela indústria de tanques de transporte de líquido, devido sua alta produtividade e baixo custo.

Demonstrar as variações e influências da soldagem diante dos consumíveis utilizados, as características físicas, metalúrgicas e propriedades mecânicas do AISI 304 L utilizado na fabricação dos tanques.

Os riscos encontrados na soldagem deste tipo de material, os defeitos encontrados e uma análise teórica de cada um dos defeitos apresentados apontando suas possíveis causas e melhorias no processo produtivo no intuito de mitigar falhas.

3. JUSTIFICATIVA

O retrabalho e o acionamento contínuo da garantia de tanques fabricados em aço inoxidáveis fomentou a elaboração deste trabalho, a execução de uma solda de qualidade precisa seguir parâmetros pré-definidos para que trincas e corrosões não aconteçam ou pelo menos sejam minimizadas dentro de padrões aceitáveis de usabilidade e vida útil do componente fabricado.

O estudo do projeto, os materiais utilizados, o controle durante a execução da soldagem e a inspeção do produto acabado possibilitam a compreensão das falhas ocorridas, em específico nas Zonas Termicamente Afetadas (ZTA) e suas adjacências. A melhoria do processo de fabricação, associado a padronização do processo construtivo e o controle de qualidade rígido com a implementação de fases e avaliações antes mesmo da fabricação com a aplicação de RQPS, EPS e qualificação dos soldadores conforme é estabelecido pela norma AWS D1.6 garantem as características mínimas para o produto final e seus resultados, de modo a obter a qualidade desejável para esta união, minimizando ou deixando dentro de parâmetros aceitáveis a qualidade do produto fornecido ao mercado.

Diante do exposto, este trabalho se demonstra relevante por apresentar um aprofundamento na soldagem do aço inoxidável autêntico, atualmente muito utilizado devido suas características mecânicas, resistência a corrosão e custo, tendo grande ascensão inclusive na indústria aeroespacial devido sua resistência a temperaturas criogênicas e sua resistência a fluência, principalmente quando combinados a elementos como Níquel (MODENESI, 2022).

Para o fabricante de tanques de armazenamento de líquido para combate a incêndio o estudo irá oferecer uma análise crítica baseado em literaturas técnicas resultando em apontamentos que mitiguem as falhas do produto reduzido o tempo de manutenção, retrabalho ou o descarte prematuro do tanque.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Soldagem e sua definição

Segundo a *American Welding Society* (AWS) A3.0 soldagens é: “Operação que visa obter a coalescência localizada pelo aquecimento localizado até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição”.

Já a *Deutsches Institut für Normung* (DIN) referência normativa mundial também aplicada pelo *International Organization for Standardization* (ISO) através da DIN EN 14610 define a soldagem como “Operação que realiza a união metálica pela aplicação de aquecimento, pressão ou ambos de modo a estabelecer a continuidade através do metal (ou metais) que foi (ou foram) unido(s)”

Em sua norma N-1438 (2023, p.16, item 3.130) a Petrobras corrobora com a AWS definindo soldagem como “união (coalescência) localizada de metais ou não-metais, produzida pelo aquecimento dos materiais à temperatura de soldagem, com ou sem aplicação de pressão, ou pela aplicação de pressão apenas, e com ou sem o uso de metal de adição”

Apesar deste trabalho abordar a soldagem de materiais metálicos, importante esclarecer que tais definições ainda que muito próximas não contemplam processos relativamente novos na indústria como a união de plásticos e compósitos em suas definições, dessa forma a Dra. Ivanilza em sua apostila de Tecnologia da Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica CEFET-MG (2016) define soldagem como:

(...) um processo de união de materiais, mais especificamente, união de metais e polímero. Na soldagem, a união é obtida pela aproximação dos átomos (nos metais) ou moléculas (nos polímeros) à distâncias suficientemente pequenas para que ligações químicas sejam formadas, em particular, ligações metálica (nos metais) e de Van der Waals (nos polímeros). (Felizardo,2016, p.05)

Considerando o escopo da norma AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel, que enfatiza os processos a arco elétrico para a soldagem de aços inoxidáveis, este estudo concentrará seus esforços no processo GMAW. Essa escolha se justifica pela predominância do GMAW nas indústrias de fabricação de tanques de

armazenamento, o que o torna um processo de grande relevância para a análise e otimização das operações de soldagem nesse setor.

4.2. Contexto histórico

Dentre os processos de soldagem existentes, a soldagem de aços inoxidáveis é dada pela soldagem por arco elétrico, tendo sido desenvolvida desde o início do século XIX, até os dias atuais (CARBÓ, 2001).

A primeira observação do arco elétrico em condição controlada é atribuída ao químico inglês Sir Humphry Davy em 1801, constituindo uma transmissão de corrente elétrica entre duas hastes de carbono (Rott,2023)

Em 1885 o russo Nikolay N. Bernardos e Stanislav Olszewsky patentearam o processo utilizando eletrodos de grafite, sendo mais tarde substituído por arames metálicos, se aproximando do processo SMAW utilizado nos dias atuais.

Em 1890 o americano Charles L. Coffin idealizou e patenteou o processo de soldagem utilizando eletrodos nus, porém sendo consumidos pela poça de fusão, mais tarde, por volta de 1930 utilizado eletrodo de tungstênio, não consumível e corrente alternada se aproximava do processo TIG (Tungsten Inert Gas) utilizado atualmente.

Em 1904 o sueco Oscar Kjellberg fundador da Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget (ESAB) passa a utilizar material argiloso misturado à cal para revestir o núcleo metálico servindo como condutor de corrente elétrica e o revestimento para gerar maior estabilidade no processo, gerando gases capazes de proteger a solda contra os gases da atmosfera e formando escória sobre o cordão.

Durante a primeira guerra mundial (1914 - 1918) a soldagem foi largamente utilizada, devido a rapidez e economicidade na recuperação de equipamentos, anteriormente fabricados apenas pelo processo de fundição, mas devido a inexistência de normas reguladoras e pouco conhecimento sobre o processo o ferro fundido ainda se destacava para fabricação de peças metálicas.

Em meados de 1920 começou-se a utilizar gases para proteção no processo de soldagem de matérias reativos como o alumínio, titânio e ligas de magnésio, ficando esse processo comercialmente viável apenas a partir de 1948.

Por volta de 1930 a soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) é estabelecida e ganha destaque na indústria aeronáutica militar para soldagem de alumínio e ligas, apresentando bom desempenho nesses metais considerados de difícil soldabilidade. Na mesma época H.M. Hobart e P.K. Devers desenvolvem o processo MIG (Metal Inert Gas), também para soldagem de alumínio, porém tornando-se comercialmente viável apenas em 1948.

Ainda na década de 1930 ingressando na década de 1940, no intuito de estabelecer melhor produtividade e qualidade na indústria naval o arco submerso é empregado na soldagem de navios durante a segunda guerra mundial, devido sua alta energia, alta deposição e penetração em chapas grossas passa a ser largamente utilizado em indústrias pesadas

Em 1941, Russell Meredith aperfeiçoou o processo o processo TIG, utilizando gás Hélio para proteger o eletrodo de tungstênio.

Já na década de 50 é introduzido gases oxidantes no gás de proteção de soldagens, utilizando gases ativos no processo de soldagem, possibilitando reações mais violentas e penetrações mais profundas no metal base, dando origem então ao termo MAG (Metal Active Gas). Na mesma década é introduzido o uso de arame tubular com proteção gasosa, sendo apenas na década de 60 introduzido por pesquisadores e engenheiros da Lincon Eletric o arame auto protegido

Dessa forma, ao longo dos anos grandes avanços foram observados na soldagem, a criação de processos por meio do conhecimento da matéria possibilitou grande variedade de processos, em especial na soldagem a arco elétrico.

4.3. Processos de soldagem e a Norma AWS D 1.6/2017

A norma AWS D1.6/2017 define os padrões de soldagem para o aço inoxidável, garantindo assim a confiabilidade, qualidade e desempenho da solda.

Na clausula 5.2.1 da AWS D1.6/2017 destaca os processos pré-qualificados, ou seja, processos que já estão em conformidade com as disposições da clausula 5., estando, portanto, isentos de qualificações através de testes definidos na clausula 6..

Sendo assim, uniões que atendam o disposto da clausula 5., como união de metais base e enchimento apenas de aços inoxidáveis nominalmente austeníticos, cuja faixa de temperatura de serviço esteja entre -75°C a 430° C ou materiais que

estejam listados nas Tabelas 5.2 e 5.3 da mesma norma, limitando a estruturas de aço inoxidável mais espessos que 1,5mm ou calibre 16 e não forem vasos de pressão, nem tubulações de pressão conforme especificado no item 1.4 da norma, são processos pré-qualificados.

Vale salientar que todos os materiais não listados nas tabelas 5.2 e 5.3, página 29, 30, 31, 32, 33 da norma, devem ser qualificados de acordo com os requisitos da Cláusula 6 da D1.6.

Dentre os processos já pré-qualificados que merecem destaque são:

- SMAW – (Shielded Metal Arc Welding);
- GTAW – (Gas Tungsten Arc Weld), incluindo a solda autógena;
- GMAW – (Gas Metal Arc Welding);
- FCAW – (Flux-Cored Arc Welding);

Vale esclarecer que os demais processos a arco estariam qualificados caso fossem realizados as RQPS (Registro da Qualificação de Soldagem) e EPS (Especificação do procedimento de Soldagem) necessárias, conforme é descrito na clausula 6., e suas parte que seguem descritas de forma resumida:

- Parte A — Requisitos Gerais. Parte que define os requisitos gerais de qualificação para procedimentos de soldagem e pessoal como reutilização de documentação, registros e edições de normas anteriores, bem como posições de soldagem (planas “F”, horizontais “H”, verticais “V”, sobrecarga “OH”), figura 6.1 e 6.2, página 94 e 95 da Norma, com base nas posições a serem utilizadas na produção.

- Parte B – Qualificação do Procedimento de Soldagem. Parte que define a responsabilidade, supervisão e controle do pessoal pela qualificação, a utilização de outras normas, o registro das variáveis essenciais e variáveis essenciais suplementares descritas e limitadas pelas tabelas 6.2, 6.2. 6.3, página 87, 88, 89 da norma. A qualificação do metal base ou combinações como aço inoxidável e aço carbono, estando eles listados na tabela 5.2 ou não. A espessura e suas limitações para qualificação conforme tabela 6.3(A) e 6.3(B), página 89 da norma. A qualificação de soldas de ranhura ou soldas de topo. Qualificação de solda de filete. Os testes, os ensaios, os retestes e os requisitos de revestimento.

- Parte C – Qualificação de Desempenho. Esta parte define os requisitos para qualificação do pessoal de soldagem, desempenho qualificado dentro dos limites definidos nas tabelas 6.8, 6.9 e 6.10, página 92, 93 da norma, e ensaios, testes e exames referentes a qualificação e habilidade do operador.

Todos esses procedimentos devem ser registrados e documentados nos formulários que seguem como amostra no anexo H, página 273 a 277 da norma.

