

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
BAHIA



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
Instituto Federal da Bahia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO PROFISSIONAL

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS MAGNÉTICAS NA
INSPEÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS OBTIDAS POR RSEW EM LIGAS DE AÇOS
DE ALTO DESEMPENHO.

IVISON SILVA PEREIRA

Salvador - BA

2024

IVISON SILVA PEREIRA

Avaliação da Técnica de Correntes Parasitas Magnéticas na Inspeção de Juntas Soldadas Obtidas por RSEW em Ligas de Aços de Alto Desempenho.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* – Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais (PPGEM) - do Instituto Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia dos Materiais.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Caracterização de Materiais e Integridade Estrutural

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria Cléa Soares de Albuquerque

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Coelho

Salvador - BA

2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

P436a Pereira, Ivison Silva

Avaliação da técnica de correntes parasitas magnéticas na inspeção de juntas soldadas obtidas por RSEW em ligas de aços de alto desempenho / Ivison Silva Pereira; orientadora Maria Cléa Soares de Albuquerque; coorientador Rodrigo Coelho -- Salvador, 2024.

95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Aço TRIP. 2. Aço IF. 3. Correntes parasitas magnéticas. 4. Soldagem por resistência por costura. I. Albuquerque, Maria Cléa Soares de, orient. II. Coelho, Rodrigo, coorient. III. TÍTULO.

CDU 691.714

**INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

“Avaliação da Técnica de Correntes Parasitas Magnéticas na Inspeção de Juntas Soldadas Obtidas por RSEW em Ligas de Aços de Alto Desempenho”

Iverson Silva Pereira

Produto (s) Gerado (s): **Produto, Processo ou Técnica**

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Cléa Soares de Albuquerque

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MARIA CLEA SOARES DE ALBUQUERQUE**
Data: 08/07/2024 21:41:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria Cléa Soares de Albuquerque
Orientadora - PPGEM/IFBA

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO SANTIAGO COELHO**
Data: 12/07/2024 16:46:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho
Co-orientador - SENAI/CIMATEC

Documento assinado digitalmente
 **IVAN COSTA DA SILVA**
Data: 09/07/2024 14:28:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ivan Costa Silva
Examinador Interno - PPGEM/IFBA

Documento assinado digitalmente
 **IVO ANDREI DE OLIVEIRA LINO LIMA**
Data: 10/07/2024 11:45:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ivo Andrei de Oliveira Lino Lima
Examinador Externo – Braskem

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 08/07/2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que sempre me municia de forças para me manter firme nos meus propósitos.

À minha esposa Michele pelo amor, companheirismo, solidariedade e paciência neste período enriquecedor de minha vida.

À minha orientadora, Prof.^a Dr^a Maria Cléa Soares de Albuquerque pelo apoio e dedicação na orientação. Seu conhecimento e a sua experiência foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho, pela contribuição para realização deste trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEM/IFBA, pela oferta do curso de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais.

Ao SENAI CIMATEC e ArcelorMittal Tubarão, em especial a Erick Cerqueira das Neves e Marcio Luiz Almeida Cunha, pela oportunidade de pesquisa e suporte técnico.

Aos colegas Juracy Ferreira, Matheus Passos e Tiago Nunes pelo apoio na realização dos ensaios.

Enfim, agradeço profundamente a todos que direta ou indiretamente contribuíram nesta caminhada.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Principais aços de alto desempenho..... | 20 |
| Figura 2 - Microscopia eletrônica de transmissão de um aço TRIP, onde PF = ferrita poligonal; RA = austenita retida, M = martensita..... | 21 |
| Figura 3 - Transformação de austenita em martensita induzida por tensão..... | 22 |
| Figura 4 - Ilustração esquemática do Processo RW..... | 24 |
| Figura 5 - Máquina de solda RSEW..... | 26 |
| Figura 6 - Temperatura média ao soldar bobinas do mesmo tipo de aço com diferentes espessuras..... | 26 |
| Figura 7 - Princípio de funcionamento do ensaio de correntes parasitas..... | 31 |
| Figura 8 - Comportamento das correntes parasitas: (a) bobina no ar; (b) bobina sob o material livre de descontinuidade; (c) bobina sob o material com descontinuidade..... | 32 |
| Figura 9 - Plano de impedância com a representação das trajetórias do sensor (a) sobre uma amostra paramagnética e (b) sobre uma amostra ferromagnética..... | 33 |
| Figura 10 - Efeito pelicular..... | 34 |
| Figura 11 - Profundidade de penetração das correntes parasitas quando alterado alguns parâmetros..... | 35 |
| Figura 12 - Princípio da técnica MEC..... | 38 |
| Figura 13 - Sinal de defeito por correntes parasitas magnéticas. Informação completa do plano de impedância..... | 39 |
| Figura 14 - (a) Representação 3D do corpo de prova; (b) corpo de prova soldado; (c) corpo de prova do metal de base..... | 42 |
| Figura 15 - Fluxograma da metodologia empregada..... | 44 |
| Figura 16 - Vista geral da máquina de solda..... | 45 |
| Figura 17 - (a) Vista lateral da máquina de solda, (b) detalhe dos discos de soldagem..... | 46 |
| Figura 18 - (a) Corpo de prova fixado ao dispositivo; (b) Scanner MEC posicionado sobre dispositivo..... | 49 |
| Figura 19 - (a) Sistema de inspeção completo, com detalhe da fonte de alimentação (b) PowerIQ e do EddyIQ..... | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 - Compressão localizada utilizando prensa hidráulica manual e punção: (a) Corpo de prova montado no equipamento ; (b) descontinuidade formada após compressão. | 51 |
| Figura 21 - Sensor diferencial presente no sistema de escanamento. | 52 |
| Figura 22 - Indicação dos pontos de início e fim da varredura. | 52 |
| Figura 23 - Simulador Termomecânico Gleeble® | 53 |
| Figura 24 - Máquina de eletroerosão a fio..... | 54 |
| Figura 25 - Diagrama esquemático da localização de extração dos corpos de prova. | 55 |
| Figura 26 - (a) Equipamento utilizado na soldagem do termopar (b)Termopar fixado sobre o cordão de solda. | 56 |
| Figura 27 - Corpo de prova montado na câmara do simulador termomecânico Gleeble®..... | 56 |
| Figura 28 - Cuva Tensão x Deformação IF. | 60 |
| Figura 29 - Valores de resistência a tração do aço IF de 0,6mm obtidos do ensaio no Gleeble. | 62 |
| Figura 30 - Curva Tensão x Deformação aço TRIP. | 64 |
| Figura 31 - Valores de resistência a tração do aço TRIP com 1,5 mm de espessura, obtidos do ensaio no Gleeble. | 65 |
| Figura 32 - Macrografia do aço IF (Grupo1). Aumento: 20x. | 67 |
| Figura 33 Macrografia do aço IF (Grupo2). Aumento: 30x. | 67 |
| Figura 34 - Macrografia do aço TRIP (Grupo3). Aumento: 20x. | 69 |
| Figura 35 - Macrografia do aço TRIP (Grupo 4). Aumento: 20x. | 70 |
| Figura 36 - Gráfico de linhas apresentando o comportamento do sinal MEC para as amostras de referência: (a) Aço IF; (b) Aço TRIP. | 73 |
| Figura 37 - Planos de impedância dos corpos de prova de aços IF (Grupo 1). ... Erro! Indicador não definido. | |
| Figura 38 - Boxplot dos sinais MEC para os Corpos de Prova de Aço IF (Grupo 1).75 | |
| Figura 39 - Planos de impedância dos Corpos de Prova de Aços IF (Grupo 2). | 76 |
| Figura 40 - Boxplot dos sinais MEC para os Corpos de Prova de Aço IF (Grupo 2).77 | |
| Figura 41 - Boxplot dos sinais MEC para os Corpos de Prova dos aços IF (Grupos 1 e 2). | 78 |
| Figura 42 - Planos de impedância dos Corpos de Prova de Aços TRIP (Grupo 3).79 | |

