

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia e Ciências Humanas
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Soldagem

Fábio Fernandes Reis da Mata

**IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM NA MANUTENÇÃO: MAXIMIZANDO
A EFICIÊNCIA E QUALIDADE**

Belo Horizonte
2024

FÁBIO FERNANDES REIS DA MATA

**IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM NA MANUTENÇÃO: MAXIMIZANDO
A EFICIÊNCIA E QUALIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Orientador: Ariel Rodríguez Ariaz

Belo Horizonte
2024

M425i

Mata, Fábio Fernandes Reis da.

A importância da soldagem de manutenção [recurso eletrônico] : maximizando a eficiência e qualidade / Fábio Fernandes Reis da Mata. - 2024.

1 recurso online (47 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

"Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais"

Bibliografia: f. 46-47.

1. Soldagem. 2. Controle de qualidade. 3. Juntas soldadas. I. Arias, Ariel Rodríguez. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

UFMG

CURSO DE SOLDAGEM

ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO FÁBIO FERNANDES REIS DA MATA

Realizou-se, no dia 31 de outubro de 2024, às 15:30 horas, teams, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM NA MANUTENÇÃO: MAXIMIZANDO A EFICIÊNCIA E QUALIDADE.*, apresentada por FÁBIO FERNANDES REIS DA MATA, número de registro 2022687293, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em SOLDAGEM, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Ariel Rodriguez Arias - Orientador (UFMG), Prof(a). Jean Aldair Oliveira (Eutectic Castolin (Esab)), Prof(a). Bernardo Hermont Barcellos Gonçalves (NLMK South América Comércio de Aço Ltda).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada (80) Nota

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 31 de outubro de 2024.

Prof(a). Ariel Rodriguez Arias (Doutor)

Prof(a). Jean Aldair Oliveira (Especialista)

Prof(a). Bernardo Hermont Barcellos Gonçalves (Mestre)

AGRADECIMENTOS

Expressar sincera gratidão a todos que desempenharam um papel fundamental na realização deste trabalho acadêmico. Em primeiro lugar, a Deus por proporcionar força e orientação nos momentos desafiadores ao longo dessa jornada acadêmica.

À família e amigos, profunda apreciação pelo apoio inabalável e pela confiança, especialmente durante os períodos de intensa dedicação aos estudos e pesquisas.

À respeitável instituição que nos acolheu durante esses anos de formação, assim como ao corpo docente, à direção e à equipe administrativa, somos gratos pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados, bem como pelo apoio contínuo que nos permitiu alcançar nossos objetivos acadêmicos, culminando na obtenção do diploma em Engenharia.

O autor agradece ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Estender a profunda gratidão ao orientador, por sua dedicação e comprometimento em nos guiar ao longo deste projeto de pesquisa. Sua orientação foi crucial para o desenvolvimento e a conclusão bem-sucedida deste trabalho, enriquecendo nossa experiência acadêmica e preparando-nos para os desafios futuros.

RESUMO

Este estudo aborda a soldagem por pontos do aço ASTM A36 com o uso do arame de solda ER 316LSI e do gás de proteção Corgon 25, adotando uma metodologia explicativa. O foco da pesquisa é a análise dos parâmetros de soldagem, das propriedades mecânicas e das características da junta soldada. A preparação minuciosa da superfície e a seleção criteriosa dos parâmetros de soldagem desempenharam um papel fundamental na preservação da integridade estrutural da junta soldada. A análise micrográfica revelou a presença de descontinuidades relacionadas ao processo de resfriamento do material. Compreender os desafios associados à soldagem por pontos é essencial para o aprimoramento contínuo das práticas de soldagem e para garantir a qualidade das juntas soldadas em uma variedade de aplicações industriais. O estudo destaca a importância de considerar os efeitos térmicos e as influências do processo de resfriamento na integridade da junta soldada, além de enfatizar a necessidade de implementar práticas de controle de qualidade robustas para assegurar a produção de soldas duráveis e de alta qualidade. Ao considerar os desafios e as nuances da soldagem por pontos, este estudo oferece uma visão abrangente dos processos e das estratégias necessárias para garantir a integridade e a durabilidade das juntas soldadas em contextos industriais exigentes.

Palavras-chave: análise; parâmetros; descontinuidades; importância.

ABSTRACT

This study addresses spot welding of ASTM A36 steel using ER 316LSI welding wire and Corgon 25 shielding gas, adopting an explanatory methodology. The research focus is on the analysis of welding parameters, mechanical properties, and characteristics of the welded joint. Thorough surface preparation and careful selection of welding parameters played a fundamental role in preserving the structural integrity of the welded joint. Micrographic analysis revealed the presence of discontinuities related to the material cooling process. Understanding the challenges associated with spot welding is essential for the continuous improvement of welding practices and ensuring the quality of welded joints in a variety of industrial applications. The study highlights the importance of considering thermal effects and influences of the cooling process on the integrity of the welded joint, as well as emphasizing the need to implement robust quality control practices to ensure the production of durable and high-quality welds. By considering the challenges and nuances of spot welding, this study provides a comprehensive insight into the processes and strategies necessary to ensure the integrity and durability of welded joints in demanding industrial contexts.

Keywords: analysis; parameters; discontinuities; importance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo De Soldagem	21
Figura 2 - Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo	25
Figura 3 - Diagrama de Schaeffler	36
Figura 4 - Superfície sendo esmerilhada.....	41
Figura 5 - Superfície da chapa lixada e esmerilhada	41
Figura 6 - Processo de soldagem do preenchimento	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa	11
1.2 Delimitação do tema	12
1.3 Problema de pesquisa	13
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo Geral	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
1.5 Hipótese	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Contextualização	15
2.2 Soldagem MIG	16
2.2.1 Fundamentos do processo	18
2.2.2 Parâmetros	19
2.2.3 Corrente de soldagem	19
2.2.4 Força aplicada nos eletrodos	20
2.2.5 Tempo de soldagem	20
2.3 Ciclo de operação do processo de soldagem	21
2.3.1 Eletrodos aplicados no processo de soldagem	22
2.3.2 Material dos eletrodos	22
2.3.3 Geometria dos eletrodos	24
2.3.4 Variáveis do processo	25
2.3.5 Qualidade da solda	26
2.4 Diferença entre eletrodos: zítrod, nitrod e titânio	26
2.4.1 Eletrodo de zircônio (Zítrod)	26
2.4.2 Eletrodo de nitrogênio (Nitrod)	27
2.4.3 Eletrodos de titânio	28
2.4.4 Consumíveis utilizados no processo de soldagem	29
2.4.5 Parâmetros de soldagem	30
2.5 Influência da composição do material base	31
2.5.1 Métodos de avaliação da qualidade da solda	32
2.5.2 Simulação dos processos de soldagem	34

2.6 Diagrama de Schaeffler	36
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	38
4. ESTUDO DE CASO.....	39
4.1 Escolha e obtenção do material.....	39
4.2 Corte do corpo de prova	40
4.3 Preparação de superfície.....	40
4.4 Soldagem.....	42
4.5 Corte e preparação de seção.....	44
5. RESULTADOS	46
5.1 Cálculo de aporte térmico	46
5.2 Análise de micrografia ótica	47
6. DISCUSSÃO	50
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo essencial na manutenção industrial, desempenhando um papel crítico na preservação, reparação e modificação de uma ampla gama de equipamentos e estruturas. No contexto da manutenção, a soldagem é utilizada para corrigir danos, reforçar componentes desgastados e adaptar equipamentos para atender a novos requisitos operacionais. A importância da soldagem na manutenção está profundamente enraizada na necessidade de maximizar a vida útil dos ativos industriais, garantir sua confiabilidade e segurança, e minimizar os custos associados à substituição de equipamentos.

A soldagem desempenha um papel crucial em diversos setores industriais, incluindo automotivo, aeroespacial, petróleo e gás, construção civil, entre outros. Em ambientes operacionais desafiadores, como refinarias, plataformas offshore e fábricas de produção em larga escala, os equipamentos estão sujeitos a condições extremas que podem resultar em desgaste, corrosão e danos mecânicos. Nessas circunstâncias, a soldagem é frequentemente empregada para reparar danos, reforçar estruturas e estender a vida útil dos equipamentos, garantindo sua operacionalidade contínua.

Além de reparar danos, a soldagem é utilizada na manutenção preventiva para identificar e corrigir potenciais pontos fracos nos equipamentos antes que causem falhas catastróficas. Isso envolve a inspeção regular das juntas soldadas, o monitoramento de sinais de desgaste e corrosão, e a realização de reparos proativos para evitar a deterioração adicional.

A soldagem na manutenção também desempenha um papel crucial na adaptação de equipamentos para atender a novos requisitos operacionais. Com as mudanças nas demandas do mercado, regulamentações governamentais e avanços tecnológicos, muitas vezes é necessário modificar equipamentos existentes para aumentar sua eficiência, capacidade ou segurança. A soldagem oferece a flexibilidade necessária para realizar essas modificações de forma rápida e eficaz, minimizando o tempo de inatividade e os custos associados.

No entanto, apesar de sua importância, a soldagem na manutenção enfrenta uma série de desafios. Isso inclui a seleção do processo de soldagem mais adequado para uma aplicação específica, o controle preciso dos

parâmetros de soldagem, a garantia da qualidade das juntas soldadas e o cumprimento de normas e regulamentações de segurança.

Diante desse contexto, este trabalho se propõe a explorar mais profundamente a importância da soldagem na manutenção industrial, analisando seus fundamentos, aplicações práticas, desafios e tendências. Espera-se que os insights obtidos possam contribuir para a otimização dos processos de manutenção e a melhoria da confiabilidade e segurança dos equipamentos industriais.

1.1 Justificativa

A soldagem desempenha um papel crucial na preservação, reparação e adaptação de uma vasta gama de equipamentos e estruturas utilizados em diversos setores produtivos. Sua aplicação na manutenção não apenas assegura a integridade estrutural dos ativos industriais, mas também contribui diretamente para a eficiência operacional das empresas.

A soldagem é um processo fundamental na indústria, permitindo a união permanente de materiais e a formação de juntas soldadas que garantem a estabilidade e funcionalidade dos componentes. No âmbito da manutenção, essa técnica se revela essencial para reparar danos, reforçar peças desgastadas e adaptar equipamentos para novas exigências operacionais. Através da soldagem, é possível prolongar a vida útil dos ativos industriais, evitar interrupções não programadas na produção e maximizar a eficiência dos processos fabris.

Além disso, a soldagem na manutenção proporciona uma alternativa econômica à substituição completa de equipamentos danificados. Ao invés de investir em novos ativos, as empresas podem optar por reparar e refabricar componentes por meio da soldagem, reduzindo significativamente os custos de manutenção e otimizando o uso de recursos financeiros. Essa abordagem não só contribui para a sustentabilidade econômica das empresas, mas também para a preservação do meio ambiente, ao minimizar o descarte prematuro de equipamentos.

No entanto, a soldagem na manutenção não está isenta de desafios. A seleção adequada do processo de soldagem, o controle preciso dos parâmetros

de soldagem, a garantia da qualidade das juntas soldadas e o cumprimento das normas de segurança são aspectos críticos que demandam atenção e expertise por parte dos profissionais envolvidos. Superar esses desafios requer não apenas conhecimento técnico especializado, mas também o acesso a tecnologias avançadas e a adesão a práticas operacionais seguras e eficientes.

