

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

JÚLIA DE REZENDE MATTOS

PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM GMAW PULSADA COM
INTERVALOS DE ENERGIA TÉRMICA ULTRABAIXAS

Joinville

2025

JÚLIA DE REZENDE MATTOS

PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM GMAW PULSADA COM
INTERVALOS DE ENERGIA TÉRMICA ULTRABAIXAS

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, no Curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Tiago Vieira da Cunha

Joinville

2025

JÚLIA DE REZENDE MATTOS

PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM GMAW PULSADA COM
INTERVALOS DE ENERGIA TÉRMICA ULTRABAIXAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, no Curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 26 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Dr. Tiago Vieira da Cunha
Orientador/Presidente

Dr. Fábio Krug Rocha
Membro
Universidade Univille

Dra. Oksana Kovalenko
Membro
Universidade Senai SC

Dedico este trabalho a minha mãe,
por acreditar em mim, mesmo quando eu
não acreditava.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, por ter me sustentado e abençoado diante de todas as dificuldades ao longo da graduação e da vida. Sou profundamente grata aos meus pais, por apoiarem meus sonhos, mesmo quando a distância física nos separa. Obrigada por me amarem incondicionalmente e por fazerem de tudo para que eu seja feliz. Estendo minha gratidão à minha irmã, pelo companheirismo e pelas conversas nos dias difíceis.

Agradeço ao Gabriel, por me arrancar sorrisos todos os dias e por estar sempre ao meu lado para enxugar as lágrimas. A vida é muito melhor com você. Sou grata também às amigas que construí nesses anos de UFSC, pessoas com quem sempre me senti à vontade para ser quem sou e que estiveram presentes nos momentos mais especiais da graduação. Desde os almoços no RU, sessões “assiste e fala”, rolês das meninas, risadas de doer a barriga, até as celebrações por cada conquista. Vocês tornaram esses anos inesquecíveis.

Registro minha sincera gratidão ao meu orientador, professor Tiago, por todos os conselhos, pela dedicação e pelo apoio durante este processo de pesquisa. Agradeço igualmente ao laboratório LTS, pelos materiais e pela infraestrutura disponibilizados, e a todos que contribuíram em algum momento dessa jornada, em especial à Kamila, pelos cafés com desabafos e por todo o suporte nessa pesquisa.

Agradeço ainda à equipe Nisus e ao laboratório LAC, que marcaram minha trajetória na universidade e me proporcionaram aprendizados valiosos com cada pessoa que tive o prazer de conhecer nesses projetos. Deixo também meu reconhecimento a todos os professores, pela sabedoria, pelo conhecimento compartilhado e pela inspiração transmitida aos alunos.

Por fim, sou grata por não ter desistido diante da doença e dos obstáculos. Por ter acreditado que valeria a pena correr atrás dos meus sonhos e, de fato, valeu.

“Renda-se, como eu me rendi. Mergulhe no que você não conhece, como eu mergulhei. Não se preocupe em entender, viver ultrapassa qualquer entendimento.”

(Clarice Lispector, 1969)

RESUMO

O transporte ferroviário desempenha um papel essencial em países de grande extensão territorial, como o Brasil, embora sua utilização ainda seja limitada em comparação a nações como Estados Unidos, Rússia e Canadá. A busca por maior eficiência, produtividade e segurança tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas de soldagem, fundamentais para a fabricação e manutenção de veículos ferroviários. Dentre essas técnicas, destaca-se o processo Gas Metal Arc Welding (GMAW), amplamente empregado devido à sua versatilidade em diferentes materiais e espessuras. No GMAW, o passe de raiz é uma etapa crítica para garantir a integridade estrutural, especialmente em materiais espessos, sendo frequentemente otimizado com o uso de cobre-junta, que auxilia no controle da penetração e na prevenção de defeitos. Entretanto, a soldagem convencional apresenta limitações que podem ser superadas por métodos de transferência metálica pulsada, caracterizados por maior controle do metal de adição e do aporte de calor, o que favorece a precisão e a qualidade do processo. Em resposta às demandas industriais, surgiram técnicas avançadas, como o processo duplamente pulsado e o Pulsed Multi Control (PMC), que proporcionam maior estabilidade e menor aporte térmico, otimizando a eficiência global do processo. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo propor e avaliar uma técnica de soldagem baseada na pulsação térmica, voltada à redução do aporte de calor e ao aprimoramento do controle do cordão, com potencial aplicação futura no passe de raiz em soldagens do setor ferroviário. A técnica consiste em um processo GMAW pulsado, utilizando correntes ultrabaixas no período de baixa energia, de modo a identificar o limite entre estabilidade e viabilidade do processo com o menor aporte térmico possível. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) do CTJ/UFSC, onde foram definidas variáveis como corrente de pico, corrente de base, velocidade de alimentação do arame e tempo de pulso. A partir dos resultados obtidos, foi possível estabelecer uma parametrização viável, capaz de promover maior taxa de fusão, formação superficial escamada e cordões de solda regulares e estáveis, evidenciando o equilíbrio entre o aporte térmico e a estabilidade do arco elétrico.

Palavras-chave: Soldagem GMAW; Pulsação térmica; Aporte de calor extremamente baixo.

ABSTRACT

Rail transport plays an essential role in countries with large territorial extensions, such as Brazil, although its use remains limited compared to nations like the United States, Russia, and Canada. The pursuit of greater efficiency, productivity, and safety has driven the development of welding techniques, which are fundamental for the manufacturing and maintenance of railway vehicles. Among these techniques, the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process stands out for its versatility in different materials and thicknesses. In GMAW, the root pass is a critical stage to ensure structural integrity, especially in thick materials, and is often optimized through the use of backing copper, which helps control penetration and prevent defects. However, conventional welding presents limitations that can be overcome by pulsed metal transfer methods, characterized by greater control of filler metal and heat input, which favor process precision and weld quality. In response to industrial demands, advanced techniques such as the double-pulsed process and Pulsed Multi Control (PMC) have emerged, providing greater stability and lower heat input, thus optimizing overall process efficiency. In this context, the present work aimed to propose and evaluate a welding technique based on thermal pulsing, focused on reducing heat input and improving weld bead control, with potential future application to root pass welding in the railway sector. The technique consists of a pulsed GMAW process, using ultralow currents during the low-energy period, to identify the limit between process stability and viability with the lowest possible heat input. The experiments were conducted at the Welding Technology Laboratory (LTS) of the CTJ/UFSC, where variables such as peak current, base current, wire feed speed, and pulse time were defined. Based on the results obtained, it was possible to establish a feasible parameterization, capable of promoting a higher fusion rate, scaled surface formation, and regular and stable weld beads, evidencing a balance between heat input and arc stability.

Keywords: GMAW welding; Thermal pulsing; Extremely low heat input.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Cronologia dos processos de soldagem | 17 |
| Figura 2 - Seção transversal de uma solda de topo por fusão..... | 18 |
| Figura 3 - Processo esquemático GMAW..... | 20 |
| Figura 4 - Maiores modos de transferência GMAW..... | 22 |
| Figura 5 - Oscilograma da transferência por curto-circuito..... | 22 |
| Figura 6 - Princípio da transferência pulsada: I_p (corrente de pico), I_b (corrente de base), T_p (tempo de pico) e T_b (tempo de base) | 24 |
| Figura 7 - Forma de onda de saída do processo GMAW com pulsação térmica..... | 25 |
| Figura 8 - Formação e destacamento de gota com uso do processo PMC..... | 26 |
| Figura 9 - Fluxograma da metodologia..... | 28 |
| Figura 10 - Bancada de ensaios de soldagem..... | 29 |
| Figura 11 - Esquema simplificado do ciclo de pulsação térmica adotado no trabalho.. | 31 |
| Figura 12 - Oscilograma da corrente I_b obtido no ensaio 9, para a análise da estabilidade do arco elétrico durante o período de base térmica..... | 37 |
| Figura 13 – Oscilograma da corrente I_b obtido no ensaio 10, para a análise da estabilidade do arco elétrico durante o período de base térmica..... | 37 |
| Figura 14 - Oscilograma da tensão obtido no ensaio 12, para analisar a estabilidade da tensão de arco durante o período de base térmica..... | 40 |
| Figura 15 - Cordões resultantes dos ensaios de parametrização..... | 42 |
| Figura 16 – Três modos distintos de transferência metálica: a) GMAW pulsado analisado no presente trabalho; b) GMAW pulsado convencional; c) GMAW curto-circuito convencional | 44 |
| Figura 17 - Vista ampliada dos três modos de transferência metálica..... | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Parâmetros fixos na etapa de parametrização | 30 |
| Tabela 2 – Variáveis de soldagem na etapa de parametrização..... | 32 |
| Tabela 3 – Condições de ensaios realizados para análise comparativa | 43 |
| Tabela 4 – Valor de V_a nos diferentes modos de transferência metálica, considerando valores normalizados para comparação..... | 47 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Descontinuidades em passe de raiz..... | 19 |
| Quadro 2 - Variação de V_a na base térmica em ensaios de soldagem, com objetivo de analisar a estabilidade do arco elétrico e da corrente de soldagem..... | 35 |
| Quadro 3 - Variação da V_a com corrente de base térmica fixa em 7 A, analisando o comportamento da tensão de arco..... | 39 |
| Quadro 4 - Variação t_p nos ensaios de soldagem da base térmica..... | 41 |
| Quadro 5 - Análise com estereoscópio das transferências metálicas ensaiadas..... | 46 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIFER – Associação Brasileira da Indústria Ferroviária
ANTF – Associação Nacional dos Transportes Ferroviário
Ar – Argônio
AWS – American Welding Society
CO₂ – Dióxido de carbono
CTJ – Centro Tecnológico de Joinville
DCP – Distância entre o bico de contato e o metal de base
ESAB – Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget
GMAW – Gas Metal Arc Welding
I_b – Corrente constante no período de base térmica
I_m – Corrente média
I_p – Corrente de pulso térmico
LTS – Laboratório de Tecnologia da Soldagem
MB – Metal de Base
MIG/MAG – Metal Inert Gas/ Metal Active Gas
PMC – Pulsed Multi Control
TIG – Tungsten Inert Gas
t_p - Tempo de pulso
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
V_a - Velocidade de alimentação do arame
V_{a,norm} – Velocidade de alimentação do arame normalizada
VT – Velocidade do Tartilope
ZCA – Zona Afetada pelo Calor
ZF – Zona Fundida
ZTA – Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1. OBJETIVOS | 16 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 16 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 16 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM | 17 |
| 2.2. O PROCESSO GMAW (MIG/MAG) | 20 |
| 2.3. MODOS NATURAIS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA..... | 21 |
| 2.4. TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS CONTROLADAS | 23 |
| 2.4.1. Transferência por arco pulsado | 24 |
| 2.4.2. Duplamente pulsado | 24 |
| 2.4.3. Pulsed Multi Control (PMC) | 26 |
| 3. METODOLOGIA | 28 |
| 3.1 BANCADA DE ENSAIOS | 28 |
| 3.3.1. Materiais e corpos de prova | 30 |
| 3.2 ENSAIOS PRELIMINARES..... | 30 |
| 3.3 PARAMETRIZAÇÃO E ENSAIOS DE SOLDAGEM..... | 32 |
| 3.4 ANÁLISE VISUAL E METALOGRAFICA..... | 32 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 34 |
| 4.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM | 34 |
| 4.1.1 Efeito Velocidade de alimentação do arame (Va) | 34 |
| 4.1.2 Efeitos dos valores de corrente do período de base térmica (Ib) | 36 |
| 4.1.3 Refinamento dos parâmetros de soldagem | 38 |
| 4.1.4 Variação do tempo de pulso | 40 |
| 4.1.5 Análise visual dos cordões de solda obtidos | 42 |
| 4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA | 43 |
| 5. CONCLUSÃO | 48 |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 49 |
| REFERÊNCIAS | 50 |

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário constitui elemento essencial para a logística, o desenvolvimento e a eficiência dos sistemas de transporte em nações de dimensões continentais, como o Brasil. Entretanto, ao contrário de outros países com áreas semelhantes, como os Estados Unidos, Rússia e Canadá, a utilização e o desenvolvimento da mobilidade ferroviária no Brasil ainda se mostram restritos. Segundo dados da Associação Nacional dos Transportes Ferroviários (ANTF) de 2022, no Brasil, o modal ferroviário representa apenas 21,5% do total da matriz de transporte de cargas, enquanto o modal rodoviário predomina com 67,6%, e o aquaviário totaliza apenas 10,6%.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Ferroviária (ABIFER, 2025), o Plano Nacional de Ferrovias prevê elevar a participação do modal ferroviário de 24% para 40% até 2035, com previsão de R\$ 100 bilhões em investimentos e a concessão de aproximadamente 5 mil km de malha. Neste contexto, a busca por maior eficiência, produtividade e segurança, tem impulsionado estudos voltados para processos essenciais na ampliação do transporte ferroviário, incluindo técnicas de soldagem, empregadas tanto na manutenção quanto na fabricação de veículos ferroviários.