| | |
|--|----|
| Figura 43 - Boxplot dos sinais MEC para os Corpos de Prova de Aço TRIP (Grupo 3)..... | 80 |
| Figura 44 - Planos de impedância dos Corpos de Prova de Aços TRIP (Grupo 4).81 | |
| Figura 45 - Boxplot dos sinais MEC para os Corpos de Prova de Aço TRIP (Grupo 4)..... | 82 |
| Figura 46 - Boxplot dos sinais MEC para os corpos de prova de Aço TRIP (Grupos 3 e 4). | 83 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova | 43 |
| Tabela 2 - Análise química do aço TRIP 780, em porcentagem em peso (%). | 43 |
| Tabela 3 - Análise química do aço IF, em porcentagem em peso (%). | 43 |
| Tabela 4 - Parâmetros de soldagem em conformidade com o processo produtivo. . | 47 |
| Tabela 5 - Parâmetros de soldagem em não conformidade com o processo produtivo..... | 47 |
| Tabela 6 - Detalhamento dos corpos de prova..... | 48 |
| Tabela 7 - Parâmetros MEC utilizados. | 51 |
| Tabela 8 - Dimensões (em mm) dos corpos de prova usados para ensaio de tração. | 55 |
| Tabela 9 - Ciclos térmicos aplicados às amostras no Gleeble. | 57 |
| Tabela 10 - Propriedades de tração das amostras dos grupos 1, 2 comparadas às amostras de referência do aço IF..... | 59 |
| Tabela 11 - Propriedades obtidas da curva tensão deformação para as amostras do aço TRIP..... | 63 |
| Tabela 12 - Extensão da região de transformação microestrutural dos corpos de prova de aços IF (Grupos 1 e 2)..... | 68 |
| Tabela 13 - Extensão da região de transformação microestrutural dos corpos de prova de aços TRIP (Grupos 3 e 4). | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| CIMATEC | Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia |
| ECT | Ensaio de Correntes Parasitas (<i>Eddy Current Testing</i>) |
| IF | Livre de Intersticiais (<i>Interstitial Free</i>) |
| IFBA | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia |
| ISSO | Organização Internacional para Padronização () |
| GMR | Magnetorresistência Gigante (<i>Giant Magnetoresistance</i>) |
| M | Martensita |
| MEC | Correntes Parasitas Magnéticas (<i>Magnetic Eddy Currents</i>) |
| MFL | Vazamento do Fluxo Magnético (<i>Magnetic Flux Leakage</i>) |
| NDT | Ensaio Não Destrutivo (<i>Non Destructive Testing</i>) |
| PF | Ferrita Poligonal |
| RA | Austenita Retida |
| RW | Soldagem por Resistência (<i>Resistance Welding</i>) |
| RSEW | Soldagem por Resistência por Costura (<i>Resistance Seam Welding</i>) |
| SENAI | Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial |
| TRIP | Transformação induzida por plasticidade (<i>Transformed Induced Plasticity</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|------------------------------------|
| f | Frequência de excitação |
| I | Corrente elétrica |
| Q | Fluxo de calor |
| R ₁ | Resistência de contato |
| R ₂ | Resistência elétrica |
| r | Diâmetro de contato |
| s | Tempo em segundos |
| Z | Impedância |
| R | Resistência indutiva |
| X _L | Reatância indutiva |
| Δ | Penetração das correntes parasitas |
| σ | Condutividade elétrica |
| μ | Permeabilidade magnética. |

