



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Engenharia Mecânica - ITec



Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL 304 DE BAIXA ESPESSURA, APÓS SOLDAGEM TIG

Autor 1 – Douglas Henrique Ramos

183978@upf.br

Autor 2 – Dr. William Haupt

williamhaupt@upf.br

Comissão Examinadora – Me. Lucas Zavistanovicz e Me. Auro Candido Marcolan

RESUMO

Este trabalho avalia as propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável 304 de baixa espessura, submetido ao processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG). Utilizando um eletrodo ER308L e solda autógena, foram analisadas amostras de aço inoxidável 304 para compreender os efeitos dessas técnicas de soldagem nas características do material. Os resultados indicam que a soldagem TIG, com ambos os métodos, impacta significativamente as propriedades do aço, como resistência à corrosão, resistência mecânica e ductilidade. A análise microestrutural revelou mudanças nos grãos e a formação de fases intermetálicas, evidenciando a importância de uma avaliação detalhada pós-soldagem. Conclui-se que a soldagem TIG pode alterar substancialmente as propriedades do aço inoxidável 304 de baixa espessura, sendo crucial para a otimização de processos industriais.

Palavras-chave: Aço inoxidável 304; Soldagem TIG; Solda autógena; Eletrodo ER308L; Propriedades mecânicas; Microestrutura; Avaliação pós-soldagem.

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável 304 é um material amplamente utilizado na indústria devido às suas excepcionais propriedades, que incluem resistência à corrosão, durabilidade, e boa usinabilidade. Sua aplicação abrange diversas indústrias, desde a química e alimentícia até a automobilística e aeroespacial. Especificamente, o interesse em materiais de baixa espessura, como o de 2 milímetros, tem crescido, uma vez que esses materiais são frequentemente empregados em componentes leves e estruturas que exigem alta resistência e resistência à corrosão (Vidal, 2022).

A soldagem é uma técnica comumente utilizada para unir peças de aço inoxidável, permitindo a fabricação de estruturas complexas e componentes personalizados. No entanto, a soldagem pode afetar significativamente as propriedades mecânicas e microestruturais do material, tornando crucial a avaliação dessas mudanças para garantir a qualidade e a integridade das soldas (de Souza, Nunes e Paganini, 2019).

Nesse contexto, a soldagem *Tungsten Inert Gas* (gás inerte tungstênio-TIG) se destaca como um dos processos de soldagem preferenciais para materiais de alta qualidade, como o aço

inoxidável 304. A soldagem TIG utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível e gás inerte para criar uma atmosfera controlada que protege a poça de fusão da contaminação atmosférica, resultando em soldas de alta qualidade (Nunes, 2022).

Em muitas indústrias, como aeroespacial, automobilística, petroquímica e de alimentos, a qualidade dos materiais é de extrema importância. Qualquer falha ou inadequação nas propriedades dos materiais pode levar a consequências graves, incluindo acidentes, falhas de equipamentos e perda de vidas (Morais e Arantes, 2021). Portanto, avaliar minuciosamente as propriedades do aço inoxidável 304 após a soldagem é essencial para garantir a qualidade e a segurança dos produtos finais.

A análise microestrutural, por exemplo, permite identificar possíveis imperfeições na estrutura do material, como inclusões, trincas, porosidades ou mudanças indesejadas na microestrutura. Isso é fundamental para otimizar os processos de soldagem e garantir que o material seja fabricado de forma eficiente e econômica (Gheno et al., 2019).

Dado o exposto, compreender como diferentes processos de soldagem afetam o aço inoxidável ajuda na seleção adequada de materiais para aplicações específicas. Isso é particularmente importante em setores onde a escolha de materiais inadequados pode resultar em falhas prematuras ou alto custo de manutenção.

O aço inoxidável *American Iron and Steel Institute* (AISI) 304, renomado por suas propriedades excepcionais, apresenta-se como uma escolha primordial em diversas indústrias devido à sua notável resistência à corrosão, durabilidade e facilidade de usinagem. No entanto, quando submetido ao processo de soldagem, essas propriedades podem sofrer alterações substanciais, particularmente no que diz respeito às características mecânicas. A soldagem introduz uma série de desafios, influenciando a resistência, tenacidade e outras propriedades mecânicas do material. Compreender essas mudanças é essencial para assegurar a aplicabilidade das soldas em diferentes contextos industriais, onde o desempenho mecânico exerce um papel crucial na confiabilidade estrutural.

A avaliação minuciosa das propriedades mecânicas das soldas em aço inoxidável AISI 304 torna-se ainda mais relevante em setores exigentes, como o aeroespacial e o automotivo, onde os componentes estão sujeitos a condições operacionais extremas. A resistência à tração, tenacidade e outras métricas mecânicas não só impactam a durabilidade dos componentes, mas também desempenham um papel vital na prevenção de falhas prematuras e garantia da segurança. Assim, este estudo visa preencher uma lacuna na compreensão das implicações da soldagem nas propriedades mecânicas do AISI 304, oferecendo insights valiosos para a seleção criteriosa de processos de soldagem e materiais, aprimorando a qualidade e a segurança dos produtos finais.

1.1 Justificativa e descrição do problema

O aço inoxidável 304 é um material de destaque na indústria metalúrgica devido às suas notáveis propriedades de resistência à corrosão, ductilidade e versatilidade. Sua aplicação é vasta, encontrando-se em equipamentos químicos, recipientes de alimentos, sistemas de exaustão automotiva, componentes eletrônicos e em inúmeras outras áreas da indústria (de Jesus, Daleffé e da Rosa 2019). No entanto, um desafio significativo surge quando se trata de soldagem de aço inoxidável 304 em baixa espessura, com placas de apenas 2 milímetros, uma característica que é frequentemente necessária em aplicações onde o peso, o espaço e a eficiência são considerações críticas.

A soldagem de aço inoxidável 304 de baixa espessura não é uma tarefa simples. Devido à sua natureza fina, essas placas são altamente sensíveis ao calor gerado durante o processo de soldagem, o que pode resultar em deformações, distorções e tensões residuais que comprometem a integridade estrutural. Além disso, a soldagem pode levar à formação de fases indesejáveis na região afetada pelo calor (ZAC), afetando negativamente as propriedades mecânicas e microestruturais do material. É, portanto, imperativo entender como a soldagem afeta o aço inoxidável 304 de baixa espessura e, mais importante, como esses efeitos podem ser amenizados para garantir a qualidade e a segurança das soldas e dos produtos finais (de Souza et al., 2019).

Assim, compreende-se então que a soldagem TIG de aço inoxidável 304 de baixa espessura (2 milímetros) é amplamente utilizada em diversas aplicações industriais, mas enfrenta desafios significativos devido à sensibilidade do material ao calor concentrado durante o processo. Isso resulta em deformações, distorções, tensões residuais e possíveis alterações na microestrutura, afetando a integridade e a qualidade das soldas. Além disso, a escolha entre o eletrodo ER308L e a solda autógena na soldagem pode influenciar as propriedades finais do material, mas a compreensão detalhada de como esses métodos afetam o aço inoxidável 304 de baixa espessura ainda não está completamente esclarecida.

Portanto, o problema de pesquisa central é: Como a soldagem TIG afeta as propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável 304 de baixa espessura (2 mm) a partir da utilização de eletrodo ER308L e da solda autógena, e quais são as aplicações mais adequadas para cada método de soldagem, considerando a resistência e a ductilidade?

A justificativa por trás deste estudo é fornecer uma análise abrangente das implicações da soldagem de aço inoxidável 304 de baixa espessura com eletrodo ER308L e solda autógena, preenchendo uma lacuna no conhecimento existente. Esta pesquisa visa contribuir para o aprimoramento das práticas de soldagem, oferecendo insights valiosos sobre como otimizar a soldagem de aços inoxidáveis de baixa espessura em aplicações industriais críticas. Ao avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais, pretende-se fornecer informações cruciais que podem ser aplicadas para melhorar a qualidade das soldas, reduzir defeitos e garantir a integridade estrutural. Portanto, a importância de realizar uma avaliação minuciosa das propriedades após a soldagem não pode ser subestimada, pois pode ter um impacto significativo na qualidade e no desempenho de produtos que dependem do aço inoxidável 304 de baixa espessura.

1.2 Objetivo Geral

Analisar as propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável 304 após a soldagem TIG, utilizando amostras de baixa espessura e diferentes métodos de soldagem.

1.3 Objetivos específicos

- Investigar a influência do eletrodo ER308L e da solda autógena no processo de soldagem TIG;
- Avaliar as propriedades mecânicas, como resistência à tração e dureza, após o processo de soldagem;
- Analisar as mudanças microestruturais do material antes e após a soldagem;
- Contribuir para o conhecimento sobre a aplicação do processo de soldagem TIG em aço inoxidável de baixa espessura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa é apresentado um estudo sobre a soldagem TIG em aço inoxidável 304, com foco no eletrodo ER308L e na solda autógena, analisando suas composições, propriedades e aplicações específicas. Também são demonstrados os métodos essenciais de análise de propriedades mecânicas e microestruturais, oferecendo insights sobre a avaliação da qualidade das juntas soldadas. A complexidade da soldagem de materiais de baixa espessura é abordada, destacando os desafios específicos e as considerações de projeto e práticas recomendadas. Ademais, as tendências atuais e futuras na soldagem de aço inoxidável, incluindo automação, novas tecnologias e questões ambientais, revelam um cenário empolgante para a evolução contínua dessa técnica vital na indústria.

2.1 Características do aço inoxidável 304

O aço inoxidável 304, a seguir apresentado, é um material vastamente reconhecido e utilizado por várias indústrias devido ao fato de possuir propriedades notáveis, sejam elas físicas, químicas e/ou mecânicas. Tais qualidades contribuem para a amplitude de uso e importância desse material.

Uma das propriedades mais destacadas do aço inoxidável 304 é a sua evidente resistência à corrosão. Ele possui uma alta capacidade de resistir à oxidação e à corrosão em ambientes variados, tornando-o ideal para aplicações onde o contato com líquidos ou substâncias corrosivas é comum. Essa resistência é atribuída à presença de cromo em sua composição química, que forma uma camada passiva de óxido de cromo na superfície do material, protegendo-o da corrosão (De Jesus e Daleffe, 2019). Além da resistência à corrosão, esse aço exibe uma excelente resistência mecânica. Isso significa que ele pode suportar cargas e tensões consideráveis sem deformações excessivas ou falhas. Essa propriedade é essencial em aplicações em que a força estrutural é crítica, como na fabricação de equipamentos industriais, peças automotivas e componentes estruturais (MORAIS e ARANTES, 2021).

Outra característica essencial do aço inoxidável 304 é a sua ductilidade, isto é, o alongamento que esse material pode suportar antes de se romper, fazendo com que possa ser moldado em formatos diferenciados sem danos. De mesmo modo, esse aço apresenta capacidade de condução térmica e elétrica, tornando-se útil nas áreas afins.

A dureza moderada desse aço permite uma boa usinagem e fabricação, ao mesmo tempo que, mantém sua capacidade de resistir à abrasão. Além disso, sua estabilidade em faixas de temperatura amplas é outra característica relevante. Ele mantém suas propriedades mecânicas e químicas em temperaturas que variam de subzero até moderadamente elevadas, tornando-o adequado para aplicações em ambientes com variações térmicas (De JESUS e DALEFFE, 2019).

A combinação dessas propriedades torna o aço inoxidável 304 um material de grande valia para a utilização nas indústrias devido a resistência à corrosão, a força mecânica, a ductibilidade e a condução térmica e elétrica, como por exemplo: nas indústrias alimentícias, automobilísticas, aeronáuticas, aeroespaciais, ferroviárias, têxteis, entre outros. O Quadro 1 apresenta a composição química do aço inoxidável 304 conforme os padrões da norma AISI (*American Iron and Steel Institute*). Essa composição detalha a presença de diferentes elementos, como carbono, manganês, silício, fósforo, enxofre, cromo, níquel e nitrogênio, fornecendo informações essenciais sobre a constituição desse material.

Quadro 1 - Composição química do aço inoxidável 304.

AISI	C (Carbono)	Mn (Manganês)	Si (Silício)	P (Fósforo)	S (Enxofre)	Cr (Cromo)	Ni (Níquel)	N (Nitrogênio)
304	0,08	2,00	0,75	0,045	0,03	18-20	8-10,5	0,10

Fonte: Adaptado de Dias (2009).

Esses dados são cruciais para compreender a proporção de elementos presentes no aço 304, o que impacta diretamente suas propriedades físicas e químicas.

O Quadro 2 destaca as propriedades mecânicas específicas do aço inoxidável 304, considerando laminados a frio. Ela oferece informações sobre o limite de resistência, limite de escoamento, alongamento, dureza Rockwell-B e limite de fadiga desse material, fundamentais para compreender sua resistência e comportamento sob tensão.

Quadro 2 - Propriedades mecânicas para laminados a frio do aço inoxidáveis 304.

AISI	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento 50mm (%)	Dureza Rockwell-B (HRB)	Limite de Fadiga (MPa)
304	700	300	54	85	241

Fonte: Adaptado de Dias (2009).

Essas propriedades mecânicas são fundamentais para determinar a aplicabilidade do aço 304 em diversas indústrias e cenários de uso.

Adicionalmente o Quadro 3 detalha as propriedades físicas do aço inoxidável 304, incluindo dados como densidade, calor específico, resistividade elétrica, condutividade térmica, módulo de elasticidade e módulo de rigidez. Essas propriedades físicas são essenciais para entender o comportamento do material em relação ao calor, eletricidade e outras características fundamentais.

Quadro 3 - Propriedades físicas para o aço inoxidável 304.