Os procedimentos de soldagem que utilizam um arco elétrico como fonte de energia, têm sido relevantes na indústria contemporânea, sendo um dos com maior destaque no setor ferroviário o Gas Metal Arc Welding (GMAW), também conhecido como Metal Inert Gas/ Metal Active Gas (MIG/MAG), que pode ser utilizado em uma ampla faixa de espessura, tanto em materiais ferrosos quanto não ferrosos (Bracarense; Marques; Modenesi, 2009).

O passe de raiz, caracterizado pela primeira deposição de material no fundo da junta, constitui etapa essencial para a integridade estrutural em soldagens GMAW, mostrando-se particularmente relevante em materiais espessos para a prevenção de defeitos como a falta de fusão. Para otimizar o controle da penetração e a formação adequada do cordão, é comum o uso de cobre-junta, que atua como um suporte térmico, dissipando o calor de forma eficiente e prevenindo o excesso de penetração do metal fundido (Bracarense *et al.*, 2009).

Apesar de sua ampla aplicabilidade, a soldagem apresenta limitações inerentes a cada método, as quais podem ocasionar falhas no componente. Para atender às diferentes condições operacionais, diversos tipos de transferência metálica são empregados de acordo com as exigências específicas do processo. Uma forma controlada de transferência metálica por GMAW é o modo pulsado, que permite uma transferência controlada do metal de adição com níveis menores de corrente média, além da oscilação da corrente em pulsos durante o processo (Modenesi, 2000).

Nesse cenário, processos baseados em pulsação térmica têm sido desenvolvidos em resposta às demandas da indústria, destacando-se o Duplamente Pulsado, que modula simultaneamente a velocidade de alimentação do arame e a frequência de pulso, proporcionando maior controle térmico sobre o cordão de solda (Barra, 2003). Outro exemplo é o Pulsed Multi Control (PMC), um método otimizado que se destaca por ser a variante mais estável entre os processos pulsados, oferecendo menor aporte térmico para uma mesma taxa de deposição quando comparado aos métodos convencionais (Gomes, 2018).

Dentro dessa perspectiva, propõe-se nesse trabalho um método de pulsação térmica que, ao explorar intervalos de baixa energia e otimizar o passe raiz, um aspecto fundamental do processo de soldagem, torna a operação mais eficiente. O objetivo é viabilizar a implementação dessa técnica de forma simplificada na indústria ferroviária. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A metodologia iniciou-se com a realização de ensaios exploratórios, voltados à identificação dos parâmetros mais relevantes do processo. Em seguida, foram conduzidos os ensaios com o objetivo de definir uma parametrização que garantisse o menor aporte térmico possível, mantendo um cordão de solda tecnicamente viável. No experimento, a fonte de soldagem foi programada para promover a pulsação térmica em períodos alternados, intercalando fases de alta e baixa energia, de modo a evitar o excesso de material no passe de raiz. A efetividade dos resultados foi avaliada com base na uniformidade, regularidade e estabilidade do cordão de solda obtido.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática do reforço no passe raiz e da necessidade do cobre-junta, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Propor e avaliar a técnica de soldagem GMAW pulsada, com características de baixa energia térmica, por meio do desenvolvimento de uma parametrização baseada na pulsação térmica, visando à redução do aporte energético e à melhoria da estabilidade do cordão, com potencial aplicação futura no passe de raiz e foco em demandas do setor ferroviário.

1.1.2. Objetivos Específicos

Baseado no objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer os parâmetros de referência para a parametrização do processo na técnica de interesse;
- Definir a parametrização do processo;
- Comparar os resultados obtidos com parâmetros convencionais do processo GMAW;
- Analisar a regularidade e a morfologia dos cordões de solda obtidos a partir da aplicação da técnica proposta, considerando aspectos visuais e a ocorrência de descontinuidades.

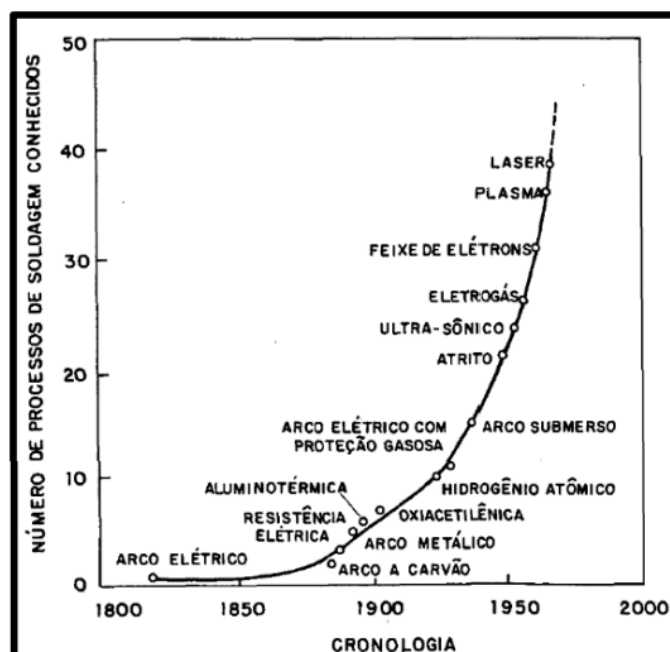
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de compreender as limitações do processo convencional e sustentar a proposta de controle térmico, este capítulo apresenta os conceitos fundamentais da soldagem, com ênfase na transferência metálica e no passe de raiz, que são determinantes para o desempenho do processo. Também são abordadas definições complementares, como a Zona Afetada pelo Calor (ZAC), de modo a fornecer a base teórica necessária para os tópicos discutidos no presente trabalho.

2.1. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM

De acordo com a American Welding Society (AWS, 2001), a soldagem é um processo que busca alcançar a coalescência em uma área específica, por meio do aquecimento, a uma temperatura apropriada, podendo ocorrer com ou sem a aplicação de pressão e de material adicional. A soldagem é amplamente empregada na união de metais na indústria e constitui um dos principais recursos para o aumento da produtividade e para o desenvolvimento de novas soluções tecnológicas (Brandi; Mello; Wainer, 2004) (Figura 1).

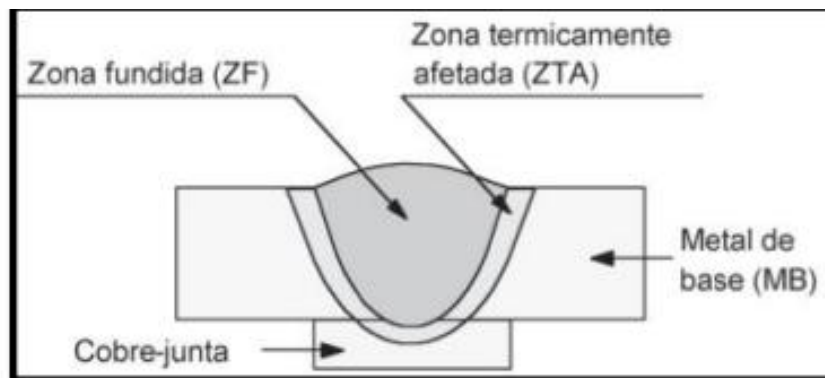
Figura 1 – Cronologia dos processos de soldagem



Fonte: Brandi *et al.* (2004, p. 1).

Durante a soldagem, o metal de adição é fundido pela fonte de calor e misturado com uma quantidade de metal de base, também fundido, para formar a poça de fusão, e por fim, o cordão de solda. Uma junta soldada pode ser dividida em três zonas: zona fundida (ZF); zona termicamente afetada (ZTA); e o metal de base (MB); além da possibilidade, ou não, de se utilizar um cobre-junta. A Figura 2 esquematiza a junta soldada (Bracarense *et al.*, 2011).

Figura 2 – Seção transversal de uma solda de topo por fusão



Fonte: Bracarense *et al.* (2011, p. 33).

A ZF é a região que atinge o estado líquido, temporariamente, durante o processo de soldagem, retornando ao estado sólido com a diminuição da temperatura. Essa zona representa uma fusão do metal de base com o metal de adição. Já a ZTA, também conhecida como Zona Afetada pelo Calor (ZAC), é a área onde ocorrem modificações microestruturais devido ao calor intenso gerado pelo processo de soldagem. O MB, ou zona não afetada, é a parcela do material que não sofre alterações na sua microestrutura, exceto pelas possíveis deformações mecânicas e tensões residuais decorrentes do processo (Bracarense *et al.*, 2011).

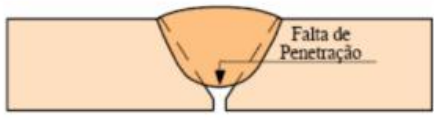

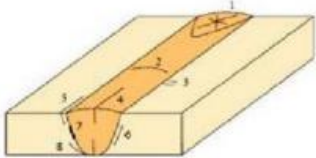
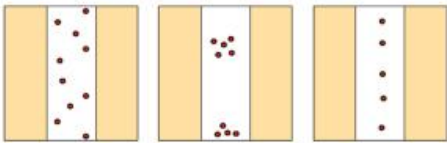

O chanfro corresponde à preparação do metal de base destinada a possibilitar a deposição de material e assegurar a união entre as peças. O preenchimento do chanfro é realizado em etapas chamadas passes, que representam a progressão da operação de soldagem na junta. O primeiro passe, conhecido como passe de raiz, preenche a abertura de raiz da junta, geralmente com o suporte de um cobre-junta na parte inferior das chapas que serão unidas (Rodrigues, 2022).

No processo de soldagem, discontinuidades como porosidades, trincas e falta de fusão podem ocorrer devido a vários fatores, como a proteção inadequada do gás, falta de preparação das chapas, utilização de parâmetros inadequados, entre

outros. A inadequada preparação das chapas, que pode incluir a presença de contaminantes, óxidos ou superfícies irregulares, prejudica a fusão entre o metal de base e o metal de adição, resultando em deficiência de fusão e comprometendo a integridade da junta (Torres, 2016).

Os parâmetros de soldagem, como a corrente de soldagem, a tensão de arco, a velocidade de soldagem, são fundamentais para garantir a qualidade do cordão de solda, por exemplo, uma corrente de soldagem muito baixa pode resultar em uma fusão inadequada, enquanto uma corrente excessiva pode provocar deformações ou até perfurações no material. Sendo o passe raiz um ponto crítico da soldagem, medidas devem ser tomadas para que não haja descontinuidades no cordão de solda (Torres, 2016). As descontinuidades usualmente apresentadas em passe raiz estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Descontinuidades em passe de raiz

| Descontinuidade | Formação |
|------------------------------|--|
| Falta de fusão ou penetração |  |
| Mordeduras |  |
| Trincas |  |
| Porosidade |  |
| Excesso de respingos |  |

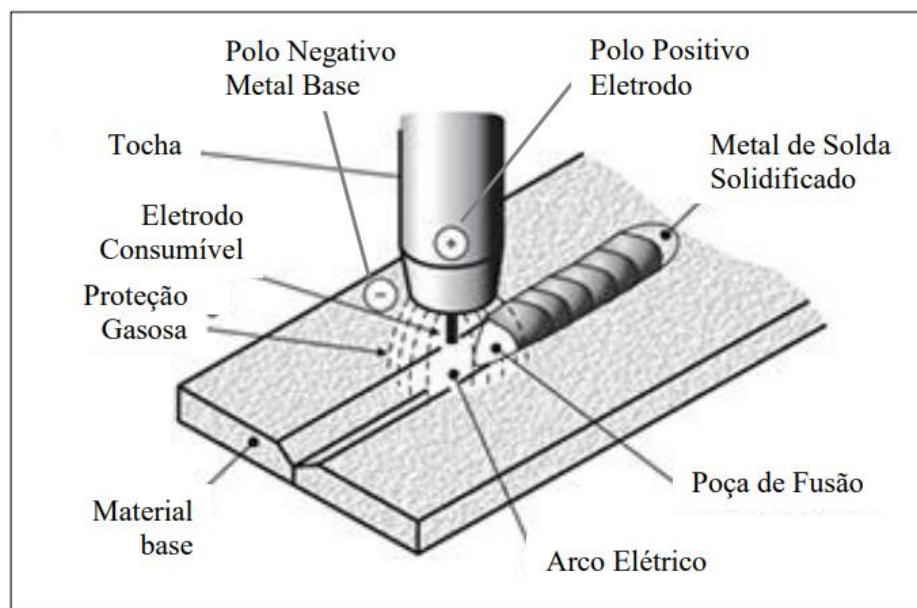
Fonte: Adaptado de Torres (2016, p. 23).