RESUMO

A grande necessidade e importância da otimização dos processos no âmbito da qualidade e da produtividade tem gerado um aumento na demanda por ferramentas de inspeção que tornem o processo de controle de qualidade cada vez mais rápido e confiável. Na área de soldagem, um dos maiores desafios está relacionado à identificação de defeitos internos. Nesse contexto, as técnicas de ensaios não destrutivos avançadas têm ganhado notoriedade na inspeção de juntas devido às características geométricas ou metalúrgicas do material inspecionado. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo, avaliar o uso da técnica de correntes parasitas magnéticas (MEC) como alternativa para a inspeção de juntas soldadas em chapas finas de aço de alto desempenho obtidas pelo processo de soldagem de resistência por costura (RSEW). Ensaios de correntes parasitas magnéticas foram realizados em corpos de prova soldados, retirados do processo produtivo de laminação de bobinas de aço de alto desempenho, obtidos com parâmetros de soldagem com e sem conformidade com o processo produtivo. Como forma de avaliar a efetividade do emprego das correntes parasitas magnéticas, foram realizados ensaios de tração a quente, simulando o ciclo térmico do processo de laminação no sistema termomecânico Gleeble. Os resultados demonstraram uma correlação entre o desempenho mecânico das juntas e os sinais obtidos através da técnica MEC, possibilitando uma futura aplicação em ambientes industriais.

Palavras chaves: Aço TRIP; Aço IF; Correntes Parasitas Magnéticas; Soldagem por resistência por costura.

ABSTRACT

A great need and importance of optimizing processes in terms of quality and productivity have led to an increased demand for inspection tools that make the quality control process faster and more reliable. In the field of welding, one of the greatest challenges is related to the identification of internal defects. In this context, advanced non-destructive testing techniques have gained prominence in the inspection of joints due to the geometric or metallurgical characteristics of the inspected material. Thus, this work aims to evaluate the use of the magnetic eddy current (MEC) technique as an alternative for inspecting welded joints in thin high-performance steel sheets obtained by the resistance seam welding (RSEW) process. Magnetic eddy current tests were performed on welded specimens taken from the production process of high-performance steel coil rolling, obtained with welding parameters both in conformity and not in conformity with the production process. To assess the effectiveness of using magnetic eddy currents, hot tensile tests were conducted, the thermal cycle of the rolling process in the Gleeble thermomechanical system. The results demonstrated a correlation between the mechanical performance of the joints and the signals obtained through the MEC technique, enabling potential future application in industrial environments.

Keywords: TRIP steel; IF steel; Magnetic Eddy Currents; Resistance Seam welding.

Sumário

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I | 15 |
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 Objetivo geral | 18 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 18 |
| CAPÍTULO II | 19 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 2.1 Aços de Alto Desempenho | 19 |
| 2.1.1 Aço com Efeito TRIP | 21 |
| 2.1.2 Aços IF | 23 |
| 2.2 Soldagem por Resistência..... | 24 |
| 2.2.1 Soldagem por Resistência por Costura (RSEW)..... | 25 |
| 2.3 Controle da qualidade na produção de bobinas em soldagem (RSEW). | 27 |
| 2.4 Correntes parasitas | 29 |
| 2.4.1 Plano de impedância..... | 31 |
| 2.4.2 Profundidade de penetração..... | 33 |
| 2.4.3 Lift-off | 35 |
| 2.4.4 Composição Química do Material | 36 |
| 2.5 Correntes Parasitas Magnéticas (MEC) | 36 |
| 2.6 Simulador Termomecânico Gleeble..... | 40 |
| CAPÍTULO III | 42 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 42 |
| 3.1 Material | 42 |
| 3.2 Métodos | 44 |
| 3.2.1 Soldagem das Chapas | 45 |
| 3.2.2 Configuração do Mecanismo de Inspeção | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.3 Ensaio de Inspeção por MEC | 49 |
| 3.2.4 Ensaio termomecânico..... | 53 |
| 3.2.5 Ensaio Metalográfico..... | 57 |
| CAPÍTULO IV | 58 |
| 4. RESULTADOS | 58 |
| 4.1 Ensaio de Tração no Simulador Termomecânico Gleeble - Corpos de Prova dos Grupos 1 e 2 | 58 |
| 4.2 Ensaio de tração no Simulador Termomecânico Gleeble - Corpos de Prova dos Grupos 3 e 4 | 62 |
| 4.3 Análise Macrográfica | 65 |
| 4.3.1 Análise Macrográfica aço IF (Grupo 1 e 2) | 66 |
| 4.3.2 Análise Macrográfica aço TRIP (Grupo 3 e 4) | 69 |
| 4.3 Ensaio de Correntes Parasitas Magnéticas..... | 71 |
| 4.3.1 Obtenção dos Parâmetros Funcionais para o Ensaio de Correntes Parasitas Magnética..... | 71 |
| 4.3.2 Ensaio de Correntes Parasitas em Amostras de Aços IF (Grupos 1 e 2) | 73 |
| 4.3.3 Ensaio de Correntes Parasitas em Amostras de Aços TRIP (Grupos 3 e 4) | 79 |
| CAPÍTULO V | |
| 5. CONCLUSÕES | 84 |
| CAPÍTULO VI | |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 86 |
| REFERÊNCIAS | 87 |

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Ao buscar alternativas para atender as exigências do mercado e se manter cada vez mais competitiva e lucrativa, a indústria siderúrgica procura investir cada vez mais em recursos que permitem otimizar seus processos e elevar o grau de confiabilidade de seus produtos. Nesse sentido, a necessidade de união de materiais exige que as técnicas de soldagem aplicadas, resultem em juntas mais seguras (DE PAEPE *et al.*, 2022).