AISI	P (g/cm ³)	Calor Específico 0 - 100°C (kCal/kg°C)	Resistividade Elétrica à Tamb (μΩ-cm)	λ (cal/scmoC)	E (GPa)	Módulo Rigidez (GPa)
304	8	0,29	70	0,033	193	86,2

Fonte: Adaptado de Dias (2009).

Essas informações físicas são cruciais para determinar a viabilidade e a aplicação do aço 304 em diferentes contextos industriais e de engenharia.

Segundo Dias (2009), *apud* (HERTZBERG, 1996) as características microestruturais do aço inoxidável 304 são afetadas pelas condições de processamento termomecânico a que é submetido. A Figura 1 mostra uma fotomicrografia do material em seu estado original e descreve como a microestrutura dos grãos de austenita muda quando submetidos a deformações com irregularidades ou degraus significativos nos limites dos grãos. Essas irregularidades podem surgir devido à nucleação dos gêmeos, que são formados a partir de marcas produzidas durante o processo de formação. A deformação plástica leva a um aumento no número de discordâncias e defeitos atômicos, o que desempenha um papel fundamental na interação entre movimento de discordância, partículas precipitadas e limites de grão.

Figura 1 - Micrografia óptica com campo polarizado do aço inoxidável AISI 304 no estado original.



Fonte: Dias (2009), *apud* (Hertzberg, 1996).

A maioria das mudanças significativas no comportamento e na resistência à corrosão local do aço inoxidável austenítico 304 são influenciadas principalmente pela sua microestrutura.

2.1.1 Efeitos da composição química na soldabilidade

A composição química do aço inoxidável 304 desempenha um papel fundamental na sua soldabilidade, especialmente quando se utiliza eletrodos ER308L e solda autógena. Esses aços inoxidáveis têm composições químicas diferentes, o que influencia diversos aspectos da soldagem, incluindo a formação de fases e a susceptibilidade à corrosão (de SOUZA et al., 2019).

O aço inoxidável 304 é um aço austenítico com uma composição química geralmente composta por cerca de 18% de cromo e 8% de níquel, com pequenas quantidades de elementos de liga, como o manganês, conforme já demonstrado no Quadro 1. Ele é conhecido por sua boa resistência à corrosão em ambientes moderadamente corrosivos e por suas propriedades de soldagem favoráveis.

Os eletrodos ER308L são projetados especificamente para a soldagem do aço inoxidável 304. Eles têm uma composição química que se alinha com as características do 304, com teor de cromo e níquel semelhantes. Isso facilita a obtenção de juntas soldadas de alta qualidade, com resistência à corrosão comparável à do material base (MORAIS e ARANTES, 2021).

Por outro lado, a solda autógena, que é realizada sem a adição de material de enchimento, depende exclusivamente do material base para formar a junta soldada. No caso do aço inoxidável 304, isso significa que as propriedades da junta soldada serão muito semelhantes às do material base, uma vez que não há adição de outros elementos que possam alterar a composição química da junta. A solda autógena é particularmente útil em aplicações onde a precisão e a consistência da composição do material são críticas, e onde se deseja evitar a introdução de novos elementos que poderiam alterar as propriedades do material (PEREIRA et al., 2018).

Portanto, a escolha entre o uso do eletrodo ER308L e a solda autógena depende das condições de operação e dos requisitos específicos da aplicação. O eletrodo ER308L é ideal

para situações onde é necessária uma resistência à corrosão similar ao material base, enquanto a solda autógena é preferível quando se busca manter a composição original do aço inoxidável 304, evitando a introdução de novos elementos na junta soldada (de SOUZA et al., 2019).

2.2 Processo de soldagem TIG: princípios e aplicações

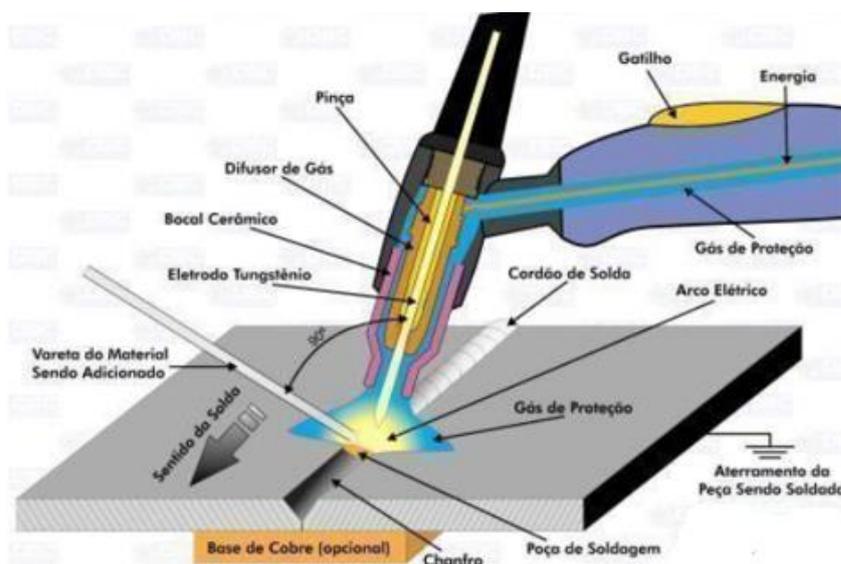
No processo TIG, um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça de trabalho. O tungstênio é escolhido como eletrodo devido à sua alta temperatura de fusão e à sua resistência à corrosão, tornando-o ideal para suportar o intenso calor gerado durante a soldagem. Este eletrodo não se consome durante o processo, o que significa que não se derrete e deposita metal na junta. Isso é importante em aplicações onde a precisão e a pureza do material soldado são cruciais (de SOUZA, NUNES e PAGANINI, 2019).

O arco elétrico produzido entre o eletrodo de tungstênio e a peça de trabalho é extremamente quente, alcançando temperaturas de até 6.000 graus *Celsius*. Essa alta temperatura é suficiente para fundir os materiais da peça de trabalho, permitindo a união das partes. O controle preciso do arco é alcançado através da regulação da corrente elétrica, que determina a quantidade de calor gerado. A corrente é ajustada de acordo com o tipo e a espessura dos materiais a serem soldados (CAETANO et al., 2019).

Um componente essencial do processo TIG é o gás inerte, geralmente argônio ou hélio. Esse gás é usado para proteger o banho de fusão e o eletrodo de tungstênio contra a oxidação e a contaminação durante o processo de soldagem. A escolha entre argônio e hélio depende da aplicação específica, uma vez que cada gás possui características diferentes de ionização e capacidade de proteção (PAIVA FILHO e dos RIBEIRO SOBRINHO, 2021).

O eletrodo de tungstênio não consumível, o arco elétrico controlado e o gás inerte permitem uma soldagem de alta qualidade, com menor risco de defeitos, como porosidade ou inclusões de gás. A precisão do processo TIG é uma vantagem em aplicações que requerem alta qualidade, como a fabricação de componentes para a indústria aeroespacial ou médica (de SOUZA, NUNES e PAGANINI, 2019). A Figura 2 mostra, a seguir, o esquema do processo de soldagem TIG.

Figura 2 - Esquema do processo de soldagem TIG.



Fonte: (CUNHA, 2008).

Uma das principais vantagens da soldagem TIG é a alta precisão que pode ser alcançada. O controle preciso da corrente elétrica e da abertura do arco permite que o soldador ajuste o calor aplicado com precisão milimétrica. Isso é particularmente importante em aplicações que exigem soldas de alta qualidade e precisão. A capacidade de produzir soldas extremamente precisas ajuda a evitar retrabalho e desperdício de material (FADRIQUE et al., 2021).

Outra vantagem significativa é o baixo respingo durante o processo TIG. Como o eletrodo de tungstênio não é consumido e não há revestimento na haste de soldagem, a produção de respingos é minimizada. Isso é especialmente benéfico em aplicações em que a limpeza dos respingos é problemática ou quando a preservação da integridade da peça é crítica. A redução do respingo também contribui para uma área de trabalho mais segura e limpa (CAETANO et al., 2019).

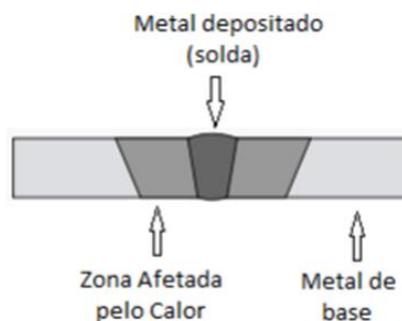
Além disso, a soldagem TIG é conhecida por sua capacidade de soldar uma ampla variedade de materiais. Desde aços inoxidáveis, alumínio e ligas de níquel até titânio e cobre, o processo TIG pode ser adaptado para atender às necessidades específicas de cada material. Essa versatilidade é fundamental em setores como o automotivo, onde diferentes ligas metálicas são frequentemente utilizadas, e na indústria química, onde a resistência à corrosão é essencial (de SOUZA, NUNES e PAGANINI, 2019).

A capacidade de soldar materiais de diferentes espessuras também é uma vantagem notável da soldagem TIG. Ela pode ser usada tanto em materiais finos quanto em espessuras mais robustas, tornando-se uma escolha confiável em aplicações que variam de soldagem de chapa metálica à fabricação de equipamentos pesados (FADRIQUE et al., 2021).

2.2.1 Efeitos da soldagem TIG nas propriedades dos materiais

Uma das principais maneiras pelas quais a soldagem TIG afeta as propriedades mecânicas dos materiais é por meio do aquecimento intenso causado pelo arco elétrico. Durante a soldagem, a zona afetada pelo calor (ZAC) experimenta um ciclo térmico acentuado, passando de altas temperaturas durante o processo de fusão para temperaturas mais baixas à medida que a solda esfria, conforme a Figura 3. Esse ciclo térmico pode resultar em mudanças na microestrutura do material, como a formação de uma zona de grãos mais grosseiros na ZAC. Isso pode levar a uma redução na resistência e na ductilidade do material na região afetada pelo calor (PAIVA FILHO e dos RIBEIRO SOBRINHO, 2021).

Figura 3 - Demonstração da ZAC.



Fonte: Adaptado de Dias (2009).

Outrossim, o resfriamento rápido do material soldado durante a soldagem TIG pode causar tensões residuais na peça. Essas tensões residuais podem levar à deformação e ao surgimento de trincas no material, afetando ainda mais as propriedades mecânicas e a

integridade estrutural. Para mitigar essas tensões residuais, práticas como o pré-aquecimento e o resfriamento controlado após a soldagem são frequentemente empregadas (CAETANO et al., 2019).

A microestrutura do material também pode ser afetada pela soldagem TIG, especialmente na ZAC. Durante o resfriamento rápido, podem ocorrer transformações microestruturais, como a precipitação de fases indesejáveis ou a alteração da distribuição de carbonetos. Isso pode influenciar negativamente as propriedades do material, como sua resistência à corrosão e sua tenacidade (de SOUZA, Nunes e PAGANINI, 2019).

Para minimizar os efeitos negativos da soldagem TIG nas propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais, é fundamental adotar boas práticas de soldagem, como a seleção adequada dos parâmetros de soldagem, o uso de técnicas de pré-aquecimento e resfriamento controlado, e a escolha de consumíveis adequados, como eletrodos de enchimento. Do mesmo modo, realizar ensaios não destrutivos, como radiografia ou ultrassom, para detectar defeitos ocultos após a soldagem, é uma prática comum para garantir a qualidade das juntas soldadas (FADRIQUE et al., 2021).

Outro efeito potencial é a formação de tensões residuais no material soldado. O aquecimento e o resfriamento desiguais durante a soldagem podem causar deformações permanentes e tensões internas no material. Essas tensões residuais podem levar à deformação da peça ou ao surgimento de trincas após a soldagem, afetando a integridade estrutural e as propriedades mecânicas do material (PAIVA FILHO e dos RIBEIRO SOBRINHO, 2021).

A possível degradação das propriedades do material também é um efeito potencial da soldagem TIG. As propriedades mecânicas, como resistência à tração, tenacidade e dureza, podem ser afetadas negativamente devido às mudanças na microestrutura e às tensões residuais. Isso é especialmente crítico em aplicações onde a integridade estrutural e as propriedades do material são fundamentais, como na indústria aeroespacial ou nuclear (MODENESI, 2013).

Para mitigar esses efeitos potenciais, práticas de soldagem cuidadosas são essenciais. Isso inclui o controle rigoroso dos parâmetros de soldagem, como a corrente elétrica, a velocidade de alimentação do arame (caso seja usado), a escolha do gás de proteção e a pré-aquecimento adequado, especialmente em materiais espessos. Portanto, técnicas de resfriamento controlado pós-soldagem podem ser empregadas para reduzir as tensões residuais e minimizar as mudanças na microestrutura (FADRIQUE et al., 2021).

2.2.2 Influência do tratamento térmico pós-soldagem

O tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) é uma etapa crítica no contexto da soldagem TIG em aço inoxidável 304 de baixa espessura. Ele desempenha um papel fundamental na melhoria das propriedades mecânicas das juntas soldadas e na redução das tensões residuais, oferecendo benefícios significativos para a integridade estrutural e a durabilidade das peças soldadas (CRUZ e MINEIRO, 2017).

Um dos principais objetivos do TTPS é aliviar as tensões residuais que se acumulam durante o processo de soldagem. Materiais de baixa espessura, devido à rápida dissipação de calor, são particularmente propensos a tensões residuais, o que pode resultar em distorções permanentes e até mesmo trincas na junta soldada. O tratamento térmico pós-soldagem envolve o aquecimento controlado da peça soldada a uma temperatura específica e, em seguida, o resfriamento lento. Isso permite que as tensões residuais sejam gradualmente liberadas e minimiza o risco de distorções (MINEIRO, CRUZ e PAYÃO FILHO, 2018).

