



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

WAGNER DE ANDRADE MIRON

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL
AISI 301 PARA CERTIFICAÇÃO PROFISSIONAL EM EMPRESA DO SETOR
METALMECÂNICO**

RECIFE
2025

WAGNER DE ANDRADE MIRON

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL
AISI 301 PARA CERTIFICAÇÃO PROFISSIONAL EM EMPRESA DO SETOR
METALMECÂNICO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia
e Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Carlos Augusto do
Nascimento Oliveira

RECIFE
2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Miron, Wagner de Andrade.

Análise microestrutural de juntas soldadas em aço inoxidável AISI 301 para certificação profissional em empresa do setor metalmecânico / Wagner de Andrade Miron. - Recife, 2025.

51 p.

Orientador(a): Carlos Augusto do Nascimento Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

1. Soldagem por eletrodo revestido. 2. Aço inoxidável AISI 301. 3. Caracterização microestrutural. 4. Defeitos de soldagem. 5. Certificação profissional. I. Oliveira, Carlos Augusto do Nascimento. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

WAGNER DE ANDRADE MIRON

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL
AISI 301 PARA CERTIFICAÇÃO PROFISSIONAL EM EMPRESA DO SETOR
METALMECÂNICO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Mecânico” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Recife, 01 de dezembro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Adson Beserra da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Manoel Cândido Júnior (Examinador Externo)

Dedico este trabalho a Deus, à minha mãe Ivonete, ao meu irmão Vinícius e à minha companheira Aline, pelo apoio e presença constante em cada etapa desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Início este trabalho agradecendo, em especial, à minha mãe, Ivonete, que sempre fez de tudo por mim, muitas vezes renunciando aos próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Ao meu irmão Vinícius, pelo apoio incondicional e pelos incentivos que me ajudaram a superar os desafios até aqui.

À minha companheira, Aline, agradeço com muito carinho por todo amor, companheirismo e pela ajuda essencial nos momentos difíceis.

Aos meus tios, Abelardo Miron, Inês Alves, Joel Miron e Sandra Alves, expresso minha gratidão por toda a ajuda e apoio prestados, sempre presentes nos momentos importantes da vida e nesta trajetória acadêmica.

À Universidade Federal de Pernambuco, agradeço o conhecimento transmitido, que me permitiu transformar-me no profissional que sou hoje. Ao Professor Carlos Augusto, deixo meu reconhecimento pelos conselhos profissionais e pelas valiosas correções deste trabalho.

Aos meus amigos de faculdade, Alefe Santos e Luiz Roberto, agradeço a parceria durante todos esses anos. Obrigado pela companhia nas noites de estudo, pelos trabalhos, projetos e pelas palavras de incentivo que tornaram essa caminhada mais leve.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este momento fosse possível, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo geral analisar o cordão de solda para qualificar a mão de obra de um soldador em formação em uma empresa do setor metalmecânico. Para tanto, uniram-se chapas de aço inoxidável austenítico AISI 301 com espessura de 3,00 mm pelo processo de soldagem com eletrodo revestido, utilizando o consumível E309L. A avaliação da junta soldada foi realizada por meio de ensaios metalográficos, incluindo macrografia e microscopia óptica, em três amostras retiradas do cordão de solda. Os resultados revelaram que, embora a solda apresentasse penetração total, foram identificadas descontinuidades críticas, como falta de fusão, rechupe e porosidade. Tais falhas, consideradas inaceitáveis por critérios normativos, foram atribuídas à inexperiência do soldador no controle dos parâmetros e na execução do processo. Conclui-se que o profissional ainda não está apto para realizar soldagens de alta responsabilidade, sendo recomendada a continuidade do treinamento supervisionado para aprimorar sua técnica e garantir a qualidade das juntas de acordo com os critérios de aceitação.

Palavras-chave: Soldagem por eletrodo revestido; Aço inoxidável AISI 301; Caracterização microestrutural; Defeitos de soldagem; Certificação profissional.

ABSTRACT

This work aimed to analyze the weld bead to qualify the workmanship of a welder in training at a company in the metalworking sector. For this purpose, 3.00 mm thick austenitic stainless steel AISI 301 plates were joined using the shielded metal arc welding process with an E309L consumable. The evaluation of the welded joint was performed through metallographic tests, including macrography and optical microscopy, on three samples taken from the weld bead. The results revealed that although the weld showed full penetration, critical discontinuities such as lack of fusion, shrinkage, and porosity were identified. Such flaws, considered unacceptable by normative criteria, were attributed to the welder's inexperience in controlling parameters and executing the process. It is concluded that the professional is not yet qualified to perform high-responsibility welding, and continued supervised training is recommended to improve their technique and ensure the quality of the joints in accordance with acceptance criteria.

Keywords: Shielded metal arc welding; AISI 301 stainless steel; Microstructural characterization; Welding defects; Professional certification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união..	14
Figura 2. Representação esquemática das zonas afetadas na soldagem. (1) Metal de base, (2) Camada depositada, (3) Faixa estreita de fusão e (4) Zona afetada pelo calor.....	15
Figura 3. Representação dos fenômenos metalúrgicos na soldagem.....	16
Figura 4. Diagrama esquemático de soldagem com eletrodo revestido.....	19
Figura 5. Princípio de funcionamento de soldagem a arco elétrico e eletrodo revestido.....	19
Figura 6. Modos de transferência de metal. (a) Alta corrente e (b) Baixa corrente ..	20
Figura 7. Deformações em peças após processo de soldagem. (a) Distorção angular, (b) Encolhimento longitudinal, (c) Deformação Angular e (d) Flexão longitudinal.....	24
Figura 8. Fusão incompleta.....	26
Figura 9. Tipos de fissuras desenvolvidas em juntas soldadas. (a) Trinca transversal, (b) Metal de base, (c) Trinca sob o cordão, (d) Trinca longitudinal e (e) Trinca na margem da solda.....	27
Figura 10. Vínculos entre composição e propriedades na família de ligas de aço inoxidável.	28
Figura 11. Diagrama de Schaeffier do metal depositado para o aço inoxidável.....	32
Figura 12. Diagrama da constituição do ferro-cromo segundo Kubaschewski.....	33
Figura 13. (a) amostra A, (b) amostra B, (c) amostra C, após a soldagem.	40
Figura 14. (a) amostra A, (b) amostra B, (c) amostra C, após o corte.....	40
Figura 15. Macrografias da seção transversal - (a) Amostra A; (b) Amostra B; (c) Amostra C.	42
Figura 16. Falha por rechupe na amostra A: (a) e (c) ampliação de 50x; (b) 100x. ..	43
Figura 17. Falha por rechupe na amostra B: (a) ampliação de 50x; (b) 100x e (c) 200x.....	44
Figura 18. Falha por rechupe na amostra B: (a) ampliação de 50x; (b) 100x.....	44
Figura 19. Falha por porosidade na região inferior do cordão da amostra C.	45
Figura 20. Falha por rechupe na amostra C: (a) ampliação de 50x; (b) 100x.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Efeitos da corrente de soldagem e da velocidade de avanço nas variáveis do processo.....	17
Tabela 2. Fatores que influenciam a escolha do eletrodo.	22
Tabela 3. Requisitos de composição química para metal de solda não diluído %. ...	23
Tabela 4. Requisitos de propriedades mecânicas para o metal de solda.	23
Tabela 5. Composição do aço AISI 301, % em peso.	31
Tabela 6. Tipos de Solidificação e Microestruturas Resultantes na Zona de Fusão de Aços Inoxidáveis Austeníticos.	34
Tabela 7. Composição química do MB e MA (% em peso).	39
Tabela 8. Faixa de condições de soldagem para o eletrodo E309L (Ø 2,5 mm).....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	SOLDAGEM	13
2.1.1	Variáveis no Processo de Soldagem	16
2.1.2	Soldagem com Eletrodo Revestido.....	18
2.2	ELETRODO REVESTIDO.....	21
2.2.1	Eletrodo E309L.....	22
2.3	PRINCIPAIS FALHAS NA SOLDAGEM	23
2.4	AÇOS INOXIDÁVEIS	27
2.4.1	Aço Inoxidável AISI 301.....	30
2.4.2	Soldagem em Aço Inoxidável	31
2.5	CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA	36
2.5.1	Ensaio Metalográfico	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	38
3.2	MATERIAIS	38
3.3	SOLDAGEM DO MATERIAL.....	39
3.4	METALOGRAFIA.....	40
3.5	MICROSCOPIA	41
3.6	AVALIAÇÃO DA JUNTA	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A história do aço inoxidável remonta ao início do século passado, quando os pesquisadores Leon B. Guille e Albert M. Portevin iniciaram os estudos de ligas com baixo teor de carbono e cromo. Eles publicaram estudos sobre os aços martensíticos de 13% de cromo e os aços ferríticos de 17% de cromo, que continham de 0,12% a 1,0% de carbono. Posteriormente, Guillet e W. Giesen contribuíram com pesquisas sobre ligas austeníticas de ferro-cromo-níquel. Esses avanços científicos foram seguidos pela utilização industrial do aço inoxidável, que ocorreu entre os anos de 1910 e 1915, impulsionada pelas pesquisas de Harry Brearley na Inglaterra (Davis, 1994).

Desde então, houve um notável crescimento na produção e utilização do aço inoxidável, impulsionado por suas propriedades. Dentre as áreas de aplicação podemos citar: petroquímica, farmacêutica, aeroespacial, química e sucroalcooleira. De acordo com dados da Abinox (Associação Brasileira do Aço Inoxidável), o consumo aparente de aço inoxidável no Brasil atingiu a marca de 422 mil toneladas somente em 2024. Com uma ampla gama de aplicações, surge a necessidade de unir elementos e componentes de aço inoxidável, e a soldagem se destaca como um dos métodos mais confiáveis para essa finalidade.

No entanto, devido às altas porcentagens de diversos elementos de liga presentes no aço inoxidável, a soldagem pode se tornar um desafio, uma vez que há o risco de formação de fases frágeis ou de alteração das propriedades originais do material-base. Essas condições podem levar a falhas no cordão de solda, como trincas, corrosão intergranular, porosidade, redução da ductilidade e diminuição da resistência do material (Okumura e Taniguchi, 1982).

Diante do exposto, a análise do procedimento de soldagem assume um papel de extrema importância. Nesse contexto, o uso de técnicas de caracterização, como ensaio metalográfico, torna-se imprescindível para avaliar a integridade do cordão de solda. A aplicação dessas técnicas possibilita a quantificação das relações entre as estruturas e as propriedades, permitindo a detecção de características que podem não estar inicialmente evidentes (Colpaert, 2008). Dessa forma, é viável assegurar a qualidade da junta soldada, identificando possíveis defeitos,

microestruturas indesejadas e propriedades mecânicas que não estejam em conformidade com os padrões desejados durante o processo.

A motivação deste trabalho decorre da necessidade de estudar os processos de união por soldagem e sua caracterização, bem como de utilizar esse conhecimento para auxiliar indústrias da região.

Portanto, a expectativa é que essa análise seja capaz de fornecer uma caracterização da estrutura cristalina do cordão de solda e da zona termicamente afetada. Sendo essas informações essenciais para compreender o comportamento mecânico e as propriedades do cordão de solda, auxiliando na avaliação da integridade e na certificação da junta e na otimização dos processos de soldagem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar o cordão de solda, visando qualificar o trabalho do soldador para uma atividade que será executada em campo, a partir da soldagem por eletrodo revestido, por meio de ensaios de metalografia.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as características da zona fundida da junta soldada;
- Realizar ensaios metalográficos nas amostras soldadas;
- Verificar os possíveis defeitos da junta soldada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLDAGEM

A união de metais pode ser classificada em duas categorias distintas: aquelas que se baseiam em forças macroscópicas entre as partes a serem unidas e aquelas em que as forças microscópicas, como forças interatômicas e intermoleculares, predominam. A soldagem enquadra-se na categoria de junção por forças microscópicas, onde a união é obtida mediante a aproximação das moléculas ou átomos do material de base, ou até mesmo pela utilização de um material intermediário adicionado à junta (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011).