ANNEX H

AWS D1.6/D1.6M:2017

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) Yes
PREQUALIFIED _____ QUALIFIED BY TESTING _____
or PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) Yes

Company Name _____
Welding Process(es) _____
Supporting PQR No.(s) _____

JOINT DESIGN USED
Type: Single Double Weld
Backing: Yes No
Backing Material: _____
Root Opening _____ Root Face Dimension _____
Groove Angle: _____ Radius (J-U) _____
Back Gouging: Yes No Method _____

BASE METALS
Material Spec. _____
Type or Grade _____
Thickness: Groove _____ Fillet _____
Diameter (Pipe) _____

FILLER METALS
AWS Specification _____
AWS Classification _____

SHIELDING
Flux _____ Gas _____
Composition _____
Electrode-Flux (Class) _____ Flow Rate _____
Gas Cup Size _____

PREHEAT
Preheat Temp., Min. _____
Interpass Temp., Min. _____ Max. _____

Identification # _____
Revision _____ Date _____ By _____
Authorized by _____ Date _____
Type— Manual Semi-Automatic
Machine Automatic

POSITION
Position of Groove: _____ Fillet: _____
Vertical Progression: Up Down

ELECTRICAL CHARACTERISTICS
Transfer Mode (GMAW) Short-Circuiting
Globular Spray
Current: AC DCEP DCEN Pulsed
Other _____
Tungsten Electrode (GTAW)
Size: _____
Type: _____

TECHNIQUE
Stringer or Weave Bead: _____
Multi-pass or Single Pass (per side) _____
Number of Electrodes _____
Electrode Spacing Longitudinal _____
Lateral _____
Angle _____
Contact Tube to Work Distance _____
Peening _____
Interpass Cleaning: _____

POSTWELD HEAT TREATMENT
Temp. _____
Time _____

WELDING PROCEDURE

Pass or Weld Layer(s)	Process	Filler Metals		Current		Volts	Travel Speed	Joint Details
		Class	Diam.	Type & Polarity	Amps or Wire Feed Speed			

Form H-1

Figura 01 – procedimento de soldagem (AWS D1.6/2017, p. 273/277, anexo H)

Procedure Qualification Record (PQR) # _____
Test Results

TENSILE TEST

Specimen No.	Width	Thickness	Area	Ultimate tensile load, lbs [N]	Ultimate unit stress, psi [MPa]	Character of failure and location

GUIDED BEND TEST

Specimen No.	Type of bend	Result	Remarks

VISUAL INSPECTION

Appearance _____
 Undercut _____
 Piping porosity _____
 Convexity _____
 Test date _____
 Witnessed by _____

Radiographic-ultrasonic examination
 RT report no.: _____ Result _____
 UT report no.: _____ Result _____

FILLET WELD TEST RESULTS

Minimum size multiple pass	Maximum size single pass
Macroetch	Macroetch
1. _____ 3. _____	1. _____ 3. _____
2. _____	2. _____

Other Tests

All-weld-metal tension test
 Tensile strength, psi [MPa] _____
 Yield point/strength, psi [MPa] _____
 Elongation in 2 in [50 mm], % _____
 Laboratory test no. _____

Welder's name _____

Clock no. _____ Stamp no. _____

Tests conducted by _____

Laboratory

Test number _____

Per _____

We, the undersigned, 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 Clause 6 of AWS D1.6, (_____) *Structural Welding Code—Stainless Steel*.
 (year)

Signed _____
 Manufacturer or Contractor

By _____

Title _____

Date _____

Figura 01 – procedimento de soldagem (AWS D1.6/2017, p. 273/277, anexo H)

WELDER OR WELDING OPERATOR QUALIFICATION TEST RECORD

Type of Welder _____
 Name _____ Identification No. _____
 Welding Procedure Specification No. _____ Rev. _____ Date _____

Variables	Record Actual Values Used in Qualification	Qualification Range
Process/Type	_____	_____
Electrode (single or multiple)	_____	_____
Current/Polarity	_____	_____
Position	_____	_____
Weld Progression	_____	_____
Backing (YES or NO)	_____	_____
Material/Spec.	_____ to _____	_____
Base Metal	_____	_____
Thickness (Plate)	_____	_____
Groove	_____	_____
Fillet	_____	_____
Thickness: (Pipe/tube)	_____	_____
Groove	_____	_____
Fillet	_____	_____
Diameter: (Pipe)	_____	_____
Groove	_____	_____
Fillet	_____	_____
Filler Metal	_____	_____
Spec. No.	_____	_____
Class	_____	_____
F-No.	_____	_____
Gas/Flux Type	_____	_____
Other	_____	_____

VISUAL INSPECTION			
Acceptable YES or NO _____			
Guided Bend Test Results			
Type	Result	Type	Result
Fillet Test Results			
Appearance _____	Fillet Size _____		
Fracture Test Root Penetration _____	Macroetch _____		
(Describe the location, nature, and size of any crack or tearing of the specimen.)			
Inspected by _____	Test Number _____		
Organization _____	Date _____		

RADIOGRAPHIC TEST RESULTS					
Film Identification Number	Results	Remarks	Film Identification Number	Results	Remarks

Inspected by _____ Test Number _____
 Organization _____ Date _____

We, the undersigned, 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 Clause 6 of AWS D1.6, (_____) *Structural Welding Code—Stainless Steel*.
 (year)

Manufacturer or Contractor _____ Authorized By _____
 Form H-3 Date _____

Figura 01 – procedimento de soldagem (AWS D1.6/2017, p. 273/277, anexo H)

STUD WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) Yes
STUD WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (PQR) Yes
STUD WELDING OPERATOR PERFORMANCE QUALIFICATION RECORD Yes
PREPRODUCTION TESTING FORM Yes

Company name _____
 Operator name _____
 Test number _____
 Weld stud material _____
 Weld stud size and PN#/Manufacturer _____
Base Material
 Specification _____
 Alloy and temper _____
 Surface condition HR CR
 Coating _____
 Cleaning method _____
 Decking gage _____
Shape of Base Material
 Flat Round Tube
 Angle Inside Outside Inside radius
 Thickness _____
Ferrule
 Part No./Manufacturer _____
 Ferrule description _____
Equipment Data
Application Settings, Current, and Time Settings
 Make _____ Model _____
 Stud gun: Make _____ Model _____
 Weld time (seconds) _____
 Current (amperage) _____
 Polarity: DCEN _____ DCEP _____
 Lift _____
 Plunge (protrusion) _____
 Weld cable size _____ Length _____
 Number of grounds (workpiece leads) _____
Welding Position
 Flat (Down hand) Horizontal (Side hand) Angular—degrees from normal Overhead
Shielding Gas
 Shielding gas(es)/Composition _____
 Flow rate _____

Stud Base Sketch/Application Detail

WELD TEST RESULTS

Stud No.	Visual Acceptance	Option #1 Bend Test	Option #2 Tension Test	Option #3 Torque Test*
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

* Note: Torque test optional for threaded fasteners only.

Mechanical tests conducted by _____ Date _____
 (Company)

We, the undersigned, certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded, and tested in conformance with the requirements of Clause 9 of AWS D1.6/D1.6M, (_____) *Structural Welding Code—Stainless Steel*. (year)

Signed by _____ Title _____ Date _____
 (Contractor/Applicator/Other)

Form H4 Company _____

Figura 01 – procedimento de soldagem (AWS D1.6/2017, p. 273/277, anexo H)

4.4. Processo de soldagem: GMAW (MIG/MAG)

Dentre todos os processos pré-qualificados da norma D 1.6 citados, o GMAW merece destaque no escopo deste trabalho por ser o mais utilizado na soldagem de tanques devido sua eficiência e velocidade da soldagem, como veremos a seguir.

O GMAW utiliza para a proteção contra a contaminação atmosférica da poça de fusão e do arco, gases, podendo utilizar gás inerte ou misturas ricas de gases inertes – MIG - *Metal Inert Gas* (Argônio, Hélio, etc), empregado para soldagem de materiais não ferrosos como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas, ou gás ativo, ou misturas ricas em gases ativos – MAG - *Metal Active Gás* (CO_2), empregado para soldagem de metais ferrosos (SCOTTI; PANOMAREV, 2008).

Este processo utiliza eletrodo nu, em que a alimentação do arame é feita mecanicamente através de um alimentador motorizado normalmente semiautomático, à medida que o soldador aciona o atuador para liberação do arame na tocha o gás também é liberado fazendo assim a proteção do arco elétrico e da poça de fusão contra contaminantes da atmosfera.

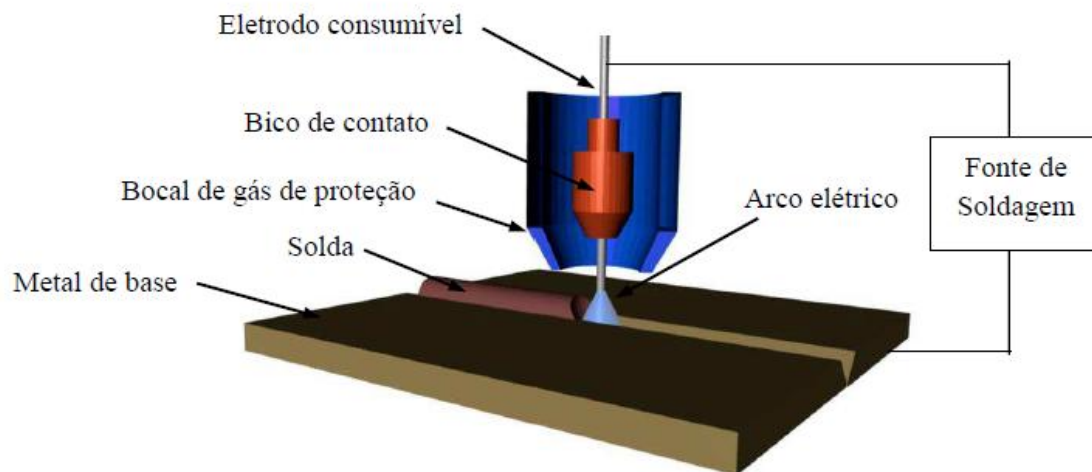


Figura 02 – Representação esquemática do processo de soldagem GMAW

Utilizado para soldar uma ampla faixa de espessura de matérias os eletrodos podem ser encontrados com diâmetro diferentes que variam normalmente de 0,8 a 3,2mm de espessura, estando diretamente ligado a taxa de deposição de material e quantidade de passes definidos pela EPS (MARQUES, 2013).

a necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros é determinante para obter um conjunto de características do cordão de solda.

Em comparação ao processo SMAW, popularmente conhecido por eletrodo revestido, o GMAW utiliza equipamento de maior custo e que demandam maior necessidade de manutenção, devido a maior complexidade do equipamento, além disso são equipamentos menos portáteis, composto basicamente por uma fonte de soldagem, um alimentador de arame e um cilindro de gás de proteção, dessa forma é pouco indicado para soldagens em campo e em locais abertos, principalmente pela forma de proteção gasosa, assegurada pela tocha de solda que precisa estar próxima da poça de fusão e sem corrente de ar que podem dissipar a proteção gasosa oferecida pela tocha (MARQUES *et al*, 2013).

O GMAW possui menor variedade de consumíveis devido a limitação metalúrgica da composição dos arames disponíveis no mercado quando comparação ao SMAW e FCAW que podem utilizar na composição do fluxo, pós metálicos que complementam a liga metálica do metal de adição, proporcionando características físicas e químicas específicas ao cordão, favorecendo a soldagem de alguns metais e ligas (FERRARESI, 2013)

Vale salientar que o maquinário utilizado no processo GMAW e FCAW são os mesmos, não sendo necessário a proteção gasosa no FCAW-S (arame auto protegido), onde o gás gerado pela queima do fluxo é responsável pela proteção do arco elétrico e formação da escoria, assim como no processo SMAW (FERRARESI, 2013).

Apesar de pré-qualificado pela AWS 1.6, este processo de soldagem não será abordado neste trabalho.

4.5. Proteção gasosa

Nos processos de soldagem a arco os gases fornecidos por fontes externas possuem grande relevância no processo, influenciando o comportamento do arco elétrico de soldagem, a condutividade térmica do arco, a transferência do metal, o formato do cordão de solda, sua composição química e propriedades, podendo ser divididos entre gases inertes e ativos (MARQUES, 2013).

- Os gases inertes não se combinam com outros elementos químicos, portanto não formam outras substâncias. Geralmente usados na soldagem GTAW e GMAW (MIG)
- Os gases ativos são divididos em gases oxidantes, aqueles que possuem oxigênio em sua composição e redutores, aqueles que reagem com o oxigênio.

Gases puros ou misturas de dois ou mais gases também podem ser usados como gases de proteção, como veremos a tabela abaixo:

Características	atm	Ar	CO₂	He	N₂	O₂	H₂
Nº Atômico	-	18	-	2	7	8	1
Tipo de gás	oxidante	inerte	oxidante	inerte	inerte	oxidante	reductor
Estrutura	-	Mono	Diat	Mono	Diat	Diat	Diat
Peso Molecular	28,98	39,94	44,01	4,00	28,01	31,99	2,01
Densidade (g/l)	1,22	1,78	1,98	0,18	1,25	1,43	0,09
Condutividade térmica	0,26	16,4	14,7	142,6	24,0	24,2	168,3
Potencial de ionização	-	15,7	14,4	24,5	15,5	12,6	15,6
Concentração max. toxicidade (%)	100%	Não Tox	Não tox Asfixia	Não Tox	Não tox Asfixia	25% 82%	Não tox Asfixia

Tabela 02 - Características físicas dos principais gases de proteção usados em soldagem. Fonte: Bracarense (2021) adaptado pelo autor.

Algumas características importantes que merecem destaque é que gases menos densos (mais leves) que o ar atmosférico, como o H₂, He e N₂, necessitam de maior vazão para oferecerem uma proteção eficaz, ou então são mais indicados para soldagens sobre cabeça. Gases mais densos que o ar atmosférico, como o CO₂, Ar e o O₂ devem ser usados com precaução em ambientes fechados, pois podem causar asfixia (BRACARENSE, 2021).

4.5.1. Condutividade térmica dos gases

Plasma é o estado físico do gás capaz de conduzir corrente elétrica, nesse sentido é a energia necessária para desprender elétrons da última camada do átomo, chamada de energia de ionização, ou potencial de ionização, cada elemento químico possui um potencial e quanto maior o potencial de ionização, maior a temperatura necessária para um gás se tornar condutor, logo o potencial de ionização do gás influencia diretamente a tensão do arco, bem como a energia térmica transferida à solda, conseqüentemente o diâmetro do arco e a penetração da solda no material base (MODENESI, 2021).