O alívio de tensões residuais é essencial para garantir a integridade estrutural da junta soldada e prevenir problemas futuros, como falhas por fadiga. Também melhora a resistência à corrosão da junta, já que, tensões residuais elevadas podem criar pontos vulneráveis à corrosão (Magalhães et al. 2019).

Além de aliviar tensões, o TTPS pode melhorar as propriedades mecânicas do aço inoxidável 304. Durante a soldagem, a ZAC experimenta mudanças microestruturais devido ao aquecimento e resfriamento rápidos. Isso pode levar à formação de fases indesejadas e à redução da resistência mecânica (CRUZ e MINEIRO, 2017).

O tratamento térmico pós-soldagem pode ajudar a restaurar as propriedades mecânicas do material na ZAC. A equação geral de crescimento de grão, representada por:

$$d = d_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad m^2/s \quad (1)$$

onde d é o tamanho do grão, d_0 é o tamanho inicial do grão, \exp é a função exponencial, Q é a energia de ativação para o crescimento do grão, R é a constante dos gases ideais, e T é a temperatura absoluta, ilustra como as estruturas cristalinas se reorganizam, reduzindo a presença de fases prejudiciais. Isso resulta em uma melhoria na resistência mecânica, na ductilidade e na tenacidade da junta soldada, tornando-a mais resistente às cargas de serviço (BARROSO et al., 2021).

É importante notar que o tratamento térmico pós-soldagem deve ser realizado com cuidado, seguindo as especificações e recomendações do fabricante do aço inoxidável 304 e dos consumíveis de soldagem. A equação de condução de calor de Fourier,

$$F = -kA \frac{dT}{dx} \quad W \quad (2)$$

onde F é a taxa de transferência de calor, k é a condutividade térmica do material, A é a área de seção transversal, e $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura, destaca a importância do controle preciso da temperatura durante o processo para evitar efeitos indesejados, como superaquecimento ou fragilização por precipitação de fases (MINEIRO, CRUZ e PAYÃO FILHO, 2018).

2.3 Soldagem TIG utilizando eletrodo ER308L e solda autógena

O eletrodo ER308L e a técnica de solda autógena são métodos essenciais quando se trata de unir aços inoxidáveis austeníticos em processos como TIG e Metal Inert Gas (MIG). Cada um desses métodos possui características distintas que os tornam ideais para diferentes situações de soldagem (COSTA, 2017). A seguir, no Quadro 4, podemos observar a composição química do eletrodo ER308L.

Quadro 4 - Composições químicas dos eletrodos ER308L.

Eletrodo	C (Carbono)	Cr (Cromo)	Ni (Níquel)	Mo (Molibdênio)
ER308L	Baixo teor	19 - 21%	9 - 11%	--

Fonte: (NUNES, 2022).

Começando pelo eletrodo ER308L, sua composição química geralmente inclui cerca de 19-21% de cromo, 9-11% de níquel, além de teores muito baixos de carbono e manganês. Isso

resulta em uma solda com baixo teor de carbono, o que é vantajoso para manter a resistência à corrosão em níveis ótimos (Olivares e Díaz, 2016). O ER308L é conhecido por sua boa soldabilidade e pela capacidade de produzir soldas com alta ductilidade. Essas características fazem dele uma escolha popular na soldagem de aços inoxidáveis do tipo 304 e 304L, amplamente utilizados em aplicações industriais (NUNES, 2022).

Por outro lado, a solda autógena, que é realizada sem a adição de material de enchimento, depende exclusivamente do material base para formar a junta soldada. No caso do aço inoxidável 304, isso significa que as propriedades da junta soldada serão muito semelhantes às do material base, uma vez que não há adição de outros elementos que possam alterar a composição química da junta. A solda autógena é particularmente útil em aplicações onde a precisão e a consistência da composição do material são críticas, e onde se deseja evitar a introdução de novos elementos que poderiam alterar as propriedades do material (PEREIRA et al., 2018).

Ambos os métodos de soldagem, utilizando o eletrodo ER308L e a solda autógena, são conhecidos por sua resistência à fissuração por solidificação, uma propriedade importante na soldagem de aços inoxidáveis. Isso significa que eles têm a capacidade de evitar o surgimento de trincas durante o processo de solidificação da solda, o que é crucial para a integridade estrutural das juntas soldadas (COSTA, 2017).

Outro aspecto importante, em termos de soldabilidade, é que ambos os métodos são geralmente considerados altamente soldáveis em aços inoxidáveis, incluindo o 304. O eletrodo ER308L, devido ao seu teor de carbono ainda mais baixo, normalmente produz soldas com um teor de carbono mínimo. Isso pode ser vantajoso em aplicações em que a resistência à corrosão superior é necessária, e um teor de carbono mínimo é desejável para evitar problemas de corrosão intergranular (PRADO, 2017).

As propriedades mecânicas também são um fator a ser considerado. O ER308L tende a produzir soldas que mantêm características mecânicas semelhantes às do material base, preservando a alta ductilidade e a resistência à tração do aço inoxidável 304. A solda autógena, por sua vez, mantém as propriedades mecânicas do material base, já que não há introdução de novos elementos que possam alterar suas características. Isso resulta em uma solda com alta integridade estrutural e resistência à corrosão comparável ao material base (SILVA, JESUS e de PAULA SILVA, 2020).

A seleção entre o uso do eletrodo ER308L e a solda autógena deve levar em consideração a aplicação específica. Em indústrias como a alimentícia, onde a resistência à corrosão é crucial, a solda autógena pode ser a escolha ideal por manter a composição original do material. Por outro lado, em aplicações que enfatizam mais a integridade estrutural e a ductilidade, como na indústria aeroespacial, o eletrodo ER308L pode ser mais adequado (GARCIA, 2011).

2.4 Métodos de análise de propriedades mecânicas e microestruturais

A avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável 304 após a soldagem é uma etapa crítica na garantia da qualidade e desempenho dos componentes soldados. Para isso, são empregados diversos métodos de análise que proporcionam uma visão abrangente das características do material (CAMPOS, 2021).

Um dos métodos fundamentais é o ensaio de tração, que fornece informações sobre a resistência à tração, ductilidade e módulo de elasticidade do material. Esse ensaio submete um corpo de prova a uma carga axial crescente até a ruptura, permitindo a construção de uma curva

de tensão-deformação que revela o comportamento mecânico do material soldado (BORGES et al., 2020).

Outro método essencial é o ensaio de dureza, que mede a resistência à deformação plástica localizada do material. Os ensaios de dureza *Vickers* e *Rockwell* são comuns e fornecem uma medida relativa da dureza do material soldado. A avaliação da tenacidade, ou seja, a capacidade do material de absorver energia antes da fratura, é realizada por meio de ensaios de impacto, como *Charpy* e *Izod*. Esses ensaios são importantes para entender como o material reage a situações de impacto, sendo especialmente relevante em aplicações onde a resistência ao choque é crítica (CAMPOS, 2021).

A análise microestrutural desempenha um papel fundamental na avaliação das propriedades do material. A microscopia óptica permite a observação detalhada dos grãos, inclusões e poros no material. Ela ajuda a identificar características como grãos grosseiros ou segregações, que podem afetar as propriedades mecânicas do material (ROCHA, 2018).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é utilizada para obter imagens de alta resolução da superfície do material, revelando informações detalhadas sobre a morfologia da superfície e a presença de inclusões, trincas e outros detalhes microestruturais (GHENO et al., 2019).

A análise de difração de raios X é valiosa para determinar a estrutura cristalina dos materiais. Isso auxilia na identificação de fases cristalinas presentes no material e na avaliação da qualidade da solda em termos de orientação cristalina e presença de fases indesejáveis (ROCHA, 2018).

A metalografia, por sua vez, envolve a preparação de amostras que são polidas e atacadas quimicamente para revelar a microestrutura. Essa técnica possibilita a observação detalhada dos grãos, fases e inclusões presentes no material (CAMPOS, 2021).

Além disso, técnicas específicas, como análise de inclusões e defeitos, análise de corrosão e testes de exposição a ambientes corrosivos simulados, são utilizadas conforme a necessidade para identificar imperfeições que possam comprometer a qualidade da junta soldada (BORGES et al., 2020).

O ensaio de tração é um dos métodos mais essenciais nesse processo. Ele envolve a aplicação de uma força crescente em amostras de corpos de prova retiradas das juntas soldadas. Isso permite a avaliação da resistência à tração e da ductilidade do material. A curva de tensão-deformação resultante revela como a soldagem afetou essas propriedades mecânicas cruciais, fornecendo informações sobre a integridade estrutural da junta soldada (GHENO et al., 2019).

Outro método importante é o ensaio de dureza, que avalia a resistência à deformação plástica localizada do material. A medição da dureza na zona da solda e na região afetada pelo calor é útil para identificar possíveis alterações nas propriedades mecânicas, como endurecimento ou amolecimento, causadas pelo processo de soldagem (CAMPOS, 2021).

Os ensaios de tenacidade por impacto são valiosos para determinar a capacidade do material de absorver energia antes da fratura, especialmente em situações de impacto. Esses testes fornecem *insights* sobre como a soldagem afetou a resistência ao impacto do aço inoxidável 304 (GHENO et al., 2019).

As técnicas de microscopia óptica e eletrônica de varredura permitem a observação detalhada da microestrutura da junta soldada. A microscopia óptica revela informações sobre a estrutura dos grãos e a presença de inclusões, enquanto a MEV oferece imagens de alta

resolução da superfície do material, auxiliando na detecção de defeitos como inclusões, trincas e poros (ROCHA, 2018).

A análise de difração de raios X é aplicada para investigar a estrutura cristalina da zona da solda. Isso é especialmente relevante para identificar quaisquer mudanças na orientação cristalina ou na presença de fases indesejáveis que possam comprometer a resistência do material (GHENO et al., 2019).

A metalografia desempenha um papel crucial, permitindo a preparação de amostras de junta soldada, polidas e atacadas quimicamente para a observação detalhada dos grãos, inclusões e possíveis defeitos na junta. Além disso, a análise de corrosão é importante quando a junta soldada estará sujeita a ambientes corrosivos. Testes de corrosão por imersão ou outros métodos de análise de corrosão ajudam a avaliar a resistência à corrosão da junta soldada (CAMPOS, 2021).

Em conjunto, esses métodos de análise garantem uma avaliação completa das propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável 304 após a soldagem TIG. Isso não apenas assegura a qualidade da junta soldada, mas também permite a identificação de quaisquer problemas que possam comprometer o desempenho do material em uma variedade de aplicações industriais (BORGES et al., 2020).

2.5 Soldagem em materiais de baixa espessura: desafios e considerações

A soldagem de materiais de baixa espessura apresenta desafios específicos que requerem uma abordagem cuidadosa e precisa durante o processo de fabricação. Um dos principais desafios é a maior sensibilidade a deformações e distorções. Materiais finos têm menos capacidade de dissipar o calor, o que torna mais provável que eles se deformem, curvem ou empenem durante a soldagem. Para evitar essas deformações, é necessário utilizar técnicas de fixação adequadas, como dispositivos de aperto e grampos, para manter as peças na posição correta durante a soldagem (ANAND e SRIDHAR, 2020).

Por sua vez, a soldagem de materiais finos pode apresentar problemas de fusão. Devido à baixa espessura, pode ocorrer falta de penetração ou fusão inadequada das bordas, resultando em juntas soldadas fracas e com defeitos. Controlar os parâmetros de soldagem, como a corrente, velocidade de soldagem e a quantidade de material de adição, é fundamental para garantir que a fusão seja adequada e que a junta seja resistente (KURYNTSEV, 2021).

Outro desafio é a distorção por deformação, conhecida como "*warpage*". A rápida dissipação de calor e a contração desigual em materiais finos podem levar à distorção permanente das peças. Para minimizar esse problema, é necessário adotar técnicas de controle de distorção, como soldagem em etapas, pré-aquecimento e aplicação de tensões contrárias (MOAYEDI et al., 2020).

A fragilização por hidrogênio também é uma preocupação em materiais finos. Devido à maior relação área/volume, esses materiais são mais suscetíveis à fragilização por hidrogênio, o que pode resultar em trincas ou falhas nas juntas soldadas. O controle do teor de hidrogênio, a secagem adequada dos eletrodos e o uso de consumíveis com baixo teor de hidrogênio são medidas preventivas fundamentais (AHMED et al., 2022).

A preparação cuidadosa da junta é outro desafio em materiais finos, pois a fragilidade do material torna a preparação da junta mais delicada. O uso de gabaritos e dispositivos de alinhamento adequados é crucial para garantir que as bordas estejam corretamente posicionadas. A maior sensibilidade à contaminação é um problema comum em materiais finos

durante a soldagem. Eles são mais suscetíveis à contaminação por impurezas e contaminantes atmosféricos. Manter uma atmosfera controlada e realizar uma limpeza rigorosa das superfícies antes da soldagem são passos essenciais para evitar defeitos na junta (ANAND e SRIDHAR, 2020).

2.5.1 Considerações de projeto e práticas recomendadas para a soldagem de materiais finos

A soldagem de materiais finos demanda uma abordagem cuidadosa e estratégica para garantir que as juntas soldadas atendam aos padrões de qualidade e integridade necessários. Para alcançar esse objetivo, diversas considerações de projeto e práticas recomendadas são cruciais (LUZ et al., 2019).

O primeiro passo começa com o projeto adequado da junta soldada. Evitar bordas afiadas e optar por chanfros ou bordas arredondadas facilita a soldagem e reduz as chances de distorções. Além disso, é importante manter juntas não muito longas, uma vez que isso pode aumentar o risco de deformações. A utilização de técnicas de fixação apropriadas é fundamental para evitar distorções durante a soldagem. Dispositivos como grampos, dispositivos de aperto e gabaritos mantêm as peças na posição correta, minimizando movimentos indesejados. Isso contribui para que a junta permaneça plana e alinhada (AHMED et al., 2022).