Portanto, diante da importância vital da soldagem na manutenção industrial, este trabalho se propõe a investigar de forma abrangente os fundamentos, aplicações práticas, desafios e tendências associados a esse tema. Ao oferecer uma análise aprofundada e reflexiva, espera-se fornecer insights valiosos que possam informar e orientar as práticas de manutenção nas empresas, contribuindo assim para o aprimoramento da eficiência e competitividade da indústria como um todo.

1.2 Delimitação do tema

Este estudo visa aprofundar a compreensão sobre a soldagem na manutenção, um método amplamente utilizado na indústria, mas que ainda apresenta desafios em relação à garantia da qualidade das juntas soldadas. Ao direcionar o foco para a otimização dos parâmetros de soldagem, como corrente, força e tempo, pretende-se não apenas melhorar a eficiência dos processos industriais, mas também elevar o padrão de qualidade das juntas produzidas.

Ao restringir a pesquisa à soldagem na manutenção, será possível uma análise mais detalhada e específica dos fatores que influenciam diretamente a formação das juntas soldadas, possibilitando recomendações práticas e aplicáveis para os profissionais da indústria.

Visando contribuir para o avanço da tecnologia de soldagem, fornecendo informações valiosas sobre a importância dos parâmetros de soldagem na qualidade das juntas. Ao considerar a influência da corrente de soldagem, da força aplicada nos eletrodos e do tempo de soldagem, espera-se desenvolver diretrizes mais precisas e eficazes para os processos de fabricação.

1.3 Problema de pesquisa

Qual a melhor combinação de corrente de soldagem, força aplicada nos eletrodos e tempo de soldagem para otimizar a qualidade e eficiência da soldagem em processos industriais?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é investigar e determinar a combinação ideal de parâmetros de soldagem que resulte na melhor qualidade e eficiência do processo em ambientes industriais.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analisar o impacto da variação da corrente de soldagem na qualidade das juntas soldadas.
- Investigar como a força aplicada nos eletrodos influencia a formação e resistência das juntas soldadas.
- Avaliar o efeito do tempo de soldagem na integridade estrutural e propriedades mecânicas das uniões soldadas.

1.5 Hipótese

Com base na análise da literatura e na compreensão dos princípios fundamentais da soldagem, presume-se que a otimização dos parâmetros de soldagem, como corrente, força e tempo, terá um impacto significativo na qualidade das juntas soldadas. A hipótese é que ajustes precisos nesses parâmetros levarão a uma melhoria substancial na resistência mecânica das juntas, garantindo uma integridade estrutural superior e aumentando a eficiência dos processos industriais. Acredita-se que, ao atingir um equilíbrio ideal entre esses parâmetros, será possível obter juntas soldadas com propriedades

mecânicas superiores, contribuindo para a redução de defeitos de fabricação e aprimorando a qualidade dos produtos finais.

Ao considerar a relação entre os parâmetros de soldagem e a qualidade das juntas resultantes, a hipótese central é que a otimização desses parâmetros levará a uma melhoria geral nos processos de fabricação industrial. Antecipa-se que o ajuste adequado da corrente de soldagem, da força nos eletrodos e do tempo de soldagem resultará em uma soldagem mais consistente e confiável, com menos defeitos e falhas de produção. Portanto, espera-se que essa otimização não apenas eleve o padrão de qualidade dos produtos fabricados, mas também contribua para a eficiência operacional, reduzindo custos relacionados a retrabalhos e aumentando a produtividade geral das linhas de produção.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Contextualização

Bessa (2018) destaca a vital importância da soldagem de manutenção para a continuidade operacional das linhas de produção, enfatizando sua capacidade de realizar reparos rápidos e econômicos em peças e equipamentos. Este processo tem se tornado cada vez mais relevante no âmbito da manutenção, visando estender a vida útil dos componentes de máquinas e equipamentos (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Alinhado a esse contexto, Veiga (2010) ressalta que a soldagem desempenha um papel fundamental na manutenção, contribuindo para aumentar a disponibilidade dos equipamentos, preservar a qualidade dos produtos e reduzir custos. Isso é possível através do revestimento de áreas sujeitas a desgaste com materiais de alta resistência, bem como na reparação de trincas e fraturas, permitindo o retorno dos equipamentos à operação sem a necessidade de substituição, o que reduz tanto os custos quanto o tempo de manutenção.

A soldagem tem evoluído significativamente em termos tecnológicos, com o desenvolvimento de ligas especiais resistentes ao desgaste, aplicadas no revestimento de peças. Estes materiais demonstram uma resistência superior ao desgaste quando comparados aos metais convencionais dos equipamentos, como aço ou ferro fundido. Paranhos (2010) destaca que a soldagem desempenha um papel crucial na prolongação da vida útil dos equipamentos utilizados na indústria sucroalcooleira. Equipamentos com peças revestidas podem ter sua vida útil aumentada em até 10 vezes em comparação com aqueles sem revestimento.

Atualmente, muitas peças são revestidas através da soldagem antes de entrarem em operação. Esse aumento na vida útil dos equipamentos reduz as paradas na linha de produção para substituição de peças, elevando a produtividade das usinas.

Conde (1986) ressalta a importância dos revestimentos duros na redução do desgaste dos equipamentos industriais. Diversos métodos são empregados para aplicar esses revestimentos, incluindo soldagem a arco elétrico com

eletrodos revestidos, MIG/MAG, arames tubulares e arco submerso. Especificamente, a soldagem por eletrodo revestido é amplamente utilizada no setor sucroalcooleiro devido à sua versatilidade, custo acessível, baixo consumo energético e baixa diluição.

O SENAI (1997) descreve as etapas para a soldagem de manutenção em trincas e fraturas, que incluem:

- Definição da localização inicial e final da trinca.
- Identificação do material envolvido.
- Preparação da região da solda para facilitar o acesso aos equipamentos.
- Limpeza da área de soldagem, removendo óleos, graxas e outras impurezas.
- Seleção do processo de soldagem e do consumível, visando preservar as propriedades mecânicas originais do material.
- Estabelecimento dos parâmetros de soldagem, como pré e pós-aquecimento, além da sequência de execução da solda.
- Avaliação da necessidade de sobreposição de material para o acabamento da junta soldada.

2.2 Soldagem MIG

De acordo com Marques et al. (2020), a soldagem é um método de união que se baseia tanto em forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas quanto em forças microscópicas.

A definição da American Welding Society - AWS (2001) conceitua soldagem como uma operação que busca unir materiais através do aquecimento até atingirem uma temperatura específica, podendo ou não envolver o uso de metal de adição ou aplicação de pressão.

Marques et al. (2020) ampliam esse entendimento ao afirmarem que o processo de soldagem engloba uma variedade de técnicas, podendo ser aplicado até mesmo em materiais não metálicos e permitindo a união sem necessariamente ocorrer a fusão. Além disso, destacam que muitos processos de soldagem são utilizados para depositar material em uma superfície, com o objetivo de recuperar peças desgastadas.

O processo de soldagem chamado de *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) consiste no uso de fontes de calor de um arco elétrico, onde se preserva a extremidade do eletrodo no consumível, alimentado continuamente e a peça a ser soldada. Durante o processo o arco elétrico funde o arame-eletrodo, que visa sustentar a poça de fusão. Entre a peça a ser soldada e o eletrodo há uma proteção por gases contra contaminantes atmosféricos (Ramos, 2018).

Conforme Scotti e Ponomarev (2008), uma atmosfera protetora de gás inerte, como o argônio e hélio, ou gás ativo como o dióxido de carbono, formam a proteção da região a ser submetida a solda. Esse gás protetor é empregado para prevenir a contaminação do eletrodo, das partículas a serem transferidas de metal fundido e da poça de fusão pelos gases atmosféricos. Em casos em que usa o gás ou mistura inerte o processo é chamado de *Metal Inert Gas* (MIG).

O processo de soldagem GMAW segue o seguinte processo: um gerador fornece uma potência elétrica que cria um arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada. Como resultado tem-se a fusão das peças metálicas a ser montada e do metal de adição. O fio vai se desenrolando de modo contínuo conforme as gotas de metal fundido vão se formando na sua extremidade. Os gases de proteção envolvem o banho contra o ar ambiente e asseguram a estabilidade do arco. A soldagem GMAW pode ser realizada de forma manual, automática ou automatizada/robotizada (Batista, 2018).

Wainer et al. (1992) explica que a soldagem MIG é indicada para soldagem de aços-carbono, aços inoxidáveis, aços de baixa, média e alta liga, soldagem de alumínio, magnésio e cobre com ligas.

Nesse processo, os gases mais usados são o Ar (argônio), O (oxigênio), CO₂ (dióxido de carbono), He (hélio), e juntamente com a adição de elementos redutores como o H₂ (hidrogênio) e N₂ (nitrogênio). Durante aplicação dos gases é preciso dar atenção aos aspectos teóricos, bem como as possíveis consequências e aplicá-las para o melhor benefício proposto, tendo como base as características da operação, garantindo uma solda de boa qualidade e maior eficiência na deposição da solda e no custo final (Scotti e Ponomarev, 2008).

2.2.1 Fundamentos do processo

Com base nas investigações de Fonseca (2019), a soldagem opera através da aplicação controlada de corrente elétrica por um período definido, resultando na fusão de uma pequena área de material sob a pressão concentrada de eletrodos. Durante o processo, a corrente é administrada até que a fusão seja alcançada, enquanto a força dos eletrodos é aplicada antes, durante e após a aplicação da corrente elétrica.

A produção de calor, necessária para a fusão, é gerada pelo efeito Joule, ocasionado pela resistência encontrada na passagem da corrente elétrica. Dada a curta distância percorrida pela corrente no material base e a brevidade do período de soldagem, correntes elétricas substanciais são requeridas para efetuar a solda. O aquecimento localizado na zona de soldagem resulta de uma combinação complexa de três parâmetros distintos, conforme detalhado por Branco (2014).

Considerando os fatores relevantes na soldagem por resistência por pontos, destacamos os seguintes termos essenciais:

I - Corrente elétrica,

R - Resistência Ôhmica da junta a ser soldada,

t - Tempo de aplicação da corrente de soldagem.

Ao reunir esses termos em uma única expressão, obtemos a equação abaixo, que representa a lei de Joule aplicada ao condutor:

$$Q=I^2 \times R \times t$$

Onde Q representa o calor gerado durante o processo de soldagem.

Da equação mencionada, é evidente que a corrente elétrica é o fator dominante na geração de calor, já que é o termo de maior grau (Fonseca, 2019).

Durante o processo de soldagem, parte do calor é direcionada para a criação da solda, enquanto outra parte é dissipada por condução, convecção e radiação para o material base e o eletrodo. Geralmente, a extensão dessas perdas é desconhecida (Branco, 2014).

Embora a lei de Joule aplicada a condutores seja comumente usada para representar a quantidade de calor gerada no processo de soldagem, essa

equação pode ser considerada uma simplificação excessiva, uma vez que a resistência varia de maneira complexa durante a soldagem, influenciada por fatores como a força aplicada pelos eletrodos, a temperatura, o tempo e as características do material soldado. Assim, o calor gerado durante o processo pode ser expresso como a integral da potência elétrica ao longo do tempo de soldagem, como indicado na equação a seguir (Fonseca, 2019):

$$Q = \int I^2 \times R \times dt$$

Onde Q representa o calor gerado no processo, e P(t) denota a potência elétrica em função do tempo.

2.2.2 Parâmetros

Os parâmetros de soldagem têm um impacto crucial na eficácia do processo de soldagem e na definição das propriedades mecânicas da junta soldada. Na soldagem por pontos, três parâmetros principais desempenham um papel fundamental: a Corrente de Soldagem, a Pressão dos eletrodos e o Tempo de Soldagem (Vargas, 2016).