De forma geral o O_2 , N_2 e H_2 possuem uma maior condutividade gerando um arco com diâmetro maior e menos profundo, já o Ar, CO_2 e o He possuem uma menor condutividade térmica, resultando em um menor diâmetro de arco e maior penetração (MODENESI, 2021).

. Gases diatômico (CO_2 , N_2 , O_2) precisam se dissociar antes de serem ionizados, o que absorve energia, essa energia é liberada nas camadas mais externas do arco, com a recombinação da molécula de gás, aumentando a eficiência na transferência de calor (MODENESI, 2021).

Em muitas situações, a melhor condição de soldagem é obtida com mistura de dois ou mais gases.

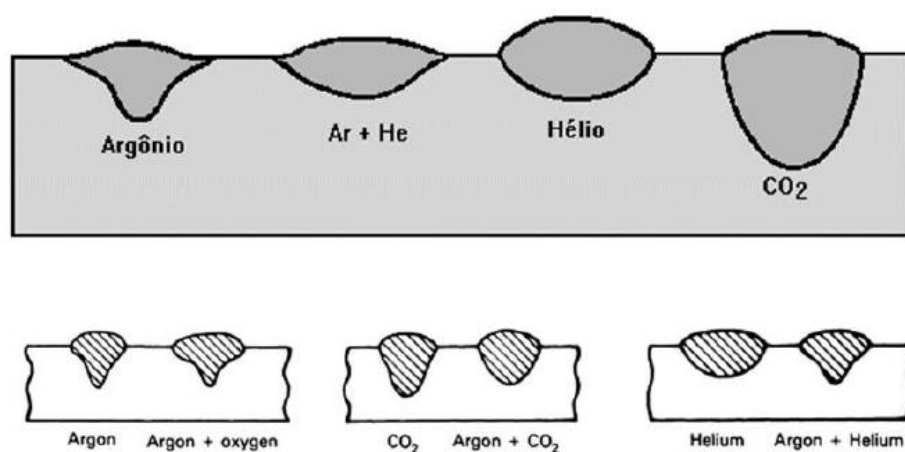


Figura 04 - Geometria típica do cordão de solda feito com diferentes gases de proteção (Argônio; Argônio + Hélio; Hélio; Dióxido de Carbono)

(Argônio; Argônio + Oxigênio; Dióxido de Carbono; Argônio + Dióxido de Carbono; Hélio; Hélio; Argônio + Hélio)

Misturas binárias como Ar-He, Ar-H₂, Ar-N₂, são usadas na soldagem GTAW, GMAW (MIG) para metais não ferrosos e aços inoxidáveis, sendo que o H₂ e N₂ são inertes em soldagens de não ferrosos e aços inoxidáveis. Já as misturas ativas contendo gases inertes e teores de CO₂ e/ou O₂ são usados em soldagem de aço carbono e baixa liga, podendo ser utilizado no processo GMAW e FCAW para soldagem de aços inoxidáveis (MODENESI, 2021).

Sendo assim a utilização do gás está diretamente ligado a morfologia do cordão de solda, bem como a condução da tocha, podendo ser puxando a poça de fusão proporcionando maior penetração e maior aporte térmico na parte já fundida ou empurrando a poça de fusão proporcionando menor penetração e maior calor na parte à frente da solda como realizado com o alumínio devido seu alto poder de dissipação do calor (MODENESI, 2021).

4.6. Modo de transferência

Basicamente existem quatro tipos de transferência do metal de adição pela tocha, sendo eles:

- Curto circuito;
- Transferência globular;
- Transferência por “spray” ou aerosol;
- Transferência controlada.

4.6.1. Curto circuito

Nesse modo de transferência usa-se baixos valores de tensão e corrente, até que a gota de metal se forme. Ao encostar na peça a gota é atraída pela tensão superficial da peça sem uma violenta separação da gota metálica.

No entanto, é caracterizado por uma grande instabilidade do arco e grande quantidade de respingos, podendo ser evitado com o adequado ajuste da indutância da máquina de forma que durante a soldagem por curto circuito a ponta do eletrodo fique praticamente mergulhada na poça de fusão (MARQUES *et al*, 2013).

É bastante usado para soldagens fora da posição plana, ou união de peças de pequena espessura, ou mesmo passes de raiz, porém por ser uma soldagem que utiliza baixa energia pode ser um problema para soldagem de peças mais espessas

que 6,0 mm devido ao baixo aporte térmico, devendo ter uma atenção especial à técnica de soldagem do operador para garantir fusão adequada durante a soldagem fora de posição em peças mais espessas.

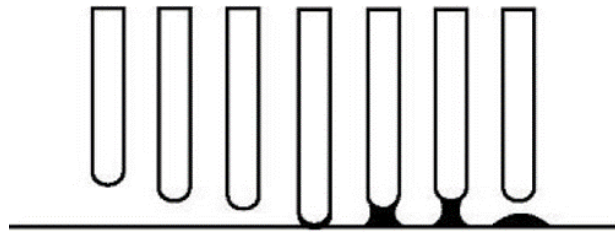


Figura 05 – Transferência por curto-circuito - Fonte: Apostila ESAB

4.6.2. Transferência globular

Caracterizada por ser uma transferência de arco mais estável que a anterior, no entanto as gotas tenderem a serem maiores que o diâmetro do eletrodo tendendo a ser uma transferência mais caótica e imprevisível, gerando elevado nível de respingos além de ser limitado à posição plana, por necessitar da ação da gravidade (MARQUES *et al*, 2013).

O diâmetro médio da gota varia com a corrente tendendo a diminuir com o aumento da corrente, as gotas do metal em fusão ficam na ponta do eletrodo até atingirem o tamanho suficiente para atuação da Força de Lorentz e serem lançadas na poça de fusão, porém, quando isso acontece, o arco apresenta uma pequena instabilidade e a força eletromagnética, conhecida como força do arco, provoca o lançamento da gota na direção contrária à da ação do arco, formando respingos. Para reduzir a formação de respingos, é indicado manter o arco o mais curto possível (MARQUES *et al*, 2013), (FELIZARDO, 2016).

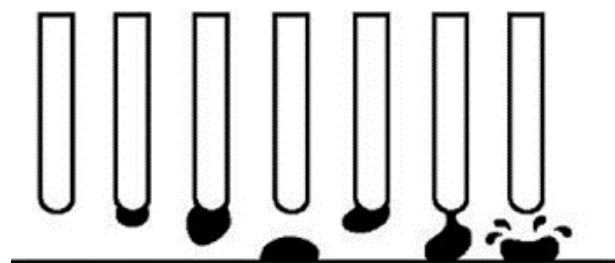


Figura 06 – Transferência globular -Fonte: Apostila ESAB

4.6.3. Transferência aerosol ou spray

Com o aumento da corrente de soldagem no modo globular o diâmetro médio das gotas tende a diminuir, até chegarem em uma “corrente de transição”, em que o processo de transferência passa de globular para o aerosol.

Esse modo de transferência é caracterizado por ter gotas pequenas, com diâmetro menor que a do eletrodo e em grande quantidade, o arco é bastante estável e praticamente sem respingos, resultando em uma força de Lorentz maior, capaz de estrangular rapidamente a parte fundida da ponta do eletrodo, criando finíssimas gotas de metal líquido (MARQUES *et al*, 2013).

Por serem gotas pequenas as forças eletromagnéticas sobrepõem a ação da força gravitacional, sendo a princípio indicada para soldagem em qualquer posição, porém por ser uma transferência axial de várias centenas de pequenas gotas de metal de solda por segundo a poça de fusão é relativamente grande e de difícil controle sendo a soldagem fora da posição plana problemática. Por utilizar elevada corrente não pode ser empregada para soldagem de chapas finas. A aparência da solda é muito boa, o aporte térmico e a força do arco asseguram uma excelente fusão lateral e penetração com uma reduzida incidência de defeitos. Esse modo é empregado quando é desejáveis taxas de deposição máximas (MARQUES *et al*, 2013).

Cada eletrodo e gás de proteção possuem um parâmetro de soldagem distinto, ou seja, cada um possui sua corrente de transição de globular para spray, conforme pode ser observado na tabela abaixo.

Material	Diâmetro do arame (mm)	Gás de proteção	Corrente de Transição (A)
Aço Inoxidável	0,8	Argônio 2% Oxigênio	170
	1,2	Argônio 2% Oxigênio	225
	1,6	Argônio 2% Oxigênio	285

Tabela 03 - Corrente de transição globular “spray” para diferentes diâmetros de eletrodo. Fonte: (MARQUES *et al*, 2013), adaptado pelo autor.

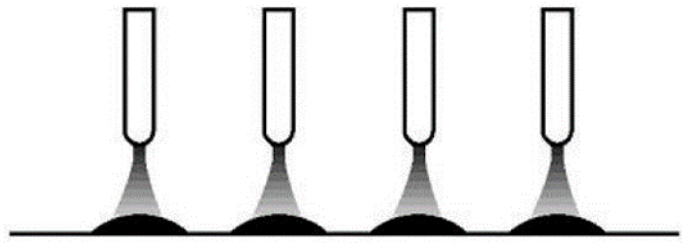


Figura 07 – Transferência por aerosol - Fonte: Apostila ESAB

4.6.4. Transferência por arco pulsado:

Com o desenvolvimento da tecnologia e a otimização dos processos de soldagem e sua automação utilizando fontes eletrônicas foi possível realizar variações de curta duração nos parâmetros de soldagem influenciando de forma significativa a transferência de metal.

Dessa forma foi possível desenvolver o modo de transferência por arco pulsado, ainda pouco difundido no Brasil, mas que vem se tornando popular na Europa graças a introdução da regulação sinérgica das fontes de soldagem (ajuste operado por softwares e microprocessadores capazes de sincronizar várias funções gerando um resultado ideal ou ótimo como o ajuste de velocidade do arame, tensão, corrente, indutância, etc).

De forma simplificada ocorre em intervalos de pulsos de corrente onde é possível prevenir variações que poderiam prejudicar a solda. O arco elétrico tem a função de pré-aquecer o material base e o eletrodo, seguido de uma repentina subida de corrente, chamada corrente de pulso, com a estabilização da corrente alta ocorre o estrangulamento do material fundido na ponta do eletrodo, seguido da queda da corrente onde ocorre a separação da gota do eletrodo (MARQUES *et al*, 2013).

Dessa forma a transferência de metal ocorre a altas correntes, mas a corrente média permanece baixa gerando um aporte térmico e uma deposição mais controlada, assim como é possível evitar mudanças na solda devido a variações como stickout, mantendo a estabilidade do arco devido seu controle adaptativo (MARQUES *et al*, 2013).

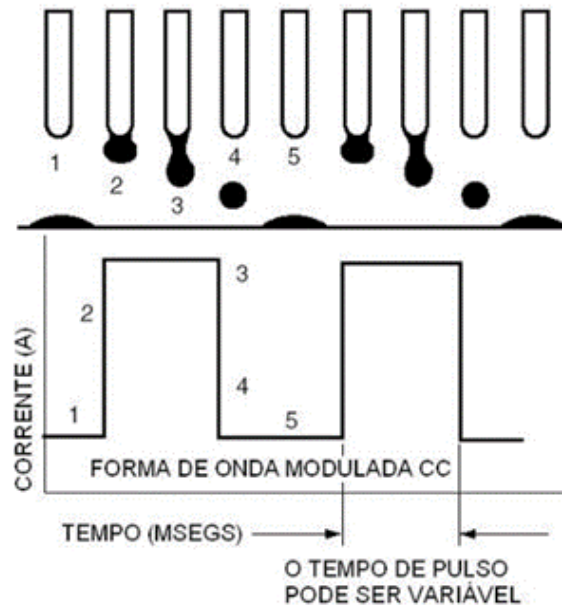


Figura 08 – Transferência arco pulsado - Fonte: Apostila ESAB

4.7. Metal Base – AÇO INOXIDÁVEL

Desenvolvido no início do século XX a partir de estudos realizados na Alemanha, em 1912 por Strauss e Mainer, Inglaterra 1913 por Bearley, Estados Unidos, em 1915 por Haynes e na França, em 1917 e 1918 por Chevenard o aço inoxidável teve seu surgimento quase que simultaneamente em vários países através do refino de ligas metálicas com diferentes composições químicas, microestruturas e propriedades químicas e mecânicas. Atualmente divididos em quatro classes principais baseadas na microestrutura do material, sendo eles: austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex (MODENESI, 2022).