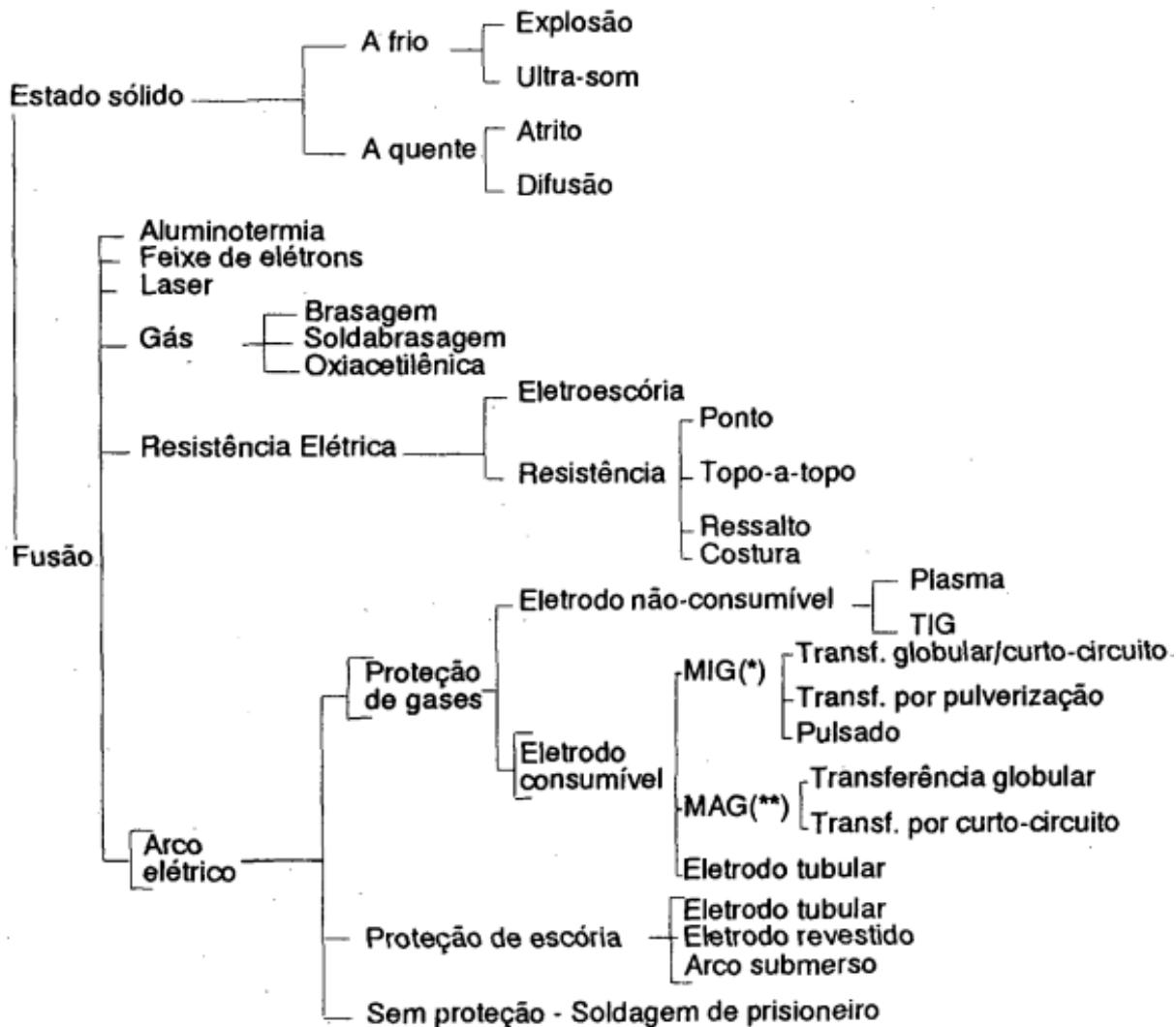
A soldagem é um processo versátil, capaz de unir diferentes tipos de ligas metálicas e variadas espessuras, sendo aplicável à maioria das ligas comumente utilizadas. Essa versatilidade se deve à existência de diversos processos de soldagem, cada um adequado a determinadas condições e materiais. Contudo, por se tratar de uma união permanente, a soldagem não é recomendada para juntas que necessitam ser desmontadas (Casarin, 2018). Além disso, a aplicação de energia térmica ou mecânica na região da junta pode gerar efeitos indesejados, como distorções, tensões residuais, alterações microestruturais e mudanças nas propriedades do material (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011).

De acordo com Okumura e Taniguchi (1982) o processo de soldagem pode ser classificado em três grandes categorias:

- a) Soldagem por fusão: Nesse processo, as partes a serem unidas são fundidas por meio de energia elétrica ou química, promovendo a junção entre os materiais.
- b) Soldagem por pressão: Aqui, as partes são coalescidas e pressionadas uma contra a outra, sem a necessidade de fusão, alcançando a união desejada.
- c) Brasagem: Trata-se de um processo de união no qual não ocorre a fusão do material base. A união é obtida pela adição de um metal de baixo ponto de fusão.

A Figura 1 indica esquematicamente os diversos processos de soldagem subdividido em dois grandes grupos, fusão e pressão.

Figura 1. Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.



Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi e Mello (2004).

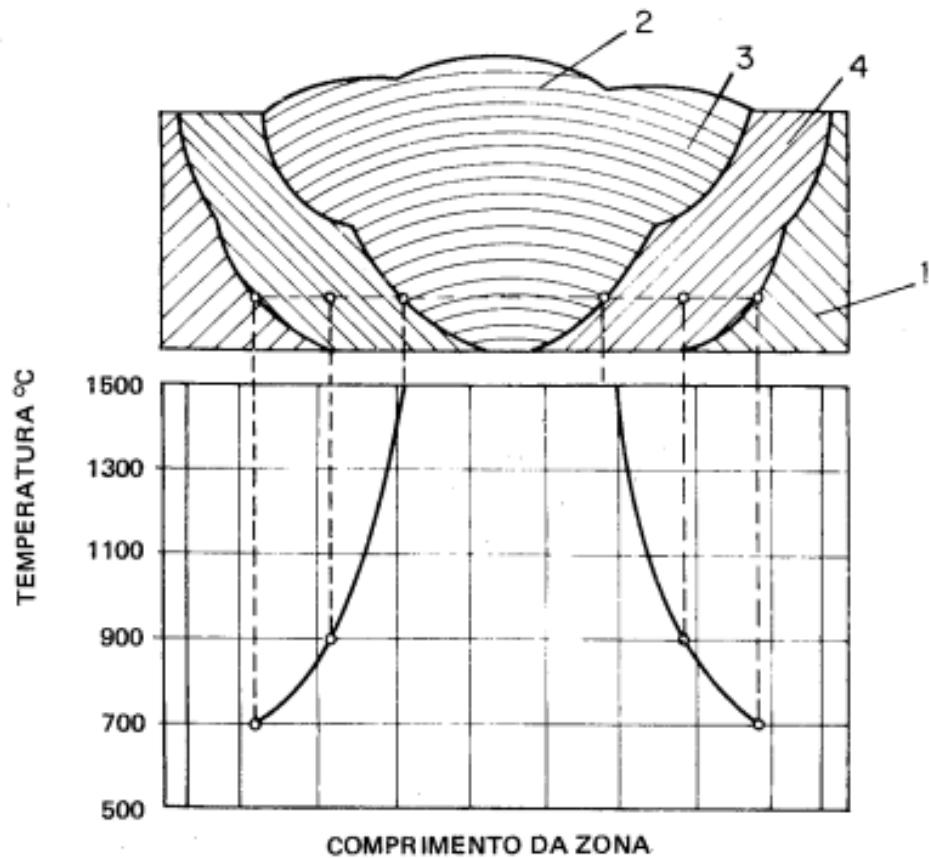
Na classificação da soldagem a arco elétrico estão incluídos os processos mais utilizados na união de aços inoxidáveis, como o eletrodo revestido, TIG e MIG, além do arco submerso e do feixe de elétrons, aplicados em menor escala (Okumura e Taniguchi, 1982). De modo geral, a soldagem a arco elétrico pode ser definida como um procedimento no qual a fonte de calor é produzida pelo arco estabelecido

entre o eletrodo e a peça a ser unida. Esse arco voltaico é responsável pela conversão da energia elétrica em calor (Cordeiro, 2013).

A geração de calor no processo de soldagem promove a formação da Zona Termicamente Afetada (ZTA), cuja microestrutura difere da do metal de base em razão da exposição temporária a elevadas temperaturas (Weman, 2012).

A Figura 2 apresenta a representação esquemática das regiões que compõem a solda, destacando a divisão resultante dos diferentes gradientes de temperatura durante o processo de soldagem.

Figura 2. Representação esquemática das zonas afetadas na soldagem. (1) Metal de base, (2) Camada depositada, (3) Faixa estreita de fusão e (4) Zona afetada pelo calor.

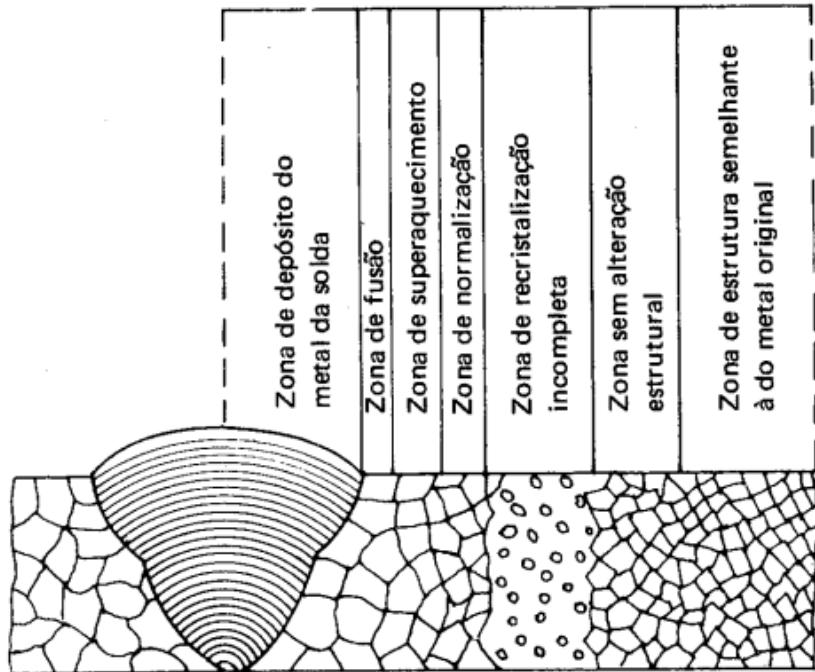


Fonte: Adaptado de Chiaverini (1986).

As propriedades e a microestrutura da ZTA são influenciadas pela taxa de entrada de calor, velocidade de resfriamento e temperatura alcançada nesta região. Além de fatores metalúrgicos, como o tamanho original dos grãos, orientação e grau de trabalho a frio prévio, as propriedades físicas dos metais, como o calor específico e a condutividade térmica, também afetam o tamanho e as características da zona afetada pelo calor (Silva, 2010).

A Figura 3 apresenta, de forma esquemática, a representação proposta por Chiaverini (1986) das diferentes zonas que se formam ao redor do cordão de solda, destacando as transformações microestruturais específicas ocasionadas pelo calor durante o processo de soldagem.

Figura 3. Representação dos fenômenos metalúrgicos na soldagem.



Fonte: Adaptado de Chiaverini (1986).

2.1.1 Variáveis no Processo de Soldagem

O controle eficaz do processo e, por consequência, a aprimorada produtividade e qualidade da junta soldada reposam substancialmente sobre as variáveis de procedimento. Essas variáveis podem ser categorizadas em três classes distintas: variáveis pré-selecionadas, variáveis ajustáveis primárias e variáveis ajustáveis secundárias. As variáveis pré-selecionadas abrangem aquelas deliberadamente escolhidas antes do início do processo de soldagem. Isso inclui a seleção criteriosa do tipo e bitola do eletrodo, assim como a determinação do tipo de corrente a ser empregada. As variáveis ajustáveis primárias, por sua vez, englobam

parâmetros críticos como corrente, tensão e velocidade de soldagem. Essas variáveis exercem controle direto sobre diversos fatores cruciais, como a energia envolvida na soldagem, a profundidade da penetração da junta e, em parte, a integridade da junta soldada. Complementando esse conjunto, encontram-se as variáveis ajustáveis secundárias, que englobam o ângulo de trabalho e de deslocamento, além dos movimentos executados na extremidade do eletrodo (Machado, 1996).

Uma das variáveis de destaque, mencionadas previamente, é a corrente de soldagem. Essa variável exerce um controle preponderante sobre todas as facetas do processo. A intensidade da corrente determina, de maneira predominante, a taxa de deposição nas condições fixas da soldagem. Ademais, a corrente de soldagem apresenta um efeito inversamente proporcional sobre a velocidade de resfriamento, um traço que impõe um limite à produtividade. Isso decorre da necessidade de um equilíbrio entre resfriamentos excessivamente rápidos e excessivamente lentos. A segunda variável de grande importância é a velocidade de avanço. Entretanto, o controle dessa variável é notavelmente menos preciso em aplicações manuais. A largura e altura do cordão de solda variam inversamente com a velocidade de avanço, ou seja, alterações na velocidade impactam diretamente as dimensões do cordão resultante (Wainer, Brandi e Mello, 2004). A Tabela 1 sintetiza a influência das variáveis de soldagem discutidas anteriormente, evidenciando os efeitos das alterações na corrente de soldagem e na velocidade de resfriamento.

Tabela 1. Efeitos da corrente de soldagem e da velocidade de avanço nas variáveis do processo.