Embora a resistência elétrica da peça não seja diretamente ajustada durante o processo de soldagem, sua influência é significativa na geração de calor (Vargas, 2016).

2.2.3 Corrente de soldagem

De acordo com Vargas (2016), a corrente de soldagem é o fator primordial na geração de calor e, portanto, tem o maior impacto sobre as propriedades da junta soldada. Variações em sua intensidade podem resultar em alterações significativas na qualidade da solda.

No contexto da soldagem por pontos, a corrente pode ser classificada em dois tipos distintos, conforme discutido por Fonseca (2019):

- Corrente Alternada: produzida por transformadores monofásicos ou trifásicos, operando em frequências que podem ser iguais ou diferentes da rede de distribuição.

- Corrente Contínua: podendo ser direta, pulsada ou com picos de corrente.

É crucial estabelecer um equilíbrio entre a corrente e o tempo de soldagem. Tipicamente, um aumento na corrente demanda uma redução no tempo de aplicação. Nos processos de soldagem por pontos, os níveis de corrente frequentemente ultrapassam os 15 kA (Vargas, 2016).

2.2.4 Força aplicada nos eletrodos

Conforme destacado por Dias (2021), a aplicação da força tem a função de aproximar, posicionar e unir as chapas a serem soldadas. A tensão mecânica resultante dessa força sobre a peça está presente durante todo o processo de soldagem, desempenhando um papel crucial na qualidade dos pontos soldados.

Essa força pode ser gerada por sistemas hidráulicos, pneumáticos, magnéticos ou mecânicos, conforme discutido por Borges (2018). O aumento da força influencia de forma indireta a geração de calor, uma vez que reduz as resistências de contato. Além disso, a força é fundamental para manter o metal fundido no lugar, garantindo a adequada consolidação do ponto (Fonseca, 1999).

2.2.5 Tempo de soldagem

Segundo Vargas (2022), o tempo de aplicação da corrente durante o ciclo de soldagem deve ser ajustado de forma inversamente proporcional à intensidade da corrente de soldagem.

A quantidade de calor gerada na junta é diretamente influenciada pelo tempo de aplicação da corrente elétrica. Portanto, é crucial otimizar o tempo com base nos parâmetros específicos de soldagem (Medeiros, 2021).

No contexto do processo, a unidade de tempo é conhecida como ciclo. Cada ciclo equivale a $1/f$, onde f (Hz) representa a frequência da rede elétrica. No Brasil, essa frequência pode ser de 50 Hz ou 60 Hz, dependendo da região, o que significa que cada ciclo corresponde a $1/50$ ou $1/60$ segundos, conforme explicado por Medeiros (2021).

2.3 Ciclo de operação do processo de soldagem

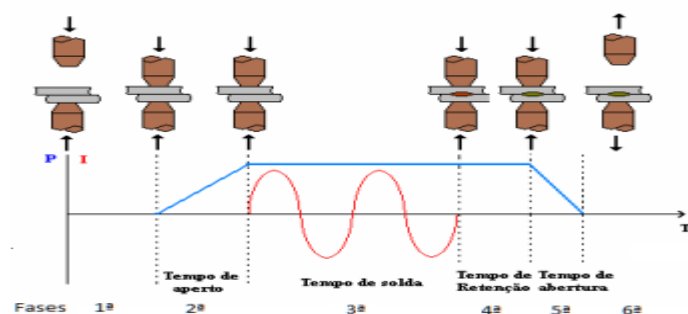
Na Figura 1, é apresentado um ciclo hipotético básico de solda, onde "P" representa a força aplicada pelos eletrodos nas chapas e "I" denota a corrente de soldagem (Nascimento, 2018). Esse ciclo pode ser subdividido em seis fases distintas, cuja soma dos tempos de todas as fases constitui o tempo total de soldagem.

Na primeira fase, os eletrodos começam a se movimentar para baixo, pressionando e posicionando as chapas. É crucial que as chapas sejam adequadamente pressionadas para garantir um assentamento preciso e prevenir problemas como a expulsão de metal fundido, que pode resultar em rebarbas no ponto soldado. Essa etapa é seguida pela aplicação da força necessária para realizar a soldagem, na segunda fase (Rodrigues, 2019).

Durante a terceira fase, os eletrodos são mantidos sob tensão enquanto a corrente de soldagem é aplicada. Subsequentemente, na quarta fase, a corrente de soldagem é desativada assim que o ponto de solda é formado, contudo os eletrodos continuam pressionando as chapas para auxiliar na solidificação do ponto de solda (Rodrigues, 2019).

Nas quinta e sexta fases, a força de soldagem aplicada pelos eletrodos é retirada, e estes são totalmente abertos. Esses processos foram descritos com base em estudos anteriores conduzido Vargas (2016).

Figura 1 - Ciclo De Soldagem



Fonte: VARGAS, 2016.

2.3.1 Eletrodos aplicados no processo de soldagem

Os eletrodos empregados na soldagem assumem múltiplas funções vitais, incluindo a condução de corrente elétrica, a aplicação de força no local onde o ponto de solda será efetuado e a contribuição para a dissipação do calor na região soldada (RWMA, 1989; Wainer, 1992).

É imperativo que os eletrodos possuam características específicas para desempenhar essas funções de maneira eficaz. Isso implica na necessidade de apresentarem boa condutividade térmica e elétrica, alta resistência mecânica e a capacidade de preservar suas propriedades mesmo em temperaturas elevadas (RWMA, 1989).

2.3.2 Material dos eletrodos

Segundo Wainer (1992), os materiais empregados nos eletrodos para soldagem por resistência por pontos devem apresentar alta temperatura de recozimento, resistência à compressão e boa resistência ao atrito.

A Resistance Welder Manufacturers Association (RWMA) categorizou os materiais dos eletrodos em três grupos distintos: ligas à base de cobre, composições de metal refratário ou compósitos e materiais especiais. Essas categorias são subdivididas em diversas classes, abrangendo uma ampla variedade de materiais a serem soldados (Fonseca, 1999; RWMA, 1989).

Na indústria automotiva, os eletrodos de base de cobre são amplamente empregados. Dentro deste contexto, três classes se destacam, conforme mencionado por Branco (2004) e RWMA (1989):

- Classe 1: Composta por materiais que não podem ser tratados termicamente e são endurecidos por trabalho a frio, exibindo alta condutividade térmica e elétrica.
- Classe 2: Composta por materiais com propriedades mecânicas melhoradas, apresentando condutividade elétrica e térmica ligeiramente inferiores em comparação com os eletrodos da Classe 1. As propriedades mecânicas e físicas necessárias são obtidas por tratamento térmico ou por uma combinação de tratamento térmico e trabalho a frio. Estes eletrodos são

amplamente utilizados e podem se adaptar a uma ampla gama de metais e condições de soldagem.

- Classe 20: Composta por materiais capazes de resistir a altas taxas de troca de calor e altas tensões aplicadas, em comparação com os materiais das Classes 1 e 2. São fabricados utilizando cobre e materiais refratários como a alumina.

A classificação RWMA Classe 1 é particularmente recomendada para a soldagem por pontos de ligas de alumínio, magnésio, latão e bronze, devido à sua alta condutividade térmica e elétrica (Ribeiro, 2020).

A Classe 2 da RWMA possui condutividade térmica e elétrica ligeiramente inferior à Classe 1, porém apresenta uma resistência mecânica mais elevada. É indicada para a soldagem por pontos e por costura na maioria dos materiais metálicos, além de ser adequada para a soldagem por projeção de porcas e parafusos de aço (Ribeiro, 2020).

A RWMA Classe 20 possui condutividade térmica e elétrica similar à Classe 2, mas possui uma resistência mecânica superior. Este material é altamente recomendado para a soldagem de materiais revestidos, como chapas de aço galvanizadas (Ribeiro, 2020).

Tabela 1 – Classe Dos Eletrodos

Classe RWMA	Descrição	Condutividade (I.A.C.S.)	Dureza (HB)	Mecanismo de Endurecimento
RWMA 1 (CLASSE 1)	Cobre – Zircônio CuZr (0,15% Zr)	90%	70	Precipitação
RWMA 2 (CLASSE 1)	Cobre – Cromo CuCr (1% Cr)	85%	83	Precipitação
RWMA 2 (CLASSE 1)	Cobre Cromo Zircônio CuCrZr (1% Cr 0,25% Zr)	85%	83	Precipitação
RWMA 20 (CLASSE 20)	Cobre Resistente por Dispersão CuAl ₂ O ₃ (1,1% Al ₂ O ₃)	85%	75	Dispersão

Fonte: Adaptado de BRANCO, 2004.

Os eletrodos de Cu/Cr (1% Cr), Cu/Cr/Zr (1% Cr; 0,25% Zr) e CuZr (0,15% Zr) são compostos por ligas endurecidas por precipitação. Essas ligas obtêm suas propriedades por meio da adição de elementos de liga em solução, seguida por um processo de envelhecimento em condições específicas de tempo e temperatura, resultando na formação de precipitados finos. A condutibilidade elétrica desses tipos de eletrodo varia entre 80% e 90% IACS (Branco, 2014).

2.3.3 Geometria dos eletrodos

Segundo Vieira (2015) um eletrodo para soldagem possui quatro características geométricas essenciais:

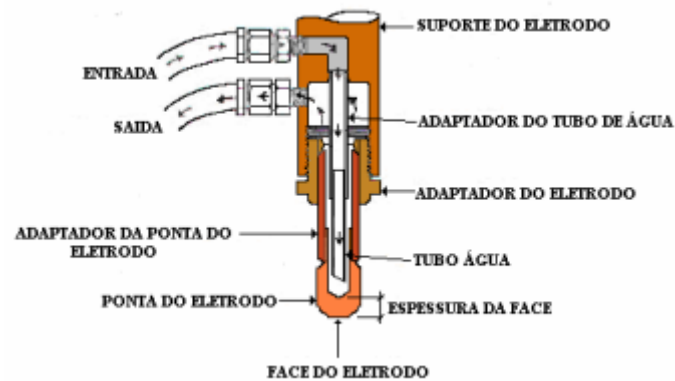
A - Face: Esta é a parte do eletrodo que entra em contato com a peça de trabalho durante a soldagem. É a característica mais crucial do eletrodo, pois determina a densidade de corrente aplicada durante a solda. Além disso, influencia na definição do parâmetro de força aplicada pelo equipamento de soldagem e na tensão aplicada pelos eletrodos. Geralmente, o uso de áreas de face de eletrodos grandes não é recomendado.

B - Corpo: Deve ser dimensionado adequadamente para suportar a força aplicada durante a soldagem. Além disso, a área da seção transversal deve ser projetada para minimizar a resistência elétrica.

C - Conexão: Refere-se ao acoplamento que une o eletrodo ao suporte do eletrodo. Geralmente, a fixação ocorre por meio de roscas ou acoplamento cônico. É crucial que a conexão possua uma vedação eficiente para evitar vazamentos no sistema de refrigeração.

D - Caverna de refrigeração: Esta é a parte oca interna do eletrodo que está conectada ao suporte do eletrodo. Sua função é permitir a refrigeração do eletrodo. Deve ser dimensionada de forma a não dificultar a passagem da água de refrigeração.

Figura 2 - Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo



Fonte: VARGAS, 2016

2.3.4 Variáveis do processo

Segundo Ruiz (2015), a qualidade requerida para a soldagem pode ser influenciada por diversos fatores, tais como a composição química e as condições do metal base, o design das junções e das peças, as condições dos eletrodos e os equipamentos de soldagem.