Através da combinação do elemento ferro (Fe), cromo (Cr) e níquel (Ni), realizada na Alemanha, o que hoje se aproxima dos aços inoxidáveis da família AISI 200 e 300, majoritariamente austeníticos, apresentam melhor resistência à corrosão, melhores propriedades mecânicas e maior facilidade de soldagem e conformação mecânica. Já na Inglaterra combinando Fe- Cr, aproximando hoje aos aços inoxidáveis da família 400 (ferríticos, martensíticos) o cromo foi introduzido devido sua elevada resistência a corrosão, ou melhor, sua grande facilidade em reagir com o meio ambiente criando assim uma fina camada passivadora em meios oxidantes (CARBÓ, 2007; MODENESI, 2022 p.5).

O cromo é um metal menos nobre em comparação ao ferro em suas séries eletroquímicas, tendendo a perder mais facilmente os elétrons de sua última camada de valência e se ligar a outro elemento químico como o oxigênio, sendo assim em princípio é menos resistente à corrosão que o ferro, logo uma liga de Fe e Cr deveria ser mais facilmente corroída ou oxidada do que o ferro puro, porém o aço inoxidável quando em contato com o ar atmosférico ou outro meio oxidante, tende a formar rapidamente uma camada de óxido de cromo na superfície destas ligas, formando uma barreira invisível, contínua, aderente, impermeável e praticamente insolúvel em numerosos reagentes (MODENESI, 2022).

O mesmo princípio é encontrado em outras ligas metálicas como o Alumínio, que forma a alumina, uma fina camada protetora que possui ponto de fusão maior que o alumínio, impossibilitando seu corte por meio do plasma ou oxiacetileno.

No gráfico da figura 10 e 11 é possível observar o comportamento do aço inoxidável e outro material que não tem a capacidade de formar o filme passivador em meio corrosivo.

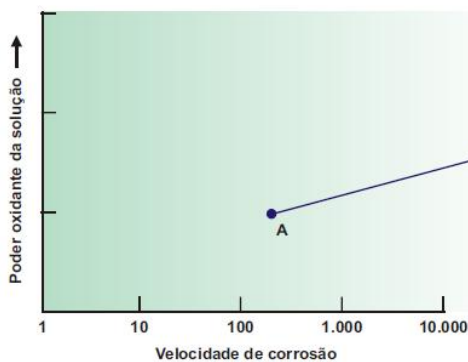


Figura 10 – Velocidade de corrosão do aço carbono quando expostos a meios corrosivo.

Medida em Potencial (V) / Densidade de Corrente (A/cm²).

Fonte: Apostila Acesita

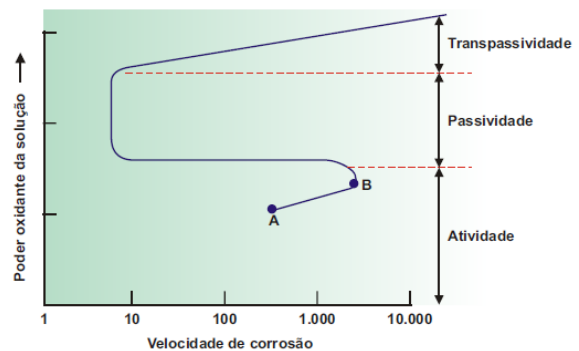


Figura 11 – Velocidade do aço inoxidável quando expostos a meios corrosivo.

Medida em Potencial (V) / Densidade de Corrente (A/cm²).

Fonte: Apostila Acesita

Na figura 10 observa-se que a medida que aumenta a concentração oxidante, maior será a velocidade de corrosão, já na figura 11 o aço inoxidável exposto ao mesmo meio corrosivo também tem uma elevada velocidade de corrosão com o aumento da concentração oxidante (ponto A-B), no entanto ao atingir determinada

concentração oxidante há a formação do filme passivador e a velocidade de corrosão cai bruscamente, estabilizando a reação até que, ao atingir altos níveis de concentração oxidante a velocidade da reação volta a crescer gradativamente atingindo o região da transpassividade.

Já na figura 12 é possível observar a velocidade de corrosão durante o ano em relação a adição de cromo ao material. Por ser altamente reativo ao oxigênio em comparação ao ferro (Fe), o cromo (Cr) é responsável pela criação do filme passivador, camada extremamente fina, muito aderente e impermeável responsável pela proteção de todo o material.

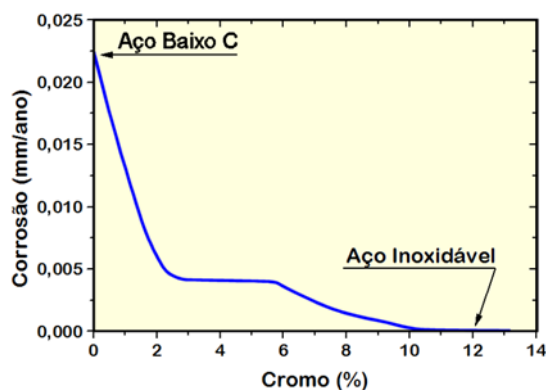


Figura 12 – velocidade de corrosão durante o ano com em relação a adição de Cr.

Medida em Potencial (V) / Densidade de Corrente (A/cm²)

Fonte: Apostila Acesita

A camada passivadora é formada espontaneamente pela exposição do metal ao ar, mas pode ser acelerada com o uso de um tratamento em solução de ácido nítrico, que consiste na imersão do material, por poucos minutos, em uma solução oxidante (MODENESI, 2022).

Devido ao alto poder oxidante do ácido nítrico nos inoxidáveis da Série 300, muitas vezes responsável pelo manchamento da superfície, é encontrado no mercado algumas soluções que não possuem o ácido nítrico, mas constituídos por uma combinação de ácidos fortes e tensoativos, recomendados para a desoxidação, limpeza e passivação de peças e superfícies.



Figura 13 – Algumas soluções utilizadas como gel decapante, passivante para limpeza e descontaminação dos aços inoxidáveis austeníticos, bem como acelerador do processo de autopassivação.

Segundo (CARBÓ, 2007), os inoxidáveis passam a ser reconhecidos quando o elemento cromo (Cr) possuir uma concentração mínima entre 10 e 12%, representados pela série 200 e 300, considerados aços austeníticos possuindo boa ductilidade e tenacidade, alta capacidade de encruamento e principalmente boa soldabilidade, no entanto (MODENESI, 2022) esclarece que o efeito desejável do Cromo é aparente quando uma pequena quantidade deste elemento está presente na liga, sendo que com uma concentração de apenas 5% de cromo o aço se torna muito mais resistente à oxidação do que os aços comuns

Alinhado a esse contexto (KOBELCO, 2015) evidencia o sistema ternário Fe-Cr-Ni, que utiliza o Ni e o manganês para estabilizar a fase austenítica, responsáveis pela grande versatilidade das propriedades mecânicas e aplicabilidade desses aços, apresentando elevada resistência quando empregados a trabalhos a altas temperaturas, (até 1.150°C), temperaturas ambientes e condições criogênicas.

Ainda conforme (KOBELCO, 2015), importante evidenciar o uso do sufixo H quando utilizado alto teor de carbono aos aços inoxidáveis e L para valores baixos de carbono.

Para concentrações acima de 13% de Cr os inoxidáveis são subdivididos em martensíticos e ferríticos, pertencentes a série 400, tendo o primeiro elevado teor de carbono, possuindo menor resistência a corrosão devido a precipitação de carbonetos de cromo no contorno dos grãos em sua microestrutura, deixando essa região

empobrecida em cromo, possuindo elevada resistência ao desgaste devido sua dureza, no entanto muito frágil e de difícil soldabilidade. Por ser de difícil trabalhabilidade é um aço vendido na forma recozido, com estrutura ferrítica, menos duro e com boa ductilidade facilitando seu uso para fabricação de facas, engrenagens, eixos e turbinas, apresentando resistência a corrosão somente após o tratamento térmico de têmpera e com excelente resistência à abrasão e erosão. (CARBÓ, 2007)

Já os ferríticos possuem um nível de cromo (Cr) mais elevados que os aços martensíticos, em torno de 16%, apresentam ótima resistência a corrosão e boa capacidade de estampagem, porém ainda apresentam limitações no processo de soldagem, devido a parcial formação de martensita na ZTA (zona termicamente afetada), onde há o surgimento de carbonitretos de cromo e um excessivo crescimento do tamanho do grão em sua microestrutura. Nesse sentido como alternativa utiliza-se adicionar elementos estabilizadores em sua composição como titânio e o nióbio, que combatem a formação da martensita e o crescimento dos grãos (CARBÓ, 2007).

Posto isso, importante ressaltar a importância dos elementos de liga nos aços inoxidáveis para o melhoramento de suas propriedades físicas e metalúrgicas diante de sua empregabilidade.

Na tabela e figura a seguir é possível observar os efeitos dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos:

Elemento	Tipos de aços	Efeitos
C	Todos	Promove fortemente a formação de austenita. Pode formar carboneto com o cromo e resultar em corrosão intergranular.
Cr	Todos	Promove formação de ferrita. Aumenta resistência à oxidação e à corrosão.
Ni	Todos	Promove formação da austenita. Aumenta resistência a alta temperatura, resistência à corrosão e ductilidade.
N	XXX N	Promove fortemente a formação da austenita. Aumenta a resistência mecânica.
Nb	347	Reduz sensibilidade à corrosão intergranular combinando com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita. Aumenta resistência à fluência.
Mn	2XX	Estabiliza a austenita à temperatura ambiente, mas forma ferrita a altas temperaturas. Inibe a fragilidade a quente (hot shortness) pela formação de MnS.
Mo	316,317	Aumenta a resistência a alta temperatura. Aumenta resistência à corrosão em meios redutores. Promove a formação de ferrita.
P, Se, S	303,303Se	Melhoram a usinabilidade, mas promovem fissuração de solidificação. Diminuem ligeiramente a resistência à corrosão.
Si	302B	Aumenta a resistência à formação de carepa e promove a formação de ferrita. Sempre adicionado em pequenas quantidades para desoxidação.
Ti	321	Reduz sensibilidade à corrosão intergranular combinando com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita.
Cu	-	Aumenta a resistência à corrosão em certos meios. Diminui a sensibilidade à corrosão sob tensão. Causa efeitos endurecedores por envelhecimento.

Tabela 04 - Efeitos dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos.

Fonte: (AWS *apud* MODENESI, 2022).

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem um limite de escoamento relativamente baixo, limite de resistência alto e uma elevada ductilidade à temperatura ambiente. Tendem a não apresentar mudança de comportamento à fratura, de dúctil para frágil, mesmo nas temperaturas mais baixas. Quando empregado a altas temperaturas são utilizados maiores teores de carbono, cromo e níquel e adições de elementos formadores de carboneto como o Nb, Ti, Mo e W, buscando aumentar a resistência à fluência. A adição de nitrogênio busca maior resistência mecânica e à corrosão localizada por pites. (MODENESI, 2022).

Tipo AISI	C	Cr	Ni	Outros Elementos	Propriedades gerais e aplicações típicas
301	0,15	16,0-18,0	6,0-8,0	Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Tipo para aplicação geral; boa trabalhabilidade; ornamentação, utensílios domésticos, fins estruturais; equipamento para indústria química, naval, alimentícia, transportes, etc.
302	0,15	17,0-19,0	8,0-10,0	Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Idem, para aplicações decorativas ou de resistência à corrosão como as indicadas para o tipo 301
302B	0,15	17,0-19,0	8,0-10,0	Si: 2,0 a 3,0 Mn: 2,0 max	Melhor resistência à formação de camada de óxido a altas temperaturas devido à presença de Si
303	0,15	17,0-19,0	8,0-10,5	P/S/Se: 0,07 min Zr/Mo: 0,60max Si: 1,0 max Mn: 2,0 max	Tipo 18:8 de usinagem fácil, para eixos, parafusos, porcas, peças de carburadores, etc.
304	0,08	18,0-20,0	8,0-11,0	Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Tipo 18:8 de C mais baixo, soldável com menor perigo de corrosão intercrystalina, mesmas aplicações dos tipos 301 e 302
308	0,08	19,0-21,0	10,0-12,0	Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Maior resistência à corrosão que o 18:8; para eletrodos de solda, entre outras aplicações
309	0,20	22,0-24,0	12,0-15,0	Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Boa resistência à oxidação e mecânica a altas temperaturas; para equipamentos da indústria química, peças de fornos, estufas, etc.
309S	0,08	22,0-24,0	12,0-15,0	Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Devido ao baixo C, permite soldagem com menor perigo de corrosão intercrystalina
310	0,25	24,0-26,0	19,0-22,0	Mn: 2,0 max Si: 1,5 max	Boa estabilidade nas temperaturas de soldagem; eletrodos de solda, equipamentos para indústria química, peças de fornos, estufas; resiste à oxidação até temperaturas da ordem de 1100°C
316	0,08	16,0-18,0	10,0-14,0	Mo: 2,0 a 3,0 Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Melhor resistência à corrosão química; para equipamentos da indústria química, de papel, etc.
317	0,08	18,0-20,0	11,0-14,0	Mo: 3,0 a 4,0 Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Melhor resistência à corrosão que o tipo 316, idênticas aplicações
321	0,08	17,0-19,0	9,0-12,0	Ti : 5xC min Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Tipo 18:8, estabilizado contra corrosão intercrystalina a altas temperaturas; para aplicações que exigem soldagem
347	0,08	17,0-19,0	9,0-12,0	Nb: 10xC min Mn: 2,0 max Si: 1,0 max	Tipo 18:8, estabilizado para serviço a alta temperatura e onde se exige soldagem

Tabela 05 – Classificação AISI dos aços austeníticos, composição química (% em peso) e aplicações (MODENESI, apud CHIAVERINI, 1977)

4.8. Propriedades relevantes aos aços inoxidáveis e soldabilidade

Ainda que os aços inoxidáveis austeníticos apresentem boa soldabilidade a negligência de certos cuidados podem causar perda de propriedades do metal base e

soldas defeituosas, gerando distorções de soldagem, rachaduras a quente, corrosão intergranular e corrosão sob tensão (KOBELCO, 2015).