Variável	Aumento da Variável	Redução da Variável
Corrente de soldagem	↑ Taxa de deposição ↓ Velocidade de resfriamento	↓ Taxa de deposição ↑ Velocidade de resfriamento
Velocidade de avanço	↓ Largura do cordão ↓ Altura do cordão	↑ Largura do cordão ↑ Altura do cordão

Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi e Mello (2004).

Dentro do contexto das variáveis ajustáveis secundárias, de acordo com Wainer, Brandi e Mello (2004), a implementação da oscilação do eletrodo se revela indispensável para alcançar configurações adequadas do cordão de solda. Um dos aspectos fundamentais a se considerar em relação a essa oscilação é a sua

influência na velocidade efetiva de avanço, que se reduz à medida que a oscilação aumenta. Esse fenômeno resulta em um incremento da energia empregada na soldagem. Em um outro âmbito, o ângulo de inclinação do eletrodo é calibrado com o intuito de nivelar o fluxo térmico entre as partes a serem unidas, bem como para direcionar o comportamento do banho de fusão e o perfil do cordão. O ângulo de inclinação assume um papel de significância considerável, pois a sua má regulação pode ocasionar a manifestação de defeitos no cordão de solda. Entretanto, é relevante destacar a dificuldade de controle dessa variável, uma vez que a sua ajustagem é condicionada pela percepção do operador.

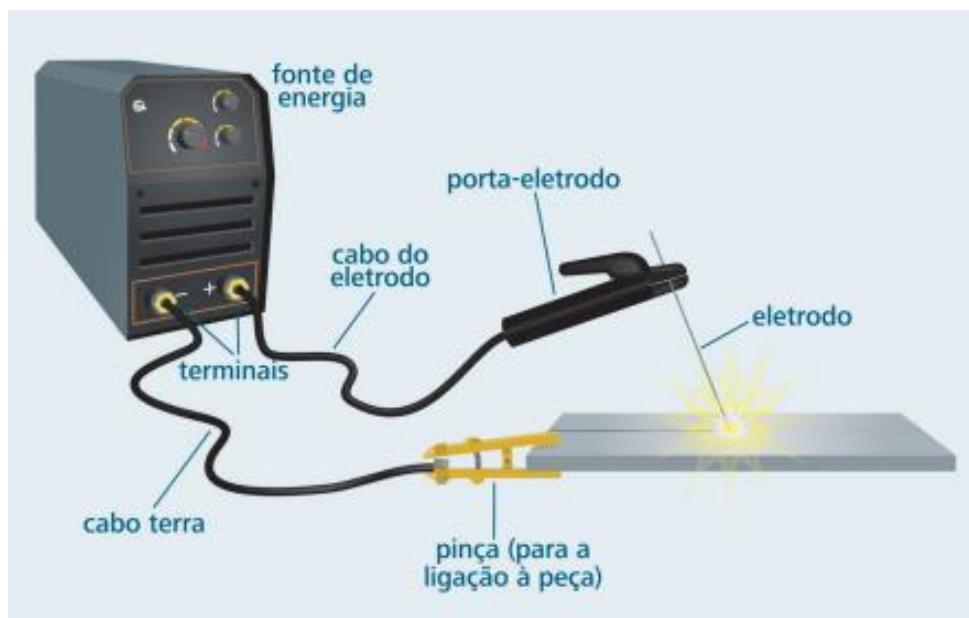
2.1.2 Soldagem com Eletrodo Revestido

O processo de soldagem com eletrodo revestido é realizado por meio de soldagem a arco elétrico, onde a união é obtida através do calor gerado pelo arco formado entre o eletrodo e o material base (Wainer, Brandi e Mello, 2004).

A soldagem com eletrodo revestido emprega equipamentos relativamente simples, como ilustrado na Figura 4, quando comparada a outros processos. Em geral, são utilizados a fonte de energia, cabos e o porta-eletrodos. O porta-eletrodos tem a função de fixar e energizar o eletrodo, enquanto os cabos conduzem a corrente elétrica da fonte ao porta-eletrodos, denominado cabo de soldagem, e da peça à fonte, denominado cabo de retorno ou cabo terra (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011).

A simplicidade dos equipamentos torna esse processo vantajoso para trabalhos ao ar livre, ao contrário de processos que requerem proteção gasosa, inviáveis em condições de vento. Entretanto, seu fator de tempo de arco é relativamente baixo, em razão da necessidade de remoção da escória após a soldagem e da substituição frequente dos eletrodos (Weman, 2012).

Figura 4. Diagrama esquemático de soldagem com eletrodo revestido.



Fonte: Adaptado de Peixoto (2012).

Conforme esquematizado na Figura 5, após a abertura do arco inicia-se a fusão tanto do material de base quanto do eletrodo, devido à ação do arco elétrico, sendo esses materiais transferidos sob essa forma para a poça de fusão (Okumura e Taniguchi, 1982). A distância da extremidade do eletrodo até o fundo da cratera é conhecida como comprimento de arco. Esse comprimento deve ser o menor possível para reduzir as chances de os glóbulos de metal em fusão entrarem em contato com o ar ambiente (Neris, 2012).

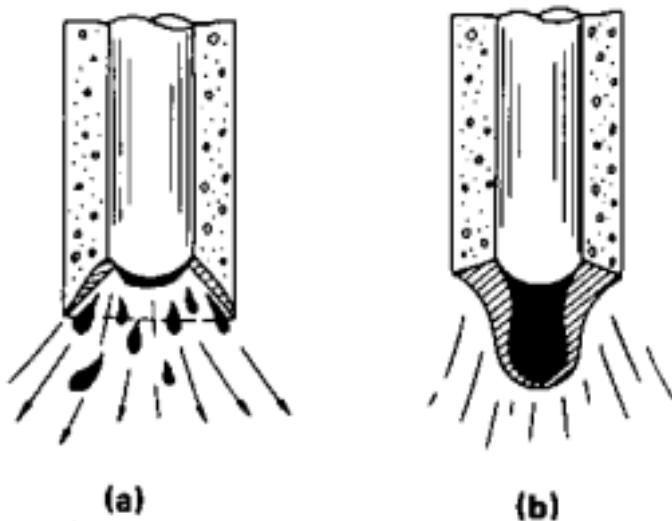
Figura 5. Princípio de funcionamento de soldagem a arco elétrico e eletrodo revestido.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2009).

Segundo Okumura e Taniguchi (1982), ao fundir o eletrodo com uma corrente de alta intensidade, observa-se a formação de gotas finas e numerosas, resultando em uma transferência do tipo pulverização. Por outro lado, quando é utilizada uma corrente de baixa intensidade, ocorre a formação de glóbulos maiores, como ilustrado na Figura 6. O tipo de deposição de material exerce influência decisiva na qualidade da junta soldada, sendo que gotas menores promovem uma transferência mais eficiente, resultando em uma soldagem de melhor qualidade.

Figura 6. Modos de transferência de metal. (a) Alta corrente e (b) Baixa corrente.



Fonte: Adaptado de Okumura e Taniguchi (1982).

Os eletrodos para soldagem são geralmente produzidos por extrusão, na qual o revestimento é aplicado sob pressão sobre a alma metálica, que normalmente consiste em um arame endireitado e cortado nas dimensões adequadas (Wainer, Brandi e Mello, 2004). Durante a soldagem, esse revestimento se transforma em uma escória que protege o metal fundido da atmosfera, criando um ambiente redutor que impede a penetração de umidade e a contaminação por elementos do ar. Adicionalmente, a escória pode liberar gases que auxiliam no transporte das gotículas de metal líquido do arame de adição para a poça. Para ser eficaz, a escória deve cobrir adequadamente o fundido, mesmo em posições verticais, e ser facilmente removida após a solidificação da solda (Easterling, 1992).

O eletrodo revestido é amplamente utilizado na soldagem de estruturas metálicas e na montagem de diversos equipamentos, tanto em ambientes de oficina quanto em campo, e até mesmo embaixo d'água. Esse processo é adequado para

materiais com espessuras variando entre 1,5 mm e 50 mm, podendo ser aplicado em qualquer posição de soldagem. Embora seja predominantemente um processo manual, ele é versátil e pode ser empregado em diversos materiais, incluindo aço carbono, aço de baixa liga, média e alta liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, cobre, níquel e ligas desses materiais (Peixoto, 2012).

2.2 ELETRODO REVESTIDO

Os eletrodos revestidos são compostos por um núcleo metálico envolto por um revestimento composto de materiais orgânicos e ou minerais de dosagem bem definidos (Neris, 2012). A composição do revestimento desempenha um papel fundamental na definição das características dos eletrodos e pode exercer impacto nas propriedades da solda. O revestimento possui diversas funções essenciais, incluindo a desoxidação ou dessulfuração, a criação de uma escória protetora, a capacidade de dissolver óxidos e impurezas, a redução da ocorrência de respingos, a desaceleração da taxa de resfriamento da solda e até mesmo o aumento da taxa de deposição (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011).

Os revestimentos podem ser categorizados em três grupos distintos: ácido, básico e rutílico. Os revestimentos ácidos apresentam concentrações elevadas de óxidos de ferro e manganês, resultando em uma produtividade notável devido ao seu rico teor de pó de ferro. Ademais, os eletrodos ácidos proporcionam cordões de solda com uma superfície lisa e brilhante. A escória gerada por esses eletrodos tem um processo de solidificação mais lento, tornando-a porosa e de fácil remoção (Weman, 2012). Apesar da aparência da solda, esse tipo de revestimento resulta em um cordão de solda com propriedades mecânicas e metalúrgicas inferiores (Machado, 1996).

Os revestimentos rutílicos são compostos por uma quantidade significativa de rutilo (TiO_2). Eles são conhecidos por produzirem cordões de solda com boa aparência e penetração moderada (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011). No entanto, é importante notar que esses eletrodos tendem a gerar níveis mais elevados de hidrogênio no metal de solda, o que aumenta o risco de fragilização e formação de trincas por hidrogênio. Por esse motivo, seu uso é frequentemente

restrito à soldagem de aço carbono com uma resistência à tração mínima inferior a 440 MPa (Weman, 2012).

Já os revestimentos básicos contêm elevadas concentrações de carbonato de cálcio e fluorita. Como resultado, o metal de solda depositado com esse tipo de consumível tende a exibir propriedades mecânicas e metalúrgicas superiores em comparação a outros tipos de eletrodos. Somado a isso, o metal depositado é altamente desoxidado e apresenta baixos níveis de inclusões de sulfetos e fosfetos (Machado, 1996).

Tabela 2. Fatores que influenciam a escolha do eletrodo.

Fator	Eletrodo Rutilico	Eletrodo Ácido	Eletrodo Básico
Estabilidade do arco	++	+	-
Aparência do cordão de solda	+	++	-
Força da solda	-	-	++
Diferentes posições de soldagem	+	--	++
Risco de inclusões de escória	-	-	++
Resistência à corrosão	+	+	-
Formação de fumaça	++	+	-
Remoção de escória	+	++	-
Quantidade de hidrogênio no metal de solda	-	-	++

Fonte: Adaptado de Weman (2012).

2.2.1 Eletrodo E309L

Este eletrodo é recomendado para uma ampla gama de aplicações, incluindo a soldagem de diversos tipos de aços inoxidáveis, como os AISI 201, 202, 301, 302, 303, 304, 304L, 305, 308, 308L e 309L. Além disso, é adequado para a soldagem de aços refratários e materiais de composição similar e pode ser utilizado em todas as posições de soldagem, exceto vertical descendente. Sua versatilidade se estende à união de aços com diferentes composições, permitindo a conexão de aços austeníticos com aços ferríticos, bem como o revestimento de aços carbono ou de baixa liga.

O depósito deste eletrodo é caracterizado pela alta tenacidade e pela notável resistência à formação de carepa, mesmo em temperaturas elevadas. Sua soldagem

produz cordões suaves e estáveis, resultando em soldas lisas e completamente livres de respingos, poros, fissuras e trincas.

Suas aplicações abrangem uma vasta gama de setores, incluindo a fabricação de tanques, vasos, recipientes, revestimentos inoxidáveis sobre aço carbono resistentes à corrosão e ao calor, fornos, grelhas, muflas, caixas e cestas de tratamento térmico, transportadores de fornos contínuos, equipamentos de banho químico, matrizes, ferramentas, almofadas para revestimentos duros e a união ou revestimento de aços de composição semelhante.

Tabela 3. Requisitos de composição química para metal de solda não diluído %.

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
0.04	22.0~25.0	12.0~14.0	0.75	0.5~2.5	1.00	0.04	0.03	0.75

Fonte: AWS (2006).

Tabela 4. Requisitos de propriedades mecânicas para o metal de solda.

Resistência á tração, min		Alongamento min, %
Ksi	MPa	
75	520	30

Fonte: AWS (2006).