A espessura da chapa desempenha um papel crucial na formação do ponto de solda e na dissipação de calor durante o processo. Quanto maior a espessura, mais material precisa ser fundido na junta, o que requer um ponto de solda proporcionalmente maior para garantir a qualidade da união. Conseqüentemente, a influência dos eletrodos na taxa de resfriamento no processo é reduzida. Para espessuras maiores, são necessários valores elevados de corrente elétrica e tempo de soldagem (Fonseca, 2019).

A condição superficial das peças a serem soldadas tem impacto na geração de calor durante o processo. A presença de óxidos, sujeira, óleo e outros contaminantes afeta a resistência de contato dos eletrodos com a peça e a interface entre as peças. A limpeza adequada das peças possibilita a execução de soldas de melhor qualidade e com propriedades mais uniformes. Além disso, variações na resistência de contato podem resultar em um aquecimento maior nos eletrodos de solda, reduzindo sua vida útil (Fonseca, 2019).

A profundidade mínima (indentação) geralmente é aceita como sendo 20% da espessura da chapa mais fina. Caso seja menor, a solda é considerada "fria" devido ao baixo calor gerado na zona de solda. O valor máximo de

profundidade não deve exceder $4/5$ da espessura da chapa mais fina (Vargas, 2016).

2.3.5 Qualidade da solda

A qualidade na soldagem varia conforme sua aplicação específica, havendo normas específicas em determinadas indústrias para análise da qualidade dos pontos de solda (Fonseca, 2019; Ruiz, 2015).

De maneira geral, uma solda a ponto de qualidade deve apresentar as seguintes características (Fonseca, 2019):

- Boa aparência superficial: sem trincas, crateras, excessiva indentação, inclusões ou rebarbas visíveis.
- Dimensões do ponto de solda dentro das especificações definidas.
- Resistência: a solda deve apresentar resistência dentro dos parâmetros especificados.
- Ausência de descontinuidades internas: sem trincas, porosidade, inclusões ou vazios no interior da solda.
- Ausência de expulsão ou separação das chapas unidas pelo ponto de solda.

Esses critérios garantem a integridade estrutural e a funcionalidade da solda, aspectos fundamentais para as aplicações industriais específicas.

2.4 Diferença entre eletrodos: zítrod, nitrod e titânio

2.4.4 Eletrodo de zircônio (Zítrod)

Segundo Barcellos (2020), os Eletrodos de Zircônio, conhecidos como Zítrod, são reconhecidos por sua excepcional resistência à corrosão e longa durabilidade em ambientes quimicamente agressivos. Amplamente empregados em diversas aplicações industriais e comerciais, esses eletrodos oferecem uma solução robusta para enfrentar a degradação química ao longo do tempo. A notável resistência à corrosão do zircônio deriva de sua capacidade única de formar uma camada protetora de óxido em sua superfície, tornando-o altamente

desejável em setores como química, petroquímica e processamento de alimentos.

Para Ferreira (2022), os eletrodos de zircônio são valorizados por sua capacidade de suportar temperaturas extremamente elevadas sem comprometer sua integridade estrutural. Isso os torna uma escolha popular para ambientes de alta temperatura encontrados em indústrias como aeroespacial, nuclear e de geração de energia, onde a estabilidade e a confiabilidade do material são imperativos essenciais. A capacidade do zircônio de manter sua resistência estrutural mesmo em temperaturas extremas o torna uma opção vantajosa para aplicações que envolvem processos de alta temperatura, como fornos industriais, reatores químicos e equipamentos de processamento de alta energia.

Na indústria de soldagem, os eletrodos de zircônio são empregados para unir materiais sujeitos a condições extremas de corrosão e temperatura, fornecendo uma solução durável e confiável para a união de metais em ambientes desafiadores. Sua capacidade de resistir a ambientes corrosivos agressivos e temperaturas elevadas possibilita a criação de juntas de solda altamente resilientes e duráveis, tornando-os essenciais em processos de fabricação que demandam fortes ligações de materiais em condições adversas. Com seu desempenho excepcional em ambientes hostis, os eletrodos de zircônio representam uma escolha valiosa para garantir a integridade estrutural e operacional em uma variedade de setores críticos e exigentes (Costa, 2017).

2.4.2 Eletrodo de nitrogênio (Nitrod)

Embora a menção direta a "nitrod" como um tipo específico de eletrodo de soldagem seja rara, o nitrogênio desempenha um papel essencial na melhoria das propriedades mecânicas de várias ligas de aço. Sua capacidade de fortalecer e aumentar a resistência à tração torna-o um elemento fundamental em muitas aplicações industriais que demandam materiais de alta resistência e durabilidade. A presença de nitrogênio em ligas de aço possibilita o desenvolvimento de produtos de alta qualidade capazes de resistir a condições operacionais severas e desgaste prolongado (Souza, 2021).

De acordo com Silva (2020), as ligas de aço com nitrogênio são amplamente empregadas em diversos setores, incluindo fabricação de automóveis, construção naval, maquinário pesado e equipamentos industriais. A

adição controlada de nitrogênio durante o processo de fabricação do aço contribui para aprimorar sua resistência à corrosão, capacidade de deformação e tenacidade, garantindo que os produtos finais atendam aos rigorosos requisitos de desempenho exigidos por esses setores críticos. O nitrogênio desempenha um papel significativo na otimização das propriedades mecânicas do aço, conferindo-lhe características superiores essenciais para aplicações exigentes que requerem materiais robustos e de alta resistência.

Além disso, a presença de nitrogênio em ligas de aço pode aprimorar a resistência à corrosão e à fadiga, proporcionando maior vida útil e durabilidade aos componentes e estruturas fabricados com esses materiais. Essas propriedades melhoradas tornam as ligas de aço com nitrogênio uma escolha ideal para ambientes industriais desafiadores, onde a resistência à corrosão e a capacidade de suportar cargas pesadas são requisitos essenciais. Com sua capacidade de fortalecer e melhorar as propriedades do aço, o nitrogênio desempenha um papel vital na garantia da integridade estrutural e operacional de uma ampla gama de produtos e componentes industriais cruciais.

2.4.5 Eletrodos de titânio

Conforme Araújo (2019), os eletrodos de titânio assumem uma função crucial na soldagem de ligas de titânio, proporcionando uma solução robusta e confiável para unir metais que demandam alta resistência e durabilidade. Reconhecido por sua excepcional resistência à corrosão e baixa densidade, o titânio é altamente valorizado em diversos setores industriais que requerem produtos leves e resistentes à corrosão. Os eletrodos de titânio são escolhidos para assegurar a preservação dessas propriedades únicas durante o processo de soldagem, resultando em juntas de solda de alta qualidade e durabilidade excepcional.

Além disso, os eletrodos de titânio são amplamente empregados em aplicações aeroespaciais e de aviação, devido à sua capacidade de resistir a ambientes extremos e condições operacionais desafiadoras. Sua resistência excepcional, combinada com notável resistência à corrosão, os torna uma escolha popular para componentes e estruturas de aeronaves que necessitam

de materiais leves e de alta resistência para suportar forças aerodinâmicas e condições atmosféricas extremas.

Esses eletrodos também são valorizados em setores como a indústria química e de processamento químico, onde a resistência à corrosão é essencial. Sua capacidade de resistir a ambientes químicos agressivos os torna ideais para equipamentos e estruturas usados em processos químicos que exigem materiais robustos e duráveis capazes de suportar exposições prolongadas a substâncias corrosivas (Pereira, 2018).

Para Loureiro (2016), os eletrodos de titânio são conhecidos por sua alta condutividade térmica, tornando-os vantajosos em processos de soldagem que requerem controle preciso da distribuição de calor. Sua capacidade de dissipar eficientemente o calor durante a soldagem ajuda a prevenir distorções e falhas estruturais, resultando em juntas de solda de alta qualidade e uniformidade.

Com suas propriedades excepcionais, os eletrodos de titânio desempenham um papel vital na garantia da integridade estrutural e operacional em uma variedade de setores industriais cruciais, onde a resistência, durabilidade e resistência à corrosão são requisitos essenciais.

2.4.6 Consumíveis utilizados no processo de soldagem

Os eletrodos empregados na soldagem desempenham diversas funções essenciais, conforme destacado por Christofletti (2013). Entre elas, destacam-se a condução eficiente de corrente elétrica, a aplicação precisa de força no local de soldagem e a dissipação adequada do calor na zona soldada. Para atender a essas demandas, os eletrodos devem exibir características específicas, como uma condutividade térmica e elétrica eficaz, juntamente com uma resistência mecânica robusta, que lhes permita manter suas propriedades mesmo em altas temperaturas, conforme enfatizado por Branco (2019).

A geometria de um eletrodo de soldagem é composta por quatro características fundamentais, conforme descrito por Christofletti (2013). A face do eletrodo é a parte que entra em contato direto com a peça de trabalho durante a soldagem, sendo um dos aspectos mais cruciais do eletrodo, pois determina a densidade de corrente aplicada durante o processo e influencia a definição dos

parâmetros de força aplicados pelo equipamento de solda, assim como a tensão aplicada pelos eletrodos.

Além da face, o corpo do eletrodo deve ser adequadamente dimensionado para suportar a força aplicada durante a soldagem, com uma seção transversal projetada para minimizar a resistência elétrica. A conexão é o ponto de acoplamento entre o eletrodo e o suporte do eletrodo, geralmente realizado por meio de roscas ou um acoplamento cônico, devendo possuir uma vedação eficiente para evitar vazamentos no sistema de refrigeração do eletrodo.

A presença de uma cavidade para refrigeração é essencial no eletrodo de soldagem por pontos, permitindo a passagem de água de refrigeração para dissipar o calor gerado durante o processo. Essa cavidade, localizada internamente no eletrodo e conectada ao suporte, deve ser cuidadosamente dimensionada para garantir uma refrigeração eficiente do eletrodo, sem prejudicar a passagem fluida da água de refrigeração.

2.4.7 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros que determinam a eficácia do processo de soldagem e influenciam diretamente as propriedades da junta soldada são denominadas de parâmetros de soldagem, destacando-se três principais, conforme salientado por Christofolletti (2013): a corrente de soldagem, a força aplicada nos eletrodos e o tempo de soldagem.

Segundo Amorim (2016), a corrente de soldagem desempenha um papel crucial no processo, sendo o parâmetro mais significativo na geração de calor e, conseqüentemente, no desempenho da solda. A seleção da corrente adequada é essencial para garantir a qualidade desejada da junta soldada. É importante notar que a corrente utilizada no processo pode ser de dois tipos distintos: alternada ou contínua, cada uma com suas especificidades e aplicações específicas.

Outro parâmetro de suma importância é a força aplicada nos eletrodos, responsável por unir as chapas a serem soldadas, garantir o posicionamento adequado e assegurar a conexão eficiente. A tensão mecânica gerada por essa força atua não somente durante a aplicação da corrente de soldagem, mas também antes e depois desse processo. A força pode ser gerada por diferentes

sistemas, incluindo hidráulicos, pneumáticos e mecânicos, com variações de aplicação dependendo das características específicas da soldagem (Sperandio, 2017).

Conforme Meirelles (2018), o tempo de soldagem, por sua vez, corresponde ao intervalo em que a corrente de soldagem é aplicada durante o ciclo de solda. O controle preciso desse tempo é fundamental para assegurar a formação adequada da junta soldada, bem como a manutenção das propriedades desejadas na solda. O tempo de soldagem é ajustado de acordo com as especificidades das chapas a serem soldadas, considerando fatores como espessura e composição do material, e está intimamente relacionado à corrente de soldagem.