Nesse sentido Kobelco esclarece que a condutividade térmica dos inoxidáveis é cerca de três vezes menor que o aço carbono e o coeficiente de expansão térmica aproximadamente 1,5 maior a do aço carbono, logo, a distorção ocorrida pela expansão e contração não uniforme do metal ocorrida durante a soldagem causa maiores distorções das chapas metálicas, sendo assim a utilização de técnicas de soldagem como simétrica (soldagem com progressão iguais em ambos os lados), trampolim e back-step (soldas espaçadas em seguimentos menores e em direção oposta a soldagem normal), bem como o uso de gabaritos e suportes de cobre para evitar uma concentração de tensões térmicas, são recomendados para mitigar as distorções.

Importante destacar que a resistência elétrica do aço inoxidável é muito mais alta que o aço carbono, conseqüentemente as correntes de soldagem são mais baixas do que as utilizadas para soldagem do aço carbono, haja vista que como citado por MODENESI, 2021 a temperatura de fusão do inoxidável também é mais baixa.

Em seu material disponibilizado pela ACESITA, Carvalho exemplifica boas práticas de soldagem dos inoxidáveis que ilustra bem as propriedades desse metal, como a utilização de dispositivos de fixação que permitam uma certa mobilidade das partes soldadas, haja vista a elevada contração e expansão ocorrida no material durante o processo. Está pratica reduz o risco de trincas a quente, bem como a utilização de dispositivos especiais como mata juntas de cobre que auxiliam na condutividade e dissipação do aporte térmico no material. (CARVALHO, 1999).

4.9. Fissuração a quente e as conseqüências do metal de adição

Segundo Kobelco a fissuração a quente é uma trinca típica observada nos aços inoxidáveis austeníticos em seus contornos de grão e limites de cristal colunar, sendo a forma mais eficaz para evitar essas fissuras o ajuste químico da composição do metal de solda utilizando consumíveis do tipo 308, 316 e 347, que possuem quantidades adequadas de ferrita, responsável pela diluição de impurezas como fósforo e enxofre, responsáveis pela formação de compostos intermetálicos de baixo ponto de fusão, tendo em vista que a austenita se cristaliza mais rapidamente. Dessa forma Kobelco destaca a importância da presença de ferrita no metal de solda para

evitar a fissuração a quente, porém em detrimento a resistência a corrosão e a resistência a impacto, principalmente em temperaturas criogênicas (KOBELCO, 2015).

Carvalho em sua obra cita ainda o nitrogênio no depósito de solda, quando em maior teor possibilita a formação de trincas a quente, podendo limitar sua entrada através da utilização de um stickout curto e uma eficiente proteção gasosa nos processos com proteção gasosa.

Ainda nesse contexto Paranhos (2003), em seu artigo esclarece que a existência de impurezas introduzidas por deficiência de limpeza ou a inclusão de enxofre ou fosforo, elementos pouco solúveis na fase austenita podendo ocupar espaços indesejáveis na zona fundida, não oferecendo resistência mecânica suficiente para suportar as tensões de contração da solda, bem como a existência de segregações macro ou microscópicas dentro dos espaços interstícios de contorno de grão.

Dessa forma outros fatores também influenciam na fissuração a quente, como a alta velocidade de soldagem favorecendo e acentuando a fissuração no centro do cordão formando uma granulação grosseira e uma severa segregação intragranular, altas energias de soldagem, juntas com alto grau de restrição e pouca liberdade de movimentação para alívio de tensões, elevada diluição do passe de raiz, chapas muito espessas, materiais base com grande resistência mecânica e pouca capacidade de escoamento plástico e por fim cordões que não seguem a razão profundidade / largura, $\frac{1}{2}$. (PARANHOS, 2003)

4.10. Corrosão nos aços inoxidáveis AISI 304

Conforme demonstrado um dos principais problemas enfrentados pelos metais é a corrosão e apesar de mais resistentes a esta ação natural todos os aços inoxidáveis também estão sujeitos a ela, o 304 apresenta maior resistência devido a ação do níquel, que favorece a repassivação em regiões onde a película foi quebrada pela corrosão.

O processo de soldagem também é um fator que favorece a corrosão dos inoxidáveis austenítico, devido ao aquecimento ocorrido durante a soldadura pode ocorrer a sensibilização do material e o surgimento de tensões residuais que favorecem o surgimento de corrosões. Como exposto em seu caderno técnico, APERAN enfatiza:

“A corrosão sob tensão é o calcanhar de Aquiles dos aços inoxidáveis austeníticos.” Pois reúne três fatores, meio agressivo (presença de cloretos), temperatura e tensões residuais oriundas do processo de fabricação.

Corroborando com esse pensamento (MODENESI, 2022) esclarece que a concentração de ânion cloreto, Cl (-) no meio em que o aço inoxidável é exposto, a temperatura de trabalho ou a que o aço é exposto durante a solda e o pH, são os três principais fatores que favorecem as corrosões.

4.10.1. Corrosão por pites

Ocorridas em regiões extremamente localizadas, necessitam de uma fenda normalmente criada durante o processo de fabricação para sua propagação, como a rugosidade após o processo de usinagem ou através de uma incrustação ou um depósito nas paredes do material, nesse sentido o acabamento e a superfície polida favorecem a resistência contra a corrosão (CARBÓ, 2001)

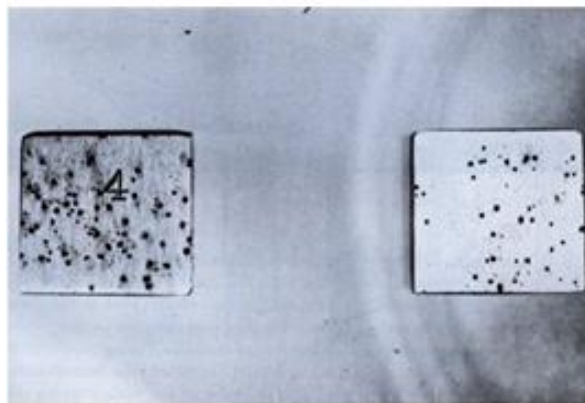


Figura 14 - Corrosão por pites em aço 304 (provocada por uma solução ácida com presença de cloretos). Fonte: Apostila Acesita

4.10.2. Corrosão em frestas

Assim como a corrosão por pites a corrosão por frestas é bastante parecida, compartilhando do mesmo mecanismo de propagação, seja pela rugosidade devido a usinagem, ou restas entre cordões de soldas.

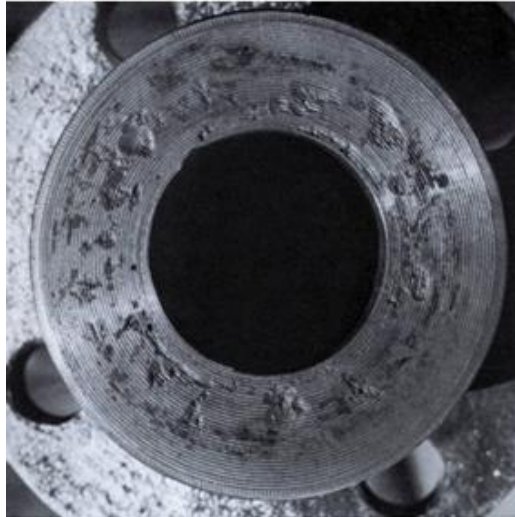


Figura 15 - Corrosão em frestas em um aço inoxidável. Fonte: Apostila Acesita

A adição de molibdênio na composição do aço 304, acima de 2%, transforma-o em um 316 ou 317, aços que possuem maiores resistências a corrosões por pites e por frestas, bem como são mais resistentes a concentrações mais altas de cloreto, isso devido a formação dos molibdatos, responsáveis pela estabilização da camada passivadora (CARBÓ, 2001).

4.10.3. Corrosão sob tensão

Ainda em sua obra Carbó (2001), a corrosão sob tensão é considerada a vulnerabilidade dos aços austeníticos, especialmente aqueles com uma concentração de níquel entre 8 e 10%, sendo que um aumento significativo no teor de níquel reduz a probabilidade de corrosão sob tensão - CST.

A corrosão sob tensão envolve um meio agressivo, como a alta concentração de Cl, temperatura de trabalho e as próprias tensões, sejam as aplicadas ou residuais do processo de fabricação.

Dessa forma podemos observar que apesar de recomendado a utilização do 304 para fabricação de tanques de transporte de alimentos e produtos químicos, para o transporte de soluções com elevada concentração de Cl merece uma certa atenção por ser uma solução corrosiva para o metal. Importante esclarecer que o Cl é utilizado para oxidar matéria orgânica da água retirada de mananciais, tendo fundamental importância para o controle de bactérias, vírus e parasitas presentes na água destinada ao consumo animal, água está disponível também nos hidrantes de reabastecimento de veículos de combate a incêndio.

Importante salientar que os aços inoxidáveis ferríticos são imunes a esse tipo de corrosão, no entanto possuem baixa soldabilidade como demonstrando anteriormente.



Figura 16 - Corrosão sob tensão em uma autoclave de aço 304. Fonte: Apostila Acesita

4.10.4. Corrosão intergranular

Como visto anteriormente a sensitização gera o empobrecimento de cromo no contorno dos grãos da microestrutura do aço inoxidável devido sua maior afinidade com o carbono difundido no interior dos grãos, ao submeter o material a temperaturas entre 425 °C a 850 °C as precipitações dos carbonetos de cromo ocorrem deixando o material mais propenso a corrosão, facilitando inclusive as corrosões já citadas.

Em seu material sobre corrosão em aços inoxidáveis Carvalho (1999), esclarece que a corrosão intergranular tem sua origem na precipitação de carbonetos de Cromo e nitretos de Cromo na região de contornos de grão da microestrutura do aço após sua sensitização, por serem regiões de maior energia e distorções na rede cristalina, são locais preferenciais de difusão dos átomos de Carbono e precipitação destes constituintes. Por consequência, são regiões que passam a serem empobrecidas em Cromo, perdendo localmente muito da resistência à corrosão. Em especial quando susceptíveis a ataques de meios corrosivos, sejam oxidantes ou redutores, podendo causar falhas em serviço. Se expostos a meios a meios redutores, como o ácido clorídrico ou íons cloreto, pode haver corrosão por pites. Se expostos a meios oxidantes como ácidos nítrico, fosfórico, etc., pode haver corrosão intergranular exatamente nos contornos de grão.