2.3 PRINCIPAIS FALHAS NA SOLDAGEM

Segundo Kalpakjian e Schmid (2020), a exposição a ciclos térmicos e às mudanças microestruturais que ocorrem simultaneamente durante o processo de soldagem pode levar à manifestação de descontinuidades na junta. Tais irregularidades na solda podem surgir tanto devido a processos térmicos quanto a modificações na estrutura do material. Do mesmo modo, descontinuidades na soldagem podem ser resultado de operações negligentes ou inadequadas, bem como da aplicação equivocada de técnicas de soldagem por parte do operador. Entre as principais falhas, destacam-se:

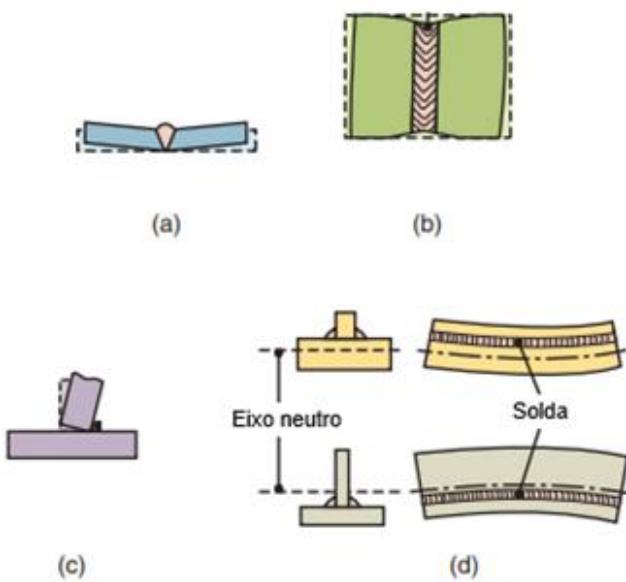
- a) Distorções;
- b) Porosidade;

- c) Inclusões de escória;
- d) Fusão incompleta;
- e) Ocorrência de trincas.

Cada uma dessas falhas traz consigo o potencial de comprometer a integridade da junta soldada e, por conseguinte, a resistência e durabilidade da estrutura.

Defeitos na soldagem podem ser divididos em duas categorias: descontinuidades dimensionais e descontinuidades estruturais. No âmbito das descontinuidades dimensionais, são tratadas as distorções originadas pela contração da solidificação e da contração térmica do metal de base durante a soldagem, conforme ilustrado na Figura 7. Essa distorção pode levar a um encolhimento da peça soldada tanto na direção transversal quanto na direção longitudinal ao longo da linha de solda. A distorção angular ascendente é um exemplo comum no contexto das descontinuidades dimensionais, ocorrendo frequentemente quando a solda é realizada apenas na parte superior da peça. Nesse cenário, a solda tende a ser mais larga na parte superior do que na parte inferior, resultando em uma contração maior da solidificação e da contração térmica na porção superior da solda em comparação com a parte inferior (Kou, 2002).

Figura 7. Deformações em peças após processo de soldagem. (a) Distorção angular, (b) Encolhimento longitudinal, (c) Deformação Angular e (d) Flexão longitudinal.



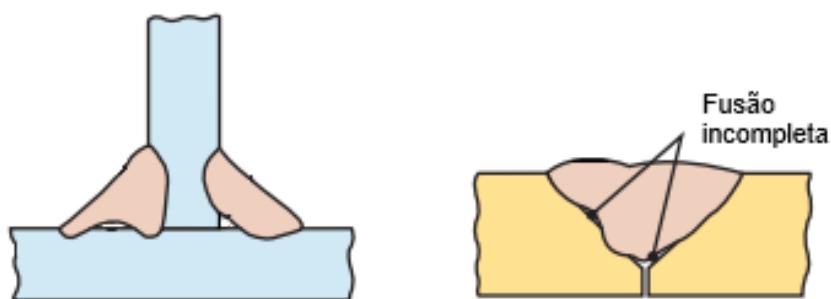
Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2020).

No contexto das descontinuidades estruturais, encontramos a porosidade, inclusões de escória, fusão incompleta e trincas. A formação de porosidade emerge quando bolhas de gás são aprisionadas à medida que a poça de fusão se desloca (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011). Essa descontinuidade está intimamente ligada a uma série de fontes de contaminação, incluindo a acumulação de sujeira, oxidação e umidade na superfície do metal base ou nos consumíveis. Além disso, essa imperfeição pode ser desencadeada por interrupções na efetividade da proteção gasosa, revelando-se quando turbulências afetam a corrente de gás de proteção. Tais turbulências podem ocorrer devido a uma vazão excessiva de gás ou mesmo à influência de correntes de ar que impactam a atmosfera protetora. Especialmente na soldagem com eletrodo revestido, a utilização de parâmetros inadequados, como uma corrente excessiva ou um arco muito longo, tem o potencial de deflagrar a ocorrência de porosidade. Adicionalmente, a deterioração do revestimento ou o consumo excessivo de agentes desoxidantes podem contribuir para a inclusão indesejada de CO na poça de fusão, resultando em porosidade (Modenesi, 2001).

Em vários métodos de soldagem, ocorre a formação de escória, composta por óxidos e materiais não metálicos, que têm a tendência de flutuar na superfície da poça de fusão devido à sua menor densidade (Modenesi, 2001). Entretanto, a escória gerada durante o processo pode ser retida na poça de fusão devido a inadequações no manuseio do eletrodo, ocasionando o deslocamento da escória à frente da poça de fusão. Igualmente, posições de soldagem, como posição sobre cabeça, podem ampliar a tendência de aprisionamento da escória. Esse fenômeno é agravado quando a soldagem requer múltiplas passadas ou quando há a presença de chanfros estreitos (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011).

A ocorrência da fusão incompleta está intrinsecamente ligada à ausência de uma união sólida por fusão entre os passes adjacentes de solda ou entre a solda e o metal de base. Esse cenário surge como resultado de manuseio inadequado da tocha de soldagem e da adoção de parâmetros de soldagem incorretos, como velocidade de soldagem excessivamente alta, corrente insuficiente e preparação inadequada da junta (Modenesi, 2001).

Figura 8. Fusão incompleta.



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2020).

Outro fator de relevância quando se trata da falta de fusão ou de penetração inadequada são defeitos que geram uma concentração significativa de tensão nas extremidades, podendo aumentar a susceptibilidade à ocorrência de trincas. Equívocos na montagem de uma solda em ângulo, especialmente com uma abertura de raiz incorreta, também resultam em uma concentração de tensão que favorece o surgimento de trincas (Wainer, Brandi e Mello, 2004).

As trincas são consideradas como as descontinuidades mais graves, uma vez que podem propiciar o desencadeamento de fraturas frágeis na estrutura. De maneira simplificada, a formação de trincas advém da incapacidade do material de lidar com as tensões resultantes do processo de soldagem. Durante a soldagem, surgem tensões na região soldada, que, somadas a mudanças microestruturais e/ou à presença de certos elementos, como o hidrogênio, podem culminar na geração de trincas (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011).

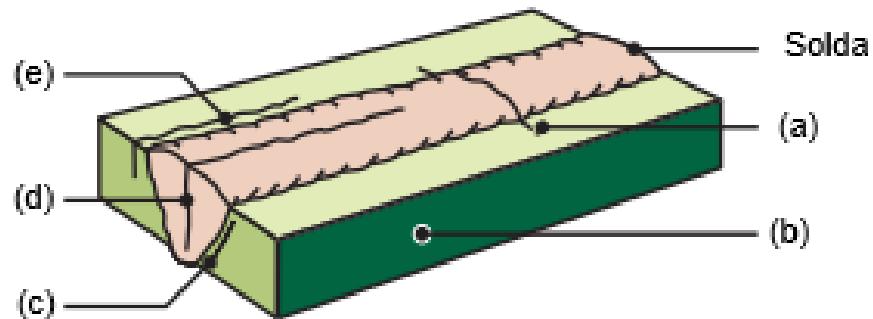
As trincas podem ser classificadas como trincas a quente ou trincas a frio. As trincas quentes, que se formam durante o processo de solidificação, estão associadas à existência de fases de baixo ponto de fusão ou ao intervalo de solidificação. A fissuração que ocorre durante a solidificação costuma ser intergranular, manifestando-se com a separação do material na região interdendrítica (Wainer, Brandi e Mello, 2004). Assim, o material segregado entre os limites dos grãos se revela incapaz de resistir às forças resultantes da contração do material (Marques, Modenesi e Bracarense, 2011). Essa segregação é acentuada na presença de impurezas, como enxofre e fósforo, que originam compostos de baixo ponto de fusão, como o FeS no caso do enxofre (Kou, 2002).

Por outro lado, as trincas a frio são aquelas que se manifestam em temperaturas abaixo de 300°C. Esse tipo de fissura pode surgir tanto na região

fundida quanto na zona termicamente afetada (Okumura e Taniguchi, 1982). A trinca a frio, induzida pelo hidrogênio, emerge da interação simultânea de quatro fatores essenciais: a presença de hidrogênio, tensões residuais, microestrutura vulnerável e baixas temperaturas. Isoladamente, nenhum desses elementos é capaz de provocar a formação de trincas a frio. É a conjugação desses quatro fatores que efetivamente culmina no surgimento dessas fissuras (Petrobras, 1983).

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2020), as trincas podem ser classificadas de acordo com sua localização, sendo os tipos mais comuns: trincas longitudinais, transversais, sob o cordão e de pé, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9. Tipos de fissuras desenvolvidas em juntas soldadas. (a) Trinca transversal, (b) Metal de base, (c) Trinca sob o cordão, (d) Trinca longitudinal e (e) Trinca na margem da solda.



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2020).

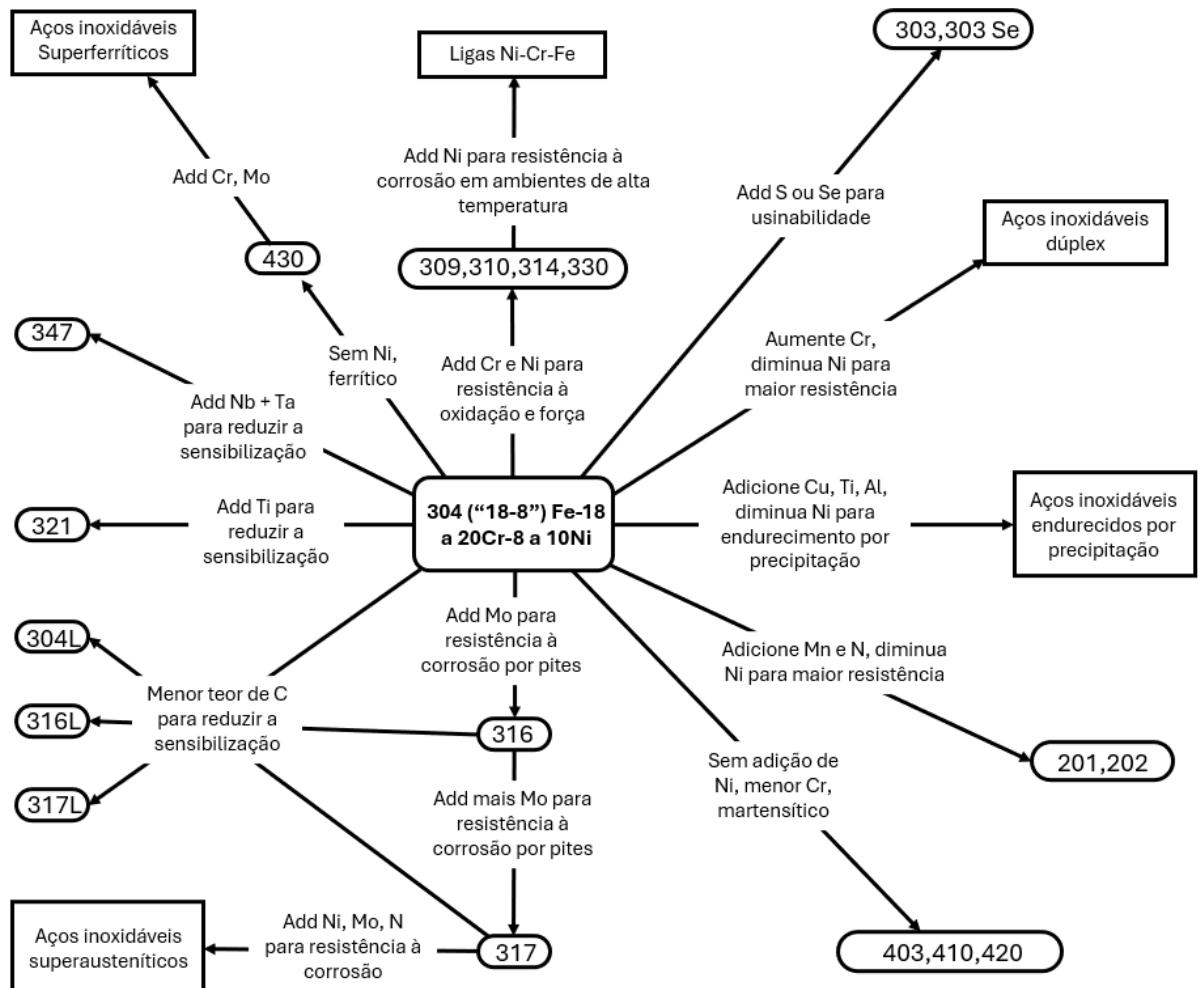
2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS

Aços inoxidáveis em sua essência é a utilização do cromo como elemento de liga com o ferro. Para garantir resistência à corrosão, é necessário que o teor de cromo seja superior a 11%. Suas características inoxidáveis derivam da formação de um filme de óxido rico em cromo na superfície, esse óxido se forma e se regenera na presença de oxigênio (Davis, 1994).