2.5 Influência da composição do material base

Segundo Silva (2018), a composição do material base é um fator determinante no processo de soldagem por pontos, pois afeta diretamente a fusão, a formação da junta e a qualidade final da solda. Elementos de liga presentes no material base, como carbono, manganês, silício e outros, influenciam a condutividade térmica e elétrica do material. Por exemplo, materiais com altos teores de carbono tendem a ter uma condutividade térmica mais baixa, o que pode resultar em uma maior concentração de calor na zona de solda, facilitando a fusão, mas também aumentando o risco de defeitos como trincas e porosidades.

A resistência mecânica e a ductilidade do material base são igualmente importantes. Materiais de alta resistência mecânica, como aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), exigem parâmetros de soldagem específicos para evitar falhas na solda. A alta resistência pode dificultar a deformação necessária para formar uma solda forte e durável. Por outro lado, materiais com maior ductilidade, como alumínio e suas ligas, podem ser mais fáceis de soldar, mas requerem controle rigoroso dos parâmetros de soldagem para evitar problemas como a formação de óxidos e a redução da condutividade elétrica (Pereira, 2019).

Além disso, a compatibilidade entre diferentes materiais base é um desafio significativo na soldagem por pontos de materiais dissimilares. Soldar

materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica, condutividades térmicas e resistências mecânicas pode resultar em tensões residuais elevadas e, conseqüentemente, em defeitos na solda. Por exemplo, a soldagem de aço a alumínio requer técnicas especiais e parâmetros de soldagem ajustados para garantir uma união forte e livre de defeitos (Gomes, 2020).

Conforme Rodrigues (2019), outro aspecto crítico é a microestrutura do material base e suas transformações durante o processo de soldagem. Materiais como aços inoxidáveis e aços de alta resistência podem sofrer mudanças significativas na microestrutura devido ao ciclo térmico imposto pela soldagem. Essas transformações podem resultar em endurecimento ou amolecimento da zona afetada pelo calor (ZAC), afetando a resistência e a durabilidade da solda. Controlar o ciclo térmico é essencial para manter a integridade da microestrutura do material base.

A composição química também influencia a formação de fases intermetálicas, especialmente em soldagem de materiais dissimilares. Fases intermetálicas, que podem se formar na interface de soldas de alumínio e aço, por exemplo, são geralmente duras e frágeis, podendo comprometer a resistência mecânica e a durabilidade da solda. A formação dessas fases pode ser controlada pela seleção adequada dos parâmetros de soldagem, como a corrente, o tempo de soldagem e a força aplicada (Freitas, 2018).

Por fim, a adição de elementos de liga no material base pode ser utilizada para melhorar a soldabilidade. Elementos como níquel e molibdênio podem ser adicionados para aumentar a resistência à corrosão e a resistência mecânica, enquanto o zinco pode ser adicionado ao alumínio para melhorar a fluidez e a resistência da solda. No entanto, a presença desses elementos de liga também pode exigir ajustes nos parâmetros de soldagem para garantir uma solda de alta qualidade (Carvalho, 2021).

2.5.4 Métodos de avaliação da qualidade da solda

A avaliação da qualidade da solda é um processo crítico que assegura a integridade e a segurança das juntas soldadas. Um dos métodos mais comuns e eficazes é a inspeção visual, que permite identificar defeitos superficiais, como trincas, porosidades, inclusões e falta de fusão. A inspeção visual é geralmente

a primeira etapa da avaliação e pode ser realizada com o auxílio de lupas, microscópios e iluminação adequada para garantir a detecção de pequenos defeitos que podem comprometer a qualidade da solda (Nascimento, 2018).

De acordo com Rodrigues (2019), além da inspeção visual, os ensaios não destrutivos (END) são amplamente utilizados para avaliar a qualidade da solda sem comprometer a integridade do componente. Entre os END, destacam-se o teste de ultrassom (UT), a radiografia (RT), o ensaio por partículas magnéticas (MT) e o ensaio por líquidos penetrantes (PT). O ultrassom é eficaz na detecção de descontinuidades internas e mede a espessura da solda, enquanto a radiografia permite a visualização de defeitos internos através de imagens radiográficas. O ensaio por partículas magnéticas é usado para detectar trincas superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos, e os líquidos penetrantes são aplicados para identificar defeitos abertos na superfície em materiais não porosos.

Para Fonseca (2019), uma avaliação mais detalhada das propriedades mecânicas da solda, os ensaios destrutivos (ED) são realizados. Entre os ED, destacam-se o ensaio de tração, o ensaio de dobramento, o ensaio de impacto e o ensaio de dureza. O ensaio de tração avalia a resistência da solda à tensão, determinando a sua resistência máxima antes da ruptura. O ensaio de dobramento verifica a ductilidade e a qualidade da fusão, dobrando a solda até um ângulo específico para observar a presença de trincas. O ensaio de impacto mede a tenacidade da solda em diferentes temperaturas, enquanto o ensaio de dureza avalia a resistência da solda à deformação plástica, proporcionando uma medida da resistência ao desgaste.

Outro método importante de avaliação é a análise microestrutural, que envolve a preparação de amostras metalográficas e a observação da microestrutura da solda usando microscópios ópticos ou eletrônicos. Essa análise permite identificar a presença de fases indesejáveis, inclusões, porosidade e a distribuição de elementos de liga na zona fundida e na zona afetada pelo calor (ZAC). A análise microestrutural é essencial para compreender as mudanças no material base e na solda, proporcionando insights sobre a formação de defeitos e a adequação dos parâmetros de soldagem utilizados (Gomes, 2020).

A espectroscopia de emissão ótica (OES) e a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) são técnicas analíticas usadas para determinar a composição química da solda e do material base. Essas técnicas são úteis para verificar se a composição da solda atende às especificações e para identificar a presença de elementos indesejáveis que podem afetar a qualidade da solda. A análise química é particularmente importante em processos de soldagem de materiais dissimilares, onde a formação de fases intermetálicas pode comprometer a integridade da solda (Carvalho, 2021).

Finalmente, a solda pode ser submetida a testes de fadiga para avaliar sua durabilidade sob cargas cíclicas. Esse método é crucial para aplicações onde a solda estará sujeita a tensões repetidas ao longo do tempo, como em estruturas aeronáuticas e automotivas. Os testes de fadiga ajudam a determinar a vida útil da solda e a identificar possíveis modos de falha, permitindo melhorias no processo de soldagem e na seleção de materiais para aumentar a longevidade e a confiabilidade das juntas soldadas (Silva, 2018).

2.5.2 Simulação dos processos de soldagem

A modelagem e simulação dos processos de soldagem têm se tornado uma ferramenta indispensável na engenharia moderna, permitindo a previsão e a otimização do desempenho das juntas soldadas. Utilizando métodos computacionais avançados, é possível simular o comportamento térmico, mecânico e metalúrgico durante e após a soldagem. Essas simulações ajudam a compreender a distribuição de temperaturas, as tensões residuais e as deformações que ocorrem durante o processo, proporcionando informações valiosas para o aprimoramento da qualidade da solda (Nascimento, 2018).

Uma das abordagens mais comuns na simulação de soldagem é a análise por elementos finitos (FEA). Essa técnica envolve a discretização da peça soldada em pequenos elementos finitos, permitindo a resolução numérica das equações de transferência de calor e das equações de equilíbrio mecânico. A FEA é amplamente utilizada para simular o ciclo térmico da soldagem, prever a formação de zonas afetadas pelo calor (ZAC) e analisar as tensões e deformações residuais. Essa abordagem oferece uma visão detalhada dos efeitos térmicos e mecânicos, auxiliando na identificação de possíveis falhas e na otimização dos parâmetros de soldagem (Rodrigues, 2019).

Além da análise por elementos finitos, a modelagem computacional inclui o uso de softwares especializados que incorporam modelos físicos e empíricos para simular a dinâmica do processo de soldagem. Programas como ANSYS, ABAQUS e SYSWELD são frequentemente utilizados para realizar simulações complexas que consideram fatores como a transferência de calor por condução, convecção e radiação, bem como as transformações de fase metalúrgica. Esses softwares permitem a simulação de diferentes tipos de soldagem, incluindo soldagem por pontos, soldagem a arco e soldagem por fricção, proporcionando uma plataforma versátil para a análise e otimização dos processos (Gomes, 2020).

A modelagem térmica é um componente crucial das simulações de soldagem, pois o controle preciso da distribuição de temperatura é essencial para evitar defeitos como trincas e distorções. Modelos térmicos ajudam a prever o perfil de temperatura ao longo do tempo e do espaço, permitindo a avaliação do ciclo térmico e das suas implicações na microestrutura e nas propriedades mecânicas da solda. A integração de modelos térmicos com análises de fluxo de fluido também é utilizada para otimizar os sistemas de refrigeração e melhorar a eficiência do processo de soldagem (Carvalho, 2021).

Outro aspecto importante da simulação de soldagem é a modelagem do comportamento metalúrgico. A soldagem envolve complexas transformações de fase que influenciam diretamente as propriedades mecânicas da junta soldada. Modelos metalúrgicos preveem a formação de microestruturas, a distribuição de elementos de liga e a precipitação de compostos indesejáveis. Essas informações são cruciais para ajustar os parâmetros de soldagem e selecionar materiais que minimizem defeitos metalúrgicos e maximizem a resistência e a durabilidade da solda (Silva, 2018).

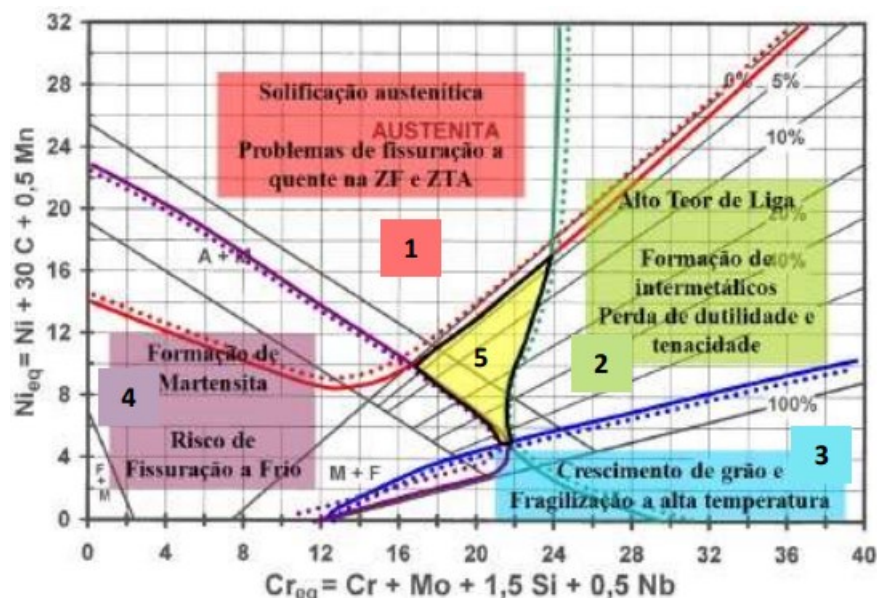
Finalmente, a modelagem e simulação dos processos de soldagem não apenas permitem a previsão de defeitos e a otimização dos parâmetros, mas também facilitam o desenvolvimento de novas técnicas de soldagem e a inovação em materiais. Com a ajuda de simulações computacionais, engenheiros podem explorar novos processos, como a soldagem a laser e a soldagem híbrida, avaliando sua viabilidade e desempenho antes da implementação em escala industrial. Essas simulações proporcionam uma base para experimentos mais direcionados e eficientes, acelerando o

desenvolvimento e a adoção de tecnologias de soldagem avançadas (Fonseca, 2019).