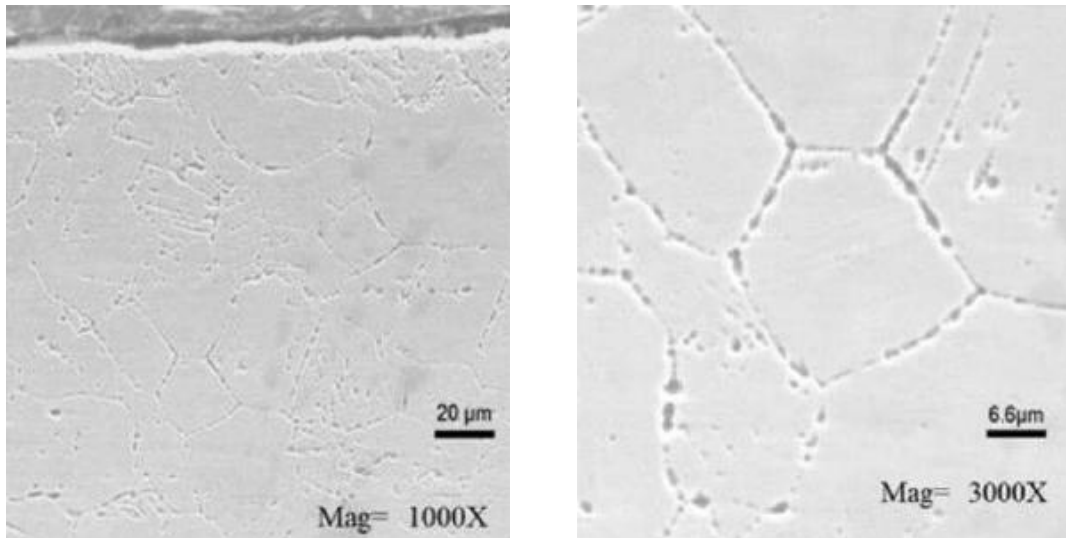


Figura 17 - Iniciação: Precipitação de Carbonetos de Cromo (CARVALHO)

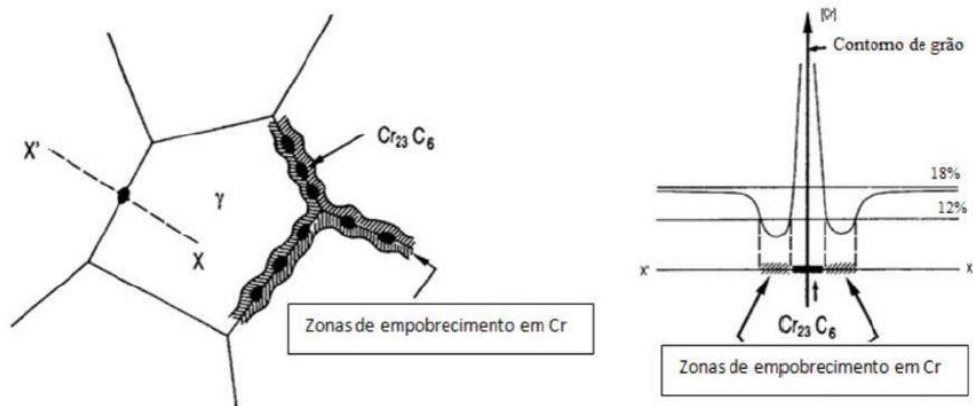


Figura 18 - Precipitação de Carbonetos e diminuição local do Cromo (CARVALHO)

Na figura 18 é possível analisar que para formação de cada precipitado Cr_{23}C_6 no contorno dos grãos o carbono por difusão atômica retirou 6 átomos de Cr da matriz do aço, deixando a região adjacente empobrecida em Cr.

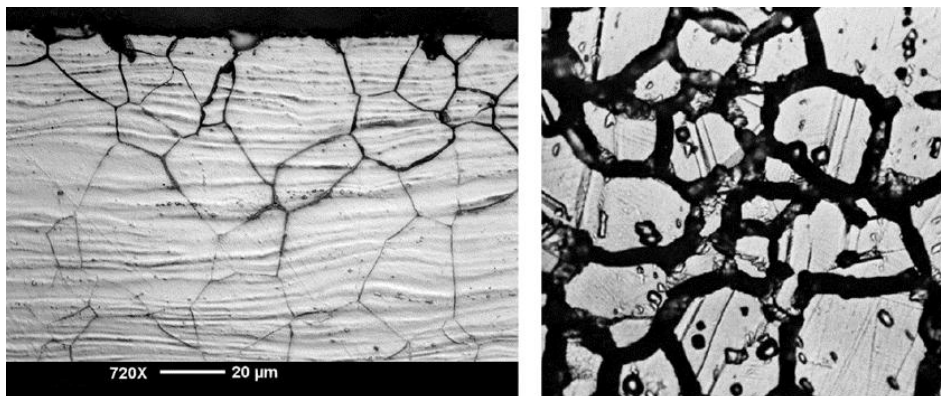


Figura 19 - Efeito do carbono: Sensitização e Corrosão intergranular (Norma ASTM A262).Fonte: MODENESI, 2021

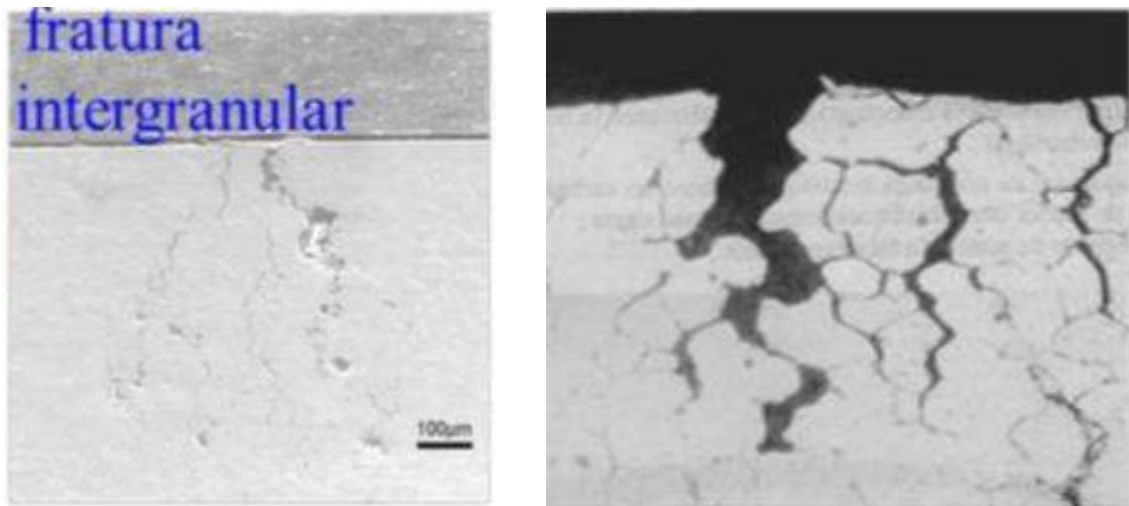


Figura 20 – fratura intergranular (CARVALHO, s.d.)

Importante destacar que a fratura intergranular somente ocorre se houver ação de tensões de tração seja por pressão interna, tensões térmicas de soldagem, tensões de carregamento estático ou vibrações (CARVALHO, s.d.)

Diante o exposto a soldagem é um processo facilitador à ocorrência da sensitização por atingir facilmente através do arco elétrico a faixa de temperatura de precipitação, sendo assim para evitar a precipitação de carbonetos é necessário reduzir a temperatura antes que a curva de resfriamento atinja um dado tempo que favorece a precipitação compreendida entre 850 °C (inicial) e 450 °C (final) para os inoxidáveis austeníticos (CARVALHO, s.d.).

Outra solução seria a redução de carbono no material base, representados pelos aços inoxidáveis 304L, 316L e 317L que possuem menos carbono que suas versões convencionais, ou mesmo o acréscimo de elementos estabilizadores como apresentado anteriormente como o titânio e o nióbio, que possuem maior afinidade com o carbono que o cromo, gerando assim os aços 321 e o 347, versões estabilizadas do 304, e o 316Ti, versão estabilizada do 316 (CARBÓ, 2001).

O controle da sensitização pode ser usado tratamento térmico de solução pós-soldagem numa faixa de temperatura entre 1000 a 1100 °C seguido de resfriamento rápido de forma que os carbonetos sejam decompostos ou um menor aporte de calor seguido de um resfriamento com água para aumentar a taxa de resfriamento (KOBELCO, 2015).

Segundo (CARBÓ, 2001) a adição de elementos de liga é sempre realizada com objetivos definidos, seja para aplicações específicas ou condições muito agressivas,

por meio da composição química é possível garantir a não sensitização após o processo de soldagem, consequentemente garantir que o material tenha ótima resistência às corrosões localizadas.

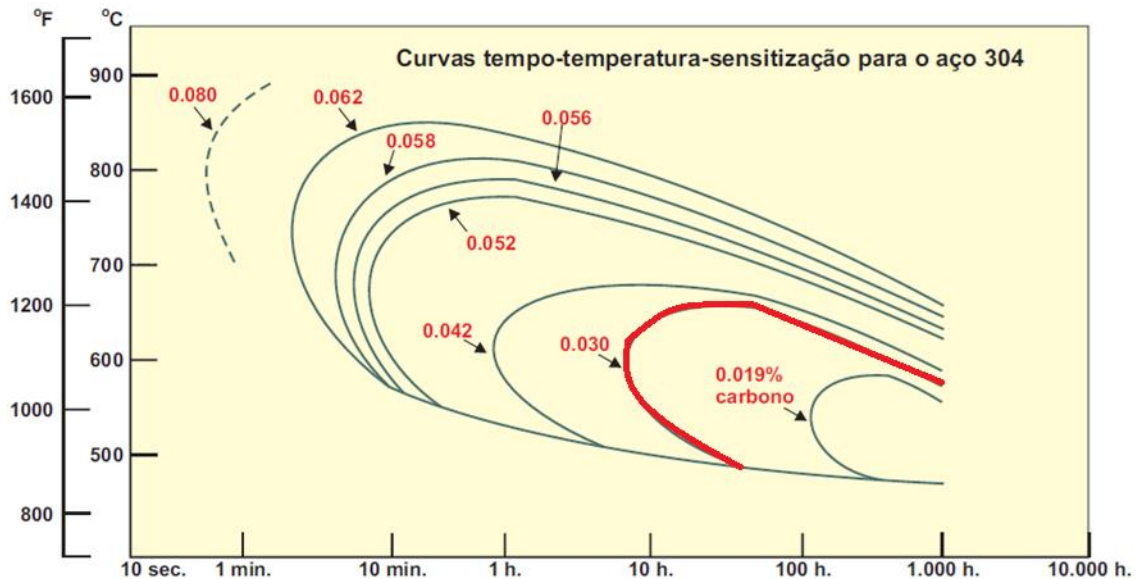


Figura 21 – Curva de tempo e temperatura de sensitização dos aços inoxidáveis. Fonte Apostila Acesita com edição do autor.

Na Figura 21, demonstra a curva Temperatura (°C) x tempo (h) de sensitização do aço 304 com diferentes concentrações de carbono. Podemos observar que qualquer combinação que fique dentro das curvas traçadas o material será sensibilizado, no entanto a medida que reduzimos a concentração de carbono no material a curva se desloca para direita, levando mais tempo para que o material seja sensibilizado, ou seja, quanto mais Carbono em um determinado aço, mais rápido terá que ser seu resfriamento para evitar a precipitação. O 304L evidenciado pela curva em vermelho e que possui carbono máximo de 0,03%, leva aproximadamente 8 horas para ser sensibilizado, enquanto outros aços com mais carbono podem levar poucos minutos para atingirem seu estado de sensitização.

Dessa forma a zona termicamente afetada é a região de propensão a ocorrência da corrosão intergranular desses aços (CARVALHO, 2023)

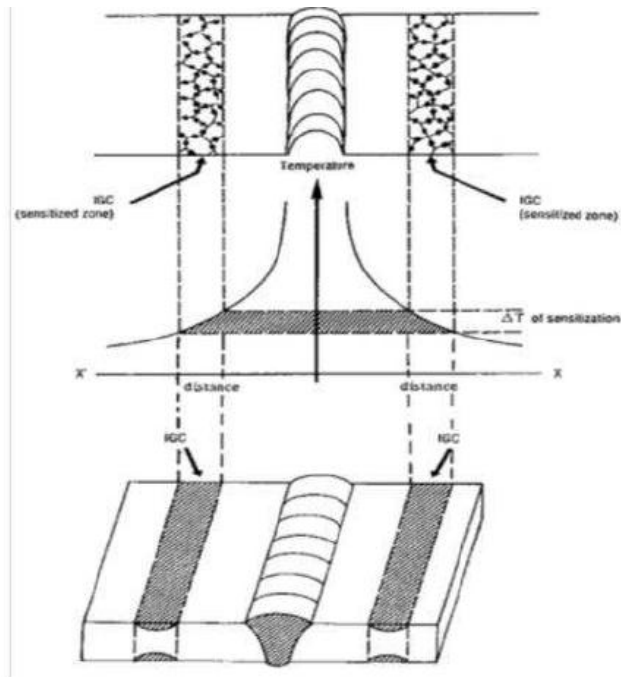


Figura 22 - corrosão intergranular em torno da solda, na zona termicamente afetada (CARVALHO, s.d.).

Vale destacar que segundo Carbó (2001), ainda que o meio seja capaz de atacar regiões empobrecidas em cromo devido a sensitização, o material recomendado não seria o 304 e sim o 304L, mais indicado para fabricação de equipamentos que envolvam a soldagem ou temperaturas elevadas.