O pré-aquecimento das peças antes da soldagem é uma prática eficaz para reduzir o gradiente de temperatura entre a zona de soldagem e o material base, diminuindo, assim, as deformações. O pré-aquecimento também evita o choque térmico, que pode ser uma fonte significativa de distorção. Durante o processo de soldagem em materiais finos, é aconselhável aplicar passes de solda intercalados e permitir que as peças esfriem entre eles. Isso é conhecido como soldagem em etapas e ajuda a distribuir o calor de maneira uniforme, reduzindo as chances de distorção (KURYNTSEV, 2021).

A seleção criteriosa dos consumíveis de soldagem é fundamental. Escolher consumíveis adequados para materiais finos e que minimizem o risco de problemas como falta de penetração ou fusão inadequada é essencial para garantir uma junta de qualidade. Consumíveis com baixo teor de hidrogênio são preferíveis para evitar a fragilização por hidrogênio. E mais importante, ajustar cuidadosamente os parâmetros de soldagem, como corrente, tensão, velocidade de soldagem e taxa de alimentação de arame, de acordo com as características do material fino, é fundamental para garantir uma fusão adequada e evitar problemas de soldagem (LUZ et al., 2019).

Monitorar constantemente as peças quanto a distorções durante o processo de soldagem é fundamental. Se ocorrerem deformações, é necessário ajustar imediatamente as técnicas de fixação ou os parâmetros de soldagem para corrigir o problema. Após a soldagem, permitir que as peças esfriem gradualmente em um ambiente controlado é importante para evitar resfriamentos rápidos, que podem aumentar as chances de distorção (MOAYEDI et al., 2020).

Além disso, a realização de testes não destrutivos (TND) é primordial para identificar defeitos ocultos nas juntas soldadas em materiais finos. A inspeção visual, líquidos penetrantes ou ultrassom são métodos comuns para essa finalidade. Por fim, garantir que os soldadores envolvidos na soldagem de materiais finos sejam devidamente treinados e qualificados é fundamental. A experiência e habilidade dos soldadores desempenham um papel crítico na obtenção de juntas soldadas de alta qualidade (AHMED et al., 2022).

2.6 Tendências atuais e futuras na soldagem de aço inoxidável

A soldagem de aço inoxidável está passando por uma série de avanços significativos que moldarão o futuro dessa técnica indispensável na indústria. A automação e a robótica estão desempenhando um papel crescente na soldagem de aço inoxidável, tornando os processos mais precisos e eficientes. Isso não apenas melhora a qualidade das juntas soldadas, mas também reduz a exposição dos operadores a ambientes desafiadores (KUNDU, PRATIHAR e PAL, 2019).

Além da automação, a soldagem por fusão a laser está emergindo como uma técnica de destaque. Com sua alta velocidade e precisão, essa tecnologia é especialmente valiosa em aplicações industriais que demandam eficiência e qualidade. A soldagem por fricção linear também está ganhando destaque, oferecendo uma abordagem inovadora para materiais de baixa espessura e minimizando problemas tradicionalmente associados à soldagem (ROMERO-RESENDIZ et al., 2022).

O desenvolvimento contínuo de materiais de adição desempenha um papel crucial na soldagem de aço inoxidável. Ligas de níquel e cromo estão abrindo novas possibilidades, permitindo a soldagem em condições mais desafiadoras, como ambientes corrosivos e de alta temperatura. A soldagem de materiais dissimilares, como aço inoxidável e ligas de alumínio, também está em ascensão, atendendo às necessidades da indústria aeroespacial e automobilística (MASAYUKI, 2021).

A soldagem híbrida, que combina técnicas de soldagem, está se destacando pela capacidade de proporcionar maior controle e qualidade nas juntas soldadas. A simulação e modelagem estão permitindo a previsão precisa dos resultados da soldagem, economizando tempo e recursos (LI et al., 2023).

Monitoramento em tempo real durante a soldagem se tornou uma prática comum para garantir a qualidade da junta soldada. Avanços em tecnologias de inspeção não destrutiva, como a tomografia computadorizada, também estão melhorando a detecção de defeitos em juntas soldadas de aço inoxidável (ROMERO-RESENDIZ et al., 2022).

À medida que a indústria se volta para práticas mais sustentáveis, há um interesse crescente em processos de soldagem energeticamente eficientes e que utilizem menos materiais. A manufatura aditiva, ou impressão 3D de componentes metálicos, está abrindo novas possibilidades de design e personalização (KUNDU, PRATIHAR e PAL, 2019).

Ademais, a soldagem em ambientes hostis, como subaquáticos ou em alta pressão, está impulsionando o desenvolvimento de tecnologias especiais de soldagem. A integração de sensores inteligentes em peças soldadas permite o monitoramento em tempo real e contribui para a manutenção preditiva (LI et al., 2023).

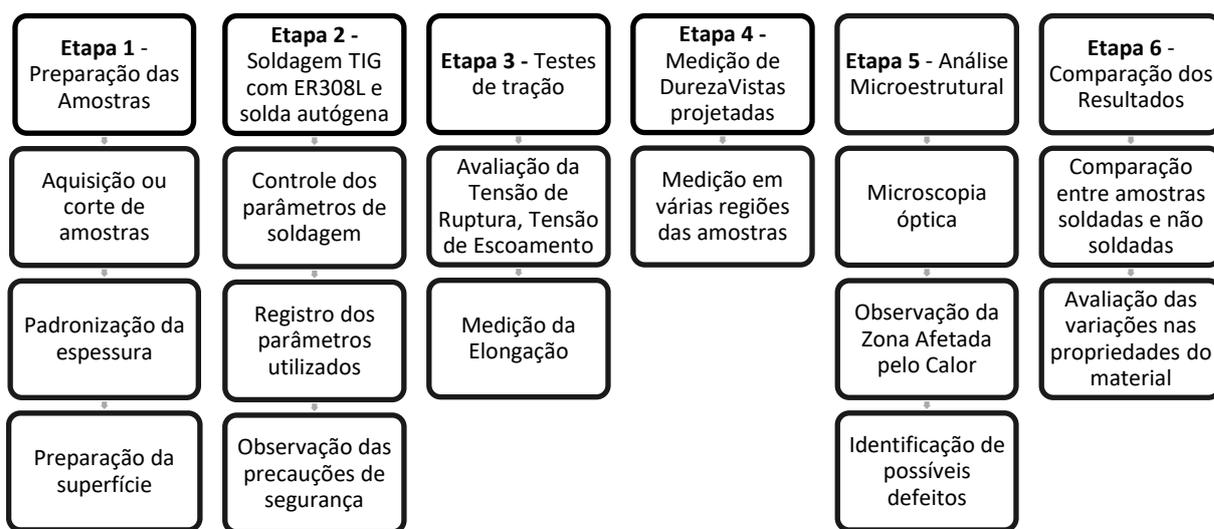
A robótica colaborativa está revolucionando o ambiente de trabalho, permitindo a colaboração segura entre humanos e máquinas. Normas e regulamentações ambientais e de segurança estão influenciando a soldagem de aço inoxidável, levando à adoção de práticas mais limpas e seguras (MASAYUKI, 2021).

À medida que novas ligas de aço inoxidável mais avançadas são desenvolvidas para atender a requisitos específicos de desempenho, a soldagem de aço inoxidável continua a se adaptar às demandas da indústria. Essas tendências refletem o compromisso contínuo com a melhoria da qualidade, eficiência e desempenho na soldagem, estabelecendo um cenário empolgante para o futuro da indústria. A pesquisa alinhada com essas tendências e desenvolvimentos é fundamental para a evolução contínua da soldagem de aço inoxidável (ROMERO-RESENDIZ et al., 2022).

3 METODOLOGIA

A pesquisa adotou uma abordagem metodológica de estudo de caso. O estudo de caso foi uma estratégia de pesquisa que buscou explorar e compreender um fenômeno dentro de seu contexto natural, permitindo uma análise aprofundada e holística do objeto de estudo. Neste caso, o objeto de estudo foi o comportamento do aço inoxidável 304 de baixa espessura após ser submetido ao processo de soldagem TIG com diferentes métodos: eletrodo ER308L e solda autógena. Conforme detalhado na Figura 4, o procedimento compreendeu seis etapas de desenvolvimento.

Figura 4 - Etapas para o desenvolvimento do projeto.



Fonte: Autor.

O presente fluxograma delineou de forma sucinta as principais etapas do trabalho, fornecendo uma visão abrangente do processo metodológico adotado. Cada etapa representou um estágio significativo da pesquisa. A seguir, cada fase foi detalhadamente explorada, oferecendo uma compreensão mais profunda de como cada componente contribuiu para a condução integral deste estudo.

3.1 Primeira etapa: preparação das amostras

Inicialmente, as amostras do material em estudo foram adquiridas e cortadas de acordo com as dimensões específicas necessárias para os testes planejados. Foi essencial que as amostras fossem cortadas com precisão, de modo que tivessem as dimensões corretas e fossem representativas do material utilizado na indústria. A espessura das amostras foi padronizada em 1,25 milímetros, garantindo que todas as amostras tivessem a mesma espessura inicial para efeitos de comparação.

Além de cortar as amostras com precisão, a superfície das amostras foi adequadamente preparada para garantir uniformidade e remoção de qualquer contaminante ou irregularidade. A preparação da superfície foi realizada por lixamento, removendo qualquer camada superficial oxidada e obtendo uma superfície lisa e limpa. Esta etapa foi essencial para garantir resultados de teste precisos e confiáveis.

Cada amostra foi identificada de forma única e rastreável, permitindo que os resultados dos testes fossem associados a cada amostra específica. Também foi realizado um registro

detalhado do processo de preparação das amostras, incluindo informações sobre dimensões, métodos de corte e preparação da superfície.

3.2 Segunda etapa: realização da soldagem TIG

Durante a fase experimental, quatro amostras de 1,25mm de espessura foram preparadas e posicionadas de forma que, agrupadas duas a duas, suas laterais fossem soldadas uma na outra, utilizando o processo de soldagem TIG. Para este fim, duas das chapas foram soldadas utilizando o eletrodo ER308L, enquanto as outras duas foram soldadas com solda autógena.

Os parâmetros de soldagem foram cuidadosamente ajustados com base na espessura das chapas e no método de soldagem utilizado. Para as chapas soldadas com o eletrodo ER308L, (lado esquerdo da imagem 5) a corrente de soldagem foi ajustada para 80 amperes (A), a velocidade de soldagem foi mantida constante em 6 polegadas por minuto e a taxa de alimentação do eletrodo foi configurada para 4 polegadas por minuto. Para as chapas soldadas com solda autógena, (lado direito da imagem 5) a corrente de soldagem foi definida em 90A e a velocidade de soldagem permaneceu em 5 polegadas por minuto, considerando que não houve taxa de alimentação de eletrodo, já que não foi utilizado material de enchimento.

Figura 5 - Amostras soldadas.



Fonte: Autor.

O ambiente de laboratório foi mantido sob controle para garantir que as condições de soldagem fossem consistentes e livres de interferências externas, como ventilação inadequada ou contaminação atmosférica. Isso foi crucial para obter resultados confiáveis. Todas as precauções de segurança ao realizar a soldagem TIG foram observadas, incluindo o uso de equipamentos de proteção pessoal e práticas de segurança padrão.

3.3 Terceira etapa: testes de resistência mecânica (tração)

Após a soldagem, as amostras foram submetidas a testes de resistência mecânica por meio de ensaios de tração. Esses testes são essenciais para avaliar como a soldagem afetou as propriedades mecânicas do material e para determinar a resistência do aço em condições de tensão. Os ensaios de tração envolvem a aplicação de uma força de tração gradual e controlada em uma amostra de material até que ela se rompa.

As amostras foram ensaiadas utilizando uma máquina de ensaio de tração com capacidade de 200.000 Newtons (N), conforme na figura abaixo.

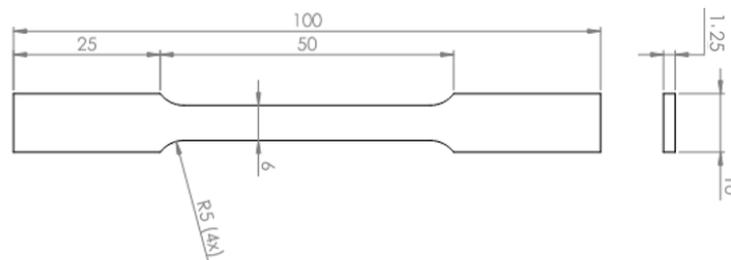
Figura 6 - Máquina ensaio de tração.



Fonte: Autor.

As amostras de aço inoxidável 304 soldadas foram preparadas conforme as especificações da norma ASTM E8/E8M. Corpos de prova subsize foram utilizados devido às dimensões limitadas do material disponível. O desenho esquemático das amostras, com todas as medidas relevantes, está ilustrado na figura abaixo.

Figura 7 - Dimensões das amostras.



Fonte: Autor.

Para assegurar a precisão dos resultados, as amostras foram cortadas com cuidado, mantendo superfícies lisas para evitar concentrações de tensão. O comprimento inicial (L_0) e a área da seção transversal (A) das amostras foram medidos e registrados com um paquímetro de alta precisão.

As amostras foram fixadas na máquina de ensaio de tração, garantindo que estivessem centralizadas e alinhadas corretamente. As garras da máquina foram apertadas nas extremidades das amostras para assegurar uma fixação firme. A máquina de ensaio foi configurada para aplicar uma carga axial uniaxial gradual e controlada, seguindo as diretrizes da norma ASTM.