A avaliação visual é amplamente utilizada como critério primário para verificar a qualidade de um cordão de solda, pois permite uma inspeção rápida de aspectos essenciais, como a regularidade, largura e uniformidade do cordão. Outras características, como descontinuidades superficiais, porosidade, respingos e trincas, também são verificadas para identificar possíveis falhas no processo. Com essa análise, podem-se ajustar parâmetros e técnicas para garantir a qualidade e consistência da solda ao longo do processo (Torres, 2016).

2.2. O PROCESSO GMAW (MIG/MAG)

No processo GMAW, um arco elétrico é estabelecido entre o material base e um eletrodo consumível, que se apresenta na forma de arame. Esse arco funde o arame de maneira contínua enquanto é direcionado para a poça de fusão. Para proteger o metal de solda da influência dos gases atmosféricos, utiliza-se um fluxo de gás, que pode ser uma mistura de gases, inerte ou ativo, conhecido como gás de proteção. A Figura 3 ilustra o esquema do processo (Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget - ESAB, 2005).

Figura 3 – Processo esquemático GMAW



Fonte: ESAB (2013) apud Zotto (2016, p. 18).

Conforme a ESAB (2005), o processo Gas Metal Arc Welding (GMAW), além de poder ser executado de forma semiautomática ou automática, apresenta diversas vantagens em relação a outros processos de soldagem, especialmente quando se considera sua versatilidade operacional e produtividade.

Assim como o processo TIG, o GMAW permite a execução de soldas em todas as posições, garantindo flexibilidade operacional. Quando comparado ao processo com eletrodo revestido, apresenta maior taxa de deposição metálica, o que contribui para a redução do tempo total de soldagem. Em condições adequadas, o GMAW possibilita altas velocidades de soldagem, resultando em menor distorção das peças e melhor aproveitamento do material, já que não há perda de pontas como ocorre no eletrodo revestido (ESAB, 2005).

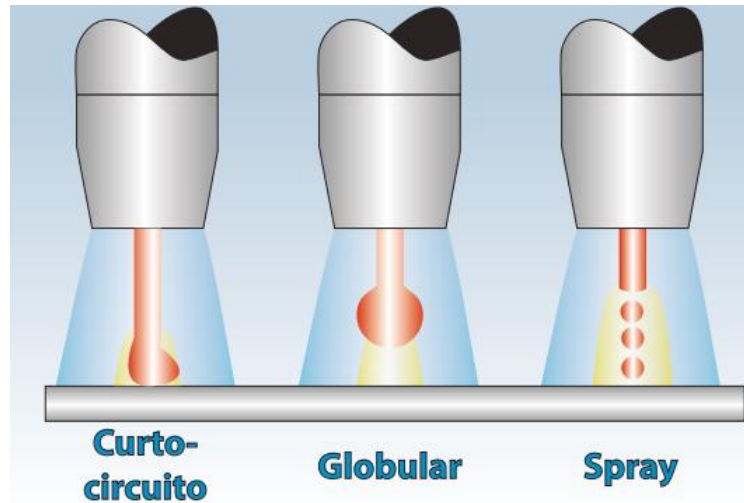
Além disso, o GMAW elimina a necessidade de remoção de escória e apresenta maior eficiência no preenchimento de aberturas e na realização de reparos, especialmente em geometrias complexas. Embora o processo de arco submerso possa alcançar taxas de deposição ainda maiores, o GMAW se destaca pela facilidade de automação, pela estabilidade do arco elétrico e pela boa qualidade do cordão de solda, o que o torna amplamente aplicado em diferentes setores industriais (ESAB, 2005).

Modenesi (2000) afirma que diversos fatores operacionais da soldagem são afetados pela maneira como o metal fundido é transferido do eletrodo para a poça de fusão. Isso inclui, em especial, a capacidade de soldar em diferentes posições, o formato do cordão, a quantidade de respingos, bem como a estabilidade e a eficiência do processo em si (Modenesi, 2000).

2.3. MODOS NATURAIS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

A transferência metálica da classe natural é dividida em dois grupos principais, definidos pelos mecanismos que a caracterizam. No primeiro grupo, denominado transferência por contato, a gota entra em contato com a poça de fusão antes de se destacar. Já no segundo grupo, denominado transferência por voo livre, o destacamento da gota ocorre antes de qualquer contato com a poça de fusão (Scotti; Ponomarev, 2008). A Figura 4 exemplifica os três maiores modos de transferência do GMAW, sendo o curto-circuito uma transferência por contato, e o globular e goticular por voo livre.

Figura 4 – Maiores modos de transferência GMAW

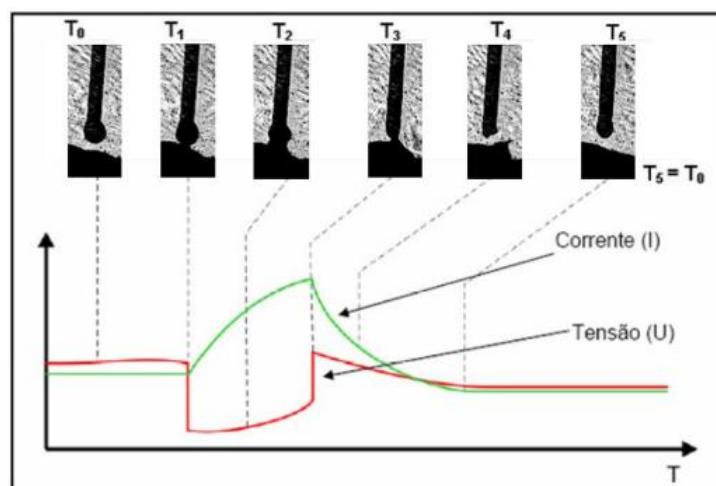


Fonte: Rodrigues (2022, p. 131).

Os métodos de transferência do metal dependem do ajuste de variáveis operacionais, incluindo corrente de soldagem, tensão de arco, polaridade da corrente, diâmetro e composição do eletrodo, composição do gás de proteção e comprimento energizado do arame (stickout), além da interação entre as forças físicas que regem o processo (Aures, 2013).

A **transferência por curto-circuito** ocorre a partir da gota de metal líquido no ponto do eletrodo que atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando curto-circuito ao entrar em contato com a peça (Aures, 2013). Em geral, essa transferência é realizada em correntes e tensões baixas de soldagem, além de no oscilograma ser possível notar o momento que a gota toca a poça, como pode-se ver na Figura 5 (Aures, 2013).

Figura 5 – Oscilograma da transferência por curto-circuito



Fonte: Gomes (2013) apud Aures (2013, p. 13).

A transferência por curto-circuito é de natureza aleatória, caracterizada pelo tempo de arco aberto, a variabilidade da duração do curto-circuito e nas formas irregulares das curvas de tensão e corrente (Scotti; Ponomarev, 2008). A baixa transferência de calor na soldagem por curto-circuito, devido aos baixos valores de corrente e tensão e à extinção parcial do arco, torna esse processo ideal para chapas finas e soldagens fora da posição plana (Scotti; Ponomarev, 2008).

Na **transferência globular**, a gota se forma na extremidade do eletrodo com diâmetro superior ao do arame, ocorrendo em faixas intermediárias de corrente e tensão, situando-se entre os modos de curto-circuito e goticular. O destacamento das gotas é promovido principalmente pela força gravitacional, já que a força eletromagnética (pinch) ainda é insuficiente para romper a tensão superficial. Como resultado, o desprendimento ocorre de forma irregular e assimétrica, causando trajetórias instáveis e alta geração de respingos. Por isso, esse modo é indicado apenas para a posição plana, devido à baixa estabilidade do arco (Brandi et al., 2004; Modenesi, 2000).

Já na **transferência goticular**, ocorre em altas densidades de corrente de soldagem, provocando a formação de uma gota com diâmetro inferior ao do eletrodo. O material se desloca por meio do arco, sendo transferido em gotículas finas para a poça de fusão. Devido à presença de uma quantidade significativa de energia térmica nessa transferência, apresenta uma elevada taxa de penetração, tornando-se apropriada para chapas mais espessas (Rodrigues, 2022).

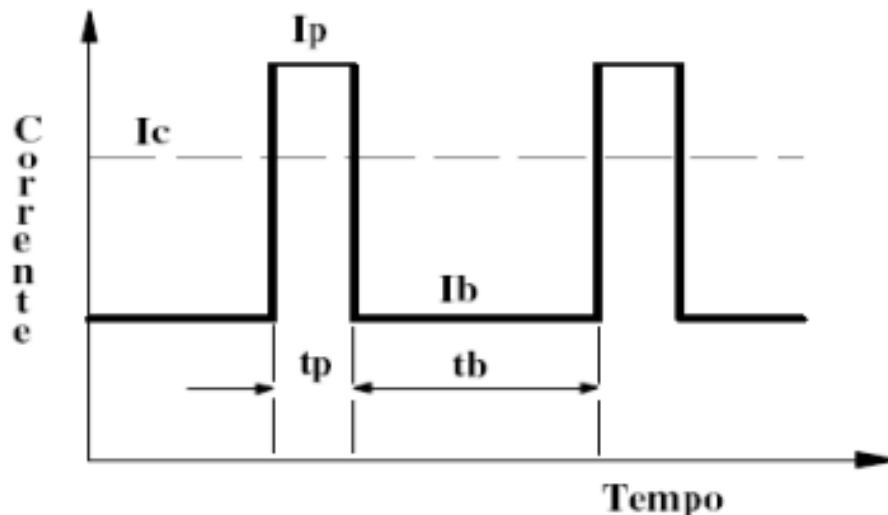
2.4. TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS CONTROLADAS

Os modos naturais de transferência metálica apresentam limitações para atender demandas específicas, como a soldagem de chapas finas ou fora da posição plana com baixa incidência de respingos. Essas necessidades, presentes desde o início do processo GMAW, foram atendidas apenas com o desenvolvimento de equipamentos modernos, capazes de controlar a transferência metálica. Assim, surgiram os modos controlados de transferência, que consistem na adaptação dos modos naturais de forma proposital, por meio da programação ou autorregulação dos parâmetros operacionais (Scotti; Ponomarev, 2008).

2.4.1. Transferência por arco pulsado

Esse tipo de transferência por arco pulsado acontece devido a variação dos níveis de corrente, alternando entre períodos de baixa energia (corrente de base) com períodos de alta energia (corrente de pico), como apresentado na Figura 6. Essa técnica oferece vantagens, como ser utilizada em todas as posições de soldagem, já que pode operar com valores de corrente inferior e atribui menos energia ao processo como um todo (Brandi *et al.*, 2004).

Figura 6 – Princípio da transferência pulsada: I_p (corrente de pico), I_b (corrente de base), T_p (tempo de pico) e T_b (tempo de base)



Fonte: Modenesi (2004, p. 240).

Para obter um controle do tamanho da gota, uma deposição de material eficiente e um cordão de solda uniforme, é essencial selecionar os parâmetros do processo com precisão. São esses, corrente de base, corrente de pulso, tempo de base, tempo de pulso e velocidade do arame. A determinação desses parâmetros é necessária para o desenvolvimento de adaptações do processo pulsado convencional, com possíveis melhorias (Brandi *et al.*, 2004).