4.11. Consumíveis de solda recomendados para os aços inoxidáveis austeníticos

Em sua obra kobelco (2015), explana que os metais de solda dos aços inoxidáveis austeníticos possuem propriedades mecânicas diferentes daqueles do metal base, bem como suas composições químicas. Isto ocorre devido a diferença de ciclo térmico ao qual o metal de solda é submetido durante a soldagem em comparação ao metal base. Ou seja, em temperatura ambiente os inoxidáveis austeníticos apresentam alta ductilidade e tenacidade, enquanto o metal de adição possui maior resistência ao escoamento, já à resistência à tração, apresentam quase o mesmo nível.

Já em temperaturas elevadas a resistência ao deslocamento e à tração diminui à medida que a temperatura aumenta. Ainda assim a resistência dos inoxidáveis austeníticos é muito maior do que a do aço carbono, sendo que os do tipo 316 e 347 possuem mais resistência a temperaturas elevadas quando comparado ao 304. O

metal de solda tem maior resistência ao escoamento, que o metal base por possuir níveis maiores de ferrita, mas quando comparada a tensão de ruptura à fluência, a junta soldada, o metal de solda e o metal base apresentam níveis semelhantes de resistência (KOBELCO, 2015).

Em temperaturas criogênicas o inoxidável austenítico não apresenta comportamento diferente de transição dúctil-frágil em sua tenacidade ao entalhe, fornece alta tenacidade a baixas temperaturas se mostrando adequado para armazenagem de gases liquefeitos como exemplo o gás natural, oxigênio, nitrogênio e argônio. As juntas soldadas tendem a se comportarem de forma semelhante à do metal base, ou seja apresentam um aumento de resistência à medida que a temperatura abaixa, enquanto o alongamento diminui ligeiramente (KOBELCO, 2015).

Conforme demonstrado na tabela 06, o metal de deposição utilizado raramente coincide com o metal base.

Grau de aço JIS (AISI)	Consumíveis de solda recomendados		
	Eléctrodo coberto de SMAW	Fio de soldadura MAG (FCW)	Fio de soldadura TIG
SUS304 (304)	NC-38 NC-38H*1	DW-308 DW-308H*1	TG-S308
SUS304L (304L)	NC-38L	DW-308L DW-308LH*2 DW-308LP*3 DW-T308L*4	TG-S308L
SUS304LN (304LN)	-	DW-308LN	-
SUS309S (309S)	NC-39	DW-309 DW-310*1 DW-309LP*3 DW-T309L*4	TG-S309
SUS310S (310S)	NC-30	DW-310	TG-S310
SUS316 (316)	NC-36	DW-316 DW-316LH*1 DW-316LP*3	TG-S316
SUS316L (316L)	NC-36L	DW-316L DW-316LH*2 DW-316LP*3 DW-T316L*4	TG-S316L
SUS316LN (316LN)	NC-317L	DW-317L DW-317LP*3	TG-S317L
SUS317 (317)	NC-317L	DW-317L DW-317LP*3	TG-S317L
SUS317L (317L)	NC-317L	DW-317L DW-317LP*3	TG-S317L
SUS321 (321)	NC-37 NC-37L	DW-347	TG-S347
SUS347 (347)	NC-37 NC-37L	DW-347	TG-S347
SUS329J3L (31803,32205)	NC-2209	DW-2209*3 DW-329AP*3	TG-S2209
SUS329J4L (32250,32260)	NC-2594	DW-2594*3	TG-S2594
SUS630 (S17400)	-	-	TG-S630

(Nota)
*1. Para a especificação de altas temperaturas.
*2. Para a especificação SR ("stress relief annealing"= recozido de distensão).
*3. Para a soldadura "Toda Posição".
*4. Para aços finos a grossos devido a uma vasta gama de correntes de soldadura aplicáveis.

Tabela 06 – consumíveis recomendados para aços inoxidáveis austeníticos (KOBELCO, 2015)

4.12. Procedimento de soldagem GMAW para os inoxidáveis austeníticos

Kobelco (2015), informa em sua obra que o eletrodo de soldagem deve ser usado com a polaridade positiva em C.C. utilizando o gás de proteção $Ar+2\%O_2$ e uma vazão de 20~25 litros/minuto, esclarecendo ainda que o $Ar+10\sim 20\%CO_2$ não é apropriado para o aço inoxidável de baixo teor de carbono como o AISI 304-L) devido a interação ocorrida entre o dióxido de Carbono e a poça de fusão, aumentando a quantidade de C no metal de solda.

Ainda nessa seara KOBELCO, esclarece que a soldagem MIG do aço inoxidável é normalmente feita utilizando o modo de transferência "Spray", conforme explicado no item 4.6.3. deste trabalho. A tensão do arco é ajustada de modo que o comprimento do arco seja de 4 a 6 mm, caso o comprimento seja excessivamente curto bolhas podem ocorrer, e, se é excessivamente longo, a molhabilidade do metal de solda derretido com o metal de base torna-se pobre, além de comprometer a proteção gasosa.

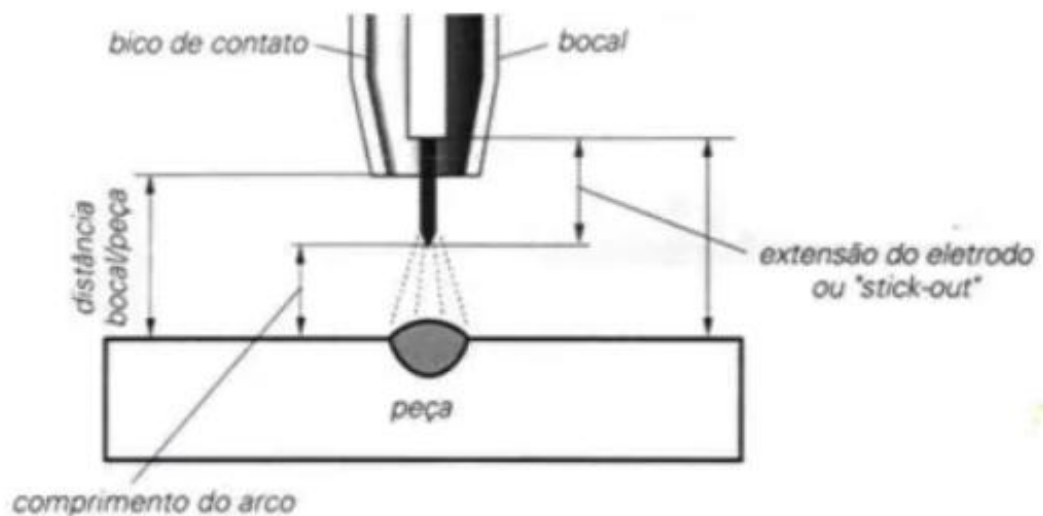


Figura 23 – desenho esquemático do arco elétrico no processo GMAW. Fonte: Infosoldas

Com o intuito de soldagem de tanques de aço inoxidáveis austeníticos e recuperação de soldas segue o resumo de procedimentos indicados.

PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	MIG	TIG	OBSERVAÇÕES
POLARIDADE DO ELETRODO	+ CC	-CC	
PROTEÇÃO GASOSA	Ar+2%O ₂	Ar	
VAZÃO	<ul style="list-style-type: none"> 20 ~ 25 L/min 	<ul style="list-style-type: none"> 7~15L/min p/ corrente de 100 a 200 A 12~20 L/min p/ corrente de 200 a 300 A 	
MODO DE TRANSFERÊNCIA	Spray	<ul style="list-style-type: none"> 100 ~ 200A 200~300 A 	
COMPRIMENTO DO ARCO	4 a 6 mm	1 a 3 mm	
EXTENSÃO DO ELETRODO		4 a 5 mm	
CORRENTE (A)	Depende do diâmetro do fio do eletrodo	Depende do diâmetro do eletrodo	Uso de uma corrente de soldadura alta pode causar a deterioração da resistência à corrosão da ZTA e a aspereza do tamanho de grão da ZTA.
TENSÃO (V)	Normalmente 30~34V.	Normalmente 30~34V.	Tensão de arco baixa, "burn-through" pode ocorrer no passe de raiz, porém pode resultar em uma fusão insuficiente, tensão de arco demasiadamente alta pode resultar em uma insuficiente penetração.

Tabela 07 – resumo de procedimento de soldagem para aço inoxidável 304L no processo GMAW (MIG) e GTAW (TIG) (KOBELCO, 2015 adaptado a tabela pelo autor)

5. ESTUDO DE CASO

5.1. Contexto

Após diversos defeitos apresentados em soldas de um tanque de água e LGE (líquido gerador de espuma) de um caminhão de combate a incêndio pertencente a uma frota de carros de emergência, foi sugerido o referente trabalho abordando de forma técnica as causas e consequências da execução sem controle da fabricação.

O tanque fabricado em aço inoxidável AISI 304L, sob espessura $\frac{1}{4}$ " e soldado através do processo GMAW, após pouco tempo de uso apresentou trincas resultando na falta de estanqueidade e excesso de corrosões, comprometendo diretamente sua vida útil e confiabilidade para seu emprego.



Figura 24 – fotos do tanque com as escotilhas superiores abertas.

Diante os defeitos apresentados e a alta deterioração ocorrida em pouco tempo de uso, o cliente solicitou a substituição integral do tanque de armazenamento, haja vista que o caminhão ainda se encontrava sob garantia contratual.

5.2. Etapa 1 - Sugestões de controle de qualidade

No intuito de garantir a qualidade esperada foram sugeridos para fabricação do novo tanque os seguintes procedimentos:

Controle do processo de fabricação das partes soldadas, realização de ensaios não destrutivos (ENDs) de controle de qualidade, execução das atividades com procedimentos formalizados, utilização de soldadores qualificados para o procedimento, utilização de inspetores com certificação válida, conforme SNQC (ABENDI/FBTS) ou SNCC (CEBRACI), não realização de cordões de solda intermitente que permitam formação de frestas dentro do tanque, realização de ensaio

visual - EVS em 100% dos cordões de solda feitos, realização de ensaio liquido penetrante - LP em 50-75% dos cordões de solda, por fim, realização de procedimento de decapagem e despassivação em todas as soldas.

Foi solicitado ainda envio de amostras de chapas retiradas do tanque antigo para análise dos danos, para uma melhor analise e emissão de um parecer técnico mais assertivo quanto aos defeitos e deteriorações apresentadas, que resultaram em sua falha e completa substituição.

5.3. Etapa 2 - Analise de informações e discussão após acionamento da garantia.



Figura 25 – fotos do 1º tanque e seus defeitos de fabricação

Através das fotos tiradas do antigo tanque é possível observar uma serie de defeitos ocorridos durante o processo de soldagem e fabricação do tanque.

Por meio do abordado neste trabalho é possível realizar uma análise das imagens da figura 25 [1], constatando oxidações em pontos de dobra e próximo às soldas. Conforme explanado por Modenesi (2021), pontos de conformação mecânica contribuem para o empobrecimento de cromo na região deformada e como abordado neste trabalho no item 4.10.4. oxidações próximo a ZTA podem ser oriundas da sensibilização gerando a corrosão intergranular.

Observou-se ainda pontos de corrosão por pites na figura 25 [4], frestas e soldas não contínuas na figura 25 [3,7,8] dentro do tanque.

Diante do aspecto dos defeitos apresentados, em conjunto com o material abordado neste trabalho e informações coletadas é possível diagnosticar uma série de defeitos ocorridos na fabricação, tais como:

- Procedimento de soldagem incorreto (sem passivação do aço inoxidável através de gás de purga);
- Processo de soldagem descalibrado, com presença de muitos respingos, soldas incompletas e cordões irregulares, figura 25 [7,8];
- Preparação de superfície com ferramentas indevidas, com diversas regiões contaminadas com aço carbono e conseqüente oxidação, figura 25[1];
- Ausência de controle de qualidade de fabricação e inexistência de RQPS e EPS para o procedimento de soldagem;
- Utilização de mais de um procedimento de soldagem;
- Falta de soldagem em alguns pontos, figura 25 [5];
- Falta de habilidade do soldador e qualificação do mesmo, figura 25 [7,8];
- Provável uso de material das chapas incorreto ou com especificação desenquadrada.

5.4. Etapa 3 - Substituição do tanque, análise e discussão de resultados

Após a troca do tanque, o equipamento passou por nova avaliação, sendo constatado uma significativa melhoria no aspecto visual das soldas, continuidade dos cordões e abrangência das regiões soldadas. Sem indícios de oxidação ou contaminação por aço carbono no meio das chapas, sem indícios de uso de ferramentas de preparação de superfície inadequadas.