No fluxo de fabricação do aço, mais precisamente no setor de laminação e acabamento, a soldagem por resistência elétrica por costura (RSEW, do inglês *Resistance Seam Welding*) é comumente empregada na junção de chapas de aço com espessuras abaixo de 3 mm. O método consiste na sobreposição de uma série de pontos de solda formados por efeito Joule, que resulta do aquecimento causado por uma corrente elétrica. Essa corrente é transmitida através de eletrodos circulares que se movem progressivamente ao longo da junta a ser soldada (DE DEUS *et al.*, 2018).

No setor siderúrgico, a união de bobinas através da soldagem é a chave para a produtividade e a qualidade em diversos tipos de linhas de produção de aço. Chapas finas, entre 0,3 mm e 2,5 mm, são comumente sobrepostas e unidas por meio do processo RSEW. Considerando que a junta soldada é o ponto mais propenso a falhas na bobina, é essencial avaliar sua qualidade para assegurar a eficiência do processo produtivo (MOLLEDA *et al.*, 2012 b).

A falha da solda em bobinas laminadas pode interromper o processo produtivo em até 48 horas, ocasionando perda de produtividade e danos aos sistemas mecânicos do laminador (DE PAEPE *et al.*, 2022, BONIKILA *et al.*, 2022).

A presença de defeitos ao longo da zona fundida, tais como, falta de fusão, expulsão de material e trincas contribui de forma significativa para o problema, resultado de parâmetros de soldagem inadequados, e pode permanecer oculta durante os processos subsequentes de produção (BONIKILA *et al.*, 2022).

A junta soldada experimenta tensões de flexão ao longo do seu processamento

na linha de produção, ocasionadas pelos rolos que guiam a chapa para diferentes seções. A combinação de defeitos à formação de uma microestrutura indesejável, durante os ciclos térmicos na soldagem, aumenta a concentração de tensões e pode levar à fácil propagação de trincas (PAWAR *et al.*, 2019 apud BONIKILA *et al.*, 2022).

Dada a ampla aplicação do processo RSEW e seu impacto significativo nas propriedades metalúrgicas dos materiais, torna-se essencial realizar estudos voltados para o controle de qualidade pós-soldagem, como sugerido por De Deus *et al.*, 2018.

Em ambientes industriais de produção contínua, é inviável conduzir ensaios destrutivos devido a vários fatores, incluindo o tempo necessário para sua execução e os danos potenciais às peças. Portanto, métodos de inspeção não destrutivos costumam ser indicados, como os que empregam processos acústicos, ópticos e térmicos (MOLLEDA *et al.*, 2012b).

Mesmo com o avanço das técnicas de inspeção não destrutivas, algumas usinas siderúrgicas ainda utilizam métodos tradicionais, como o martelamento manual para atestar a integridade e a resistência de juntas soldadas obtidas por RSEW. Por se tratar de uma análise meramente qualitativa, esse método exibe baixa confiabilidade, uma vez que sua análise se estende a comprimentos limitados da junta soldada. Além disso, causa marcas de impacto na superfície do produto, o que restringe a inspeção a poucas peças em estudo, e riscos ergométricos ao operador (De Deus *et al.*, 2018).

Fricke (2003 apud BONIKILA *et al.*, 2022) explica que o martelamento de forma escalonada, ao longo da linha de solda, é utilizado para avaliar a qualidade do procedimento, antes de etapas subsequentes do processamento das bobinas, tais como recozimento e galvanização. Esse modo de inspeção manual pode não identificar problemas relacionados a falhas internas, as quais funcionam como concentradores de tensão, predispondo as juntas soldadas à falha.

Entre as técnicas avançadas de inspeção, a técnica de correntes parasitas magnéticas (MEC, do inglês *Magnetic Eddy Current*) vem ganhando espaço por exibir boa sensibilidade na detecção de descontinuidades internas, além de permitir a distinção de defeitos internos e externos e ser mais tolerante a mudanças de temperatura (WASIF *et al.*, 2022).

A técnica MEC supera as desvantagens do ensaio convencional por correntes

parasitas (ECT, do inglês *Eddy Current Testing*), como a penetração limitada das correntes, que restringe a detecção a defeitos superficiais e subsuperficiais a sensibilidade aumentada ao *lift-off* e a exigência de habilidade por parte do operador para interpretar sinais complexos nos instrumentos de exibição do plano de impedância (SOPHIAN *et al.*, 2001).

Nesse contexto, este estudo se propõe a avaliar a possibilidade de substituir o método de martelamento pela técnica MEC na inspeção de chapas de aço alto desempenho, soldadas por RSEW. Essa transição é esperada por possibilitar avanços consideráveis na indústria siderúrgica ao permitir identificar soldas não conformes e, por conseguinte, aumentar a confiabilidade operacional.

A inovação tecnológica decorrente dessa substituição marca um avanço significativo na otimização dos processos de inspeção e garantia de qualidade na produção contínua de bobinas de aço laminado. Ao substituir métodos convencionais por abordagens mais avançadas, a indústria siderúrgica pode realizar uma análise mais abrangente das juntas soldadas, identificando e corrigindo potenciais defeitos de forma mais eficaz, aumentando a eficiência operacional ao longo de toda a cadeia de produção.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicação da técnica de correntes parasitas magnéticas na inspeção de juntas soldadas de chapas de aços de alto desempenho, soldadas pelo processo RSEW e utilizadas na produção contínua de bobinas laminadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento do sinal MEC em chapas finas soldadas de duas classes de aços de alto desempenho, obtidas com diferentes parâmetros de soldagem;
- Correlacionar o comportamento mecânico, determinado através de ensaios de simulação termomecânica, com os sinais de inspeção MEC em juntas soldadas de aços de alto desempenho, obtidas com parâmetros com e sem conformidade com o processo produtivo.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AÇOS DE ALTO DESEMPENHO

O aço é uma liga metálica que tem na sua composição, como elementos principais, o ferro e o carbono, e desempenha um papel fundamental na evolução da sociedade e no avanço de novas tecnologias.