2.4.2. Duplamente pulsado

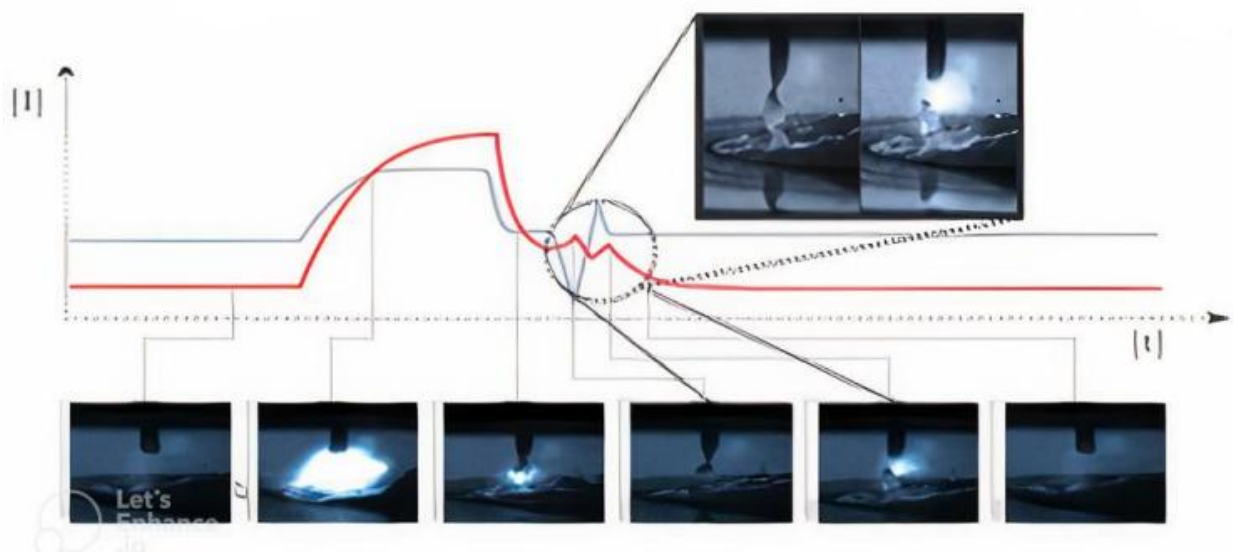
O processo GMAW com pulsação térmica, também conhecido como GMAW duplamente pulsado, é uma técnica de soldagem que modula simultaneamente a

2.4.3. Pulsed Multi Control (PMC)

Desenvolvido pela empresa Fronius, o Pulsed Multi Control (PMC) é uma variação avançada do processo GMAW pulsado, projetada para oferecer maior controle sobre o destacamento da gota metálica e, conseqüentemente, melhor estabilidade do arco elétrico. No processo pulsado convencional, o ciclo de soldagem é composto por períodos alternados de corrente de base e corrente de pico. Durante a fase de base, o arco permanece apenas aberto, aquecendo o eletrodo sem formação de gota. À medida que a corrente aumenta, ocorre a nucleação da gota na extremidade do arame, que cresce até atingir a corrente de pico, momento em que se inicia o processo de destacamento.

A Figura 8 compara o comportamento do arco elétrico e da transferência metálica nos processos pulsado convencional e PMC. A linha vermelha representa a forma de onda de corrente do pulsado convencional, enquanto a linha azul corresponde ao PMC, evidenciando uma variação de corrente mais controlada e sincronizada. No modo convencional, o destacamento da gota ocorre de forma irregular e sem correlação direta com o pico de corrente, o que resulta em instabilidade do arco e maior formação de respingos. Já no PMC, observa-se que o pico de corrente coincide com o momento de destacamento da gota, promovendo uma transferência metálica precisa, estável e previsível.

Figura 8 – Formação e destacamento de gota com uso do processo PMC



Fonte: Fiedler, Plozner, Rutzinger e Scherleitner (2016) apud Arbex (2022, p. 17).

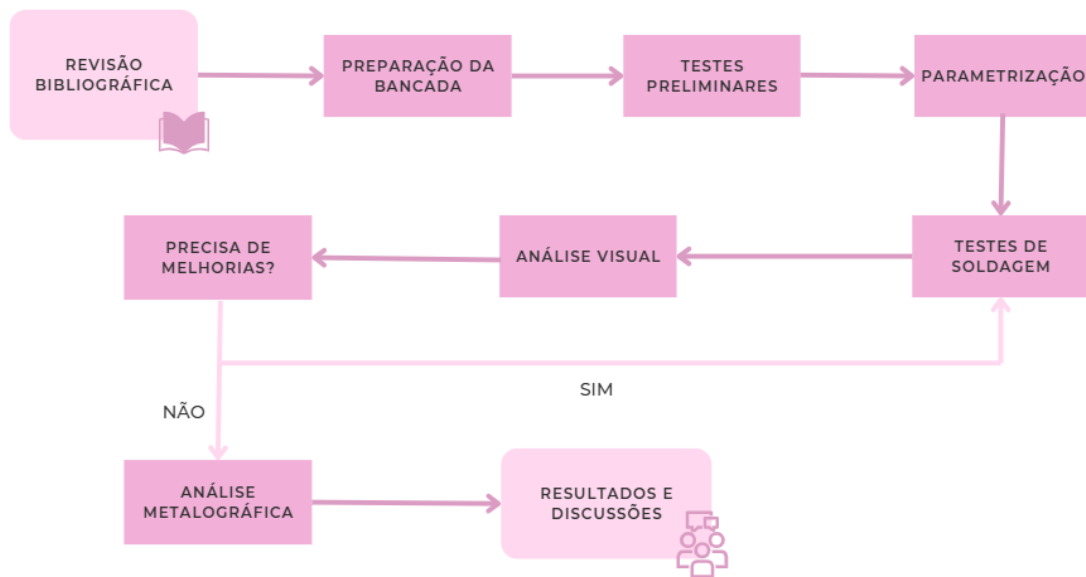
Nas imagens da figura, nota-se que, enquanto o processo convencional apresenta gotas formadas e destacadas de maneira aleatória, o PMC utiliza curtos-circuitos controlados para comandar o momento exato de ruptura. Essa estratégia permite que a fonte de soldagem detecte continuamente a posição da ponta do arame e ajuste automaticamente a corrente e a tensão em tempo real, assegurando o destacamento sincronizado da gota e reduzindo significativamente a geração de respingos (Arbex, 2022).

Essa atuação dinâmica é o principal diferencial do PMC em relação ao modo pulsado convencional. Ao incorporar curtos-circuitos controlados durante o ciclo de pulso, o processo consegue forçar o destacamento da gota no instante ideal, garantindo transferência metálica uniforme, melhor controle térmico e cordões de solda mais regulares, mesmo sob altas velocidades de soldagem. Como resultado, o PMC combina baixo aporte térmico, alta previsibilidade da transferência metálica e excelente estabilidade do arco, características que o tornam uma das tecnologias mais eficientes entre os processos pulsados modernos (Arbex, 2022; Fronius, 2024).

3. METODOLOGIA

Com base nos conceitos apresentados, este capítulo abordará a estrutura de análise da problemática da pulsação térmica, detalhando o caminho seguido para alcançar os objetivos específicos. A Figura 9 apresenta um fluxograma que ilustra os principais passos necessários para atingir tais objetivos.

Figura 9 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autora (2024).

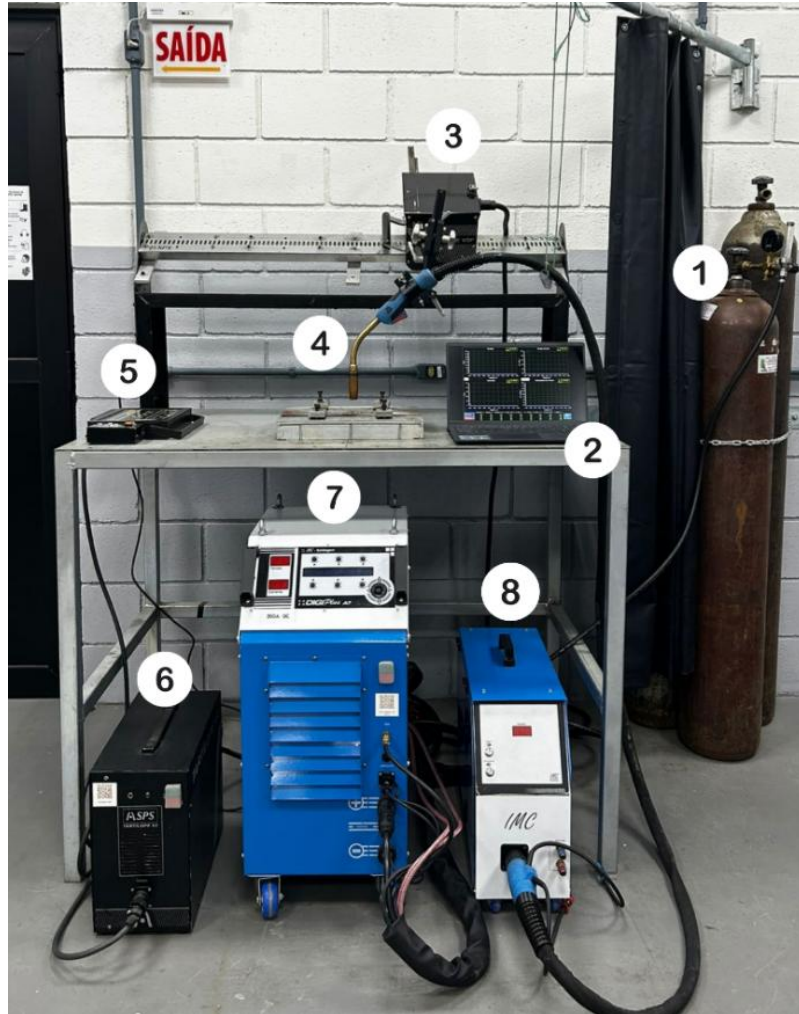
3.1 BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios foi montada no LTS, localizado no CTJ da UFSC, empregando os equipamentos do laboratório utilizados na execução dos ensaios. A Figura 10 apresenta os equipamentos utilizados nos ensaios, acompanhados de suas respectivas descrições:

- 1) Gás de proteção - mistura de Ar + 8% de CO₂;
- 2) Sistema de aquisição de dados – SAP V4;
- 3) Carro do sistema de deslocamento de tocha – Tartílope V2F;
- 4) Tocha de soldagem - GMAW
- 5) Teclado de comando – Tartílope V2F;

- 6) CPU – Tartílope V2F;
- 7) Fonte de soldagem – DigiplusA7 350DC;
- 8) Cabeçote (tracionador de arame).

Figura 10 – Bancada de ensaios de soldagem



Fonte: Autora (2025).

Configurou-se a fonte de soldagem no modo de corrente pulsada, com ajustes específicos de corrente de pulso, corrente de base, tempo de pulso, tempo de base e velocidade de alimentação do arame. A alimentação foi realizada por meio de tracionadores, assegurando o avanço estável do material pela tocha. O deslocamento foi controlado pelo sistema de deslocamento de tocha Tartílope V2F, que possibilita ajustes precisos na posição e na velocidade de movimentação da tocha.

3.3.1 Materiais e corpos de prova

Nos ensaios, utilizaram-se chapas de aço SAE 1020 com 3 mm de espessura, escolhidas em razão de sua ampla aplicação na indústria. Como material de adição, adotou-se o arame ER70S-6, de 1,0 mm de diâmetro.

O processo foi conduzido com gás de proteção composto por argônio e 8% de dióxido de carbono (CO₂), na vazão de 14,5 L/min. Todos os ensaios foram feitos na posição plana de soldagem e os insumos empregados nesse trabalho foram fornecidos pelo LTS.

3.2 ENSAIOS PRELIMINARES

Inicialmente, foram realizados ensaios preliminares com o objetivo de definir os parâmetros mais adequados para a execução do método de soldagem proposto. Nessa etapa, as variáveis de operação foram ajustadas conforme o comportamento do arco elétrico, observando-se aspectos como estabilidade, comprimento do arco elétrico e formação do cordão de solda.

Tabela 1 – Parâmetros na etapa de parametrização

| Variáveis | Condição inicial |
|--|---------------------------------------|
| Velocidade de soldagem (VT) | 25 cm/min |
| Processo sinérgico da fonte | Carbono C5 1.0 (corrente média 100 A) |
| Parâmetro altura de arco "a" da fonte | 8 |
| Vazão de gás de proteção | 14,5 L/min |
| Diâmetro do arame | 1,0 mm |
| Distância entre o bico de contato e o metal de base (DBCP) | 15mm |
| Tempo de pulso no período de base térmica | 0,7 s |

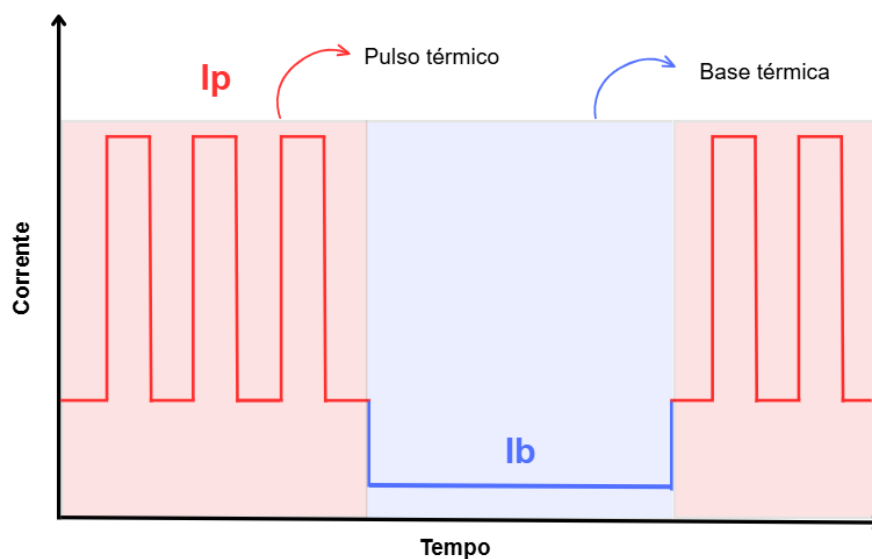
Fonte: Autora (2025).