No entanto o tanque foi reprovado, necessitando de novo reparo por ainda apresentar defeitos nas soldas internas, podendo ser resumidas em 2 pontos principais:

- Execução de reparos e emendas muito grosseiras em relação ao processo de solda original;
- Execução de soldas por um dos lados da chapa (lado externo) sem preocupação do reforço interno da solda, ficando este sem uma goivagem e repasse que poderiam minimizar os problemas de emenda e reparos detectados.

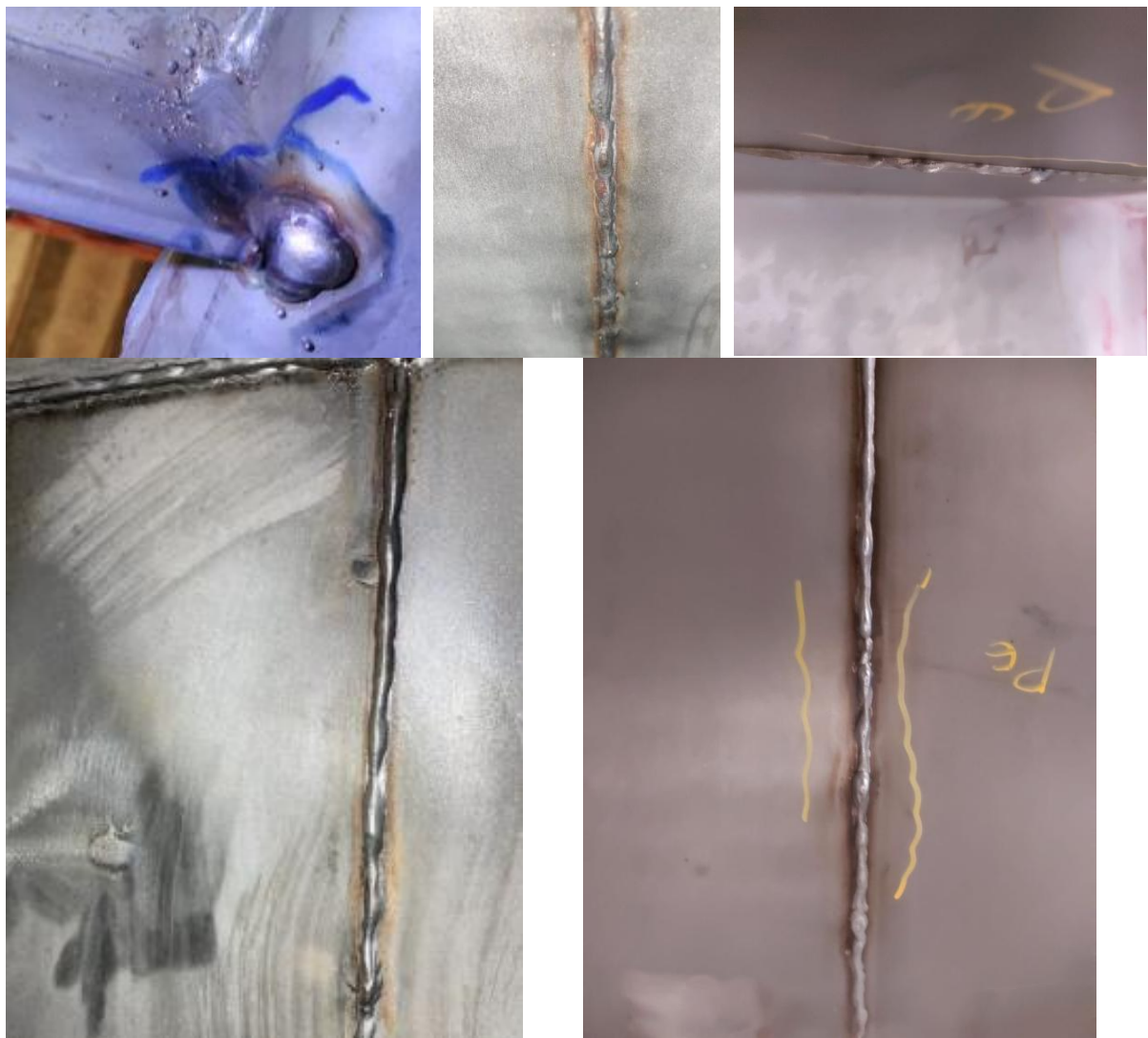


Figura 26 – defeitos vinculados ao excesso de aporte térmico e falta de regulagem da máquina.

Em análise as imagens da figura 26, possível constatar soldas com coloração azulada e avermelhada, indicativo de excesso de aporte térmico e um nível de oxidação que pode comprometer a resistência à corrosão destes pontos.

Evidências de que a soldagem foi realizada pelo lado oposto do visualizado (lado externo do tanque), sem a devida regulagem da máquina e sem o devido acabamento interno.



Figura 27 – falta de fusão na junta entre chapas.



Figura 28 - Descontinuidade do cordão de solda



Figura 29 - Falta de soldagem



Figura 30 – diversas imagens com soldas contendo frestas

De modo geral, ainda que tenha havido consideráveis melhorias em comparação ao tanque anterior é possível observar a existência de diversos defeitos, várias regiões com poros, sobreposição, falta de fusão, mordeduras ou *undercuts*, concavidade excessiva, ausência de solda e locais que poderão se tornar pontos de acúmulo de produto nas frestas, gerando corrosão localizada por pites ou fresta no aço inoxidável.

Ainda que os defeitos apresentados não fossem críticos à estanqueidade do tanque, o conjunto soldado ainda apresentava defeitos de fabricação que poderiam ter sido evitados com um controle de qualidade mais atento e ensaios mais abrangente.

As soldas ainda apresentavam características que pudessem permitir a ocorrência da corrosão, principalmente nos pontos de soldas de mais baixa qualidade, com pontos de oxidação que reduzem a resistência à corrosão localmente, gerando uma pilha de ação local de maior intensidade e levando à propagação de danos no futuro que podem demandar a manutenção mais frequente do tanque.

5.5. Etapa 4 - Reparos no tanque substituído, análise e discussão

Sendo assim, foi solicitado o retorno do tanque para mapeamento integral das soldas por ensaio EVS e LP, com sua subsequente reparação.



Figura 31 – ensaio EVS após soldagem

A partir das imagens da figura 31 constata-se imediatamente a alta energia utilizada durante o processo de soldagem GMAW, apesar de mais uniforme os cordões devido a conservação dos parâmetros de soldagem durante toda a soldagem os cordões não seguem a razão profundidade / largura, $\frac{1}{2}$ citada por Paranhos em sua obra. Considerando que a chapa possui $\frac{1}{4}$ " e os cordões apresentam aproximadamente 1".

Importante ressaltar a utilização inadequada do gás de proteção, sendo utilizado a mistura Ar+4%CO₂ que garantiu uma perfeita penetração, porém a solubilização do gás de proteção com o Carbono do metal base, sensitizando e empobrecendo ainda mais a região termicamente afetada.

Vale salientar que o tanque substituído já não apresentava vazamento como o outro, apenas maus acabamentos nas soldas que proporcionavam pontos para corrosão.



Figura 32 – ensaio LP após procedimento de soldagem.

Através das imagens da figura 32 é possível constatar significativa melhora dos cordões, sem regiões com poros, sem a falta de fusão entre as juntas, sem mordeduras, e ausência de solda que poderiam gerar pontos de acúmulo de produto resultando em corrosão.



Figura 33 – cordões de solda após aplicação do decapante

6. CONCLUSÃO

O processo de soldagem tem papel importante na qualidade do produto entregue ao cliente, o planejamento, a seleção correta dos materiais e o rigoroso controle de qualidade durante o processo de fabricação evita o retrabalho e o sucateamento do produto.

Ainda que no momento da licitação para fornecimento de veículos de combate a incêndio dotados com o Auto Tanque, não seja cobrado em suas Especificações Técnicas e Termos de Referências as regulamentações quanto ao procedimento de soldagem e normas, é responsabilidade do fabricante a aplicação das boas práticas de engenharia de soldagem, uma vez que todos os processos de compra desse tipo de equipamento, exige garantia total contra defeitos de fabricação, vazamentos, corrosões (internas e externas), trincas e reações químicas com água, ficando claro a necessidade de um controle de soldagem por parte do fabricante para evitar acionamentos de garantia, descarte prematuro do auto tanque e prejuízo.

Apesar de largamente utilizado e conquistado cada vez mais colocação na indústria, o aço inoxidável, merece uma atenção durante o processo de fabricação por soldagem, em especial os aços austeníticos da família 300, abordados neste trabalho.

Por apresentarem inúmeras vantagens como a boa soldabilidades e a fácil empregabilidade em diversos setores da indústria, em especial os aços inoxidáveis que utilizam o sufixo L, são os metais mais indicados para peças que passarão pelo processo de fabricação através da soldagem.

A utilização de uma EPS durante o procedimento de fabricação de tanques de caminhões de combate a incêndio apesar de não serem exigidos pelos clientes durante o processo de compra do equipamento e das viaturas, deveria ser uma boa pratica adotada pelo próprio fabricantes do produto. A exigência de garantia exigida está diretamente ligada a qualidade desses tanques e a utilização de um procedimento avaliado, testado e qualificado pode gerar menos gastos ao fabricante durante o pós-venda.

Um bom conhecimento na matéria, aliado ao amparo das boas práticas de soldagem e a consulta as normas é capaz de evitar danos previsíveis ao produto entregue.

O registro das variáveis de soldagem, a realização de testes em corpos de prova e a qualificação do procedimento de soldagem conforme é indicado pela norma AWS D1.6, em seu anexo H, evita a ocorrência de defeitos reversíveis e permanentes do equipamento, resultando em uma falha generalizada podendo culminando na troca integral do equipamento.

Como abordado no trabalho a especificação correta do gás utilizado seja para fabricação ou manutenção, avaliando suas influencias durante o procedimento, a devida especificação do eletrodo, a faixa de corrente utilizada, a tensão, a velocidade de soldagem, podem comprometer as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material soldado.

O bom acabamento na parte interna e a utilização dos corretos equipamentos para desbaste, livres de partículas contaminantes garantem superfícies que não apresentarão corrosões por pites e frestas, assim como a utilização da energia de soldagem adequada, que evitará corrosões intergranulares e o surgimentos de poros, que em contato com fluidos com a presença de Cl e F, elementos agressivos ao aço inoxidável se tornam pontos com potencial corrosivo, comprometendo a estanqueidade e durabilidade do tanque.

A utilização do aço inoxidável AISI 316-L ou o AISI 317-L, são indicados nessa utilização ainda que possuam valor comercial maior, haja vista que possuem em sua composição química maiores teores de Molibdênio, conforme demonstrado na figura 09. Elemento este responsável pelo aumento da resistência a corrosão em ambientes redutores, por estabilizar a camada passiva, através dos molibdatos formados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELGO, Arames, **História da Soldagem**: Disponível em: <https://www.belgo.com.br/blog/soldas/historia-da-solda/> Acesso em 10 de agosto 2024.

CARBÓ, Héctor Mario. **Aço Inoxidável Aplicações e Especificação**, ACESITA, 2001

CARVALHO, José Antônio Nunes. **Módulos de Treinamento Corrosão em Aços Inoxidáveis**. ABINOX, 2023

CARVALHO, Messias José. **Orientações Práticas de Soldagem em Aço Inox**. ACESITA, 1999.

FELIZARDO, Ivanilza. **Apostila Tecnologia da Soldagem**, Belo Horizonte: CEFET-MG, 2016.

FERRARESI, Valtair Antônio. **Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-circuito na Posição Horizontal**, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laprosolda, Uberlândia, MG, 2013.

Goldenstein, Hélio; Landgraf, Fernando José Gomes; Slaughter, Christian. **O MISTÉRIO DA ESPADA DE DAMASCO. SUA SOFISTICADA METALURGIA E TÉCNICA DE PRODUÇÃO**, p. 4340-4350. In: 67º Congresso da ABM - Internacional / 12º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, Rio de Janeiro, 2012.

INFOSOLDAS. **Soldagem** – Coleção tecnológica SENAI – 1ª ed. 1997: Disponível em: <https://infosolda.com.br/174-processo-mig-mag-parametros-desoldagem/> Acesso em: 04 de setembro 2024.

KOBELCO, **Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons**, publicado por Kobe Steel, LTD, 2015.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2022.

PARANHOS, Ronaldo; SILVA Cláudio L. J.. Fissuração a Quente (Trinca a Quente), Infosoldas, 2003.

ROTT, Henrique, **História da Soldagem**, Disponível em:

<https://www.balmer.com.br/blog/historia-da-soldagem/> Acesso em: 10 de agosto 2024.

SCOTTI, A; PANOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo, Altliber Editora, 2008.

TURANI, Cláudio. **Soldagem MIG/MAG**. Belo Horizonte: ESAB, 2005