O ensaio de tração foi iniciado, aplicando-se a força de tração de forma contínua e controlada. A carga aplicada e o alongamento da amostra foram registrados em intervalos regulares pelo sistema de aquisição de dados da máquina. Durante o ensaio, foram registrados os dados de carga e deslocamento até que a amostra se rompesse. A carga máxima (F_{max}) e o deslocamento correspondente (ΔL) foram anotados.

3.4 Quarta etapa: medição de dureza

As medições de dureza foram realizadas nas amostras soldadas e não soldadas para avaliar as propriedades mecânicas do material. A dureza foi medida utilizando um durômetro com o método Vickers, aplicando uma carga de 0,5 quilograma-força (kgf). O durômetro utiliza um penetrador de diamante em forma de pirâmide quadrada, que é pressionado contra a superfície da amostra.

Figura 8 – Microdurômetro.



Fonte: Autor.

As superfícies das amostras foram preparadas por lixamento e polimento para garantir que estivessem lisas e livres de contaminantes. As medições foram realizadas em várias regiões das amostras, incluindo a zona afetada pelo calor (ZAC), o metal de solda e o material base, com um espaçamento de 0,3 mm entre as medições. Três medições foram realizadas em cada local para assegurar a precisão dos resultados.

3.5 Quinta etapa: análise microestrutural

Para a análise microestrutural, foi necessário preparar uma amostra metalográfica representativa, sem arranhões de polimento, sem corrosão devido ao ataque químico e sem manchas. A amostra foi lixada, polida e atacada de forma a manter inclusões intactas e plana o suficiente para permitir a observação. Toda a preparação das amostras para a realização do ensaio foi realizada no laboratório do Núcleo de Tecnologia Mecânica do ITEC da Universidade de Passo Fundo.

3.5.1 Embutimento

O embutimento é aplicado em casos que o corpo de prova ou amostra possui pequenas dimensões e não permitem a manipulação durante o polimento e lixamento. O objetivo é facilitar o manuseio de amostras durante o preparo e observação da metalografia. A superfície deve estar em um só plano e ausente de arredondamento das bordas do copo de prova. Foi realizado o embutimento a quente sob pressão, utilizando uma prensa metalográfica da Struers.

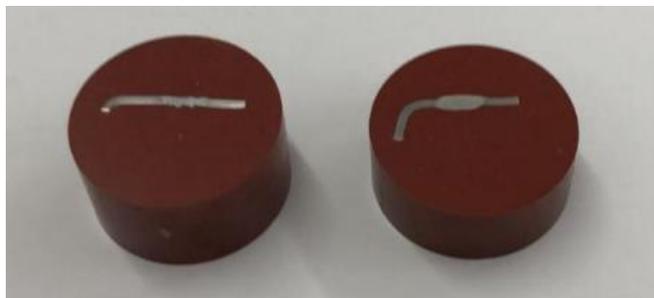
Figura 9 - Máquina embutidora.



Fonte: Autor.

A pressão foi controlada em 120 bar, e a temperatura de embutimento foi de aproximadamente 198°C. O embutimento foi realizado com baquelite vermelho, com 15 min de embutimento e 10 min de resfriamento. O resultado do embutimento se encontra na Figura 10.

Figura 10 - Amostras embutidas.



Fonte: Autor.

3.5.2 Lixamento

O lixamento tem como principal objetivo retirar todas as danificações na amostra, tais como sulcos e riscos provenientes do desbaste, assim como a realização de uma superfície plana para a análise. Foram utilizadas as lixas, #220, #400, #600 e #1200, com o lixamento realizado sempre na mesma direção, e utilizando água como fluido refrigerante. A cada mudança de lixa, a superfície foi girada em 90° para a retirada dos riscos da lixa anterior. Para o lixamento, foi utilizado a lixadeira metalográfica manual.

Figura 11 - Lixadeira metalográfica manual.



Fonte: Autor.

3.5.3 Polimento

A finalidade do polimento é obter uma superfície plana, livre de riscos e com alta refletividade. Não é necessário que a amostra esteja totalmente ausente de riscos, mas para início, a amostra deve estar limpa. Para o polimento, foi utilizada alumina no estado líquido, com $3\ \mu\text{m}$, que resulta em melhor acabamento superficial no polimento. O pano de polimento também deve estar livre de impurezas, pois estas podem vir a arranhar a superfície da amostra, utilizando o álcool etílico para lubrificação. Para o processo de polimento das amostras foi utilizado a politriz Artec conforme figura abaixo.

Figura 12 - Politriz Artec.



Fonte: Autor.

Após o lixamento e polimento, a amostra foi levada à capela de reagentes, conforme mostrado na figura abaixo, onde o corpo de prova foi mergulhado em um material reativo para revelar a microestrutura do material. O ataque químico foi realizado utilizando ácido oxálico, na concentração de 10 gramas para 100 ml de água destilada.

Figura 13 - Capela de reagentes.



Fonte: Autor.

A amostra de aço inoxidável 304 foi inserida em um reservatório contendo a solução de ácido oxálico. Uma fonte de 12 V foi utilizada, com o terminal negativo conectado à água e o terminal positivo conectado à peça. O tempo de ataque variou entre 5 a 15 segundos, dependendo do material a ser observado, sendo aproximadamente 10 segundos para o aço inoxidável 304.

Após o ataque, a superfície da amostra foi imediatamente lavada com água e, em seguida, submetida a um processo de secagem por um jato de ar quente.

3.6 Sexta etapa: comparação dos resultados

Os resultados obtidos nas etapas anteriores foram comparados entre as amostras soldadas com o eletrodo ER308L e solda autógena. A análise das diferenças entre as amostras soldadas e não soldadas permitirá identificar se a soldagem teve impacto nas propriedades do aço inoxidável 304 de baixa espessura e, se sim, em que extensão. Poderão haver variações na resistência mecânica, na dureza, na microestrutura ou na presença de defeitos entre as amostras soldadas com diferentes eletrodos e as amostras não soldadas.

A comparação dos resultados também permitirá avaliar se a soldagem TIG afetou de forma significativa as propriedades do aço inoxidável 304 de baixa espessura e como diferentes tipos de eletrodos podem influenciar essas alterações.

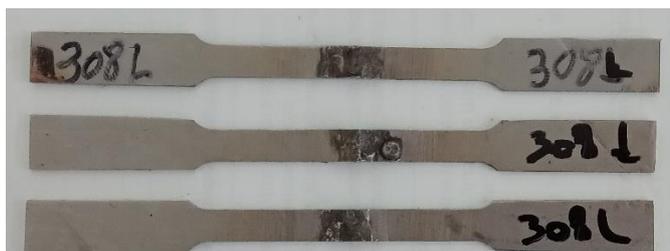
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na ampla bibliografia e metodologia delineada, obteve-se uma compreensão aprofundada do impacto da soldagem TIG, utilizando eletrodos ER308L e solda autógena, sobre o aço inoxidável 304 de baixa espessura. Os resultados abrangem diversas áreas, refletindo as propriedades mecânicas, dureza e microestrutura do material soldado, conforme etapas do estudo descritas a seguir.

4.1 Propriedades Mecânicas (Ensaio de Tração):

Nesta seção, os resultados do ensaio de tração realizado em amostras de aço inoxidável 304 de baixa espessura, soldadas com processo TIG - solda autógena e com eletrodo ER308L. O objetivo foi avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais das soldas.

Figura 14 - Corpos de prova para ensaio de tração – ER308L.



Autor: Autor.

Figura 15 - Corpos de prova para ensaio de tração – solda autógena.



Fonte: Autor.

Os resultados do ensaio de tração são apresentados no Quadro 5. As propriedades mecânicas avaliadas incluem a carga máxima, a tensão máxima, a carga de escoamento, a tensão de escoamento, a razão elástica, o alongamento final e a estricção.

Quadro 5 – Resultados ensaio de tração.

Tipo	Amostra	Área (mm ²)	Ensaio	Cmáx/Ai	Gráfico	Cesc/Ai	Cmáx/Cesc	((L0-LF)/LF)*100	((Ai-Af)/Ai)*100
			Carga Máx (N)	Tensão Máx (N/mm ²)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (N/mm ²)	Razão Elástica	Alongamento Final (%)	Estricção (%)
Autógena	1	8	3878,67	484,83	2064,61	258,08	1,88	16,37	36,19
	2	8,25	2966,48	359,57	1761,67	213,54	1,68	6,22	52,41
	3	7,5	3735,387	498,05	2049,26	273,23	1,82	16,73	48,83
ER308L	1	8,25	5902,32	715,43	2010,72	243,72	2,94	35,18	36,58
	2	8,25	6048,97	733,21	2287,2	277,24	2,64	34,00	34,34
	3	7,875	4249,06	539,56	2123,56	269,66	2,00	23,02	48,98

Fonte: Autor.

Os resultados do ensaio de tração, mostram as propriedades mecânicas de duas amostras de solda de aço inoxidável AISI 304, uma soldada de forma autógena e outra utilizando eletrodo ER308L. A análise das propriedades mecânicas, como carga máxima, tensão máxima, carga de escoamento, tensão de escoamento, razão elástica, alongamento final e estricção, revela diferenças significativas entre os dois tipos de solda.

4.1.1 Solda Autógena:

- A carga máxima variou de 2966,48 N a 3878,67 N, com tensões máximas entre 359,57 N/mm² e 498,05 N/mm².

- As cargas de escoamento ficaram entre 1761,67 N e 2064,61 N, correspondendo a tensões de escoamento de 213,54 N/mm² a 273,23 N/mm².
- A razão elástica variou de 1,68 a 1,88, indicando a relação entre a tensão máxima e a tensão de escoamento.
- O alongamento final variou significativamente, de 6,22% a 16,73%, assim como a estricção, que foi de 36,19% a 52,41%.

4.1.2 Solda com Eletrodo ER308L:

- A carga máxima foi substancialmente maior, variando de 4249,06 N a 6048,97 N, com tensões máximas entre 539,56 N/mm² e 733,21 N/mm².
- As cargas de escoamento variaram de 2010,72 N a 2287,2 N, com tensões de escoamento de 243,72 N/mm² a 277,24 N/mm².
- A razão elástica para essas soldas foi maior, variando de 2,00 a 2,94.
- O alongamento final foi notavelmente maior, variando de 23,02% a 35,18%, enquanto a estricção variou de 34,34% a 48,98%.

As dimensões iniciais e finais das amostras são apresentadas na Quadros 6 e 7 para solda autógena e solda com eletrodo ER308L, respectivamente.

Quadro 6 - Dimensões das Amostras Soldadas com Solda Autógena.

Autógena								
Amostra	EI (mm)	EF (mm)	LI (mm)	LF (mm)	L0 (mm)	LF (mm)	Área (mm ²)	ÁreaF (mm ²)
1	1,25	0,91	6,4	5,61	48,27	56,17	8	5,11
2	1,25	0,69	6,6	5,69	47,92	50,9	8,25	3,93
3	1,25	0,72	6	5,33	48,25	56,32	7,5	3,84

Fonte: Autor.

Quadro 7 - Dimensões das Amostras Soldadas com Eletrodo ER308L.

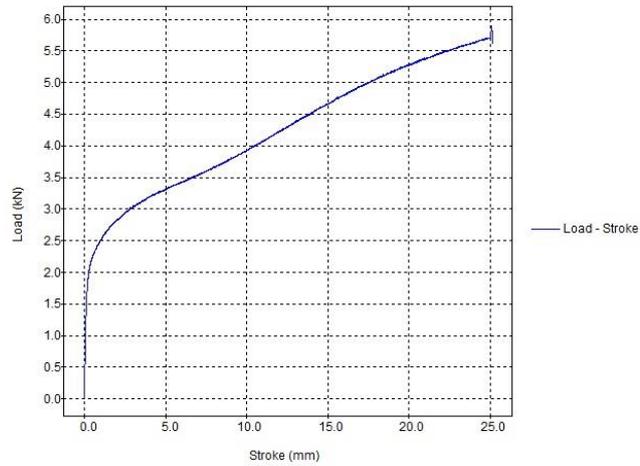
ER308L								
Amostra	EI (mm)	EF (mm)	LI (mm)	LF (mm)	L0 (mm)	LF (mm)	Área (mm ²)	ÁreaF (mm ²)
1	1,25	1,01	6,6	5,18	47,7	64,48	8,25	5,23
2	1,25	1,06	6,6	5,11	48,36	64,8	8,25	5,42
3	1,25	0,81	6,3	4,96	49,26	60,6	7,875	4,02

Fonte: Autor

Os Quadros 6 e 7 mostram as dimensões iniciais e finais das amostras soldadas de forma autógena e com eletrodo ER308L, respectivamente. Para as amostras autógenas, observa-se uma maior redução na área final, indicando maior estricção e deformação plástica. Em contraste, as amostras com eletrodo ER308L mantêm áreas finais maiores e mais consistentes, refletindo uma melhor resistência à fratura e distribuição de carga, corroborando os resultados dos ensaios de tração que indicam maior capacidade de carga e alongamento final nas soldas com ER308L.

Os gráficos abaixo ilustram as curvas de tensão-deformação para as amostras soldadas com ER308L. Cada gráfico representa o comportamento do material durante o ensaio de tração, mostrando a relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida.