Buscou-se estabelecer variáveis que não fossem excessivamente elevados, de modo a evitar respingos, porosidades ou queima do material, mas que, ao mesmo tempo, assegurassem a formação de um cordão contínuo, uniforme e regular. Durante

os ensaios, deu-se ênfase especial à altura do arco e à sua relação com os ajustes das variáveis de soldagem.

Nessa etapa, também foi definido o comportamento desejado para cada período do ciclo de pulsação térmica. O período de alta energia, ou pulso térmico, teve como objetivo promover a fusão e a transferência efetiva do metal de adição. Já o período de baixa energia, ou base térmica, foi destinado a manter o arco aberto com o menor aporte térmico possível, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema simplificado do ciclo de pulsação térmica adotado no trabalho



Fonte: Autora (2025).

Ressalta-se que, neste trabalho, não se buscou operar com o modo de transferência por curto-circuito durante os períodos de base térmica, ainda que existam processos pulsados semelhantes, como o PMC, nos quais essa condição é utilizada de forma controlada para forçar o destacamento da gota. O foco, portanto, foi analisar o limite inferior de corrente da base térmica capaz de sustentar o arco de forma estável, sem interrupções, a fim de reduzir o aporte térmico e compreender seu impacto sobre a morfologia e a regularidade dos cordões de solda.

Esses ensaios preliminares tiveram caráter exploratório e qualitativo, permitindo delimitar uma faixa operacional inicial segura, das variáveis citadas anteriormente na Tabela 1, para a continuidade do estudo. Com base nessas observações, estabeleceram-se variáveis e referência que serviram como ponto de partida para a etapa seguinte de parametrização.

3.3 PARAMETRIZAÇÃO E ENSAIOS DE SOLDAGEM

A etapa de parametrização consistiu na definição e no controle sistemático das variáveis de soldagem, visando assegurar a reprodutibilidade dos ensaios e permitir a análise da influência individual de cada variável sobre as características do cordão produzido. A metodologia adotada fundamentou-se na variação isolada de cada variável, mantendo os demais constantes. Os intervalos de variação considerados nos ensaios durante toda a etapa de parametrização estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis de soldagem na etapa de parametrização

| Variável de soldagem | Intervalo ensaiado |
|--|--------------------|
| Corrente constante no período de baixa energia (I _b) | 5 – 30 A |
| Velocidade de arame (V _a) | 0,5 – 1,0 m/min |
| Tempo de pulso (t _p) | 0,2 - 0,5 s |

Fonte: Autora (2025).

Com base nesses ajustes, foi definida uma parametrização considerada adequada aos objetivos do estudo, a partir da qual se conduziram os ensaios comparativos. Esses ensaios foram realizados sob condições de correntes médias aproximadamente equivalentes, permitindo avaliar o desempenho entre três configurações distintas: o processo GMAW em modo curto-circuito convencional, o GMAW pulsado padrão e a técnica proposta neste trabalho.

Durante esses ensaios, também foi determinada a taxa de deposição correspondente a cada tipo de transferência metálica, calculada a partir da velocidade de alimentação do arame. Os resultados comparativos dessa análise são apresentados e discutidos no capítulo seguinte. As condições completas dos ensaios encontram-se anexadas no Apêndice A.

3.4 ANÁLISE VISUAL E METALOGRAFICA

A análise visual dos cordões de solda foi realizada ao longo dos ensaios, com o objetivo de verificar a formação de cordões contínuos, que indiquem estabilidade do processo. Foram observadas características como uniformidade, aspecto escamado

e baixa incidência de respingos. A evolução visual dos cordões será apresentada e discutida no capítulo seguinte.

A análise metalográfica foi realizada a partir de amostras transversais retiradas dos três cordões de solda depositados lado a lado em uma mesma chapa. O corpo de prova foi seccionado em amostras de 10 mm, extraídas da região central de cada cordão, respeitando-se uma distância de 20 mm em relação às bordas laterais.

As amostras foram embutidas em resina para posterior preparação metalográfica. Em seguida, procedeu-se com o processo de lixamento com lixas de gramatura de 80 até 600, garantindo a preparação adequada da superfície.

Após essa etapa, realizou-se o ataque químico por imersão em solução de Nital a 4% durante 15 segundos, com o objetivo de revelar as macrorregiões da junta soldada. As imagens foram obtidas com o estereoscópio DIGILAB DI-152T e posteriormente analisadas e dimensionadas por meio do software ImageJ.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Este capítulo apresenta e discute os resultados dos ensaios de soldagem realizados. Inicialmente, são descritos os ensaios que levaram à definição da parametrização final, com ênfase nos efeitos dos ajustes das variáveis de soldagem e na análise do oscilograma correspondente.

Num segundo momento, são expostos os resultados comparativos entre a parametrização proposta e os métodos tradicionais de soldagem GMAW, avaliando aspectos como estabilidade do arco, formação do cordão, aporte térmico e taxa de fusão. Além disso, são apresentados os resultados da análise metalográfica, que complementam a avaliação do desempenho dos diferentes processos.

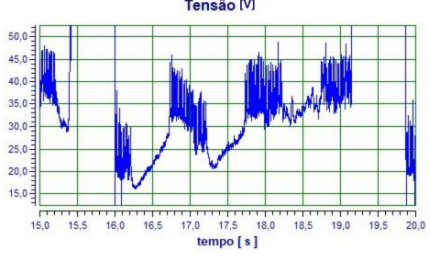
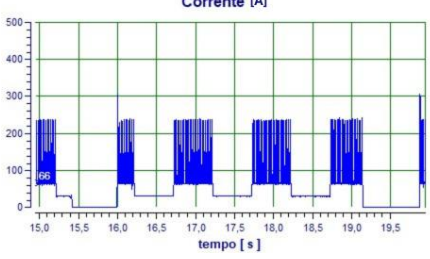
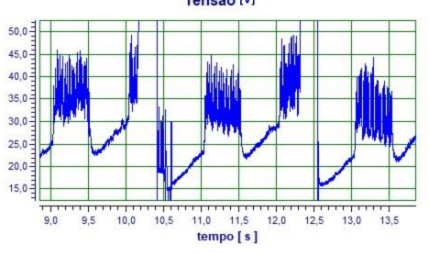
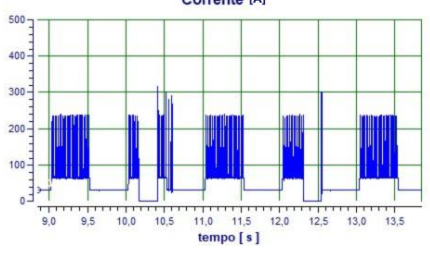
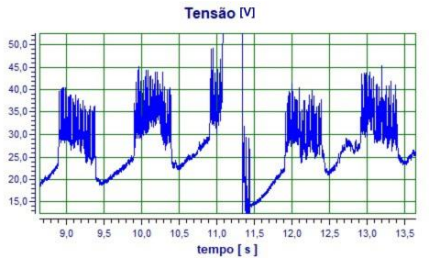
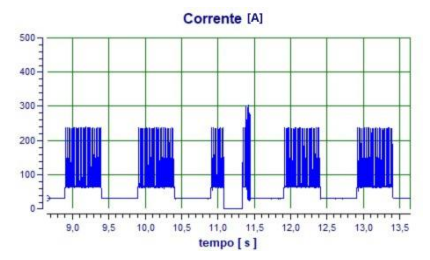
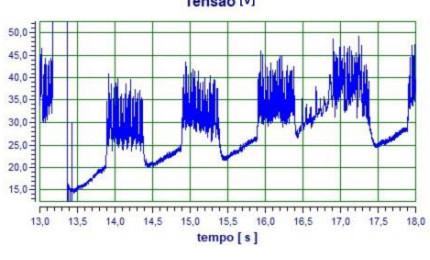
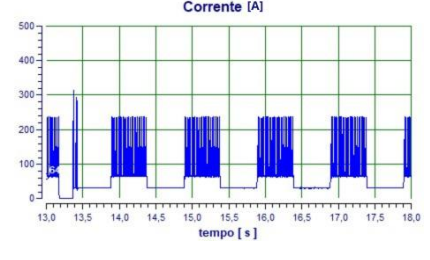
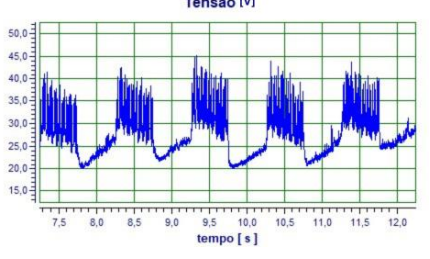
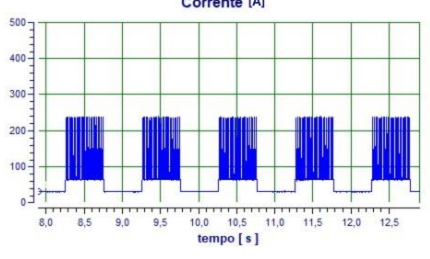
4.1.1 Efeito Velocidade de alimentação do arame (V_a)

A velocidade de alimentação do arame é uma das variáveis mais importantes no processo de soldagem GMAW, pois está diretamente relacionada à taxa de deposição de material e à corrente de soldagem resultante. O ajuste desta variável altera também o comprimento do arco e, conseqüentemente, a tensão de arco, influenciando a estabilidade do processo, a penetração e a formação do cordão, além da ocorrência de respingos.

Nos ensaios realizados, foram definidos diferentes valores de velocidade de arame, na base térmica, com o objetivo de observar o comportamento do arco e identificar a faixa de operação que proporciona melhor estabilidade e qualidade do cordão. O Quadro 2 apresenta os valores adotados e suas respectivas condições experimentais.

No primeiro ensaio, observou-se que a velocidade de alimentação do arame de 0,5 m/min mostrou-se insuficiente para a corrente aplicada de 30 A no período de baixa energia. Essa condição favoreceu o acúmulo de grandes gotas na extremidade do eletrodo, nos períodos de pulso, e aumentou o risco de fusão do bico de contato, comprometendo a estabilidade do arco e a segurança do processo. Como se pode observar no Quadro 2, os oscilogramas de tensão e corrente evidenciam variações abruptas na tensão de arco e períodos intermitentes de curto-circuito.

Quadro 2 – Variação de V_a na base térmica em ensaios de soldagem, com objetivo de analisar a estabilidade do arco elétrico e da corrente de soldagem

| Nº ensaio | V_a [m/min] | Oscilograma Tensão | Oscilograma Corrente |
|-----------|---------------|---|--|
| 1 | 0,5 |  |  |
| 2 | 0,7 |  |  |
| 3 | 0,8 |  |  |
| 4 | 0,9 |  |  |
| 5 | 1,0 |  |  |

Fonte: Autora (2025).

Diante dessa constatação, a velocidade foi aumentada gradualmente, variando de 0,5 a 1,0 m/min, com os demais parâmetros mantidos constantes. A análise dos oscilogramas revelou que, nas menores velocidades, a tensão apresentou comportamento instável, com valores elevados e flutuações significativas. Com o aumento gradual da velocidade de arame, verificaram-se períodos mais frequentes de estabilidade na transferência metálica e diminuição de oscilações abruptas da tensão de arco e ocorrências de curtos-circuitos.

No ensaio número 5, correspondente à velocidade de alimentação do arame de 1,0 m/min, constatou-se maior estabilidade do arco elétrico, evidenciada pela forma de onda da corrente e da tensão mais uniforme e com menor amplitude de oscilações nos oscilogramas. Essa regularidade indica que o processo manteve um arco estável e contínuo ao longo do tempo, sem interrupções perceptíveis ou flutuações abruptas de energia. Além disso, observou-se formação de cordões visualmente mais uniformes, com molhabilidade e largura constantes, o que reforça a condição de soldagem mais controlada e reprodutível. Dessa forma, o valor de V_a igual a 1,0 m/min foi adotado como referência para a continuidade dos ensaios.