2.6 Diagrama de Schaeffler

O diagrama de Schaeffler é uma ferramenta usada pela metalurgia para analisar a microestrutura da zona fundida por meio do processo de definição do cromo (Cr_{eq}) e níquel (Ni_{eq}) equivalentes que são estimados através dos elementos químicos que relacionados ao processo de solda. O diagrama se divide em cinco áreas conforme ilustra a Figura 3 (Carvalho, 2018).

Figura 3 - Diagrama de Schaeffler



Fonte: CARVALHO, 2018.

Na região 1, indicada em rosa, tem-se a formação da microestrutura austenítica que estimula o desenvolvimento de fissuras a quente na ZF e na ZTA; na região 2, indicada em verde, ocorre a fragmentação resultante de fases intermetálicas; na região 3, indicada em azul, a microestrutura se caracteriza por grandes grãos que fragilizam-se quando submetidos a temperaturas elevadas; na região 4, indicada em roxo, ocorre a fragmentação e fissuração decorrente da presença da martensita; a região 5, indicada em amarelo, refere-se a uma microestrutura livre de patologias (Carvalho, 2018).

Ao aplicar o diagrama, calcula-se os valores de C_{req} e N_{ieq} para os materiais de base e de enchimento resultando no desenvolvimento graficamente, onde o eixo X representa o cromo e o eixo Y o equivalente ao níquel. A microestrutura esperada no metal de solda é indicada no diagrama por meio da posição marcada, que pode variar entre ferrítica, austenítica, martensítica ou na relação entre elas. Essa previsão permite ajustar as propriedades mecânicas, como dureza, resistência e ductilidade, e prevenir o desenvolvimento de manifestações patológicas na soldagem, como distorções e trincas. Nesse sentido, o diagrama de Schaeffler é uma ferramenta importante para definir materiais de enchimento adequados e melhorar a qualidade e a confiabilidade estrutural das peças submetidas a soldagem (Aguiar, 2020).

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa realizada neste estudo é de natureza explicativa, buscando compreender as relações causais entre as variáveis do processo de soldagem por pontos e as propriedades mecânicas do material resultante. A abordagem explicativa é fundamental para elucidar os mecanismos subjacentes ao desempenho da junta soldada, proporcionando uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam a qualidade e a integridade do cordão de solda.

O estudo de caso foi conduzido em um ambiente de oficina especialmente equipado para realizar análises metalúrgicas e testes de soldagem. A seleção desse ambiente propiciou um controle preciso das variáveis do processo, garantindo a consistência dos resultados obtidos e a validade das conclusões tiradas. As condições controladas permitiram uma investigação minuciosa das interações entre os parâmetros de soldagem e as propriedades mecânicas, possibilitando uma compreensão abrangente dos fenômenos envolvidos no processo de soldagem por pontos.

A coleta de dados foi realizada por meio de observações diretas durante o processo de soldagem, bem como por meio de testes subsequentes, como análises microestruturais, medições de dureza e avaliações de resistência. A utilização de instrumentação especializada, incluindo equipamentos de análise de dureza, garantiu a precisão na coleta de dados e a obtenção de informações detalhadas sobre as características do cordão de solda e sua interação com o material base.

Além disso, foram realizadas consultas a fontes especializadas, como literatura técnica e normas industriais, a fim de embasar teoricamente o estudo e situar os resultados no contexto mais amplo da soldagem por pontos e suas aplicações industriais. A combinação de abordagens práticas e teóricas proporcionou uma base sólida para a análise dos resultados e a formulação de conclusões fundamentadas sobre a influência dos parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas da junta soldada.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Escolha e obtenção do material

O aço ASTM A36 desempenhou o papel de metal base para a aplicação do revestimento contra corrosão química, sendo soldado com o auxílio do arame de solda ER 316LSI. De acordo com as informações fornecidas pela TechnoAlloys (2016), o arame sólido de aço inoxidável conhecido como ER 316LSI é reconhecido por sua baixa concentração de carbono e sua alta resistência a níveis elevados de corrosão química. É amplamente indicado para preenchimento em superfícies e soldas "cladding", onde ocorre a sobreposição entre cordões de solda.

A escolha do aço ASTM A36 como material base foi baseada em sua ampla gama de aplicações e uso comum na indústria metal-mecânica. Uma grande parte das tubulações, tanques e estruturas que lidam com ácidos são fabricadas com esse material. Devido à sua boa soldabilidade, o ASTM A36 mantém suas propriedades mecânicas durante o processo de soldagem, o que o torna um material altamente versátil.

Por sua vez, o material de adição ER 316LSI atua na eliminação de impurezas da superfície do cordão de solda, prevenindo a formação de porosidades e outras descontinuidades durante o processo de soldagem. Além disso, sua ampla faixa de temperatura de trabalho, que pode variar de -120 °C a 400 °C, conforme apontado pela Delacor Soldas (2019), reforça sua eficácia em uma variedade de ambientes de soldagem.

Quanto ao agente de proteção de soldagem, optou-se pelo gás para solda Corgon 25, composto por uma mistura de 25% de dióxido de carbono e 75% de argônio. Essa escolha foi respaldada pelo fabricante, que recomenda o uso conjunto desse gás de proteção com o material de adição ER 316LSI. O uso desse gás proporciona um ambiente controlado durante o processo de soldagem, minimizando a ocorrência de imperfeições e contribuindo para a obtenção de soldas de alta qualidade e durabilidade.

4.2 Corte do corpo de prova

A matéria-prima utilizada para a fabricação dos corpos de prova consistiu em uma tira de chapa com dimensões de 100x1200x14 mm, a qual foi posteriormente cortada em um tamanho apropriado para a amostragem, resultando em peças com dimensões de 100x65x14 mm. A seleção dessa amostra representativa foi crucial para garantir resultados precisos e confiáveis durante a análise de dureza do corpo de prova.

Considerando que o processo de corte poderia potencialmente gerar calor e, conseqüentemente, afetar os resultados das análises, foram tomadas precauções para evitar quaisquer influências térmicas indesejadas no material. Assim, o método de corte escolhido foi o uso da serra fita, uma vez que esse processo é conhecido por não gerar quantidades significativas de calor capazes de comprometer as propriedades do material.

A serra fita foi selecionada devido à sua capacidade de proporcionar cortes precisos e limpos, sem introduzir alterações térmicas substanciais no material. Isso foi essencial para garantir que as propriedades estruturais e a composição do aço ASTM A36, utilizadas nos corpos de prova, fossem mantidas intactas durante o processo de corte.

A escolha cuidadosa do método de corte reflete o compromisso em preservar a integridade e a qualidade do material durante todas as fases do processo de preparação, a fim de assegurar a exatidão e a confiabilidade dos resultados da análise de dureza. Essa abordagem metódica foi fundamental para garantir a validade e a precisão dos dados obtidos por meio das análises subsequentes dos corpos de prova.

4.3 Preparação de superfície

Na superfície em que o cordão de solda seria aplicado, foram identificadas carepas de laminação, bem como sinais de oxidação e outros contaminantes que poderiam comprometer o processo de soldagem. Para garantir a remoção eficaz desses contaminantes, foi empregada uma esmerilhadeira equipada com um disco de desbaste. Tanto a região onde o cordão de solda seria preenchido

quanto as áreas adjacentes foram submetidas ao processo de esmerilhamento, conforme ilustrado na imagem 1. Esse procedimento teve como objetivo eliminar as impurezas e criar uma superfície adequada para o processo de soldagem.

Após a etapa de esmerilhamento, a superfície foi submetida a um lixamento adicional. Para isso, a mesma máquina utilizada anteriormente foi equipada com um disco de lixa com grão 40. O lixamento, ilustrado na imagem 4, teve como finalidade proporcionar uma superfície lisa e com menor rugosidade, o que contribuiu para evitar a presença de impurezas e contaminantes indesejados durante o processo de soldagem.

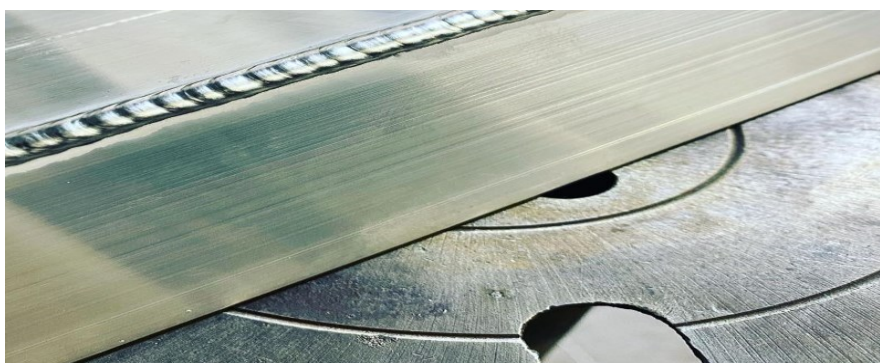
Essas medidas foram essenciais para garantir que a superfície estivesse devidamente preparada e livre de qualquer resíduo que pudesse prejudicar a qualidade e a integridade do cordão de solda. Ao remover as carepas de laminação, a oxidação e outros contaminantes, a etapa de esmerilhamento e lixamento contribuiu para assegurar que a soldagem fosse realizada em condições ideais, promovendo uma adesão adequada e duradoura entre os materiais envolvidos.

Figura 4 - Superfície sendo esmerilhada



Fonte: Autor, 2024.

Figura 5 - Superfície da chapa lixada e esmerilhada



Fonte: Autor, 2024.

Dado que o processo de soldagem seria realizado manualmente, previu-se a possibilidade de o soldador enfrentar dificuldades para manter os cordões de solda alinhados e paralelos. Como estratégia para facilitar o processo, foram feitas marcações superficiais com o auxílio de um disco de corte. Essas marcações consistiram em linhas com 2,5 mm de largura e 2 mm de profundidade, gravadas paralelamente uma à outra, com um espaçamento de 6 mm entre elas.

Após a conclusão dos processos de preparação da superfície e marcação das linhas-guia, foi realizada uma limpeza minuciosa com um solvente tipo álcool isopropílico. Esse solvente foi escolhido por sua eficácia na remoção de quaisquer resíduos de óleo ou outros contaminantes líquidos e sólidos que poderiam comprometer a qualidade do cordão de solda. Essa etapa de limpeza foi crucial para garantir que a soldagem fosse realizada em uma superfície completamente limpa e livre de impurezas, contribuindo para a obtenção de uma solda de alta qualidade e durabilidade.

4.4 Soldagem

O processo de soldagem escolhido para este estudo foi a soldagem por pontos utilizando o eletrodo Nitrod, uma opção comumente utilizada devido à sua composição que incorpora nitrogênio em ligas de aço para aprimorar suas propriedades mecânicas, como resistência e tenacidade. A soldagem por pontos foi selecionada devido à sua eficiência em garantir uma boa união entre as peças, especialmente em componentes automotivos que requerem uma forte aderência.