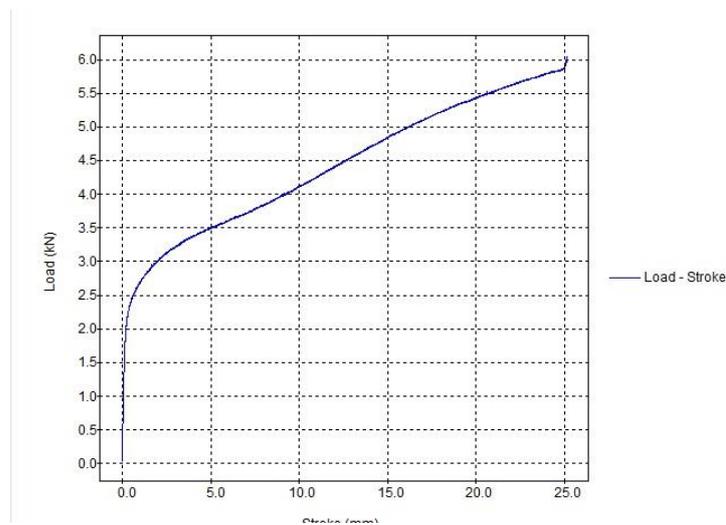
Figura 16 - Gráfico amostra 1 ER308L.



Fonte: Autor.

A curva carga-deslocamento mostra um aumento inicial rápido seguido por uma estabilização, atingindo uma carga máxima de 6 kN, indicando uma transição clara entre a fase elástica e a plástica.

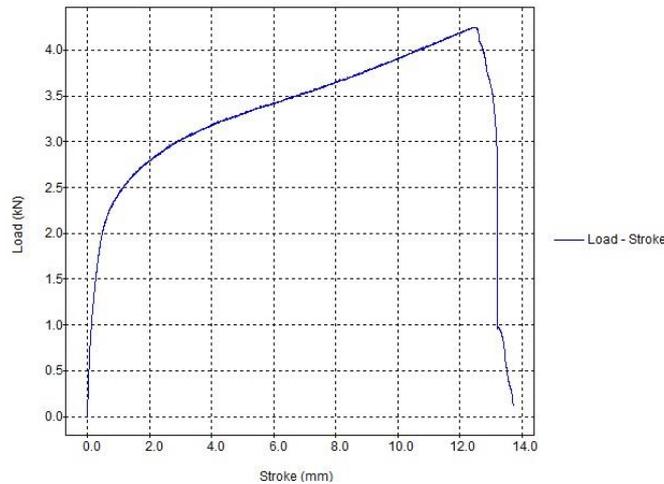
Figura 17 - Gráfico amostra 2 ER308L.



Fonte: Autor.

A curva apresenta um comportamento semelhante ao Gráfico 16, com um aumento rápido da carga até cerca de 6 kN, seguido por uma região de escoamento estável, demonstrando a resistência e ductilidade da solda.

Figura 18 - Gráfico amostra 3 ER308L.



Fonte: Autor.

Analisando o comportamento elástico e plástico, os três gráficos apresentam uma fase inicial elástica, onde a curva é linear, seguida por uma fase plástica até a fratura. Isso é típico do comportamento de materiais dúcteis, como o aço inoxidável, indicando que o material pode suportar deformações significativas antes de fraturar.

Em relação as cargas suportadas, as amostras atingiram cargas máximas de 5,9 kN, 6,0 kN e 4,2 kN, respectivamente. A variação na carga máxima entre as amostras pode ser atribuída a pequenas diferenças na qualidade da solda ou na geometria das amostras. Já em relação a tensão, as máximas correspondentes foram 715,43 N/mm², 733,21 N/mm² e 539,56 N/mm². A tensão máxima elevada nas duas primeiras amostras indica uma alta resistência à tração, enquanto a terceira amostra mostrou uma resistência um pouco menor.

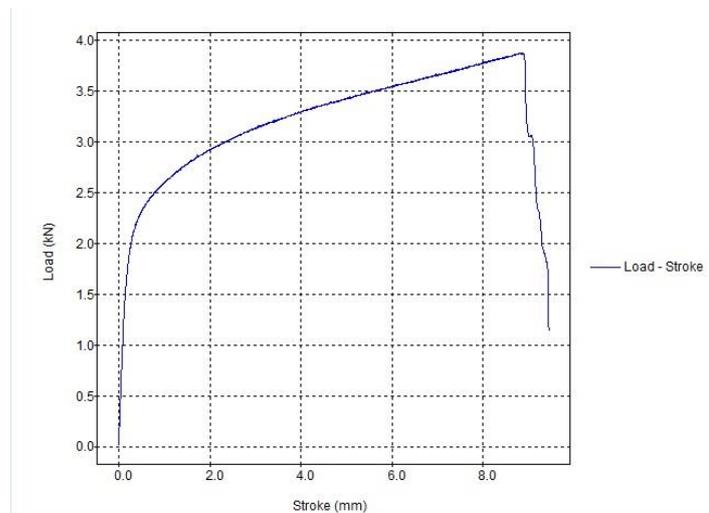
Verificou-se que as curvas mostram que as amostras apresentaram um alongamento final significativo, destacando a boa ductilidade, evitando falhas catastróficas, permitindo que o material se deforme antes de fraturar.

Os pontos de fratura das curvas indicam que as amostras suportaram uma deformação substancial antes de falharem. A estricção foi observada nas três amostras, com redução de área na fratura, que é uma característica típica de materiais dúcteis.

4.1.3 Gráficos das Amostras Soldadas com Autógena

Os gráficos a seguir mostram as curvas de tensão-deformação para as amostras soldadas de forma autógena. Estes gráficos representam a relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida durante o ensaio de tração, fornecendo uma visão detalhada do comportamento mecânico das soldas autógenas. As curvas permitem observar as diferentes fases do ensaio, desde a deformação elástica inicial, onde a tensão aumenta proporcionalmente à deformação, até a fase de escoamento e deformação plástica, onde a tensão se estabiliza antes de atingir o ponto de fratura. A análise dessas curvas é fundamental para entender a capacidade de resistência e a ductilidade das soldas autógenas, além de fornecer informações críticas sobre a integridade estrutural dos materiais testados.

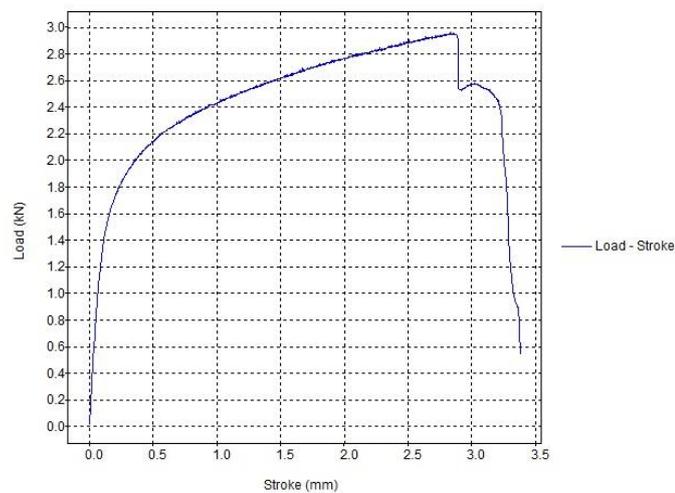
Figura 19 - Gráfico amostra 1, solda autógena.



Fonte: Autor.

O gráfico mostra a curva carga-deslocamento para uma amostra de solda autógena, onde a carga aumenta rapidamente até cerca de 3,7 kN, seguida por uma fase de escoamento e uma queda abrupta na carga, indicando a fratura da amostra após a deformação plástica.

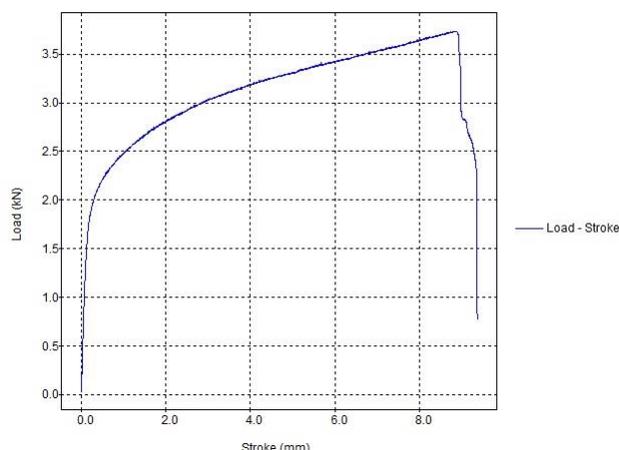
Figura 20 - Gráfico amostra 2, solda autógena.



Fonte: Autor.

O gráfico apresenta a curva carga-deslocamento para outra amostra de solda autógena, com um aumento rápido na carga até aproximadamente 2,8 kN, seguido por uma fase de escoamento e uma queda abrupta, sinalizando a fratura da amostra após a deformação plástica.

Figura 21 - Gráfico amostra 3, solda autógena.



Fonte: Autor.

Analisando o comportamento elástico e plástico, os gráficos apresentam fases elásticas seguidas por fases plásticas, típicas de materiais dúcteis. As curvas mostram uma boa capacidade de deformação antes da fratura, embora as cargas e tensões máximas sejam menores que as das amostras ER308L.

As cargas máximas foram de 3,88 kN, 2,97 kN e 3,74 kN, respectivamente. As menores cargas máximas indicam que as juntas soldadas sem material de adição (autógena) têm menor resistência à tração em comparação com as soldadas com ER308L. As tensões máximas foram 484,83 N/mm², 359,57 N/mm² e 498,05 N/mm². As tensões são consideravelmente menores que nas amostras ER308L, refletindo a menor resistência das soldas autógenas.

Verificando as curvas, há uma indicação de um alongamento final variado, mas geralmente menor do que nas amostras ER308L. A menor ductilidade pode ser um indicativo de maior fragilidade das juntas soldadas autogenamente. As curvas de fratura, mostram que as amostras falharam após uma deformação significativa, mas menos pronunciada que nas amostras com ER308L. A estrição observada é típica de materiais dúcteis, embora menor que nas amostras ER308L, sugerindo uma fratura mais abrupta.

A análise dos gráficos confirma que as amostras soldadas com ER308L possuem maior resistência e ductilidade em comparação às soldas autógenas. As curvas de tensão-deformação das amostras ER308L mostram maior absorção de energia antes da fratura, com maiores valores de carga e tensão máximas, além de alongamentos finais mais elevados. No entanto, as soldas autógenas apresentam boa ductilidade, o que pode ser vantajoso em aplicações que requerem maior deformabilidade. A simplicidade do processo autógeno e a ausência de material de adição são desejáveis em certas situações.

Os resultados indicam que as soldas com ER308L têm melhores propriedades mecânicas em termos de resistência e ductilidade. Em contraste, a soldagem autógena é eficiente em termos de ductilidade e simplicidade do processo, sendo adequada para aplicações que exigem flexibilidade do material e redução de custos. A soldagem autógena é ideal para reparos rápidos, indústrias alimentícias e farmacêuticas, componentes estruturais de baixa solicitação e tubulações. A ausência de material de adição reduz os custos totais de produção e simplifica o processo, oferecendo vantagens econômicas significativas.

4.2 Ensaio de dureza:

Para avaliar as propriedades mecânicas do aço inoxidável 304 após a soldagem TIG, foi realizado um ensaio de dureza Vickers. As amostras foram preparadas através de corte, lixamento e polimento, seguidos por ataque químico para revelação da microestrutura. Utilizou-se um durômetro Vickers com carga de 500 g e tempo de aplicação de 10 segundos, realizando medições ao longo da zona soldada, zona termicamente afetada e metal base. Os valores de dureza obtidos foram registrados e analisados para correlacionar a variação de dureza com a microestrutura e as propriedades mecânicas da junta soldada.

4.2.1 Amostra soldada com ER308L

Os resultados das medições de dureza para as amostras de aço inoxidável 304, soldadas com eletrodo ER308L, estão apresentados na tabela abaixo. As medições foram realizadas em diferentes pontos das amostras, incluindo as regiões de metal base (MB), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de solda (MA).

Quadro 8 - Resultados das medições de dureza Vickers para as amostras de aço inoxidável 304 soldadas com eletrodo ER308L.

AMOSTRAS 308					
LOCALIZAÇÃO	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
MB/direita	203	199	204	202	2
ZAC/direita	190	189	192	190	1
MA	179	175	182	179	3
ZAC/esquerda	185	188	190	188	2
MB/esquerda	197	198	195	197	1

Fonte: Autor.

4.2.1.1 Metal Base (MB)

- **MB/direita:** A média da dureza é de 202 HV com um desvio padrão de 2.
- **MB/esquerda:** A média da dureza é de 197 HV com um desvio padrão de 1.

Os valores de dureza no metal base estão dentro dos valores típicos esperados para o aço inoxidável 304, que geralmente apresenta dureza Vickers na faixa de 150 a 200 HV para materiais não trabalhados ou levemente trabalhados. A uniformidade e a alta dureza indicam uma boa resistência e qualidade do material base.

4.2.1.2 Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

- **ZAC/direita:** A média da dureza é de 190 HV com um desvio padrão de 1.
- **ZAC/esquerda:** A média da dureza é de 188 HV com um desvio padrão de 2.

A dureza nas regiões ZAC direita e esquerda é ligeiramente inferior à do metal base, o que é esperado devido ao efeito térmico da soldagem, que pode causar alterações microestruturais como recristalização parcial ou formação de fases mais moles. A variação na dureza é mínima, indicando um controle adequado do impacto térmico durante a soldagem.

4.2.1.3 Metal de Solda (MA)

- A média da dureza é de 179 HV com um desvio padrão de 3.

A dureza do metal de solda é menor do que a do material de base, o que pode ocorrer devido ao processo de solidificação e mistura de materiais durante a soldagem. Este valor está dentro da faixa esperada para regiões soldadas em aço inoxidável 304, onde a dureza pode variar dependendo dos parâmetros de soldagem e do metal de enchimento utilizado.

4.2.1.4 Influência do Eletrodo ER308L

O eletrodo ER308L utilizado na soldagem TIG contribui para as propriedades mecânicas e microestruturais do metal de solda. O ER308L é um eletrodo de baixa liga de carbono que ajuda a minimizar a precipitação de carbonetos e melhorar a resistência à corrosão intergranular. Esses fatores podem influenciar a dureza e a ductilidade do metal de solda, resultando em valores de dureza como os observados.