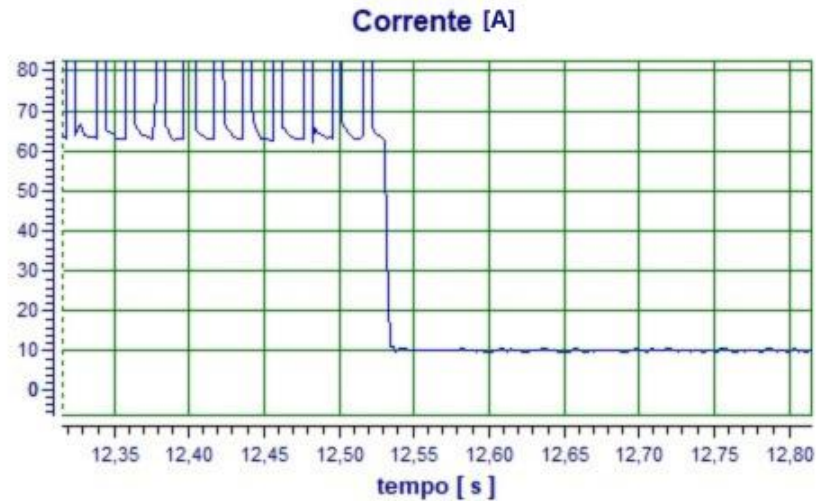
4.1.2 Efeitos dos valores de corrente do período de base térmica (I_b)

Partindo da hipótese de que seria possível reduzir a corrente média de soldagem sem comprometer a estabilidade do processo, esta etapa teve como objetivo identificar o limite mínimo de I_b antes do apagamento do arco. Para isso, a corrente de pulso térmica foi mantida constante, enquanto a corrente do período de base térmica foi progressivamente reduzida, iniciando em 30 A e diminuindo em intervalos de 5 A, até que se observasse o início da instabilidade. Cada ajuste foi acompanhado pela análise dos oscilogramas e pela observação do comportamento do arco elétrico durante os ensaios.

Observou-se que, embora a tensão apresentasse momentos de instabilidade, o processo manteve-se globalmente estável, indicando condições viáveis de soldagem mesmo em níveis reduzidos de corrente, como I_b igual a 10 A e 15 A, valores empregados nos ensaios 9 e 8, respectivamente. A investigação concentrou-se em identificar um regime de menor aporte térmico, preservando a estabilidade do arco e a continuidade da transferência metálica. A Figura 12 apresenta um trecho representativo do ensaio 9, com ampliação do sinal de corrente no período de base

térmica, evidenciando que, com corrente na fase de base térmica de apenas 10 A, o arco permaneceu aceso e estável, sem ocorrência de curtos-circuitos.

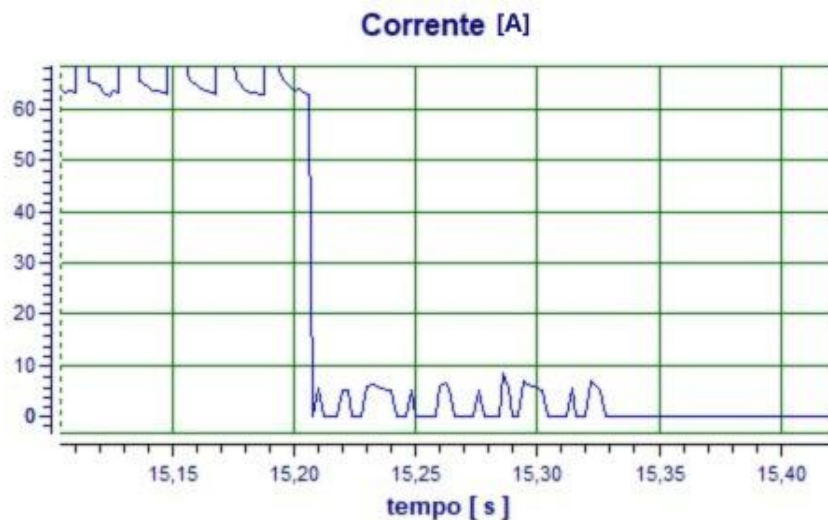
Figura 12 – Oscilograma da corrente I_b obtido no ensaio 9, para a análise da estabilidade do arco elétrico durante o período de base térmica



Fonte: Autora (2025).

Dando continuidade aos ensaios, buscou-se reduzir ainda mais a corrente de base, a fim de identificar o limite de estabilidade do arco elétrico. Assim, o ensaio 10 foi conduzido com corrente I_b igual a 5 A, representando a condição de menor aporte térmico testada.

Figura 13 – Oscilograma da corrente I_b obtido no ensaio 10, para a análise da estabilidade do arco elétrico durante o período de base térmica



Fonte: Autora (2025).

Nessa condição, verificaram-se instabilidades na tensão de arco e a ocorrência de curtos-circuitos, resultando no apagamento intermitente do arco, como mostrado na Figura 13. A figura apresenta um trecho ampliado do ensaio, destacando os momentos em que ocorrem os curtos-circuitos, o que caracteriza o limite operacional para a redução da corrente no período de baixa energia.

4.1.3 Refinamento dos parâmetros de soldagem

Após a identificação do limite de corrente de base em que o arco apresentava instabilidade, realizou-se uma etapa de refinamento das variáveis, com o objetivo de eliminar os curtos-circuitos residuais e otimizar a estabilidade do processo.

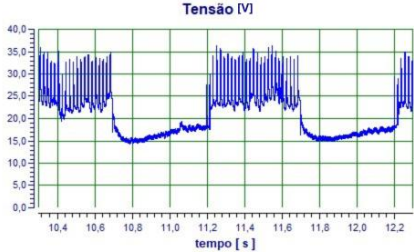
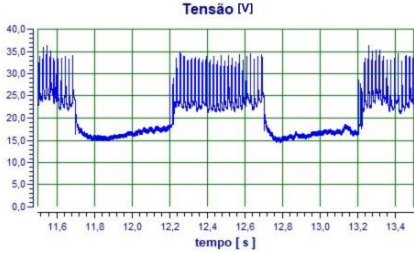
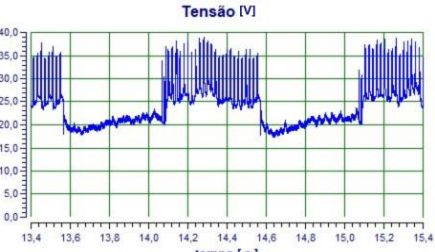
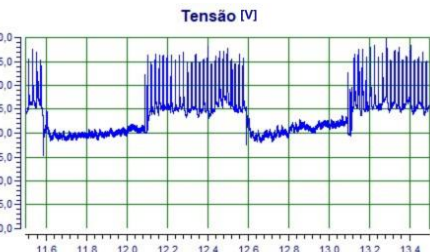
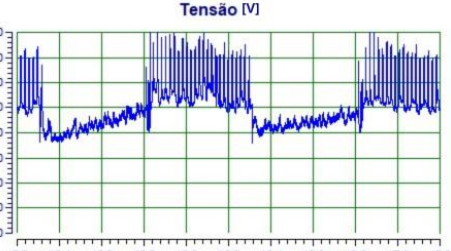
A corrente I_b foi aumentada gradualmente, em incrementos de 1 A a partir de 5 A, até que o arco permanecesse aceso de forma contínua, sem ocorrência de curtos-circuitos. Essa avaliação permitiu determinar com precisão o valor mínimo de I_b capaz de garantir a estabilidade do processo nas condições estabelecidas, eliminando os curtos-circuitos e reduzindo as oscilações abruptas do arco elétrico.

Dando continuidade à sequência experimental, foram realizados os ensaios 11 e 12, com correntes I_b de 6 A e 7 A, respectivamente. No ensaio 11 ainda foram observados curtos-circuitos ocasionais, indicando que o arco não se mantinha estável em toda a duração do ciclo térmico. Já no ensaio 12, verificou-se que a corrente de base de 7 A foi suficiente para manter o arco aceso de forma contínua durante todo o ciclo de pulsação, sem ocorrência de curtos-circuitos.

Para confirmar esse resultado, realizaram-se cinco ensaios adicionais com I_b igual a 5 A, variando-se V_a entre 1,0 e 0,5 m/min. Em todas essas condições, ainda ocorreram períodos de curto-circuito, o que confirmou que a instabilidade do processo estava associada à insuficiência de corrente. Assim, definiu-se a corrente de base de 7 A como o valor mínimo necessário para garantir a estabilidade do arco.

Com esse valor definido, passou-se à etapa de ajuste da tensão de arco durante o período de baixa energia, buscando melhor controle do comprimento do arco e maior estabilidade do processo. O Quadro 3 apresenta os ensaios em que se variou a V_a , mantendo I_b fixo em 7 A, com foco na análise do comportamento da tensão de arco, uma vez que a corrente se manteve estável em todos os casos.

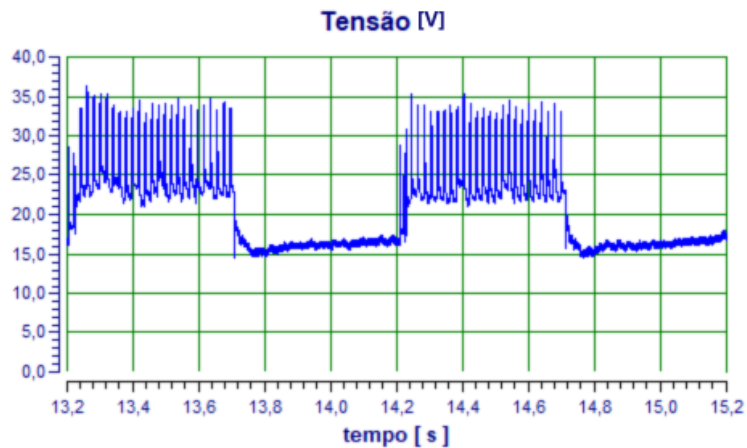
Quadro 3 – Variação da V_a com corrente de base térmica fixa em 7 A, analisando o comportamento da tensão de arco

| Nº ensaio | V_a [m/min] | Oscilograma da Tensão |
|-----------|---------------|--|
| 18 | 0,9 |  |
| 19 | 0,8 |  |
| 20 | 0,7 |  |
| 21 | 0,6 |  |
| 22 | 0,5 |  |

Fonte: Autora (2025).

A análise dos registros de oscilogramas demonstrou que variações na velocidade de alimentação do arame impactam de forma significativa a estabilidade do arco e os níveis de tensão. Verificou-se que a redução da velocidade de arame provoca o aumento da tensão e a perda de estabilidade no período de baixa energia. Dessa forma, estabeleceu-se a velocidade de 1,0 m/min como a mais adequada, garantindo melhor equilíbrio entre tensão e estabilidade, com valores médios de aproximadamente 15 V na fase de baixa, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Oscilograma da tensão obtido no ensaio 12, para analisar a estabilidade da tensão de arco durante o período de base térmica



Fonte: Autora (2025).

Observa-se ainda que, durante o período de base térmica, a tensão apresenta um comportamento característico de elevação e posterior estabilização. Esse aumento pode ser atribuído à redução da corrente de soldagem, que diminui a taxa de fusão do arame e, conseqüentemente, o comprimento do arco tende a se elevar até alcançar um novo ponto de equilíbrio. Esse fenômeno é típico de períodos de baixa energia e reflete o mecanismo de autorregulação do processo, no qual a tensão se ajusta para manter o arco aceso de forma estável.

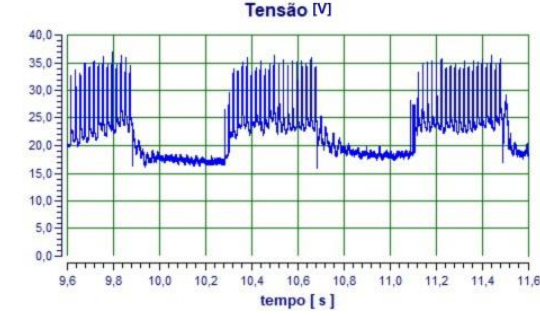
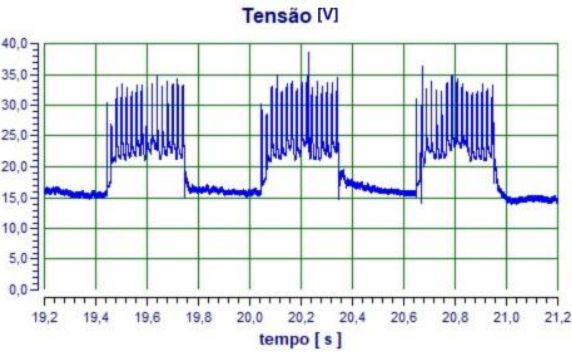
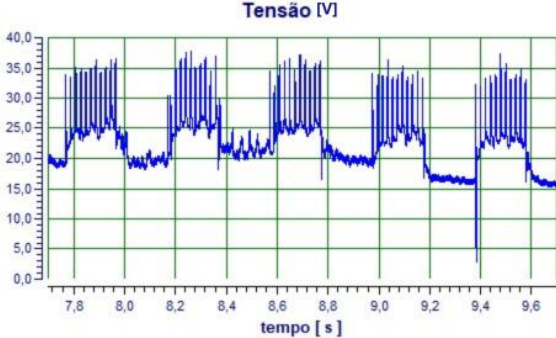
4.1.4 Variação do tempo de pulso

Até este ponto, os ensaios foram conduzidos tempo de pulso de 5 segundos, adotada como condição padrão nas etapas anteriores de parametrização. No entanto, considerando que o tempo de pulso também é um fator que afeta o comportamento

térmico e a estabilidade do arco, foram realizados novos testes com o objetivo de avaliar seu impacto sobre o processo de soldagem.