Após o cromo, o níquel é o elemento mais relevante nos aços inoxidáveis. Ele amplia a faixa de resistência à corrosão das ligas ferro-cromo, mas sua principal contribuição está nas propriedades mecânicas que confere, aprimorando a plasticidade, a tenacidade e as características de soldabilidade.

No entanto, os aços inoxidáveis não são formados apenas por cromo e níquel, a fim de melhorar algumas propriedades são utilizados outros elementos de ligas como molibdênio para resistência a corrosão por pites; cobre, titânio e alumínio para endurecimento por precipitação; manganês e nitrogênio para aumento da resistência; e nióbio e/ou tântalo para reduzir a sensitização (Pramanik e Basak, 2015). A sensitização ocorre quando certas ligas de aço inoxidável permanecem em determinadas faixas de temperatura, provocando a segregação de elementos nos contornos de grão. O principal responsável por esse fenômeno é a precipitação do carboneto de cromo, que empobrece a região adjacente do cromo necessário para a passivação, tornando-a suscetível à corrosão intergranular (Colpaert, 2008). A Figura 10, apresenta a relação entre a composição e as propriedades das ligas da família dos aços inoxidáveis.

Figura 10. Vínculos entre composição e propriedades na família de ligas de aço inoxidável.



Fonte: Adaptado de Pramanik e Basak (2015).

De acordo com Colpaert (2008), neste tipo de aço, a microestrutura exerce um papel fundamental na definição de suas propriedades. Com base nessa característica, os aços inoxidáveis são subdivididos em cinco grupos, de acordo com sua microestrutura em temperatura ambiente, a saber:

- a) Martensíticos;
- b) Ferríticos;
- c) Austeníticos;
- d) Ferrítico – austeníticos (Duplex);
- e) Endurecidos por precipitação.

Dentre os tipos mencionados, os aços inoxidáveis ferríticos são os mais simples. Eles contêm o mínimo de cromo necessário para superar as impurezas naturais de carbono e atingir 11% de cromo, valor suficiente para garantir a "inoxidabilidade" (McGuire, 2008).

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam características similares às ligas de Fe-C submetidas a processos de austenitização, têmpera e revenimento, com o objetivo de aumentar a ductilidade e a tenacidade. Essas ligas são magnéticas e, quando tratadas termicamente, adquirem uma estrutura tetragonal de corpo centrado (Davis, 1994). Para garantir a tenacidade, a austenitização dos aços inoxidáveis martensíticos deve ocorrer em temperaturas entre 925 °C e 1070 °C, com o objetivo de dissolver completamente os carbonetos, garantindo uma austenita uniforme e o adequado controle do tamanho do grão austenítico (Colpaert, 2008).

Entre os aços inoxidáveis, os mais comuns são os austeníticos, geralmente compostos por cromo, níquel e manganês em ferro. Essa classe de aço inoxidável não é magnética e pode ser endurecida por trabalho a frio. Além disso, é a mais dúctil de todas e permite fácil conformação (Kalpakjian e Schmid, 2020). A alta plasticidade e a capacidade de encruamento dos aços austeníticos permitem que sejam trabalhados a frio até atingirem valores excepcionais de limite de escoamento e ruptura. No entanto, processos a quente, como a soldagem, podem comprometer a resistência obtida pelo encruamento. Somado a isso, quando esses aços são aquecidos na faixa de 425-815 °C ou resfriados lentamente dentro dessa faixa, pode ocorrer a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão. Como

consequência, a região de austenita ao redor fica empobrecida de cromo, tornando-se mais suscetível à corrosão (Silva e Mei, 1988).

Até a década de 1930, existiam apenas as três classes de aços mencionadas anteriormente. As ligas austeníticas eram consideravelmente mais caras que os graus martensíticos e ferríticos e apresentavam suscetibilidade à corrosão intergranular e à fissuração sob tensão. Assim, começaram a ser desenvolvidas ligas austenita-ferrita, que apresentam frações iguais das duas fases. Essa combinação proporciona propriedades como elevada resistência mecânica, boa tenacidade e excelente resistência à corrosão sob tensão. Em geral, essa microestrutura e suas propriedades são resultado do aumento dos teores de cromo, molibdênio e nitrogênio (Cobb, 2010).

Para os aços endurecidos por precipitação, utiliza-se um mecanismo de endurecimento semelhante ao empregado para fortalecer ligas de alumínio. Nesse processo, a precipitação de uma segunda fase coerente a partir de uma solução sólida supersaturada é alcançada por meio de um tratamento térmico de envelhecimento. O precipitado coerente deforma a rede cristalina e impede o movimento das discordâncias, resultando no fortalecimento do material. Essas ligas são reforçadas por pequenas adições de titânio, que se combinam com o carbono para formar precipitados finos de carboneto de titânio, fortalecendo a matriz cristalina (McGuire, 2008).

Essas ligas contêm de 11 a 18% de cromo, de 3 a 27% de níquel e pequenas quantidades de outros metais, como alumínio, cobre, nióbio, molibdênio, titânio e tungstênio. Destacam-se por sua resistência extremamente alta e por apresentarem resistência à corrosão tão boa quanto, ou até superior, à do aço inoxidável tipo 304. A elevada resistência dessas ligas é obtida pela formação de precipitados minúsculos durante o tratamento de envelhecimento. (Cobb, 2010).

2.4.1 Aço Inoxidável AISI 301

O aço inoxidável austenítico tipo 301, da classe cromo-níquel, oferece alta resistência e boa ductilidade quando trabalhado a frio. Nesse tipo de aço, o trabalho a frio modifica as propriedades mecânicas devido à transformação parcial da

austenita em martensita ($\gamma \rightarrow \alpha'$) e à introdução de discordâncias adicionais pela deformação (Barbucci *et al.*, 2001).

O aço inoxidável austenítico tipo 301 é geralmente considerado soldável pelas técnicas comuns de soldagem por fusão. No entanto, esses aços apresentam suscetibilidade à trinca a quente, especialmente quando submetidos à soldagem com consumíveis de composição similar à do metal base. Essas trincas ocorrem devido à presença de impurezas com baixa solubilidade e ponto de fusão reduzido, que se acumulam nos contornos de grão da estrutura austenítica, favorecendo a formação de defeitos (Gnanasekaran *et al.*, 2021).

Tabela 5. Composição do aço AISI 301, % em peso.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.15	2.00	1.00	0.045	0.030	16.00~18.00	6.00~8.00

Fonte: Adaptado de Davis (1994).

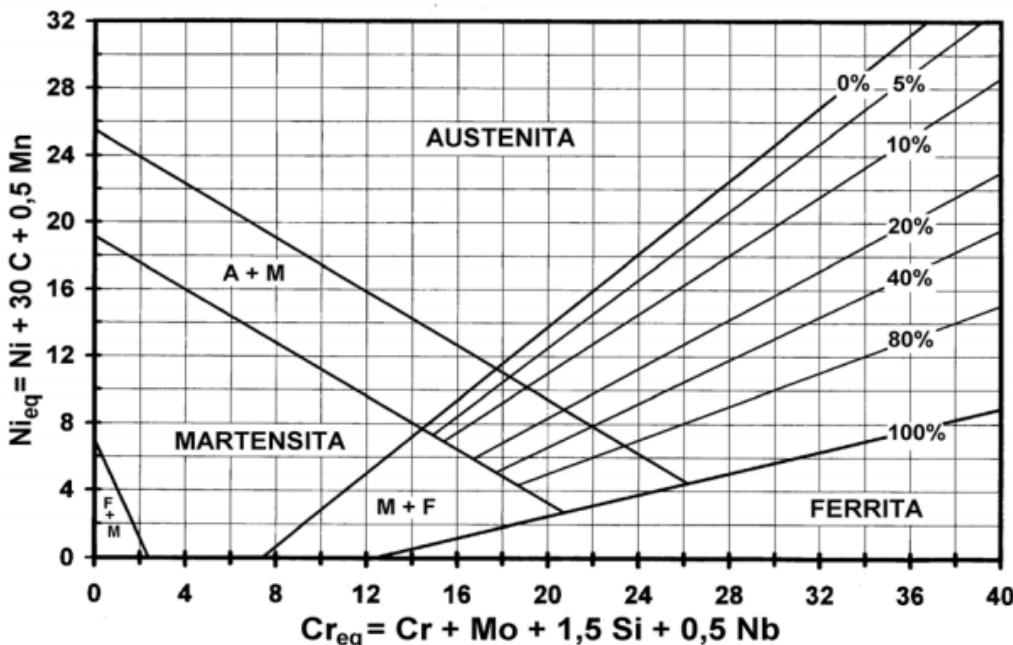
2.4.2 Soldagem em Aço Inoxidável

Cada família de aços inoxidáveis apresenta considerações distintas de soldabilidade devido ao comportamento variável da transformação de fase durante o resfriamento, da solidificação até a temperatura ambiente ou abaixo dela. Frequentemente, o material de adição ideal não é aquele cuja composição corresponde mais fielmente ao metal base. Os consumíveis empregados na soldagem desses materiais são, na maioria das vezes, selecionados com base na resistência à corrosão exigida para a aplicação pretendida. Isso geralmente implica que o material de adição deve, no mínimo, igualar, e em alguns casos, superar o teor de elementos de liga essenciais, como cromo, níquel e molibdênio. Após essa consideração, a prevenção de trincas torna-se o principal fator na escolha do insumo e no desenvolvimento do procedimento de soldagem (Davis, 1994).

As propriedades mecânicas e a resistência à corrosão do metal depositado na soldagem de aços inoxidáveis dependem principalmente da composição química e da estrutura cristalina (Okumura e Taniguchi, 1982). A Figura 11 apresenta o diagrama de Schaeffler, que relaciona os tipos de estruturas metalúrgicas possíveis

em função da composição química, expressa pelos equivalentes percentuais de níquel e cromo.

Figura 11. Diagrama de Schaeffier do metal depositado para o aço inoxidável.



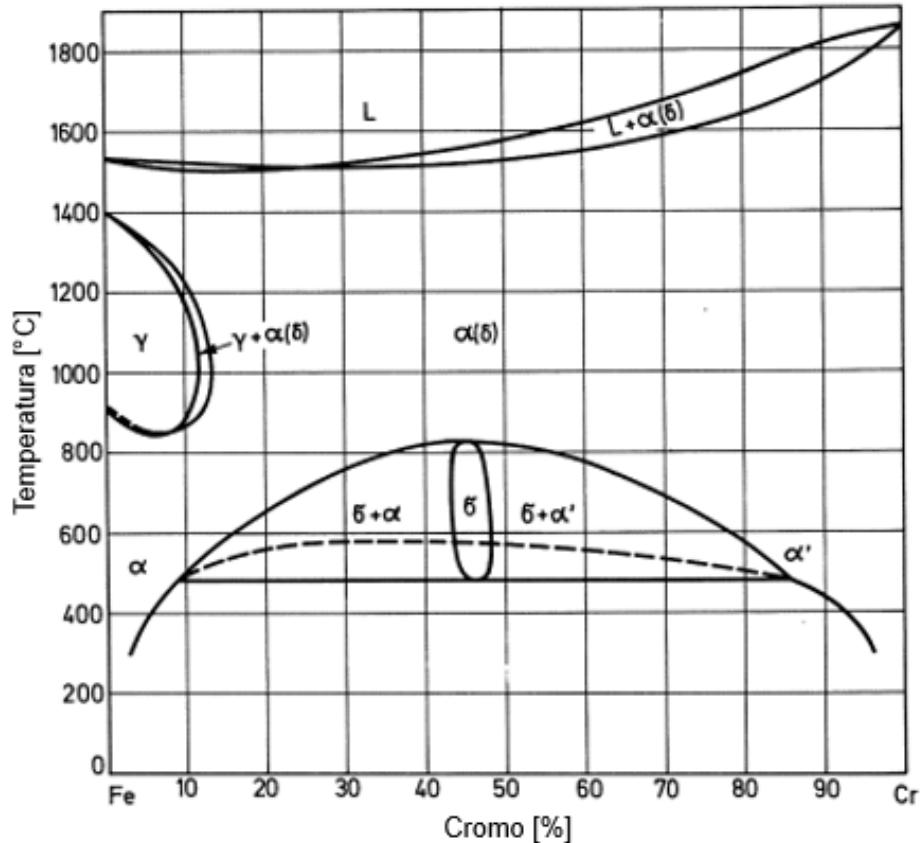
Fonte: Adaptado de Weman (2012).