A demanda dos setores, principalmente o automotivo, no que diz respeito ao elevado potencial de leveza, excelente comportamento em caso de colisão, boa conformabilidade, redução de emissão de CO₂ e preços razoáveis, em comparação com materiais não ferrosos, motiva a indústria siderúrgica a apresentar soluções através do desenvolvimento de aços de alto desempenho (KRIZAN *et al.*, 2018).

De acordo com Jeon *et al.*, (2020), existem vários tipos de aços de alto desempenho comumente utilizados, como aços de fase dupla (DP, do inglês *Dual Phase*), aços com efeito TRIP (do inglês *Transformed Induced Plasticity*), aços de plasticidade induzida por geminação (TWIP, do inglês *Twinning-Induced Plasticity*), aços de fase complexa (CP, do inglês *Complex Phase*), aços livres de intersticiais (IF, do inglês *Interstitial Free*), aços martensíticos (MS, do inglês *Martensitic Stainless*) entre outros, que combinam boas propriedades mecânicas e leveza a um custo razoável.

No que diz respeito às tendências recentes na produção de automóvel, a utilização de materiais que proporcionem redução de peso ao produto, é uma das principais prioridades para satisfazer à exigência dos clientes e os crescentes requisitos legais. Para atender essas expectativas, a aplicação de materiais de alta resistência é considerada uma das possibilidades mais promissoras. Os materiais de alta resistência tem uma resposta positiva não só para a redução de massa, mas também para o aumento da resistência mecânica e maior proteção ambiental, ocasionada pelo menor consumo de combustível e conseqüente redução na quantidade de gases emitidos para o ambiente (TISZA *et al.*, 2018).

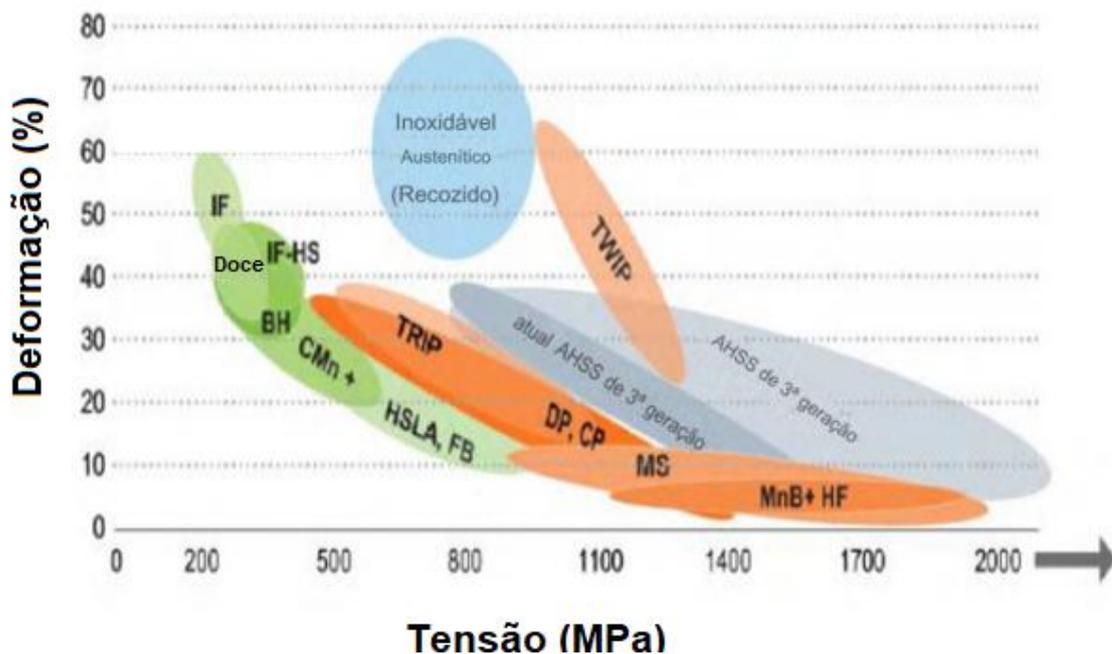
A necessidade de empregar chapas mais finas na indústria automotiva reforça

a importância de manter as propriedades mecânicas elevadas, garantindo simultaneamente, uma conformabilidade adequada.

Outras vantagens para utilização de ligas de aço de alto desempenho são a consistência de fornecimento, resistência à corrosão com revestimentos de zinco, facilidade de união, reciclabilidade e boa absorção de energia de colisão.

A Figura 1 apresenta os principais aços de alto desempenho utilizados na indústria automotiva, destacando-se os aços IF e TRIP, os quais foram utilizados nos estudos realizados neste trabalho.

Figura 1 - Principais aços de alto desempenho: IF (*Interstitial Free*) - livre de intersticiais; HS (*High Strength*) - alta resistência; BH (*Bake Hardening*) - endurecíveis por tratamento térmico; HSLA (*High Strength and low alloy*) - alta resistência e baixa liga ou ARBL; FB (*Ferrite-Bainite*) - Ferrita-Bainita; TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) - plasticidade induzida por transformação de fase; DP (*Dual Phase*) - Dupla Fase; CP (*Complex Phase*) - Fase Complexa; MS (*Martensitic Stainless*) - Inoxidável Martensítico; MnB + HF (*Manganese-Boron Hot Formed*) - ligados com manganês e boro e conformados a quente; TWIP (*Twinning-Induced Plasticity*) - plasticidade induzida por geminação; AHSS (*Advanced High Strength Steel*) - aços avançados de alta resistência.