O tempo de pulso foi gradualmente reduzido de 0,5 s para 0,2 s, em intervalos de 0,1 s, mantendo-se constantes as demais variáveis de soldagem. Essa abordagem permitiu isolar o efeito dessa variável, possibilitando avaliar de forma direta como a redução do intervalo entre pulsos influencia a tensão e a estabilidade do arco, conforme evidenciado nos oscilogramas apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Variação t_p nos ensaios de soldagem da base térmica

| N° ensaio | t_p [s] | Oscilograma da Tensão |
|-----------|-----------|--|
| 23 | 0,4 |  |
| 24 | 0,3 |  |
| 25 | 0,2 |  |

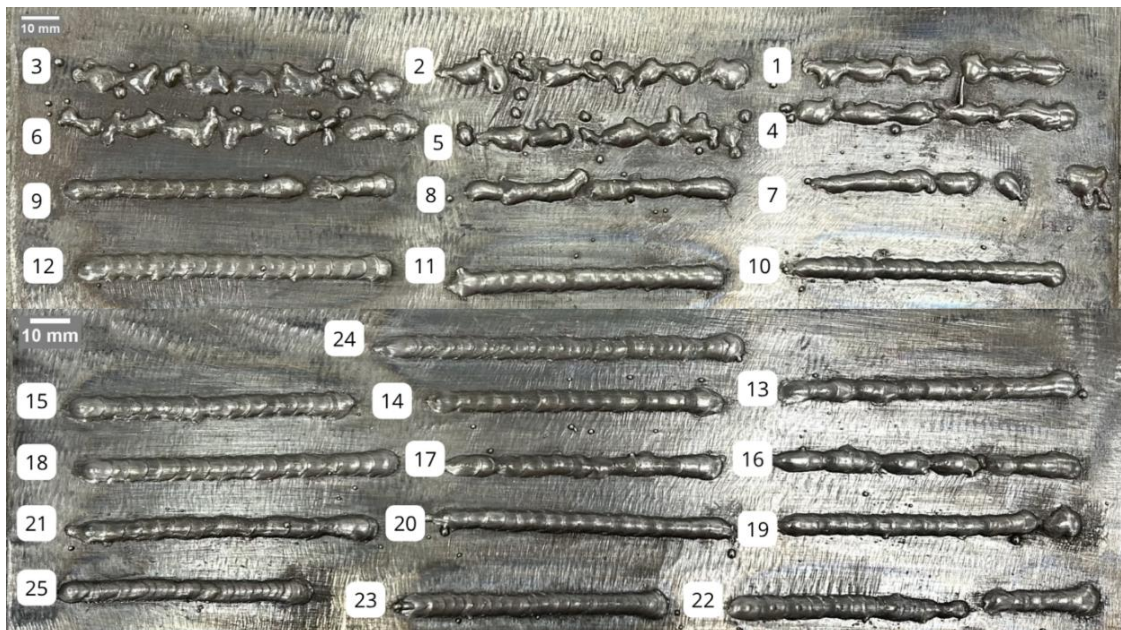
Fonte: Autora (2025).

Com base nesses resultados, definiu-se o ensaio 24 como a parametrização resultante deste trabalho, por representar o melhor equilíbrio entre estabilidade do arco, controle térmico e regularidade da tensão, concluindo, assim, a etapa de ajuste e otimização dos parâmetros de soldagem.

4.1.5 Análise visual dos cordões de solda obtidos

A Figura 15 apresenta uma visão geral da evolução dos ensaios realizados para a parametrização (1 a 25), evidenciando as modificações graduais nos parâmetros de soldagem e seus efeitos diretos sobre a formação e o aspecto dos cordões. Esse conjunto ilustra o processo de otimização conduzido ao longo do estudo, em que cada etapa experimental contribuiu para o aperfeiçoamento da parametrização final proposta.

Figura 15 – Cordões resultantes dos ensaios de parametrização



Fonte: Autora (2025).

A análise visual evidenciou uma evolução significativa na qualidade dos cordões ao longo dos ensaios realizados. As variações graduais nas variáveis de soldagem resultaram em melhorias perceptíveis na transferência metálica e na formação do cordão de solda. Nos testes iniciais, do 1 ao 8, verificaram-se

descontinuidade de falta de fusão, gotas de grandes dimensões e irregularidades na deposição.

Com o ajuste progressivo da parametrização, os cordões passaram a apresentar perfil mais estável, boa molhabilidade e continuidade adequada. Essa evolução demonstra o efeito direto do controle das variáveis de soldagem sobre a morfologia do cordão, confirmando a eficiência do método proposto na obtenção de resultados visualmente consistentes e tecnicamente satisfatórios.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA

Para a análise comparativa, foram realizados ensaios com três modos distintos de transferência metálica: GMAW em curto-circuito convencional, GMAW pulsado convencional e o método analisado neste trabalho. As condições operacionais utilizadas nos ensaios estão apresentadas na Tabela 3. Nos processos GMAW convencional e pulsado, aplicou-se o modo sinérgico, enquanto para o método proposto foi empregada a parametrização definida neste estudo.

Tabela 3 – Condições de ensaios realizados para análise comparativa

| Modo de transferência ensaiado | Gás de proteção | Im [A] | Vm [V] | Modo de operação |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| GMAW curto-circuito convencional | Ar + 25% de CO ₂ | 48 | 18,4 | Sinérgico |
| GMAW pulsado convencional | Ar + 8% de CO ₂ | 45 | 18,4 | Sinérgico |
| Método analisado neste trabalho | Ar + 8% de CO ₂ | 52 | 23 | Parametrizado |

Fonte: Autora (2025).

A Figura 16 apresenta uma visão geral dos três cordões de solda obtidos, permitindo analisar a regularidade e diferenças morfologias entre os processos. Todos os cordões foram realizados buscando o mesmo valor de corrente média, possibilitando uma avaliação comparativa direta entre os diferentes modos de transferência/técnica.

Figura 16 – Três modos distintos de transferência metálica: a) GMAW pulsado analisado no presente trabalho; b) GMAW pulsado convencional; c) GMAW curto-circuito convencional.



Fonte: Autora (2025).

Na Figura 17, que mostra um detalhe ampliado da região central dos cordões de solda, é possível visualizar com maior clareza as características superficiais e o padrão de deposição. O cordão obtido com a parametrização proposta apresentou um aspecto superficial escamado, com boa molhabilidade nas laterais e aparência regular e contínua, indicando equilíbrio entre aporte térmico e estabilidade do arco.

Figura 17 – Vista ampliada dos três modos de transferência metálica



Fonte: Autora (2025).

Esse padrão escamado é considerado característico de soldas estáveis, pois resulta da transferência uniforme das gotas de metal de adição, que se solidificam de forma sequencial e homogênea. Em contraste, o cordão produzido pelo processo pulsado convencional, embora tenha apresentado um acabamento superficial

consideravelmente melhor, apresentou-se mais elevado e estreito, evidenciando menor molhabilidade e um perfil de fusão mais concentrado.

O cordão obtido pelo processo GMAW em curto-circuito convencional apresentou maior irregularidade e presença de respingo. Apesar do acabamento menos uniforme, destacou-se pela boa molhabilidade, favorecendo maior espalhamento do metal fundido e uma zona de fusão mais ampla, embora com menor controle dimensional.

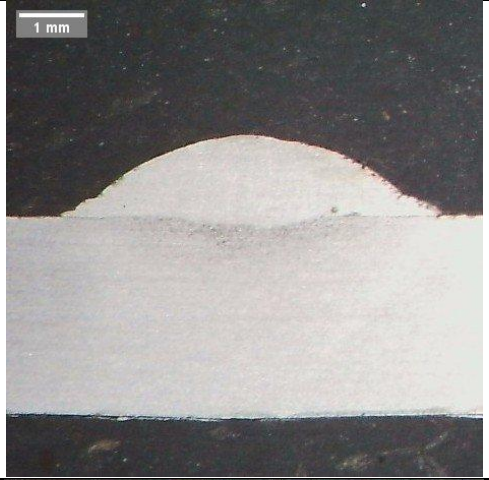
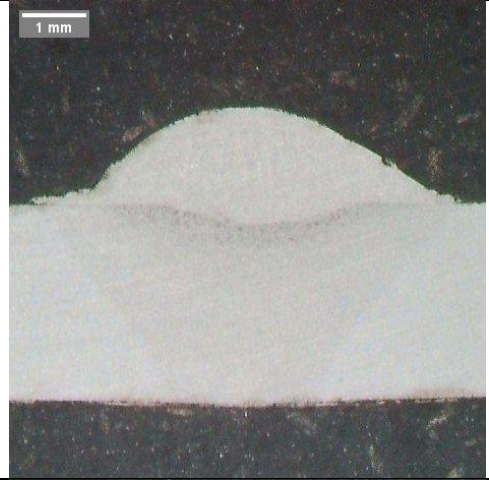
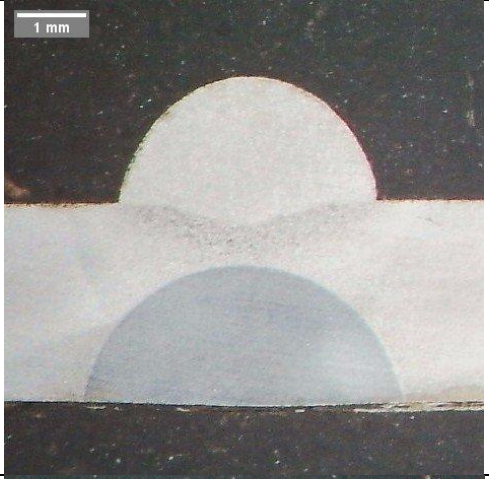
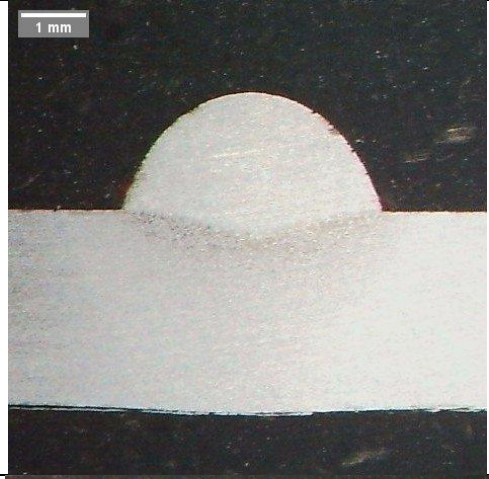
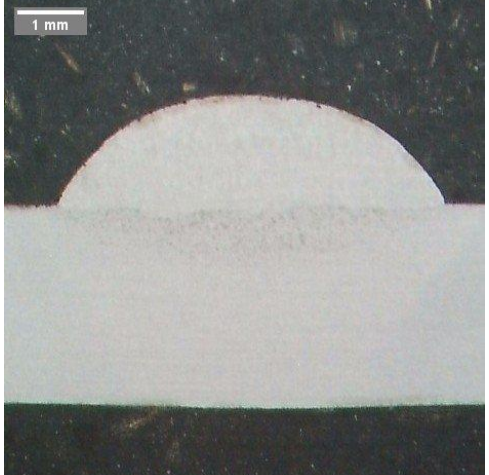
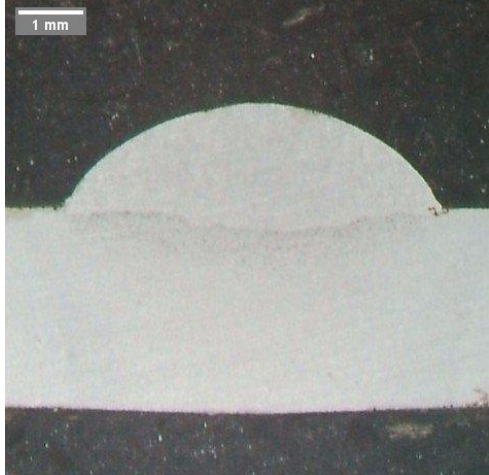
O Quadro 5 apresenta as micrografias da seção transversal dos cordões de solda correspondentes aos três métodos avaliados: GMAW curto-circuito convencional, GMAW pulsado convencional e o processo analisado neste trabalho. Para cada modo de transferência, foram analisadas duas regiões distintas do cordão, de modo a obter uma avaliação mais representativa das características das seções laterais das amostras.