Os valores de dureza medidos nas diferentes regiões das amostras de aço inoxidável 304 soldadas com eletrodo ER308L são consistentes com os valores típicos encontrados na literatura para este material. A dureza do metal base é alta e uniforme, indicando boa resistência e qualidade do material. As variações na dureza nas regiões ZAC e no metal de solda são esperadas e indicam os efeitos térmicos e mecânicos do processo de soldagem. No geral, os valores de dureza são bons e indicam que o processo de soldagem foi realizado de maneira eficaz, mantendo as propriedades mecânicas desejadas do material. A utilização do eletrodo ER308L contribuiu para as propriedades observadas no metal de solda.

4.2.2 Amostra soldada com solda autógena

Os resultados das medições de dureza para as amostras de aço inoxidável 304 soldadas pelo processo TIG autógeno (sem material de adição) estão apresentados na tabela abaixo. As medições foram realizadas em diferentes pontos das amostras, incluindo as regiões de metal base (MB), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de solda (MA).

Quadro 9 - Resultados das medições de dureza Vickers para as amostras de aço inoxidável 304 soldadas pelo processo TIG autógeno.

AMOSTRAS AUTÓGENA					
LOCALIZAÇÃO	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
MB/direita	204	199	203	202	2
ZAC/direita	194	195	199	196	2
MA	229	232	233	231	2
ZAC/esquerda	199	198	204	200	3
MB/esquerda	200	197	196	198	2

Fonte: Autor.

4.2.2.1 Metal Base (MB)

- **MB/direita:** A média da dureza é de 202 HV com um desvio padrão de 2.
- **MB/esquerda:** A média da dureza é de 198 HV com um desvio padrão de 2.

Os valores de dureza no metal base são consistentes com os esperados para o aço inoxidável 304, que geralmente apresenta dureza Vickers na faixa de 150 a 200 HV. A uniformidade na dureza indica uma boa resistência e qualidade do material base.

4.2.2.2 Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

- **ZAC/direita:** A dureza média é de 196 HV com um desvio padrão de 2.

- **ZAC/esquerda:** A dureza média é de 200 HV com um desvio padrão de 3.

As durezas nas regiões ZAC direita e esquerda são um pouco inferiores à do metal base, o que é esperado devido ao efeito térmico da soldagem, que pode causar mudanças microestruturais como recristalização parcial. A variação na dureza é mínima, indicando um controle adequado do impacto térmico durante a soldagem.

4.2.2.3 Metal de Solda (MA)

A dureza média é de 231 HV com um desvio padrão de 2. A dureza do metal de solda é maior do que a do material de base, o que é típico em processos de soldagem autógena, onde o rápido resfriamento pode resultar em uma microestrutura mais dura e fina.

Os valores de dureza medidos nas diferentes regiões das amostras de aço inoxidável 304 soldadas pelo processo TIG autógeno são compatíveis com os valores típicos encontrados na literatura para este material. A dureza do metal base é alta e uniforme, refletindo boa resistência e qualidade. As variações de dureza nas regiões ZAC são mínimas e esperadas devido ao impacto térmico da soldagem. A dureza aumentada no metal de solda sugere uma formação microestrutural fina e resistente. No geral, os valores de dureza são satisfatórios e indicam que o processo de soldagem autógeno foi eficaz, preservando as propriedades mecânicas desejadas do material.

4.2.3 Comparação de Dureza das Amostras

A comparação dos dados de dureza das amostras soldadas com ER308L e pelo processo TIG autógeno revela diferenças significativas.

- *Metal Base (MB):* A dureza é praticamente igual em ambas as amostras, indicando que ambos os processos de soldagem mantiveram a integridade do material base.
- *Zona Afetada pelo Calor (ZAC):* A dureza na solda autógena é ligeiramente maior, sugerindo um impacto térmico que pode ter melhorado a resistência microestrutural.
- *Metal de Solda (MA):* A dureza do metal de solda na solda autógena é significativamente maior do que na solda com ER308L, o que é esperado devido ao rápido resfriamento no processo autógeno, resultando em uma estrutura mais dura.
- *Conclusão:* A soldagem autógena pode produzir uma região de solda mais resistente em comparação com a soldagem com material de adição ER308L.

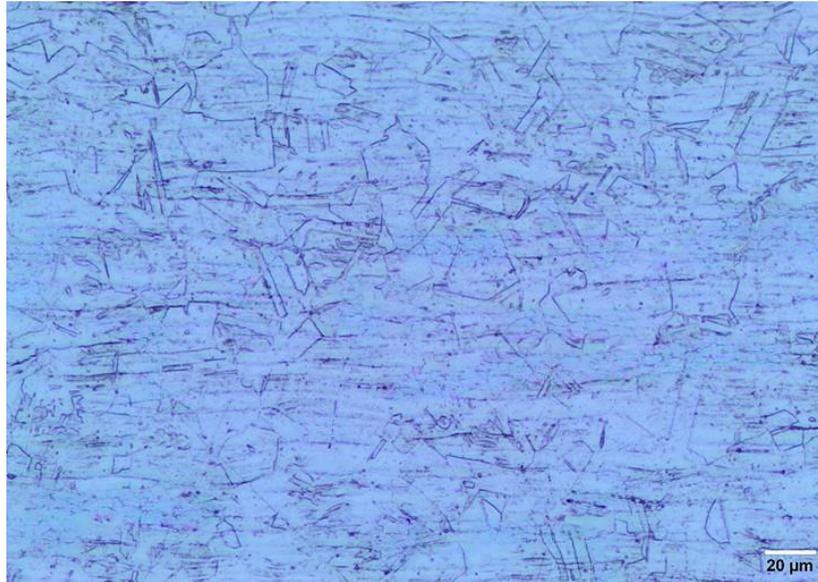
4.3 Análise Microestrutural:

A análise microestrutural foi realizada por meio de microscopia óptica. A microscopia óptica permite observar a microestrutura do material em nível macroscópico, fornecendo informações sobre a distribuição de fases, inclusões e possíveis defeitos visíveis a olho nu.

A Figura 22 mostra grãos de austenita de formas e tamanhos variados. O tamanho dos grãos pode ser influenciado pelo processo de fabricação e pelo tratamento térmico do material. Grãos menores podem indicar um processo de resfriamento mais rápido, enquanto grãos maiores podem resultar de um resfriamento mais lento ou de tratamentos térmicos específicos.

Os contornos dos grãos são claramente visíveis e podem ser observados devido ao ataque químico aplicado durante a preparação da amostra. Esses contornos são regiões de alta energia onde os átomos estão menos ordenados em comparação com o interior dos grãos.

Figura 22 – Microscopia óptica do aço inoxidável 304 a 200x de aumento.



Fonte: Autor.

O aço inoxidável 304 é um aço austenítico, o que significa que a sua microestrutura é composta predominantemente de grãos de austenita a temperatura ambiente. Esta fase é uma solução sólida de carbono em ferro com uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC).

4.3.1 Análise microestrutural após soldagem TIG com eletrodo ER308L

A imagem a seguir mostra a macrografia da amostra de aço inoxidável 304 soldada utilizando o processo TIG com material de adição ER308L. A macrografia é uma técnica que permite observar a estrutura e a qualidade da solda em uma escala macro, evidenciando características como a penetração, uniformidade e possíveis defeitos na junta soldada.

Figura 23 – Macrografia amostra soldada ER308L a 100x de aumento.



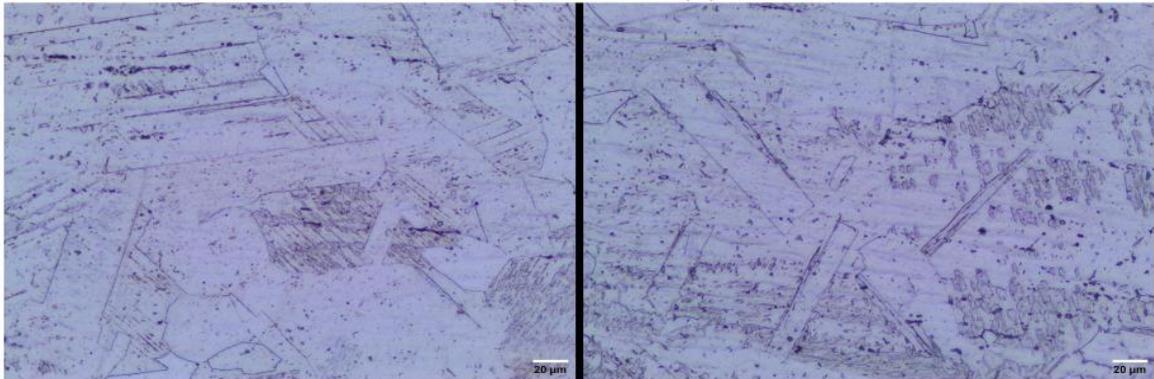
Fonte: Autor.

Esta análise foi fundamental para avaliar a integridade e a qualidade da soldagem, fornecendo informações valiosas para otimizar os parâmetros de soldagem e assegurar a confiabilidade das juntas em aplicações industriais.

A Zona Afetada pelo Calor (ZAC) é uma região crítica em amostras soldadas, onde ocorrem mudanças microestruturais devido ao aquecimento durante a soldagem. Esta zona pode ser observada e analisada cuidadosamente para identificar quaisquer modificações na

microestrutura, como a formação de fases secundárias, alterações na granulação ou a presença de tensões residuais.

Figura 24 – Microscopia óptica da ZAC do aço inoxidável 304 soldada com ER308L a 200x de aumento.

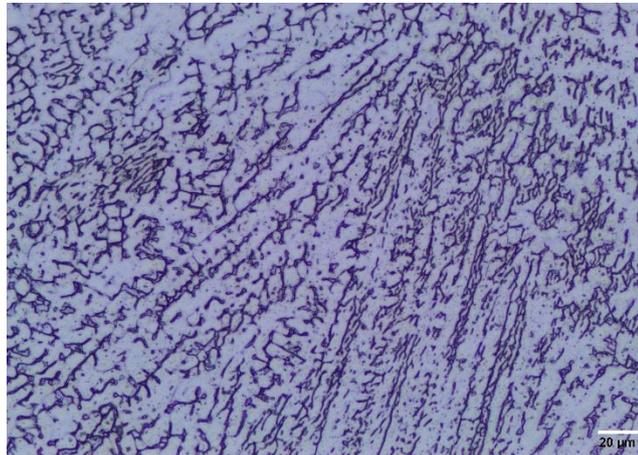


Fonte: Autor.

A análise microestrutural das imagens da ZAC do aço inoxidável 304 revela uma microestrutura predominantemente austenítica, com grãos equiaxiais bem definidos. Isso é indicativo de uma boa recristalização durante o processo de soldagem. Os contornos dos grãos são bem definidos, sugerindo um ataque químico adequado. A presença de contornos de grão claramente visíveis indica que a preparação da amostra foi bem executada.

Além de avaliar a ZAC, a análise microestrutural permitiu a identificação de possíveis defeitos, como trincas, porosidades ou inclusões, que podem ter se formado durante o processo de soldagem. Isso permite uma análise posterior e a correlação dos resultados com outros testes realizados.

Figura 25 – Microscopia óptica da ZF, 200x de aumento.



Fonte: Autor.

A análise microestrutural da solda TIG com eletrodo ER308L no material base aço inox 304 revelou características distintas nas diferentes zonas da solda. Na Zona Fundida (ZF), observou-se a presença de uma estrutura dendrítica ou colunar, típica do processo de solidificação a partir do estado líquido. A Zona afetada pelo calor mostrou um crescimento de grãos, evidenciando o efeito do calor da soldagem sobre a microestrutura. No metal base (MB), identificaram-se grãos austeníticos equiaxiais, característicos do aço inoxidável 304 não afetado pelo calor da soldagem. Essas observações confirmam as expectativas teóricas sobre a microestrutura das zonas de solda TIG e destacam a importância do controle térmico durante o processo de soldagem para garantir a integridade do material.

4.3.2 Análise microestrutural após soldagem TIG com solda autógena

A análise microestrutural da soldagem TIG com solda autógena no aço inoxidável 304 revelou mudanças significativas na estrutura do material devido ao processo de soldagem sem adição de material de enchimento. Esta técnica resulta em uma microestrutura predominantemente austenítica com grãos equiaxiais bem definidos na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e na Zona Fundida (ZF). Observou-se também a formação de estruturas dendríticas ou colunares típicas da solidificação do metal base. A preparação adequada das amostras, incluindo lixamento e polimento, foi crucial para a observação detalhada dessas alterações.

A imagem de macrografia abaixo fornece uma visão geral da junta soldada, destacando a uniformidade e a integridade da solda autógena no aço inoxidável 304. A análise macroscópica foi fundamental para identificar defeitos superficiais e inconsistências na solda, já que poderiam afetar a performance mecânica da junta soldada. A uniformidade observada na macrografia é um indicativo da qualidade do processo de soldagem realizado, assegurando que a solda atenda aos requisitos estruturais esperados.