Os aços inoxidáveis quando aquecidos, dependendo do teor de cromo, níquel e carbono nos aços inoxidáveis, a estrutura resultante após o resfriamento até a temperatura ambiente será composta por quantidades variáveis de ferrita delta, austenita e martensita. O diagrama de constituição ferro-cromo, mostrado na Figura 12, indica que, para os aços com 12% de cromo, a cerca de 1050°C, estes estão próximos do limite da região γ e, para teores mais baixos de carbono, já estão dentro da região ($\delta + \gamma$). Já os aços com 17% de cromo situam-se na região ($\delta + \gamma$), com proporções relativamente altas de ferrita delta (Folkhard, 1988).

Considerado o aço inoxidável mais simples, o aço inoxidável ferrítico pode apresentar de 30 a 50% de austenita quando aquecido acima de 800 °C, a qual se transforma em martensita durante o resfriamento, resultando em uma estrutura final composta por ferrita e martensita. No processo de soldagem, é comum ocorrer o crescimento de grãos na zona termicamente afetada e a precipitação nos contornos de grão. Esses fenômenos comprometem significativamente sua tenacidade e resistência à corrosão. Uma forma de atenuar esses problemas é a redução dos intersticiais, o que minimiza a formação de precipitados (carbonetos e nitretos) nos

contornos de grão, principais responsáveis pela baixa tenacidade e pela degradação do material durante a soldagem (Silva e Mei, 1988).

Figura 12. Diagrama da constituição do ferro-cromo segundo Kubaschewski.



Fonte: Adaptado de Folkhard (1988).

Mesmo com pré-aquecimento relativamente alto e altos aportes térmicos, essas condições mantêm-se fora da área de transformação para perlita, o que implica que, após a soldagem e o resfriamento até a temperatura ambiente, a zona afetada pelo calor (ZTA) e o metal de solda terão sempre uma estrutura martensítica. No resfriamento ao ar, a estrutura será composta por martensita e ferrita delta, sendo que o teor de ferrita delta varia entre 20-30% nos aços com 12% de cromo e entre 50-80% nos aços com 17% de cromo (Folkhard, 1988).

Os aços inoxidáveis austeníticos são facilmente soldados por quase todas as técnicas de soldagem. No entanto, eles apresentam características que os diferenciam dos aços carbono comuns nesse processo. Possuem menor condutividade térmica e maior expansão térmica em comparação aos aços carbono e aos aços inoxidáveis ferríticos, o que pode concentrar o aquecimento e aumentar o potencial para tensões residuais, levando a trincas a quente (McGuire, 2008).

A microestrutura da zona de fusão dos aços inoxidáveis austeníticos à temperatura ambiente depende tanto do comportamento de solidificação quanto das transformações no estado sólido subsequente. Existem quatro possibilidades de solidificação e transformação no estado sólido para os metais de solda desses aços, conforme mostrado na Tabela 6. Os modos de solidificação A e AF estão associados à solidificação primária da austenita, na qual essa fase é a primeira a se formar após a solidificação. Já os modos de solidificação FA e F apresentam a ferrita delta como fase primária (Lippold e Kotecki, 2005).

Tabela 6. Tipos de Solidificação e Microestruturas Resultantes na Zona de Fusão de Aços Inoxidáveis Austeníticos.

Tipo de Solidificação	Microestrutura
A	Estrutura de solidificação totalmente austenítica e bem definida.
AF	Ferrita nas fronteiras de células e dendritos.
FA	Ferrita esquelética e/ou lamelar resultante da transformação de ferrita em austenita.
F	Ferrita acicular ou matriz de ferrita com austenita de contorno de grão e placas laterais de Widmanstätten.

Fonte: Adaptado de Lippold e Kotecki (2005).

Metais de solda que solidificam no modo A, formando uma estrutura totalmente austenítica, são mais suscetíveis a trincas de solidificação. Já os que solidificam no modo FA apresentam maior resistência a esse tipo de falha. De igual modo, altos níveis de impurezas, como enxofre e fósforo, nas ligas que solidificam nos modos A ou AF aumentam a vulnerabilidade a trincas de solidificação. Elementos como fósforo e enxofre são conhecidos por promover trincas de solidificação em aços, com o fósforo sendo mais eficaz na formação de trincas na zona de fusão, enquanto o enxofre tem maior influência na formação de trincas de liquefação na ZTA. No entanto, a redução excessiva do enxofre pode prejudicar a penetração da solda. Com níveis baixos de enxofre, a tensão superficial da poça de solda diminui com o aumento da temperatura, resultando em uma penetração ampla, porém superficial. Em contrapartida, quando o enxofre é mais alto, a tensão superficial aumenta, fazendo com que o metal líquido seja puxado em direção ao centro da solda (Lippold e Kotecki, 2005).

Já os aços inoxidáveis martensíticos possuem um teor de cromo entre 11% e 18%, semelhante aos ferríticos, porém seu maior teor de carbono permite a transformação completa da ferrita em austenita a altas temperaturas (~980 °C), seguida pela formação de martensita dura após resfriamento rápido. O ciclo térmico da soldagem equivale a um processo de têmpera, resultando em uma estrutura martensítica de alto carbono, extremamente frágil sem revenimento. Dessa forma, trincas podem ocorrer quando a junta soldada aquecida e a zona termicamente afetada (ZTA) martensítica circundante não se contraem na mesma medida e taxa que o metal de solda (Davis, 1994).

Devido à sua resposta aos ciclos térmicos da soldagem, os aços inoxidáveis martensíticos são considerados os mais difíceis de soldar entre as cinco famílias de aços inoxidáveis. O grau de endurecimento na ZTA depende do teor de carbono do metal base, sendo que concentrações superiores a 0,15% resultam em maior dureza e, consequentemente, maior suscetibilidade à formação de trincas. Além das tensões localizadas associadas à mudança de volume durante a transformação martensítica, o risco de fissuração aumenta na presença de hidrogênio proveniente de diversas fontes no metal de solda (Davis, 1994).

A compreensão dos fatores que afetam a soldabilidade dos aços inoxidáveis é essencial para a aplicação bem-sucedida desses materiais. No caso do aço inoxidável duplex, o equilíbrio entre ferrita e austenita exerce influência significativa tanto nas propriedades mecânicas quanto na resistência à corrosão. No entanto, controlar esse equilíbrio nas soldas é mais complexo do que nos metais de base. O principal objetivo na soldagem do aço inoxidável duplex é obter uma zona fundida e uma zona afetada pelo calor com resistência à corrosão comparável à do metal de base e com propriedades mecânicas adequadas. Embora os aços inoxidáveis duplex geralmente apresentem boa soldabilidade, os processos de fusão e solidificação durante a soldagem por fusão comprometem a microestrutura duplex ideal desses materiais. A microestrutura dos aços inoxidáveis duplex forjados apresenta uma orientação característica das ilhas de austenita na matriz ferrítica, dispostas paralelamente e transversalmente à direção de laminação. Entretanto, a soldagem por fusão altera essa microestrutura, resultando em grãos grosseiros de ferrita e em fases de austenita intergranular no metal de solda e na zona termicamente afetada (ZTA) (Pramanik e Basak, 2015).

2.5 CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) nas operações de soldagem, a realização de soldas inadequadas durante a fabricação de determinados tipos de estruturas ou equipamentos pode resultar em sérios acidentes, com grandes perdas materiais, eventualmente humanas, além de danos ao meio ambiente. Como consequência, diversos aspectos das operações de soldagem para diferentes aplicações são regulamentados por códigos, especificações e outras normas, de acordo com a aplicação específica.

Dessa forma, torna-se necessária a realização de testes para avaliar os procedimentos executados, sendo o ensaio metalográfico um dos métodos que podem ser requisitados.

2.5.1 Ensaio Metalográfico

A correlação entre propriedades e microestrutura, realizada por meio da investigação metalográfica, pode envolver uma análise qualitativa, como a observação da morfologia e da homogeneidade das estruturas, bem como uma análise quantitativa, por meio da medição de parâmetros microestruturais, tais como a fração volumétrica das fases presentes, a distribuição e o tamanho de grão das microestruturas (Souza, 2008).

De acordo com o tipo de observação, o ensaio pode ser classificado como:

- a) Macrografia
- b) Micrografia.

Segundo Colpaert (2008), macrografia é o termo empregado para designar os registros que reproduzem a macroestrutura de um material em tamanho natural ou com ampliação máxima de até 10 vezes.

O exame macroscópico, em geral, não exige o mesmo grau de suavidade superficial requerido nos exames microscópicos. Técnicas de preparação, como o ataque químico, são frequentemente prolongadas para realçar as características superficiais; por essa razão, não se recomendam medições quantitativas em amostras submetidas ao ataque macroquímico (Voort, 2004).

Na micrografia, existem diversas técnicas de observação da microestrutura dos aços e ferros fundidos, sendo a mais comum a microscopia óptica (Colpaert, 2008). Essa técnica é amplamente empregada na investigação metalográfica de estruturas, com ampliações que variam de 50 a 1000 vezes (Bramfitt e Lawrence, 2004).

A caracterização óptica das microestruturas de metais e ligas, realizada com luz visível, envolve a identificação e a medição de fases, precipitados e constituintes, bem como a determinação do tamanho e da forma dos grãos, da extensão das maclas e de determinadas características dos contornos de grão e de outros defeitos observáveis. Como as características microestruturais são tridimensionais, enquanto a observação metalográfica geralmente fornece apenas representações bidimensionais, uma análise microscópica eficaz frequentemente requer observações da microestrutura em duas ou mais direções (Voort, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A avaliação das juntas soldadas será conduzida por meio de três etapas principais: inspeção visual, análise macrográfica e micrográfica. Inicialmente, a inspeção visual será realizada para identificar descontinuidades superficiais e irregularidades no cordão de solda, permitindo uma primeira verificação da integridade e da qualidade do processo. Em seguida, será efetuada a análise macrográfica, na qual as amostras serão seccionadas, lixadas, atacadas quimicamente e examinadas com o objetivo de observar a geometria do cordão, a zona termicamente afetada, a penetração e possíveis descontinuidades internas.

Por fim, será realizada a análise micrográfica, destinada a observar as características internas do material após a soldagem, identificando possíveis modificações decorrentes do ciclo térmico e verificando a uniformidade estrutural da região soldada. Permitindo uma avaliação completa da qualidade das juntas e dos efeitos do processo de soldagem sobre o material.

3.2 MATERIAIS

O material de base (MB) utilizado neste estudo foi o aço inoxidável austenítico AISI 301, fornecido na forma de chapas retangulares com espessura de 3,00 mm. O eletrodo utilizado na soldagem, correspondente ao material de adição (MA), foi o tipo E309L.

As composições químicas nominais do MB e do MA, conforme especificado na norma, estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Composição química do MB e MA (% em peso).

MB	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni		
	0.15	2.00	1.00	0.045	0.030	16.00~18.00		6.00~8.00	
MA	C	Mn	Si	Mo	S	Cr	Ni	P	Cu
	0.04	0.5~2.5	1.00	0.75	0.03	22.0~25.0	12.0~14.0	0.04	0.75

Fonte: AWS (2006).

3.3 SOLDAGEM DO MATERIAL

As superfícies de corte foram preparadas com o objetivo de eliminar rebarbas, possibilitando a execução da soldagem. Utilizou-se uma junta de topo sem folga entre as chapas. Antes da soldagem, foi realizada a limpeza das superfícies, com o intuito de minimizar a ocorrência de possíveis defeitos na solda. A solda foi realizada com o consumível E309L, utilizando dois passes, um em cada lado da junta.

As condições de soldagem foram definidas com base em referências de catálogos de fornecedores, sendo posteriormente ajustadas experimentalmente para esta aplicação específica. As faixas de aplicação do eletrodo E309L estão apresentadas na Tabela 8.

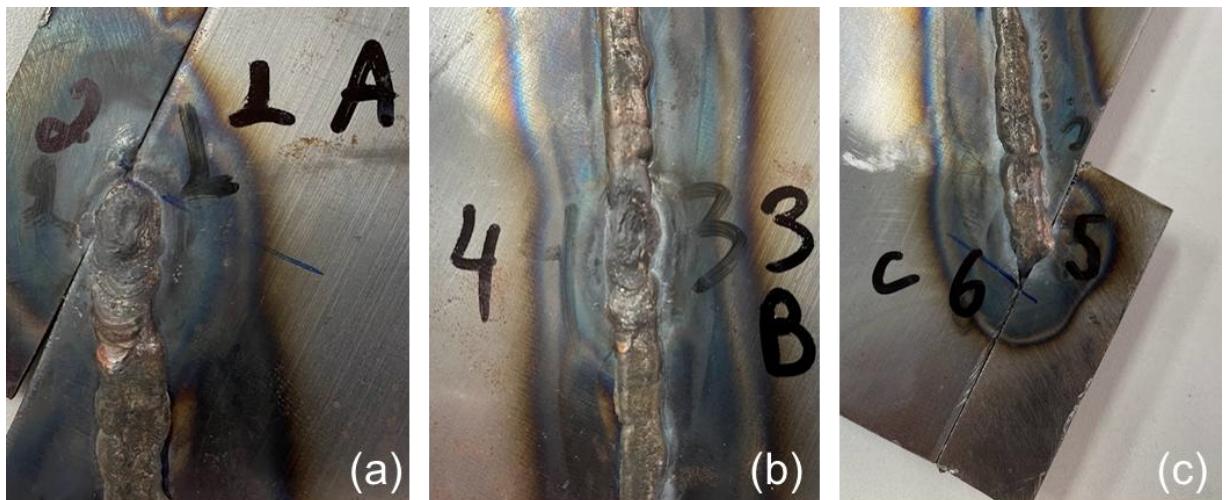
Tabela 8. Faixa de condições de soldagem para o eletrodo E309L (\varnothing 2,5 mm).