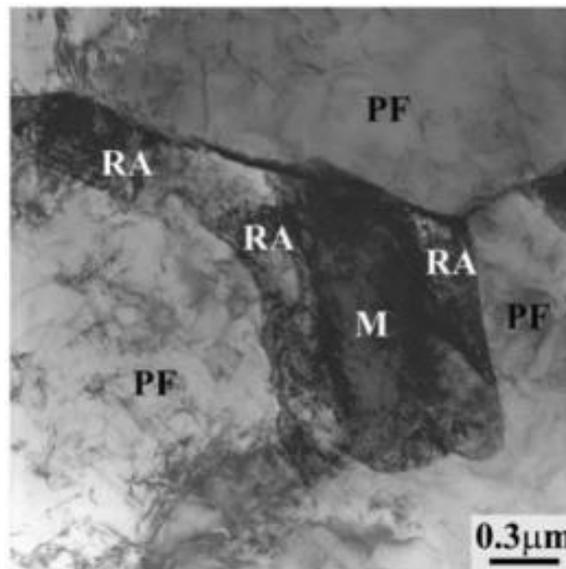
Fonte: Keeler (2014, apud SINGH, 2016).

2.1.1 AÇO COM EFEITO TRIP

O aço com efeito de plasticidade induzida por transformação de fase vem sendo cada vez mais utilizado em aplicações que exigem um bom desempenho em processos de estampagem, combinando propriedades bastante interessantes, tal como elevada resistência mecânica e ao escoamento à boa capacidade de conformação.

A microestrutura destes aços é formada por austenita retida em uma matriz de ferrita. Com uma quantidade mínima de 5% em volume de austenita retida, fases mais duras como a martensita e bainita podem estar presentes. A Figura 2 exibe a microestrutura complexa de um aço TRIP (FREITAS, 2022).

Figura 2 - Microscopia eletrônica de transmissão de um aço TRIP, onde PF = ferrita poligonal; RA = austenita retida, M = martensita.



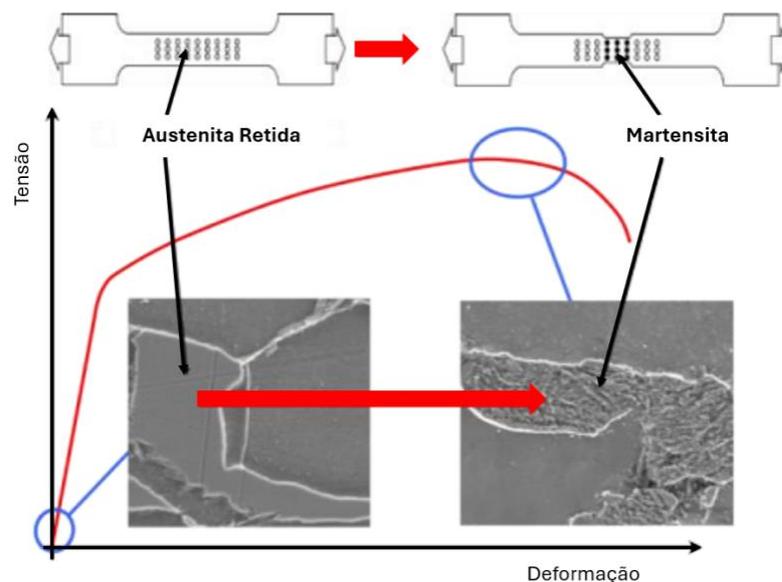
Fonte: Hodgson *et al.*, 2011 (apud FREITAS, 2022).

Solemani *et al.* (2020), explicam que o efeito da plasticidade induzida pela transformação de fase nessas ligas acontece com a transformação da austenita retida em martensita durante a deformação plástica macroscópica, promovida durante a conformação, sendo responsável por elevar, ao mesmo tempo, a resistência e a ductilidade. Esta transformação aumenta substancialmente a taxa de encruamento e retarda, de forma eficiente, a estrição, que acontece nas regiões que experimentam

uma deformação mais elevada, como durante um ensaio de tração. A deformação é interrompida nesta região, resultando em uma excelente combinação de resistência e ductilidade.

Conforme pode ser observado na Figura 3, se um aço com efeito TRIP for submetido a um ensaio de tração, durante a estrição, a região com menor seção transversal, que apresenta maior grau de deformação, será aquela em que haverá uma maior concentração de martensita. Assim, esta região apresentará resistência comparável às demais e a deformação voltará a ser mais bem distribuída ao longo do corpo de prova que, conseqüentemente, irá apresentar uma maior taxa de encruamento e maior alongamento durante o ensaio.

Figura 3 - Transformação de austenita em martensita induzida por tensão.



Fonte: KRIZAN *et al.*, 2018.

A austenita retida é considerada prejudicial para a maioria dos aços, e sua presença na microestrutura deve ser evitada, pois aumenta as tensões internas, que levam ao surgimento de trincas (KRIZAN *et al.*, 2018). Já nas aplicações para a indústria automotiva, a utilização dos aços com efeito TRIP, representa uma tecnologia de ponta, uma vez que propriedades mecânicas bastante contraditórias como resistência e ductilidade, podem ser obtidas simultaneamente (KRIZAN *et al.*, 2018).

Segundo Fonstein (2015 apud MAGALHÃES, 2019), uma das desvantagens dos aços com efeito TRIP é possuir um teor de carbono relativamente elevado (cerca de 0,20%), o que geralmente prejudica a soldabilidade do material, dificultando a união de bobinas ou de peças por soldagem.

A soldabilidade desses aços é limitada pelo alto teor de elementos de liga na composição, fazendo com que o ciclo térmico modifique a microestrutura do material, o que por sua vez gera propriedades mecânicas de solda insatisfatórias (GONÇALVES *et al.*, 2020)

2.1.2 AÇOS IF

Os aços IF são aços que apresentam um baixo percentual de elementos intersticiais. Essa característica permite a essas ligas, uma boa plasticidade e a sua aplicação em operações de conformação e estampagem profunda, para obtenção de peças com geometria cada vez mais complexas.