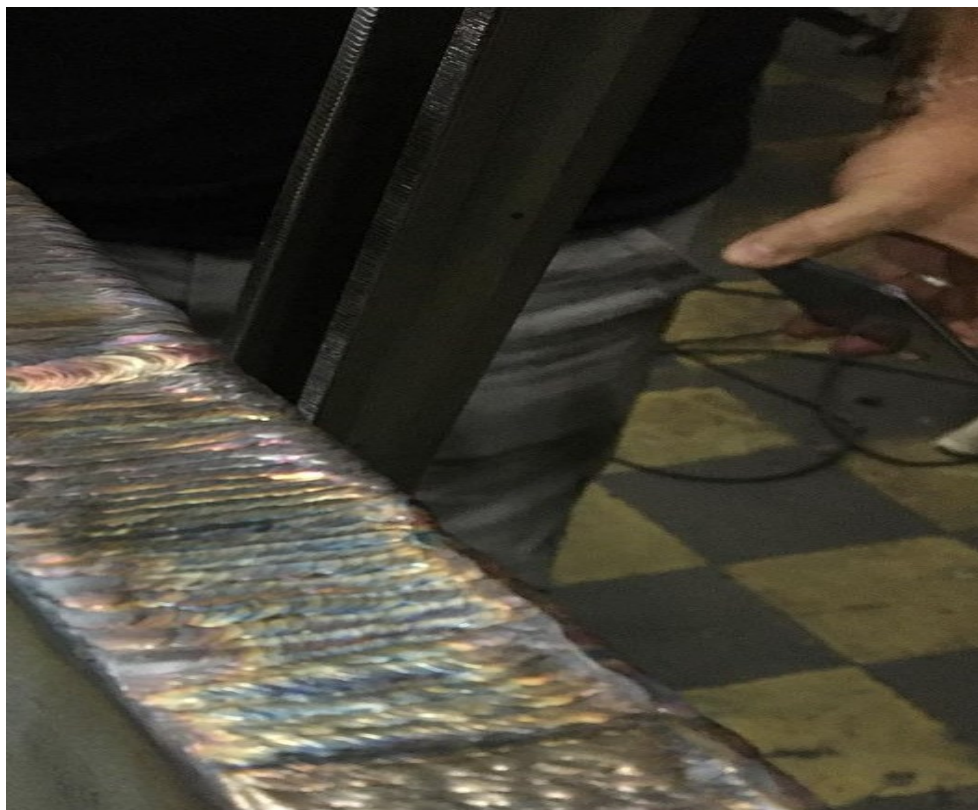
Na implementação do processo de soldagem por pontos com o eletrodo Nitrod, uma série de variáveis precisou ser cuidadosamente definida para garantir a confiabilidade dos resultados. Essas variáveis incluíram a escolha do metal base e do material de adição, bem como a determinação dos parâmetros de soldagem adequados. A regulação dos parâmetros de soldagem foi realizada de acordo com as recomendações do fabricante do arame, com a corrente variando entre 100 e 300 A, a tensão entre 15 e 29 V e a velocidade de alimentação do arame entre 3 e 14 m/min. Após testes em chapas sacrifício, os

valores finais dos parâmetros foram estabelecidos em 230 A para corrente, 28 V para tensão e 10 m/min para a velocidade de alimentação do arame.

O procedimento de soldagem consistiu em duas etapas principais: a soldagem das arestas adjacentes e o preenchimento da superfície. A soldagem das arestas foi realizada para contornar toda a área de soldagem, garantindo que o preenchimento subsequente ocorresse de maneira uniforme e evitasse falhas no início ou no final de cada cordão de solda. Para o preenchimento, foi empregado o método "Cladding", que envolve o revestimento utilizando cordões filetados e sobrepostos, com uma sobreposição de aproximadamente 40%.

As etapas do processo de soldagem por pontos utilizando o eletrodo Nitrod podem ser observadas na imagem 6 e nos anexos 1 e 2, que ilustram os processos de solda do preenchimento e das arestas, além de um vídeo do procedimento de soldagem em andamento. Essas representações visuais oferecem insights valiosos sobre a execução prática do processo e as etapas envolvidas na criação de uma solda de alta qualidade e durabilidade.

Figura 6 - Processo de soldagem do preenchimento



Fonte: Autor, 2024.

O resfriamento do processo de soldagem foi conduzido de maneira natural, sem o uso de qualquer agente externo para acelerar ou retardar a redução da temperatura. É importante ressaltar que, devido às condições de aplicação do revestimento, como a soldagem em campo, não foi possível empregar métodos como a submersão em cal ou outros agentes que poderiam atenuar o processo de resfriamento da peça. No entanto, é importante observar que o método de resfriamento adotado pode resultar em trincas no cordão de solda, especialmente nas áreas de finalização do cordão de solda.

Este aspecto do processo de resfriamento é particularmente relevante, considerando-se os desafios inerentes à soldagem em campo e a natureza das condições em que o trabalho foi realizado. É crucial compreender e monitorar os efeitos do resfriamento natural sobre a integridade estrutural da junta de solda, especialmente em relação à ocorrência de possíveis trincas. A implementação de medidas de acompanhamento e inspeção durante o resfriamento é essencial para avaliar a qualidade do cordão de solda e garantir que os requisitos de resistência e durabilidade sejam atendidos.

Além disso, a consideração das características específicas do resfriamento natural pode oferecer insights importantes para a melhoria contínua do processo de soldagem e o refinamento das práticas operacionais. Com uma compreensão mais aprofundada dos efeitos do resfriamento, é possível implementar estratégias adicionais de controle e prevenção para minimizar o risco de trincas e garantir a integridade estrutural de componentes críticos.

4.5 Corte e preparação de seção

Concluída a etapa de soldagem, o corpo de prova foi submetido ao corte para viabilizar a realização das análises necessárias. O método de corte escolhido levou em consideração a necessidade de evitar a geração excessiva de calor no corpo de prova. Nesse sentido, optou-se pela utilização de uma serra fita, como ilustrado na imagem 4.

A seleção desse método de corte foi fundamentada na sua capacidade de minimizar o impacto térmico sobre a peça, preservando as propriedades do material e garantindo a integridade da região de interesse para análise. A prevenção da geração excessiva de calor é crucial para evitar quaisquer

distorções ou alterações nas propriedades estruturais do corpo de prova, o que poderia comprometer a precisão dos resultados das análises subsequentes.

Por meio do corte preciso e controlado com serra fita, foi possível obter seções transversais representativas do cordão de solda, permitindo uma avaliação detalhada da integridade da junta soldada. Essa abordagem demonstra o cuidado e a atenção dedicados ao processamento dos corpos de prova, assegurando que os resultados das análises refletissem com precisão a qualidade e as características da solda executada.

Após a etapa de corte, o corpo de prova foi encaminhado a uma empresa especializada para a realização do polimento da superfície recém-cortada. O processo de polimento foi executado de forma criteriosa, empregando diferentes etapas para atingir um acabamento refinado. Inicialmente, foram utilizadas lixas de granulações variadas, incluindo 100, 280, 600 e 800, com o intuito de remover quaisquer irregularidades e imperfeições presentes na superfície.

Posteriormente, para aprimorar ainda mais o acabamento, a peça foi submetida ao polimento com lixas de granulação mais fina, como a de 1200. Por fim, para conferir o toque final de brilho e uniformidade à superfície, foi empregada uma roda de pano acoplada a uma polítriz.

A sequência de etapas de polimento adotada resultou em uma superfície final com um acabamento espelhado, livre de quaisquer marcas, arranhões ou imperfeições. Esse procedimento é crucial para assegurar que a região de interesse esteja pronta para as análises subsequentes, garantindo a obtenção de dados precisos e confiáveis sobre a qualidade da solda e suas propriedades estruturais.

5. RESULTADOS

5.1 Cálculo de aporte térmico

Para o cálculo do aporte térmico, utiliza-se a fórmula 1, na qual a corrente de soldagem (I) é considerada como 230 A em todas as condições analisadas. A duração de cada cordão de solda foi cronometrada para calcular a velocidade de soldagem (v), que foi determinada a partir da distância percorrida, correspondente ao comprimento da lagarta (65 mm), e o tempo aproximado de execução do cordão de solda, que totalizou cerca de 27 segundos. Com base nessas medidas, obteve-se uma velocidade média de soldagem de 2,40 mm/s.

Considerando que o processo de soldagem por pontos é manual, a tensão (V) é fixa, e a corrente (I) varia durante a soldagem em função da distância do eletrodo em relação à peça. A fim de calcular a tensão média, esta foi verificada durante o procedimento utilizando um alicate amperímetro, registrando os valores mínimos e máximos em cada passagem, resultando em uma tensão média de 28 V.

Além disso, o valor da eficiência térmica (n) foi considerado como 90%, conforme as normas estabelecidas para o processo de soldagem. Esse parâmetro é fundamental para a análise do processo e influencia diretamente no cálculo do aporte térmico. Com todos esses valores devidamente estabelecidos, é possível realizar o cálculo preciso do aporte térmico e avaliar os efeitos térmicos decorrentes do processo de soldagem sobre o material.

$$H = \frac{V \cdot I}{v} \cdot n$$

$$H = \frac{28 \times 230}{2,4} \cdot 0,9$$

$$H = 2,415 \text{ J/mm}$$

Para determinar a entrada total de calor na peça, é necessário calcular o comprimento total de soldagem, considerando tanto o comprimento das soldas das arestas quanto o comprimento do revestimento. O comprimento das soldas

das arestas pode ser obtido a partir da soma das duas arestas, que totalizam 110 mm, e das duas outras arestas, que somam 65 mm, resultando em um comprimento total de 350 mm. Já o comprimento do revestimento pode ser obtido multiplicando o comprimento de 65 mm pela quantidade de cordões de solda, que corresponde a 20 cordões, resultando em 1300 mm.

Ao somar os dois comprimentos obtidos, chega-se a um comprimento total de 1650 mm. Multiplicando esse valor pela quantidade de J/mm, que é a unidade de medida de energia, é possível calcular a entrada total de calor, que equivale a 3,985 MJ (megajoules). Esse valor representa a quantidade total de energia que foi introduzida no material durante o processo de soldagem, sendo um indicador importante para compreender os efeitos térmicos e a influência do calor sobre a peça soldada.

5.2 Análise de micrografia ótica

Para examinar a taxa de diluição do cordão de solda, foram realizados testes micrográficos seguindo um procedimento metalográfico padrão, que incluiu etapas de esmerilhamento e polimento, conforme demonstrado na imagem 6. Além disso, foram obtidas imagens de perfil das soldas utilizando um estereoscópio binocular. Através dessas imagens, foi possível medir as áreas de penetração do cordão de solda e as áreas de reforço, o que permitiu estimar as taxas de diluição. Essa análise é crucial para compreender a qualidade e a integridade do cordão de solda, bem como para avaliar a eficácia do processo de soldagem em manter a composição adequada do material soldado.

O teste de microdureza foi conduzido utilizando o Durômetro Hansen - 3000. Para a avaliação do revestimento, medições foram tomadas aleatoriamente na superfície do corpo de prova e as médias foram calculadas. Os resultados obtidos e convertidos a partir desse processo indicaram uma dureza de 187 HBW. Em relação à análise da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), o perfil de dureza das amostras foi determinado através de 5 medições espaçadas de forma aleatória, revelando um valor de dureza de 202 HBW nessa região.

O teste de micrografia ótica realizado nos corpos de prova teve como objetivo medir a profundidade da penetração do cordão de solda. Foi observada

uma considerável variação nos pontos em que as medições foram realizadas, com espessuras variando de 3 mm a 7 mm. Essa variação pode ser atribuída principalmente à falta de habilidade do soldador e à possível variação nos parâmetros da máquina de solda durante a execução, o que resultou em flutuações na corrente e na tensão aplicada.