Tensão	Corrente	Taxa de deposição de 90% I máx
28 a 31 V	50 a 90 A	0.9 kg/h

Fonte: Adaptado de ESAB (2022).

Após a conclusão do processo de soldagem, foram selecionadas três seções ao longo do cordão de solda para a retirada dos corpos de prova, conforme ilustrado a seguir.

Figura 13. (a) amostra A, (b) amostra B, (c) amostra C, após a soldagem.



Fonte: Autor

3.4 METALOGRAFIA

As amostras foram seccionadas utilizando uma cortadora metalográfica, assegurando um corte sem alterações na microestrutura. O procedimento visou obter dimensões compatíveis com o processo de embutimento, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14. (a) amostra A, (b) amostra B, (c) amostra C, após o corte.



Fonte: Autor

A etapa seguinte consistiu no embutimento das amostras a quente, realizado em uma prensa embutidora metalográfica automática, utilizando baquelite como material de moldagem.

Posteriormente, foi realizado o lixamento das amostras em uma politriz metalográfica, com o objetivo de remover riscos e marcas profundas presentes na superfície. Para isso, utilizou-se uma sequência de lixas de carbeto de silício com granulometrias progressivamente menores: 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. A cada

troca de lixa, as amostras eram giradas em 90°, garantindo a eliminação dos riscos da etapa anterior antes de prosseguir para a próxima.

Concluído o lixamento, as amostras foram limpas com álcool etílico, visando à completa remoção de resíduos abrasivos. Em seguida, iniciou-se o processo de polimento utilizando pasta de diamante, com o propósito de obter uma superfície livre de quaisquer marcas deixadas pela última lixa.

3.5 MICROSCOPIA

Na sequência do polimento, foi realizado o ataque químico das amostras, utilizando-se um reagente composto por uma mistura de 25 ml de água, 19 ml de ácido clorídrico (HCl) e 12 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Após o ataque, as amostras foram lavadas com água corrente, limpas com álcool etílico e, em seguida, secas com ar quente.

Após o ataque químico, as amostras foram encaminhadas ao microscópio óptico para a análise micrográfica. Durante a observação, foram utilizadas lentes com ampliações de 0,65x, 50x e 100x.

3.6 AVALIAÇÃO DA JUNTA

A avaliação das características do cordão de solda gerado pelo processo de soldagem com eletrodo revestido, na união de chapas em aço inoxidável AISI 301, foi realizada por meio de inspeção visual e ensaios metalográficos e microscopia.

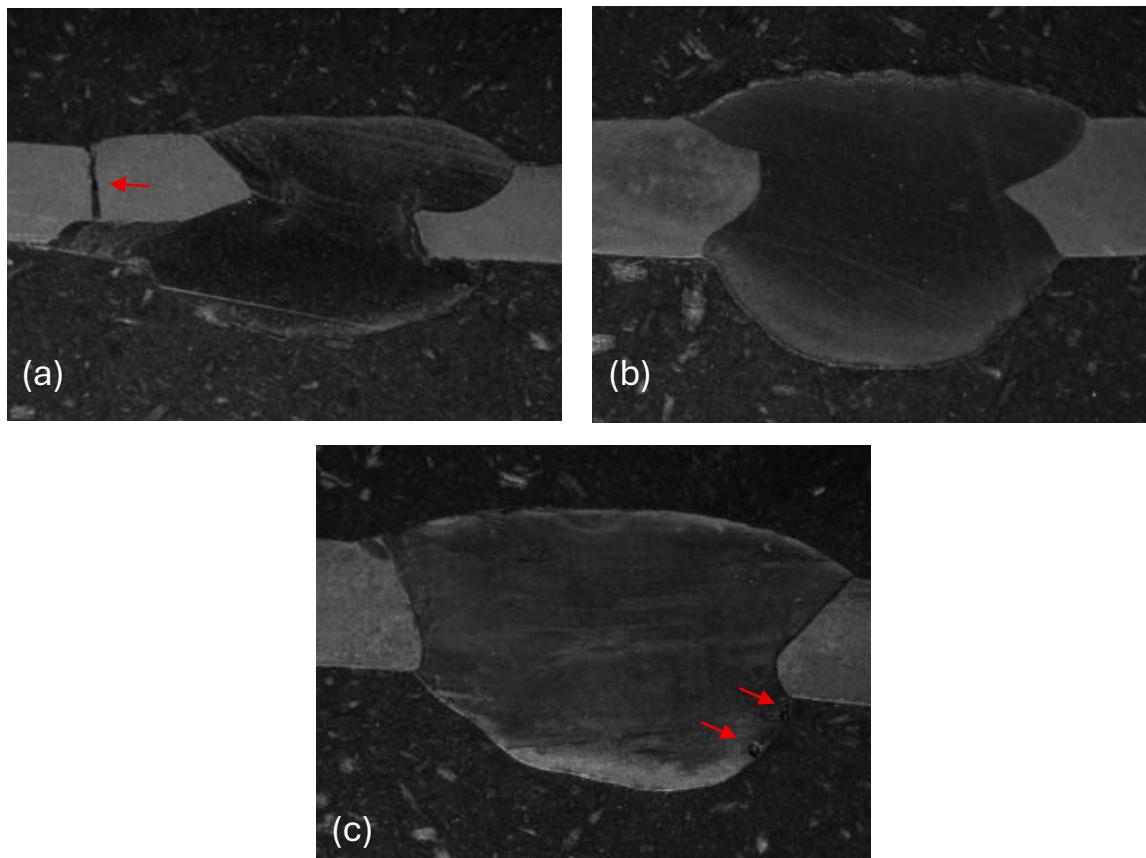
Inicialmente, na inspeção visual, observa-se que o cordão de solda apresenta acabamento superficial inadequado, evidenciado pela presença de mordeduras ao longo de suas bordas e por uma sequência de ondulações excessivas, conforme pode ser observado na Figura 13.

Esses aspectos indicam instabilidade no controle do arco e variações no avanço do eletrodo durante a execução do processo. A Figura 15 apresenta as

seções transversais do cordão de solda, evidenciando penetração total em todas as juntas analisadas. Entretanto, nota-se uma irregularidade na altura do cordão ao longo da soldagem, possivelmente relacionada ao manuseio inadequado da tocha e à baixa velocidade de avanço em determinados trechos.

Adicionalmente, foram identificadas descontinuidades, como a falta de união na amostra A e a presença de porosidade na extremidade inferior direita da amostra C.

Figura 15. Macrografias da seção transversal - (a) Amostra A; (b) Amostra B; (c) Amostra C.



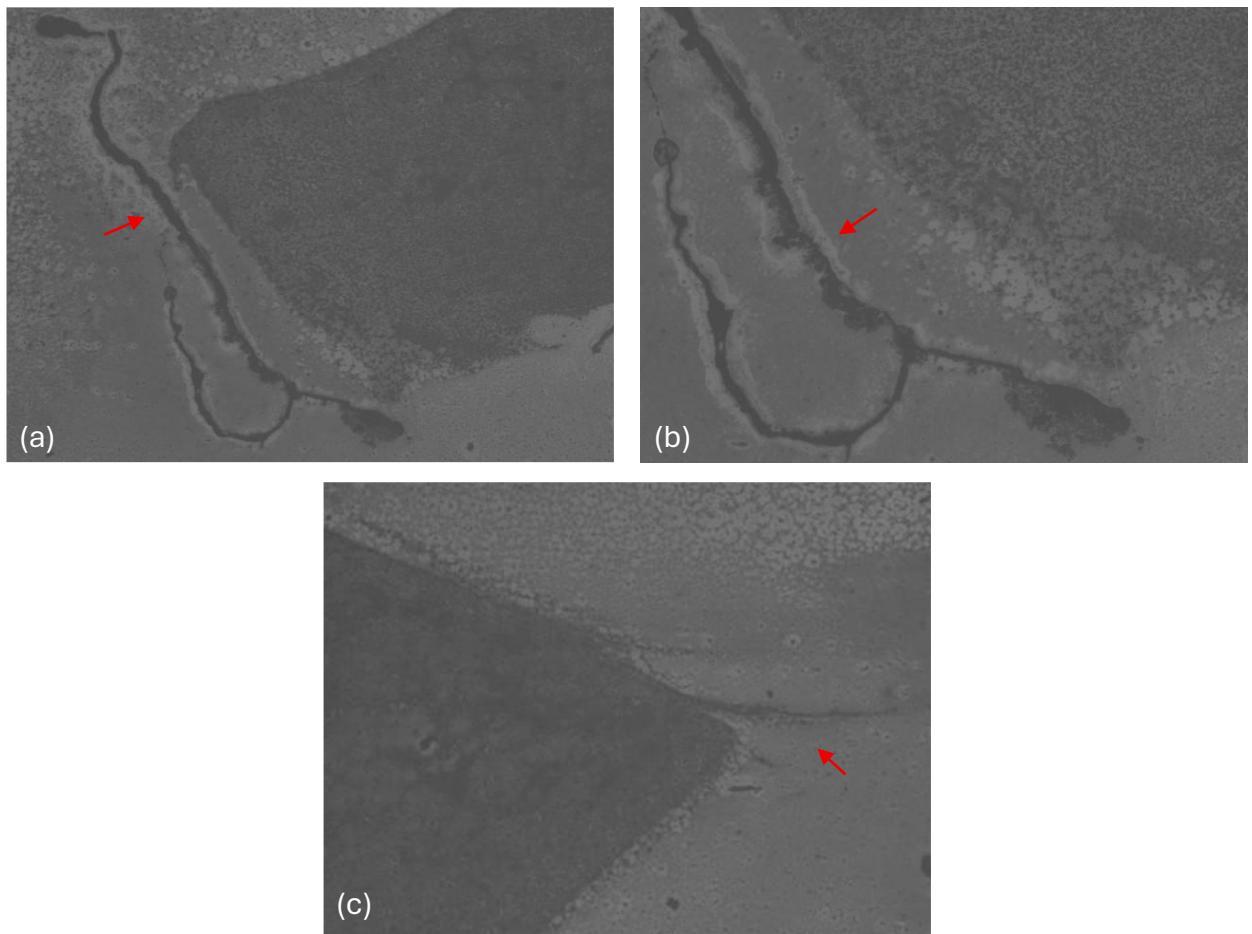
Fonte: Autor

Na Figura 15a, observam-se descontinuidades no metal de adição, localizadas próximas à interface com o metal de base. Essas indicações podem corresponder a rechupe, um defeito que ocorre durante a solidificação. Nesse processo, há uma contração volumétrica decorrente da redução de temperatura. Caso não haja metal líquido suficiente para compensar essa variação de volume, formam-se regiões ocas no interior da massa metálica. Além disso, foi evidenciada a

falta de união na região da amostra A, a qual pode ter sido ocasionada por manuseio inadequado da tocha de soldagem, adoção de parâmetros de soldagem incorretos ou ainda por preparação inadequada da junta.

A Figura 16 apresenta imagens obtidas por microscopia óptica na região do material de adição onde foi identificada a descontinuidade previamente mencionada. Nas micrografias, é possível visualizar regiões ocaas características de rechuve.

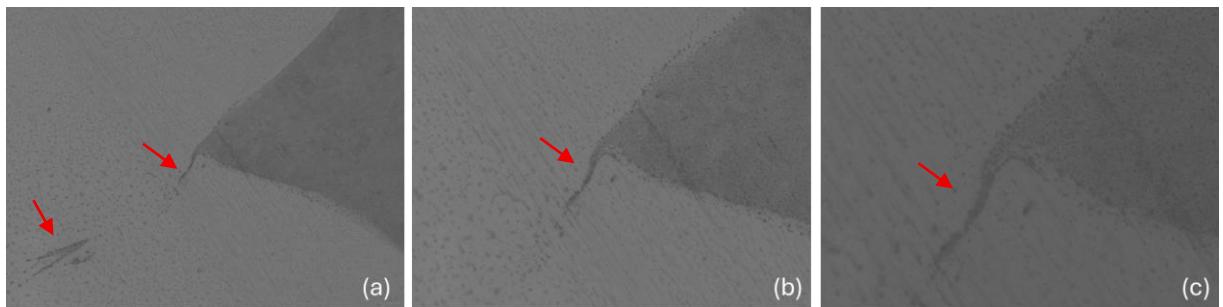
Figura 16. Falha por rechuve na amostra A: (a) e (c) ampliação de 50x; (b) 100x.