Os aços IF, ao contrário das ligas convencionais de alta resistência, possibilitaram o desenvolvimento da indústria automotiva, que conseguiu reduzir o peso da carroceria e dos painéis externos dos veículos, mantendo a resistência e a conformabilidade (ROMANYUK *et al.*, 2018). Seus elementos intersticiais, carbono e nitrogênio, são combinados com titânio e/ou nióbio, o que resulta em precipitação de partículas insolúveis de carbonetos, nitretos e/ou carbonitretos, possibilitando uma boa conformabilidade, comparados aos aços de baixo carbono convencionais (SAMPAIO *et al.*, 1998, apud INÁCIO, 2013). Os requisitos dos aços IF incluem alta resistência, característica alcançada através da composição química, fenômenos de precipitação, condições de processo controladas e desenvolvimento de uma microestrutura adequada através de processos de laminação (ROMANYUK *et al.*, 2018).

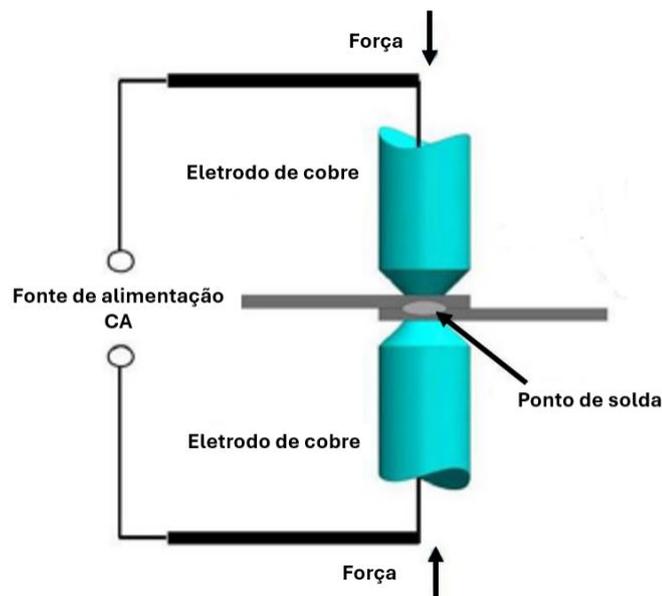
Basicamente, os aços IF podem ser encontrados comercialmente, estabilizados ao Ti, Nb ou Ti+NB. Os baixíssimos teores de elementos intersticiais e a adição de elementos microligantes permitem que estas ligas tenham uma matriz ferrítica bem limpa, fundamental à sua característica de estampabilidade (CASTRO, 2019).

2.2 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA

A soldagem por resistência (RW, do inglês *Resistance Welding*) compreende um grupo de processos de soldagem nos quais o calor necessário à formação da junta soldada é obtido pela resistência à passagem da corrente elétrica através das peças. O aquecimento da junta é induzido pela corrente elétrica, o que contribui para diminuir a resistência mecânica do material. Isso possibilita, com a aplicação de pressão em áreas específicas, a deformação do material e, em certos casos, a fusão localizada para alcançar a união desejada (GONZAGA *et al.*, 2016).

O processo de soldagem por resistência é fundamental na união de metais na indústria automotiva, utilizando pressão e calor para formar a junta soldada, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Ilustração esquemática do Processo RW



Fonte: Adaptado de Paranthaman *et al.* (2021).

No processo RW, o calor necessário para a soldagem é gerado por efeito Joule. A entrada de calor por resistência durante a RW, Q , é dada pela seguinte equação proporcional:

$$Q = (R_1 + R_2) * I^2 * s * r^{-4} \quad (1)$$

onde:

R_1 é a resistência de contato de duas chapas metálicas em ohm;

R_2 é a resistência elétrica da chapa metálica em ohm;

I é a corrente de soldagem em amperes;

s é o tempo de soldagem em segundos e

r é o diâmetro de contato das duas chapas em milímetros.

I , s , r são parâmetros que podem ser modificados e têm grande impacto na qualidade do cordão de solda.

2.2.1 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA POR COSTURA (RSEW).

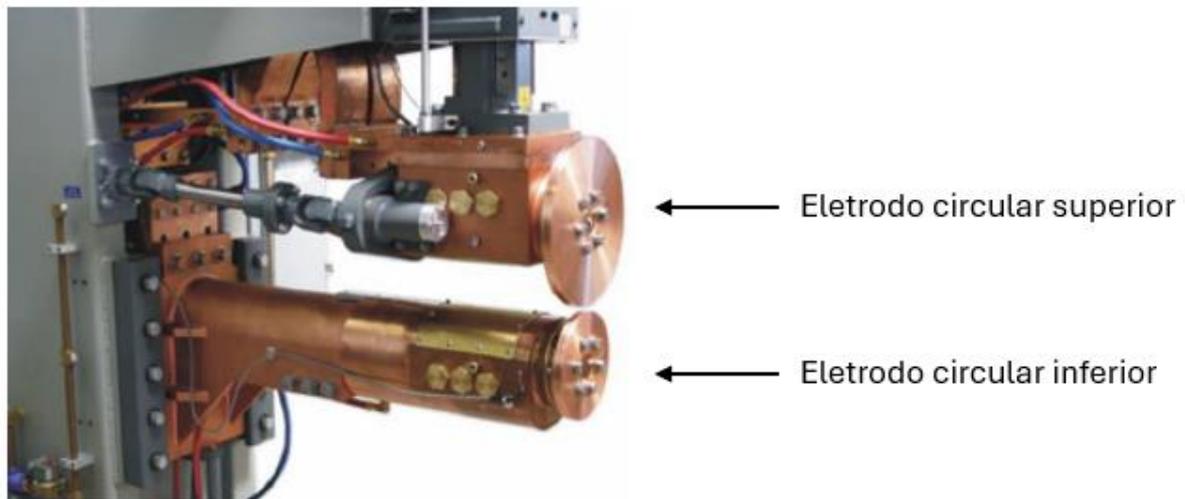
Uma das variações da soldagem por resistência, é a soldagem de resistência por costura (RSEW, do inglês *Resistance Seam Welding*). Neste processo, a corrente elétrica, necessária para a obtenção do efeito Joule, é transmitida para a peça através de dois eletrodos circulares que giram sobre a junta a ser soldada.