Durante a análise micrográfica, a detecção de microtrincas nas extremidades da penetração em relação ao metal base revelou um fenômeno associado ao comportamento térmico e mecânico das juntas soldadas. Essas microtrincas são indicativos de tensões residuais acumuladas durante o ciclo térmico da soldagem, particularmente na fase de resfriamento. Durante a solidificação, o cordão de solda experimenta contrações volumétricas, enquanto o metal base, que resfria mais lentamente e em temperaturas mais baixas, restringe esse movimento. Essa interação gera tensões térmicas que, dependendo da intensidade, podem superar os limites de resistência do material, resultando em trincas intergranulares ou transgranulares, dependendo das propriedades do material e do ambiente térmico.

A intensificação desses efeitos pelo resfriamento rápido ressalta a importância de uma gestão controlada da temperatura. Em aços endurecíveis ou materiais sujeitos a transformações de fase, como a formação de martensita, o resfriamento rápido não apenas exacerba as tensões, mas também induz fragilização estrutural. A martensita, uma fase dura e quebradiça, forma-se em temperaturas mais baixas e é particularmente suscetível a falhas devido à sua baixa ductilidade. Nessas condições, as zonas afetadas pelo calor (ZTA) tornam-se focos preferenciais para o início e a propagação de microtrincas, o que compromete a integridade estrutural da solda e a durabilidade da junta em serviço.

A recomendação do fabricante para um resfriamento lento e controlado está diretamente ligada à redução desses riscos. O resfriamento gradual permite que as tensões sejam redistribuídas de forma mais uniforme, prevenindo concentrações localizadas que resultam em trincas. Métodos como o pré-aquecimento do material antes da soldagem e o uso de mantas térmicas após o processo podem ajudar a alcançar esse objetivo. O pré-aquecimento reduz o gradiente térmico inicial entre o cordão de solda e o metal base, enquanto o resfriamento controlado assegura uma transformação microestrutural mais

equilibrada, evitando a formação de martensita em excesso ou outras fases frágeis.

Além disso, a análise detalhada das trincas pode revelar informações importantes sobre sua natureza. Trincas intergranulares, por exemplo, indicam uma possível fragilização por segregação de elementos químicos na borda dos grãos, enquanto trincas transgranulares sugerem que as tensões residuais ultrapassaram os limites de coesão do grão. Essas características podem ser exploradas por meio de técnicas avançadas, como difração de raios X ou análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), permitindo uma abordagem mais precisa para a resolução do problema.

Portanto, o surgimento dessas microtrincas deve ser analisado não apenas como um resultado de falhas no resfriamento, mas como um indicador crítico da interação entre os parâmetros térmicos, as propriedades do material e o ambiente de soldagem. Isso reforça a necessidade de práticas rigorosas de controle de processo para garantir a qualidade e a confiabilidade das juntas soldadas.

6. DISCUSSÃO

Embora os procedimentos tenham sido executados com gabaritos para garantir repetibilidade no dimensionamento do cordão, a velocidade de soldagem foi controlada manualmente e foi sujeita a erros humanos. No entanto, observou-se que os valores médios calculados de aporte de calor foram semelhantes, indicando que não houve mudanças abruptas na energia de soldagem entre os processos. Isso pode ser atribuído ao uso de gabaritos para controlar a oscilação durante o movimento de tecelagem, bem como ao cronometrar cada cordão criado para auxiliar no controle da velocidade de soldagem.

Uma pequena variação é de se esperar devido à necessidade de ajustes manuais durante a execução. Além disso, devido à sobreposição lateral no processo de soldagem do revestimento, sabe-se que a taxa de diluição final gerada no revestimento é menor do que nos cordões individuais.

Para evitar quaisquer problemas relacionados a trincas e microtrincas internas no material, é essencial realizar um processo de resfriamento lento. Em certos casos, a completa submersão da peça em cal pode ser aplicada para evitar que agentes externos, como o vento, acelerem o processo de resfriamento.

Os ensaios de dureza e micrografia óptica anteriormente mencionados foram para analisar o cordão de solda em si, sem ligações diretas à proteção contra corrosão resultante do procedimento de revestimento. Uma experiência prévia da empresa que fabricou os corpos de prova ajudou a compreender melhor a durabilidade do revestimento.

A espessura do corpo de prova, o modelo do material de adição e as variáveis de soldagem foram escolhidos com base em trabalhos anteriores realizados pela empresa durante o processo de fabricação dos corpos de prova. Essas escolhas foram feitas para permitir a comparação e análise de longo prazo do revestimento, uma vez que essas práticas já foram aplicadas em outras peças anteriormente.

Em um caso de 2018, o processo de soldagem de revestimento foi realizado em tubulações para um ácido de limpeza altamente corrosivo em chapas. Este ácido é extremamente agressivo para aços de liga SAE 10XX e

ASTM A36, tornando necessário o uso de revestimentos resistentes para evitar desgaste prematuro. A diferença notável na vida útil das peças revestidas em comparação com aquelas sem revestimento indica a importância do revestimento em determinadas aplicações.

Apesar de reduzir o custo, revestir uma peça utilizando soldagem tem algumas desvantagens, incluindo a possibilidade de alteração na estrutura do metal base e deformação da geometria da peça. Portanto, ao considerar o processo de revestimento, é importante levar em conta a quantidade de calor que a peça recebe durante a soldagem, bem como a sua geometria, para garantir a viabilidade do procedimento.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A união de peças metálicas desempenha um papel crucial na indústria metalmeccânica, sendo fundamental tanto para a produção quanto para a manutenção. Compreender a coalescência entre metais é essencial para a aplicação adequada dos processos de soldagem.

Ao longo deste estudo, vários pontos cruciais foram levantados em relação aos parâmetros e processos de soldagem, com foco na comparação entre diferentes materiais. Essa análise incluiu a qualidade superficial do cordão de solda, a presença de descontinuidades dentro da solda e as alterações na junta causadas pelo processo de soldagem.

O escopo abrangente do processo de soldagem demanda um estudo mais aprofundado para compreender todos os seus aspectos. Nesse sentido, a revisão bibliográfica de questões pertinentes ao trabalho em questão desempenhou um papel crucial. A preparação cuidadosa das amostras e a realização dos testes foram essenciais para a compreensão de alguns dos resultados obtidos, como as marcas de polimento ou as manchas deixadas pela solução ácida nas peças.

Observou-se que a concentração de perlita está diretamente relacionada à dureza do material, enquanto o aumento da ferrita está associado à melhoria da tenacidade. Em relação ao material de adição, as composições de perlita e ferrita nas amostras foram bastante similares, no entanto, a identificação nos processos MIG e MAG revelou uma tenacidade menor em comparação com outros processos. Na linha de fusão, foi possível identificar uma região de granulação mais grosseira, onde a tenacidade é comprometida devido ao crescimento de grão e à presença de perlita (grãos escuros), tornando essa seção mais propensa a trincas.

As descontinuidades encontradas são o resultado da contração do material devido à diferença de densidade entre suas fases líquida e sólida. De um modo geral, não há uma distinção clara entre um processo e outro no que diz respeito à qualidade da microestrutura, e o processo de resfriamento exerce maior influência em relação a descontinuidades ou problemas relacionados à soldagem.

A análise comparativa entre diferentes materiais e processos de soldagem revelou a complexidade subjacente à formação de juntas soldadas e à interação entre os metais envolvidos. Os resultados obtidos destacaram a importância de considerar não apenas os parâmetros de soldagem, mas também as características intrínsecas dos materiais base e de adição. A compreensão das transformações metalúrgicas e das mudanças na microestrutura durante o processo de soldagem é fundamental para garantir a integridade e a durabilidade das juntas soldadas.

Ao examinar a influência da composição do material base, observou-se que a concentração de perlita e ferrita desempenha um papel significativo na determinação das propriedades mecânicas do material. Enquanto a perlita está associada à dureza, a presença de ferrita contribui para a melhoria da tenacidade. Essas relações são importantes considerações no desenvolvimento de procedimentos de soldagem adequados e na seleção de materiais compatíveis para aplicações específicas na indústria.

Além disso, a identificação de descontinuidades na junta soldada ressalta a importância de controlar adequadamente o processo de resfriamento durante a soldagem. A formação de trincas e outras imperfeições está intrinsecamente ligada à contração do material e às mudanças na estrutura cristalina durante a solidificação. Portanto, estratégias para minimizar tais descontinuidades devem ser incorporadas aos procedimentos de soldagem, visando garantir a integridade estrutural e funcional das peças soldadas.

Em futuros trabalhos recomenda-se: analisar o uso de novas tecnologias, como a soldagem a laser; aplicar simulações computacionais para prever efeitos de parâmetros.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. V. **Desenvolvimento de aplicativo como facilitador na utilização do diagrama de schaeffler a fim de prever a microestrutura do metal de solda de aços inoxidáveis.** Monografia (Especialista em Tecnologia e Qualificação em Soldagem). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2020.

BATISTA, L. A. **Soldagem MIG/MAG com fluxo ativo do aço inoxidável austenítico AISI 304L.** Dissertação (Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2018.

BRANCO, H. L. O. (2004). **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004. 113p.

BRANCO, H. L. O. **SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA: Máquinas, Processos e Aplicações.** [S. l.]: MEPE, 2019. 149 p.

CARVALHO, T. M. A. S. **Avaliação da microestrutura de uma junta dissimilar formada por aço carbono ASTM A36 x aço inox AISI 316 L e comparação com a microestrutura prevista pelo Diagrama De Schaeffler.** Engenharia de Soldagem pela Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. 2018.

CHRISTOFOLETTI, G. M. **Soldagem Por Pontos: Avaliação Dos Parâmetros De Soldagem E Das Propriedades Mecânicas Da Junta Soldada.** 2013

EAGAR, T. W. **Resistance Welding: A fast, Inexpensive and Deceptively Simple Process.** 3rd International Conference on Trends in Welding Research. Gatlinburg, Tennessee, USA: June 1992, p 341 – 351

FONSECA, E. O. DA. **Monitoração da resistência dinâmica na soldagem a ponto por resistência elétrica e avaliação da sua relação com a resistência mecânica do ponto de solda.** 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

FURLANETTO, V. **Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de solda a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais.** 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARCONDES, G. A. **Comparativo de solda ponto por resistência elétrica com corrente contínua e soldagem adaptativa em chapas da indústria automobilística.** 2016

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MARQUES, PAULO VILLANI. MODENESI, PAULO JOSÉ. BRACARENSE, ALEIXANDRE QUEIROZ. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363p.

MELLOR, B. G. (Ed.). **Surface coatings for protection against wear**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.

MODENESI, P. J. **Fluxo de Calor em Soldagem**. 2003. Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

NASCIMENTO, V. C. DO. **Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2008. 130f.

RAMO, J. V. M. **Soldagem – MIG/MAG: a seleção e aplicação de gases de proteção**. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica). Faculdade Pitágoras de Uberlândia. Uberlândia. 2018.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

RODRIGUES, R; GONÇALVES, J. C. **Procedimentos de Metodologia Científica**. 8. ed. Lages: Papervest Editora, 2017.

RUIZ, D. C. **Contribuição ao desenvolvimento de processos de montagem e soldagem de carrocerias automotivas**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RUIZ, D. C; BATALHA, G. F. **Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência**. In: Workshop sobre novos desenvolvimentos em Engenharia de fabricação. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

RWMA. **Resistance Welding Manual**. 4. ed. E.U.A., 1989. 443 p.

SCOTTI, A; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento e Melhor desempenho**. São Paulo: Artiber, 2008.

VARGAS, J. E. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências: Uma Abordagem Estatística**. Dissertação de

Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. 143p.

WAINER, E. B; et. al. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 1 ed. São Paulo: Editora Bluncher, 1992. 494p.