Fonte: Autor

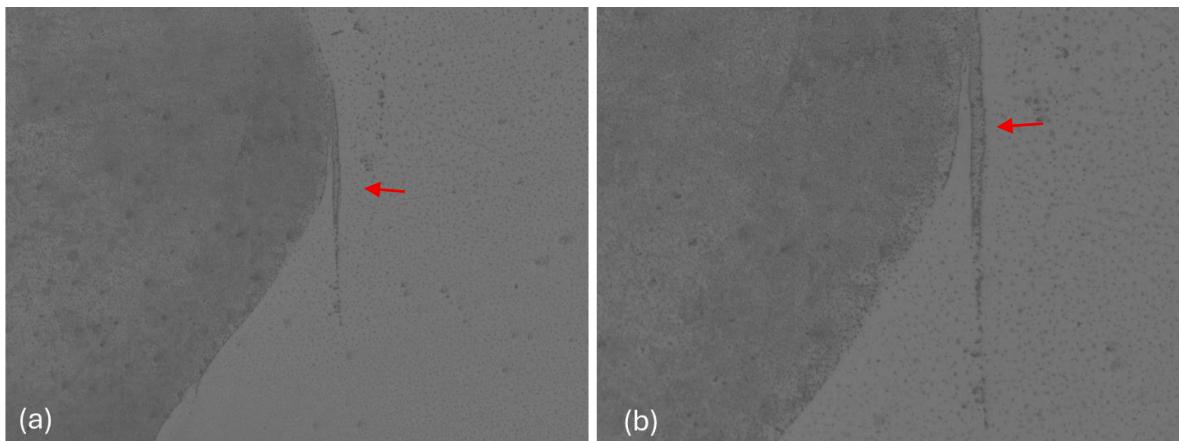
Na amostra B, também foi possível identificar a presença de rechuve, o mesmo tipo de descontinuidade observado na amostra A, porém com menor intensidade e extensão, conforme ilustrado nas Figuras 17 e 18.

Figura 17. Falha por rechupe na amostra B: (a) ampliação de 50x; (b) 100x e (c) 200x.



Fonte: Autor

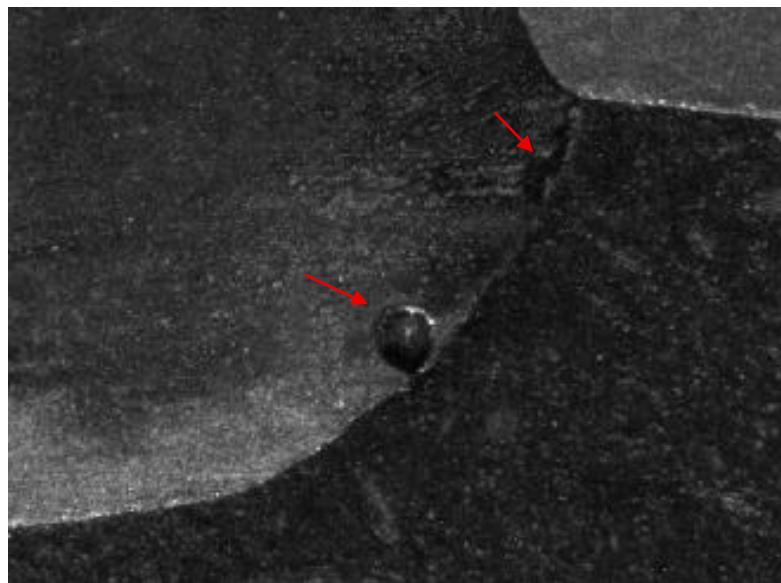
Figura 18. Falha por rechupe na amostra B: (a) ampliação de 50x; (b) 100x.



Fonte: Autor

A Figura 19 apresenta uma descontinuidade do tipo porosidade, presente na amostra C. Segundo Trevisan (2007), esse tipo de falha pode ocorrer pelo aprisionamento de gases na zona fundida durante a solidificação, ou ainda pela utilização de correntes excessivamente altas, que elevam a temperatura da poça de fusão e aumentam a solubilidade de gases como o oxigênio, favorecendo a formação de poros.

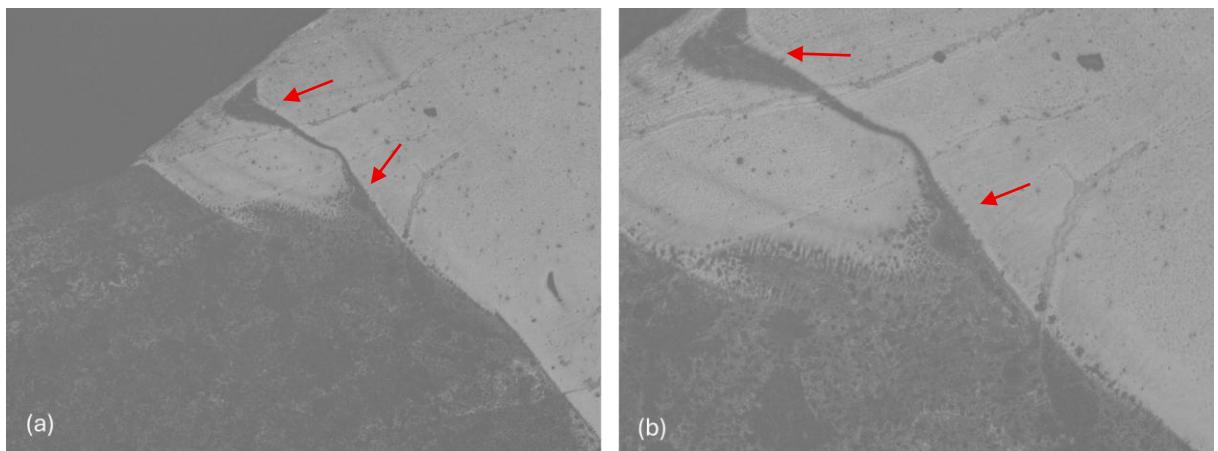
Figura 19. Falha por porosidade na região inferior do cordão da amostra C.



Fonte: Autor

Seguindo o padrão observado nas demais amostras, a região da solda correspondente à amostra C também apresenta marcas de chupagem, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20. Falha por rechupe na amostra C: (a) ampliação de 50x; (b) 100x.



Fonte: Autor

A análise da solda evidenciou a presença de descontinuidades intrínsecas que comprometem a integridade microestrutural dos cordões. O rechupe, identificado com diferentes intensidades nas amostras A e B, configura-se como um defeito crítico de solidificação, resultante da contração volumétrica do metal líquido e

da insuficiência de material para compensar essa redução durante o resfriamento (Easterling, 2004). Sua ocorrência indica a necessidade de ajustes nas condições de solidificação e no controle do volume de metal de adição.

A porosidade, observada na amostra C, sugere aprisionamento de gases na zona fundida, agravado por temperaturas elevadas da poça de fusão, que aumentam a solubilidade de gases como o oxigênio (Trevisan, 2007).

Adicionalmente, a falta de união identificada na amostra A ressalta a importância da técnica operatória, da correta definição dos parâmetros de soldagem e da adequada preparação da junta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A junta soldada em aço inoxidável AISI 301, utilizando eletrodo revestido E309L (\varnothing 2,5 mm), foi avaliada por meio de inspeção visual e microscópica. O ensaio exigiu que o soldador realizasse a preparação da junta, a escolha da corrente e da tensão de soldagem, a definição da melhor posição de execução, bem como o controle da velocidade de avanço e da aproximação do eletrodo.

Na inspeção visual das juntas, constatou-se que o cordão de solda não apresentou acabamento superficial adequado, evidenciando mordeduras e ondulações acentuadas. Esses indicadores refletem instabilidades durante a execução do processo, revelando limitações no controle do arco e na condução do eletrodo, o que influencia diretamente a qualidade final da solda.

As análises microestruturais indicaram que, apesar da penetração completa do cordão em todas as amostras, foram observadas descontinuidades que comprometem a integridade da junta soldada. Foram identificados defeitos como falta de fusão, considerada uma descontinuidade linear inaceitável segundo a norma AWS B2.1:2005, rechupe, porosidade localizada e irregularidades ao longo do cordão de solda.

O soldador encontra-se em fase de formação pela empresa, motivo pelo qual ainda não domina completamente a técnica e necessita de maior número de horas de prática supervisionada. As falhas observadas estão diretamente relacionadas à falta de experiência na definição de parâmetros e na execução contínua da soldagem.

Diante do exposto, conclui-se que o soldador não está apto para realizar soldagens em aplicações que demandem alta confiabilidade estrutural. Recomenda-se a continuidade do treinamento, com ênfase na repetição prática, no ajuste de parâmetros conforme Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) e na execução de novos corpos de prova até que sejam obtidos resultados compatíveis com os critérios normativos de aceitação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.4/A5.4M**: Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. Miami, 2006.

BARBUCCI, A.; DELUCCHI, M.; PANIZZA, M.; SACCO, M.; CERISOLA, G. Electrochemical and corrosion behaviour of cold rolled AISI 301 in 1 M H₂SO₄. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 317–318, 2001, p. 607-611. Doi: 10.1016/S0925-8388(00)01396-7. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838800013967>. Acesso em: 18 fev. 2025.

BRAMFITT, B. L.; LAWRENCE, S. J. **Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels**. In: ASM Handbook. Metallography and Microstructures. Metals Park, Ohio: ASM, 2004.

CASARIN, S. J. **Manufatura mecânica: Soldagem**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.

COBB, H. M. **The History of Stainless Steel**. ASM international, 2010.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2008.

CORDEIRO, Amilton. **Tecnologia da Soldagem**. Sorocaba: Centro Paula Souza, 2013.

Dados estatísticos 2024: Consumo aparente do aço inoxidável. Associação Brasileira de Aço Inoxidável, 2025. Disponível em: <https://abinox.org.br/estatisticas/>. Acesso: 15 jun. 2025.

DAVIS, J. R. et al. (Ed.). **Stainless steels**. ASM international, 1994.

EASTERLING, Kenneth. **Introduction to the physical metallurgy of welding**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.

Eletrodo E309L. **Delarco Soldas Especiais**. Disponível em:
<https://delarcosoldas.com.br/produto/eletrodo-revestido-de-aco-inox-e309l-16/>.
Acesso: 13 mar. 2025.

ESAB. **Catálogo de Consumíveis**, 2024. Disponível em:
https://esab.com.br/sam_pt/support/tools/resources/catalogos-de-produtos-esab/
Acesso em: 25 ago. 2025.

FOLKHARD, E. **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. Viena: Springer-Verlag, 1988.

GNANASEKARAN, S.; KUMAR, S. S.; VENUGOPAL, N.; UPADHYAYA, M.; MANJUNATH, T. C.; CHELLADURAI, S. J. S.; PADMANABAN, G. Effect of laser power on microstructure and tensile properties of pulsed Nd:YAG laser beam welded AISI 301 austenitic stainless steel joints. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, part 2, 2021, p. 934-939. ISSN 2214-7853. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.145. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320345995>. Acesso em: 18 fev. 2025.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. Estados Unidos: Pearson Education, 2020.

KOU, S. **Welding metallurgy**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: Processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MCGUIRE, M. **Stainless Steels for Design Engineers**. ASM international, 2008.

MODENESI, P. J. **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001.

NASCIMENTO, Alexandre Saldanha do. **Fontes de Soldagem – Notas de Aula da Disciplina Processos de Soldagem**. Escola Técnica Estadual do Município de Belém – ETEMB, Mecânica. Belém, PA. Abril, 2009.

NERIS, M. M. **Soldagem**. Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2012.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1982.

PRAMANIK, A.; BASAK, A. **Stainless steel: microstructure, mechanical properties and methods of application**. New York: Editora Nova Science Publishers, 2015.

PEIXOTO, A. L. **Soldagem**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012.

PETROBRAS. **Norma nº 1737: Inspeção de soldagem - qualificação de pessoal. Módulo 06: metalurgia da soldagem**. FBTS, 1983.

SILVA, A. L. C; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Eletrometal S.A Metais Especiais, 1988.

SILVA, Ramsés. **Caracterização da zona termicamente afetada de aço produzido via resfriamento acelerado**. 2010. 214 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga com estrutura bainítica/martensítica, via microscopia óptica**. 2008. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

TREVISAN, R. E. **Análise Da Porosidade Em Juntas Soldadas Pelo Processo Mig/Mag Robotizado**. Campinas: Def-Fem-Unicamp, 2007.

VOORT, G. F. V. **Metallography and microstructures**. ASM international, 2004.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2004.

WEMAN, K. **Welding processes handbook**. Cambridge: Editora Woodhead Publishing, 2012.