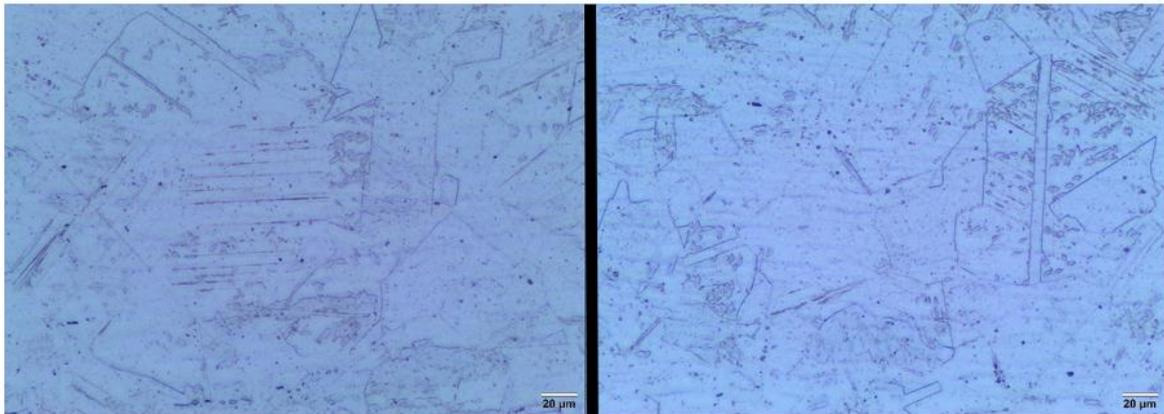
Figura 26 – Macrografia solda autógena a 100x de aumento.



Fonte: Autor.

A imagem microscópica abaixo da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), forneceu detalhes cruciais sobre as mudanças microestruturais induzidas pelo calor da soldagem. Ambas as imagens mostram grãos austeníticos recristalizados com bordas definidas, indicando uma recristalização eficiente e resultando em uma microestrutura homogênea. A presença de grãos equiaxiais reforça a qualidade da recristalização. No entanto, algumas áreas apresentam fases secundárias e possíveis tensões residuais, que podem influenciar negativamente a resistência mecânica e à corrosão da junta soldada. A presença de defeitos menores, como porosidades, sugere a necessidade de otimização dos parâmetros de soldagem para minimizar esses efeitos e garantir a integridade estrutural do material soldado.

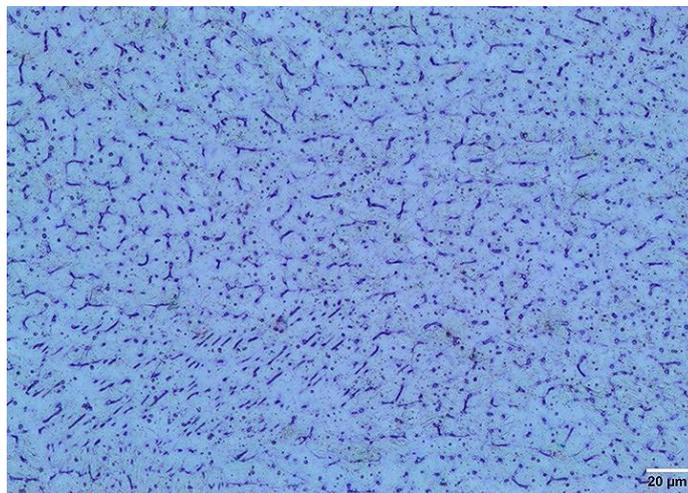
Figura 27 - Microscopia óptica da ZAC do aço inoxidável 304 com solda autógena a 200x de aumento.



Fonte: Autor

A análise microscópica da área soldada em uma solda autógena TIG no aço inoxidável AISI 304, com ampliação de 200x, demonstrada a seguir, destaca a presença de ferrita delta equiaxial. A soldagem autógena, sem adição de material, resulta na fusão direta do metal base, levando à formação de ferrita delta devido à rápida solidificação. Essa microestrutura é benéfica, pois proporciona resistência à corrosão e melhora a resistência à fissuração. A distribuição uniforme da ferrita delta é um indicativo positivo da qualidade da solda, assegurando uniformidade estrutural e integridade mecânica do metal de solda.

Figura 28 – Metal de solda autógeno.



Fonte: Autor.

Ainda se destaca a presença de ferrita delta equiaxial na área soldada confirma a boa qualidade da soldagem autógena em aço inoxidável AISI 304, garantindo as propriedades desejadas de resistência à corrosão e integridade mecânica.

4.3.3 Comparação dos Resultados:

Os ensaios de tração demonstraram que as amostras soldadas com eletrodo ER308L apresentam maior resistência à tração e ductilidade em comparação com as soldas autógenas. As amostras ER308L suportaram maiores cargas e tensões, além de mostrar melhores alongamento e estrição. No ensaio de dureza Vickers, o metal de solda das amostras autógenas apresentou uma dureza superior, indicando uma estrutura mais dura devido ao rápido

resfriamento. A análise microestrutural revelou que as soldas ER308L têm uma estrutura mais homogênea e menos defeitos, enquanto as soldas autógenas apresentam estruturas mais duras e resistentes à corrosão.

Em conclusão, para aplicações que exigem alta resistência à tração e maior ductilidade, como componentes estruturais de alta solicitação, a soldagem com eletrodo ER308L é mais adequada. Por outro lado, para aplicações que necessitam de maior dureza e resistência à corrosão, como reparos rápidos e indústrias alimentícias e farmacêuticas, a soldagem autógena é mais vantajosa devido à sua simplicidade e custo reduzido.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi realizada a soldagem TIG em amostras de aço inoxidável 304 de baixa espessura utilizando eletrodos ER308L e solda autógena, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas, dureza e microestrutura das juntas soldadas. Os ensaios de tração mostraram que as amostras soldadas com ER308L possuem maior resistência à tração e ductilidade, com cargas máximas e tensões superiores, além de alongamento e estrição mais elevados. Em contrapartida, as soldas autógenas apresentaram maior dureza no metal de solda, resultado do rápido resfriamento que gera uma microestrutura mais dura.

A análise microestrutural revelou que as soldas com ER308L têm uma estrutura mais homogênea e menos defeitos, com grãos austeníticos bem definidos na zona afetada pelo calor e no metal base. As soldas autógenas, por outro lado, apresentaram estruturas dendríticas ou colunares na zona fundida, características de um resfriamento rápido, além de uma presença significativa de ferrita delta, conferindo maior resistência à corrosão.

Esses resultados indicam que a soldagem com ER308L é mais adequada para aplicações que requerem alta resistência e ductilidade, como componentes estruturais de alta solicitação, enquanto a soldagem autógena é mais vantajosa para reparos rápidos e indústrias alimentícias e farmacêuticas devido à sua simplicidade e menor custo, além da elevada dureza e resistência à corrosão. Assim, ambos os métodos de soldagem apresentam vantagens específicas que devem ser consideradas de acordo com as exigências da aplicação.

Um trabalho futuro promissor seria a aplicação dos métodos de soldagem dentro de uma empresa, trocando os eletrodos ER308L pela solda autógena. Este estudo poderia verificar a diminuição de custos e avaliar o impacto dessa mudança nas propriedades mecânicas e microestruturais das juntas soldadas. Além disso, seria relevante analisar a eficiência do processo de soldagem autógena em termos de tempo e recursos, bem como a adequação das soldas para diferentes aplicações industriais. Comparar os resultados de desempenho e custo podem fornecer insights valiosos para otimizar os processos de soldagem na empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, Mohamed MZ et al. Friction stir spot welding of different thickness sheets of aluminum alloy aa6082-T6. **Materials**, v. 15, n. 9, p. 2971, 2022.
- ANAND, R.; SRIDHAR, V. G. Studies on process parameters and tool geometry selecting aspects of friction stir welding—A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 576-583, 2020.
- BORGES, Vitor D. et al. Análise das Propriedades Mecânicas e Microestrutural da Solda Híbrida TIG-MAG em Aço SAE 1020. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 28, p. 148-156, 2020.

- CAETANO, Gabriela Aksascki et al. **Efeito de tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas de chapas soldadas do aço inoxidável duplex UNS S32304**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 16, n. Especial, p. 0-0, 2019.
- CAMPOS, Murilo Rodrigues de. **Análise das propriedades mecânicas e microestruturais de diferentes polímeros empregados na fabricação de cápsulas para overdentures obtidas por impressão 3D**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2021.
- COSTA, Rafael Cortinas de Castro. **Estudo da soldagem por eletrodo revestido utilizando o aço 308L e a técnica cold wire**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CRUZ, Karen Debora Pinheiro; MINEIRO, Paloma Estebanez Marques. Influência do tratamento térmico pós-soldagem na microestrutura e dureza da zta do aço 9% ni para aplicação offshore. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 8, p. 1227-1242, 2017.
- CUNHA, T. V. **Desenvolvimento de equipamento e de metodologia de parametrização para a soldagem orbital TIG**. Florianópolis: Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC, Out. 2008.
- DA SILVA BARROSO, Geison et al. Análise dos tratamentos pós-soldagem de juntas de aço inoxidável duplex AISI 2205. **Análise**, v. 11, n. 33, 2021.
- DE JESUS, Dickson Biella; DALEFFE, Anderson; DA ROSA, Magali. Comparativo do desgaste abrasivo do aço inox 304 e alta alumina através do ensaio de roda de borracha e areia seca. **Revista Vincci-Periódico Científico do UniSATC**, v. 4, n. 2, p. 205-225, 2019.
- DE SOUZA, Adair Gomes et al. Verificação da influência da temperatura e da concentração de cloreto férrico na usinagem fotoquímica do aço inoxidável 304. **Cadernos UniFOA**, v. 14, n. 41, p. 47-59, 2019.
- DE SOUZA, Sandro Soares; NUNES, Wesley Matheus; PAGANINI, Paula. Processo de Soldagem: uma Introdução aos Princípios Básicos do Processo de Soldagem TIG Aplicado na Indústria Mecânica. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 14, n. 14, p. 27-29, 2019.
- FADRIQUE, Rodrigo et al. Efeito da soldagem nas propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X65. **Revista Liberato**, v. 22, n. 38, p. 215-222, 2021.
- GARCIA, E. R. V. **Efeito da corrente de soldagem do processo TIG pulsado autógeno na microestrutura da zona fundida dos aços inoxidáveis duplex UNS S32304 e UNS S32101**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. DOI: 10.11606/D.3.2011.tde-12032012-121409.
- GHENO, Simoni Maria et al. Análise das propriedades mecânicas e microestruturais do aço inox duplex submetido a processos de soldagem. **SITEFA**, v. 2, n. 1, p. 69-83, 2019.
- KUNDU, Anupam; PRATIHAR, Dilip Kumar; PAL, Abhishek Rudra. A review on micro-electron beam welding with a modernized SEM: Process, applications, trends and future prospect. **Journal of Micromanufacturing**, v. 2, n. 2, p. 220-225, 2019.
- KURYNTSEV, Sergey. A review: Laser welding of dissimilar materials (Al/Fe, Al/Ti, Al/Cu)—Methods and techniques, microstructure and properties. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 122, 2021.
- LI, Yuantai et al. Ultra-high-power laser welding of thick-section steel: Current research progress and future perspectives. **Optics & Laser Technology**, v. 167, p. 109663, 2023.

LUZ, SOUSA et al. **Avaliação do conservadorismo do método de análise térmica do prci quanto ao risco de perfuração no reparo com soldagem em operação de oleoduto com baixa espessura.** XL International Sodebras Congress. Volume 14 N° 159 Março/2019.

MAGALHÃES, Aparecida Silva et al. **Efeito de Tratamentos Térmicos Pós-Soldagem a Laser na Microestrutura de um Aço Inoxidável Duplex UNS S32304.** In: 74° Congresso Anual da ABM–Internacional. 2019. p. 88-98.

MASAYUKI, A. **Research and development trends of stainless steel and its future prospects.** Nippon Steel Technical Report, 2021.

MINEIRO, Paloma Estebanez Marques; CRUZ, Karen Debora; FILHO, João da Cruz Payão. **Influência do tratamento térmico pós-soldagem na dureza da zta do aço 9% NI.** Revista Uniabeu, v. 11, n. 29, 2018.

MOAYEDI, Hossein et al. **Weld orientation effects on the formability of tailor welded thin steel sheets.** Thin-Walled Structures, v. 149, p. 106669, 2020.

MODENESI, Paulo J. A química da formação do cordão na soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, p. 287-300, 2013.

MORAIS, Lucas Alexandre; ARANTES, Vera Lúcia. **Desenvolvimento de materiais com gradiente funcional a base de carbetto de nióbio e de aço inoxidável 304, utilizando carbetto de molibdênio como inibidor de crescimento de grão.** Livro de Resumos Expandidos, 2021.

NUNES, Juliana Andrielle de Lima. **Soldagem dissimilar AISI 316L/NiCrMo-3: Efeito do calor aportado sobre as características químicas e geométricas da zona parcialmente misturada.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

OLIVARES, Erick Alejandro González; DÍAZ, Victor Manuel Vergara. Estudo do processo TIG Hot-Wire com material de adição AISI-316L analisando o efeito do sopro magnético do arco sobre a diluição do cordão de solda. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, p. 330-341, 2016.

PAIVA FILHO, Antonio Ribeiro; DOS REIS SOBRINHO, José Francisco. Efeitos do processo de soldagem a-tig em aços inoxidáveis austeníticos. **Revista De Engenharia E Tecnologia**, v. 13, n. 4, 2021.

PEREIRA, Elaine Cristina et al. **Caracterização do aço inoxidável 304 exposto em ambiente corrosivo de caldeira de recuperação.** XXI Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais, 2018.

PRADO, Juliane Carla Lopes. **Revestimento pelo processo eletrodo revestido com aço inoxidável 308L.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ROCHA, Vinícius Resende. **Análise das propriedades mecânicas e microestruturais do aço microligado DOMEX 460MC soldado em diferentes condições de pré-aquecimento.** 2018. xiii, 108 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas)—Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

ROMERO-RESENDIZ, L. et al. **Heterostructured stainless steel: Properties, current trends, and future perspectives.** Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 150, p. 100691, 2022.

VIDAL, Vitor Cruz. **Utilização de gás de purga no processo de soldagem TIG em aço inoxidável austenítico ABNT 304.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.