Nas amostras obtidas pelo processo GMAW em modo curto-circuito convencional, verificou-se a formação de cordões com boa molhabilidade, caracterizados por um ângulo de aproximadamente 32° . Observou-se fusão lateral satisfatória, embora com variações na largura e na continuidade do cordão ao longo do percurso. No processo pulsado convencional, constatou-se maior concentração de material na região central e redução da molhabilidade, com ângulo em torno de 67° , indicando uma transição mais abrupta entre o metal de adição e o metal de base.

O método proposto neste estudo apresentou cordões com molhabilidade intermediária, ainda que inferior à obtida no modo curto-circuito, com ângulo próximo de 50° . A transição entre o metal de adição e o metal de base ocorreu de forma gradual, resultando em cordões homogêneos e distribuição uniforme do metal fundido, comportamento reproduzido de maneira consistente nas diferentes regiões analisadas.

Conforme descrito por Brandi, Mello e Wainer (2004), o ângulo de molhabilidade é um dos principais indicadores do comportamento do metal fundido durante a soldagem. Ângulos pequenos estão associados a boa fluidez do metal e adequada fusão lateral, o que favorece a formação de cordões planos. Já ângulos mais elevados indicam baixa molhabilidade, caracterizando cordões mais convexos e concentrados na região central, resultado de menor espalhamento do metal fundido sobre o metal de base.

Quadro 5 – Análise com estereoscópio das transferências metálicas ensaiadas

| Modo de transferência metálica | Seção 1 | Seção 2 |
|---|---|--|
| GMAW curto-circuito convencional |  |  |
| GMAW pulsado |  |  |
| GMAW com parametrização desenvolvida neste trabalho |  |  |

Fonte: Autora (2025).

Além disso, verificou-se uma maior taxa de fusão de material na soldagem com a parametrização proposta, indicando melhor eficiência de fusão do material de adição para mesmos valores de corrente média. Para confirmar essa diferença, foi realizado

um ensaio complementar para medir a velocidade de alimentação do arame com as mesmas variáveis aplicadas aos três métodos analisados. Os resultados estão apresentados na Tabela 4, permitindo comparar quantitativamente o comportamento de deposição entre as diferentes condições avaliadas.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4, observa-se que o método proposto apresentou o maior valor da razão $R = \frac{V_a}{I_m}$, indicando maior eficiência de fusão, ou seja, uma maior quantidade de material alimentado e fundido por unidade de corrente elétrica. A partir dessa relação, foi calculada a velocidade de alimentação normalizada ($V_{a,norm}$) o que permitiu comparar os três modos de transferência sob correntes médias equivalentes.

Tabela 4 – Valor de V_a nos diferentes modos de transferência metálica, considerando valores normalizados para comparação

| Modo de transferência ensaiado | V_a [m/min] | I_m [A] | $R=V_a/I_m$ [m.min-1/A] | V_a [m.min-1] (normalizada) |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---|---|
| GMAW curto-circuito convencional | 2,0 | 48 | 0,0416 | 1,99 |
| GMAW pulsado convencional | 1,9 | 45 | 0,0422 | 2,02 |
| Método analisado neste trabalho | 2,5 | 52 | 0,0480 | 2,30 |

Fonte: Autora (2025).

Verifica-se que o método proposto neste trabalho apresentou valor de $V_{a,norm}$ cerca de 15% superior ao modo curto-circuito e 14% maior que o pulsado, evidenciando melhor aproveitamento do calor disponível e maior eficiência de deposição do material de adição.

Os resultados qualitativos corroboram as análises macro e microscópicas, indicando que a parametrização proposta assegura regularidade na geometria dos cordões e adequada molhabilidade. Além disso, os resultados quantitativos evidenciam elevada eficiência na fusão metálica. Dessa forma, o método consolidou-se como uma alternativa viável e promissora para aplicações em setores de alta exigência, como a indústria ferroviária.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar e parametrizar o processo de soldagem GMAW com foco na redução da energia térmica, utilizando a variação pulsada da corrente como estratégia de controle. A proposta buscou desenvolver um procedimento eficiente e tecnicamente viável para aplicação na indústria ferroviária, setor em que a soldagem desempenha papel fundamental e a otimização dos processos representa um fator determinante de qualidade e produtividade.

Inicialmente, considerou-se a possibilidade de aplicação da parametrização desenvolvida no passe de raiz, etapa crítica do processo de soldagem devido à necessidade de uso de cobre-junta e à importância do controle do aporte térmico para evitar deformações e excessos de penetração. Para isso, realizaram-se ensaios sistemáticos com mudança das variáveis de soldagem, como corrente de soldagem, velocidade de arame e velocidade de soldagem, analisando-se seus efeitos por meio dos oscilogramas obtidos e da avaliação visual e macrográfica dos cordões de solda resultantes.

Os resultados evidenciaram que a parametrização proposta possibilitou a formação de cordões de solda com geometria uniforme, estabilidade do arco elétrico e características adequadas de molhabilidade e morfologia. Esses aspectos indicam que o controle dos parâmetros contribuiu para reduzir variações dimensionais e garantir consistência na transferência metálica.

Nos resultados obtidos, verificou-se um incremento na taxa de fusão do material de 15% quando comparado ao processo GMAW em curto-circuito convencional. Em relação ao método GMAW pulsado convencional, o aumento foi da ordem de 14%, evidenciando maior eficiência térmica e melhor aproveitamento da energia aplicada.

A análise dos oscilogramas confirmou a estabilidade do processo mesmo sob baixo aporte térmico, demonstrando controle eficaz da transferência metálica e da energia por ciclo. Esses resultados evidenciam que a técnica proposta é viável para aplicações industriais que demandam rigor no controle térmico e qualidade do cordão, como no setor ferroviário.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de análises complementares, incluindo ensaios mecânicos e metalográficos, bem como a aplicação da parametrização em chapas de maior espessura e em diferentes materiais de base e arames. Tais investigações poderão consolidar a aplicabilidade industrial do método e contribuir para o aprimoramento de processos de soldagem mais eficientes e sustentáveis.

- Aplicação do método parametrizado em passe de raiz:

Realizar soldagens completas utilizando a parametrização desenvolvida, avaliando a estabilidade do arco elétrico, a penetração da solda e a possibilidade de eliminar o uso do cobre-junta.

- Análises metalográficas e avaliação de porosidade:

Conduzir análises microestruturais detalhadas, identificando a morfologia dos grãos, a zona termicamente afetada e a presença de defeitos internos, como poros e trincas.

- Análise das propriedades mecânicas do cordão:

Executar ensaios de tração, dureza, correlacionando as propriedades mecânicas com os parâmetros de soldagem e o comportamento térmico do processo.

- Ensaios com diferentes materiais de base e arames de solda:

Avaliar o desempenho da parametrização em outras ligas metálicas, verificando sua aplicabilidade em diferentes combinações de metais e condições térmicas.

- Aplicação em chapas de maior espessura:

Testar o processo em chapas espessas, comuns no setor ferroviário, analisando o comportamento do arco elétrico, a penetração da solda e a formação do passe de raiz.

REFERÊNCIAS

ABIFER. Plano Nacional de Ferrovias: uma injeção de ânimo e de R\$ 100 bi no modal ferroviário. **Associação Brasileira da Indústria Ferroviária**, 10 abr. 2025. Disponível em: <https://abifer.org.br/en/plano-nacional-de-ferrovias-uma-injecao-de-animo-e-de-r-100-bi-no-modal-ferroviario/>. Acesso em: 6 set. 2025.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2001**: Structural Welding Code - Steel. 19. ed. Miami: AWS, 2001.

ARBEX, J. R. **Mapeamento de parâmetros de soldagem robotizada GMAW visando tempos de produção reduzidos para juntas do aço ASTM A572 G50**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS (ANTF). **Avanço expressivo do transporte de grãos**. Disponível em: <https://www.antf.org.br/releases/avanco-expressivo-do-transporte-de-graos/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS (ANTF). **Informações gerais**. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 02 nov. 2024.

AURES, J. E. V. **Avaliação de processos MIG/MAG derivativos utilizando-se simulador de soldagem de dutos por retificação**. 2013. Tese (Doutorado em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre as propriedades microestruturais e mecânicas da zona fundida**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H.; WAINER, E. **Soldagem – Processos e metalurgia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2004.

ELEKTRISKA SVETSNINGS-AKTIEBOLAGET - ESAB. 2005. **ESAB University: Apostilas**. Disponível em: <https://www.esab.com>. Acesso em: 02 nov. 2024.

GOMES, B. F. **Manufatura aditiva e caracterização de componentes da liga Al-4,4%Mg utilizando diferentes processos de deposição metálica - CMT, PMC e PMC-MIX**. 2018. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/12932>. Acesso em: 05 mai. 2024.

MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V. **Soldagem. Fundamentos e Tecnologia**. 3ª edição ed. [s.l.] UFMG, 2009.

MODENESI, P.J., **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**, Apostila Didática, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, 2000.

RODRIGUES, C. R; CERSOSIMO, A. G. **Soldagem na Indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Programa Petrobras de Editoriação de Livros Didáticos, 2022. Disponível em: http://fbts.org.br/PDF/Soldagem_na_industria_do_petroleo.pdf. Acesso em: 05 out. 2024.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2014.

SOBIERAJ, A.; WELCER, K.; SKRZYPEK, S.; KRAWCZYK, K.; KARCZMARZ, A. Control of mechanical properties of high-strength steels through optimized welding processes. **Bulletin of the Institute of Welding**, v. 67, n. 1, 2023. Disponível em:.. Acesso em: 10 nov. 2024.

TORRES, H. H. C. **Avaliação do passe de raiz em junta de chanfro estreito na soldagem orbital pelo processo GMAW CMT e convencional**. 2016. xiv, 110 f., il. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

APÊNDICE A – Condições dos ensaios de soldagem

Tabela A.1 – Condições dos ensaios de soldagem

| Ensaio (n°) | Vt (tartilope) [cmi] | Im total [A] | Va [m/min] | PS (sinérgico) | Im pulso [A] | a | lb base [A] | t [s] |
|-------------|----------------------|--------------|------------|----------------|--------------|----|-------------|-------|
| 1 | 25 | 65 | 0,5 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 30 | 0,5 |
| 2 | 25 | 65 | 0,7 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 30 | 0,5 |
| 3 | 25 | 65 | 0,8 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 30 | 0,5 |
| 4 | 25 | 65 | 0,9 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 30 | 0,5 |
| 5 | 25 | 65 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 30 | 0,5 |
| 6 | 25 | 62,5 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 25 | 0,5 |
| 7 | 25 | 60 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 20 | 0,5 |
| 8 | 25 | 57,5 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 15 | 0,5 |
| 9 | 25 | 55 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 10 | 0,5 |
| 10 | 25 | 52,5 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 5 | 0,5 |
| 11 | 25 | 53 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 6 | 0,5 |
| 12 | 25 | 53,5 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,5 |
| 13 | 25 | 52,5 | 0,9 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 5 | 0,5 |
| 14 | 25 | 52,5 | 0,8 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 5 | 0,5 |
| 15 | 25 | 52,5 | 0,7 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 5 | 0,5 |
| 16 | 25 | 52,5 | 0,6 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 5 | 0,5 |
| 17 | 25 | 52,5 | 0,5 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 5 | 0,5 |
| 18 | 25 | 53,5 | 0,9 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,5 |
| 19 | 25 | 53,5 | 0,8 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,5 |
| 20 | 25 | 53,5 | 0,7 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,5 |
| 21 | 25 | 53,5 | 0,6 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,5 |
| 22 | 25 | 53,5 | 0,5 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,5 |
| 23 | 25 | 53,5 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,4 |
| 24 | 25 | 53,5 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,3 |
| 25 | 25 | 53,5 | 1 | Carbono C5 1.0 | 100 | -8 | 7 | 0,2 |

Fonte: Autora (2025).