Nos processos siderúrgicos, principalmente nos setores de laminação e acabamento, o processo RSEW é comumente empregado para unir bobinas de aço com espessura de até 3 mm. O calor necessário para formar a junta soldada é fornecido pela resistência à passagem de corrente elétrica nas peças a serem unidas. Nas condições de soldagem mais comuns, a qualidade das juntas soldadas depende da distribuição de calor, responsável pela formação das zonas fundida e afetadas pelo calor, no material de base. A corrente elétrica é transmitida por dois eletrodos giratórios, dispostos verticalmente, alinhados e em contato com as laterais das chapas sobrepostas a serem soldadas. Nesta etapa é exercida a pressão necessária para o contato adequado entre os metais de base. Os eletrodos giram com velocidade constante sobre os materiais, sobrepondo-se para realizar uma junta contínua, característica da soldagem por costura (DE DEUS *et al.*, 2018).

O processo RSEW é afetado por vários fatores, entre eles, a resistência da interface da chapa, a corrente de soldagem, o tempo de soldagem e a pressão que o eletrodo exerce sobre a superfície do material, sendo a corrente de soldagem, o parâmetro mais sensível (WINTJES *et al.*, 2010, apud JEON *et al.*, 2020). A Figura 5

apresenta o equipamento utilizado na soldagem RSEW.

Figura 5 - Máquina de solda RSEW



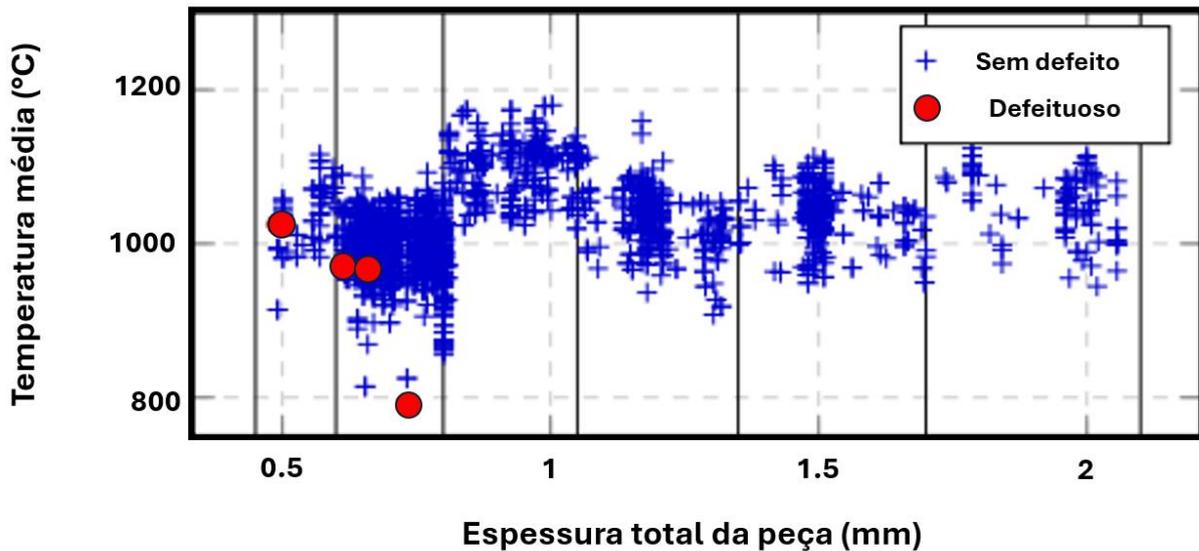
Fonte: Adaptado de MIJAJLOVIC *et al.* (2021).

Alguns dos fatores mais críticos que influenciam a qualidade da solda são os parâmetros da máquina de soldagem, como pressão, tensão e sobreposição. Para cada solda, esses parâmetros são determinados por programas de controle de soldagem, selecionados em função do material e espessura da chapa (DE PAEPE *et al.*, 2022).

Nas linhas de produção de bobinas de aço, os programas de controle determinam os valores específicos de todos os parâmetros de configuração da máquina de solda, com base nas características físicas e químicas das bobinas a serem soldadas. Cada programa de controle é adaptado para soldar bobinas com características específicas dentro de uma faixa limitada de espessuras.

Consequentemente, conforme a espessura da bobina aumenta ou suas características são modificadas, diferentes programas de controle de soldagem são selecionados. Entretanto, alterações nos parâmetros do processo de soldagem e na composição química das bobinas de aço podem resultar em configurações inadequadas dos programas (MOLLEDA *et al.*, 2012a). Como exemplo, a Figura 6 apresenta a temperatura média registrada durante a soldagem para bobinas do mesmo tipo de aço.

Figura 6 - Temperatura média ao soldar bobinas do mesmo tipo de aço com diferentes espessuras



Fonte: Molleda *et al.*, 2012a.

Na indústria siderúrgica, as linhas de produção agrupam os tipos de aço e as espessuras das bobinas em programas de controle de soldagem para definir “soldas semelhantes”, ou seja, aquelas realizadas com os mesmos parâmetros. Com isso espera-se que suas principais características se mantenham consistentes em todos os processos realizados (MOLLEDA *et al.*, 2012a).

Contudo, como evidenciado pela variação de temperatura em bobinas feitas do mesmo material, exibida na Figura 6, a avaliação da solda, que deveria ser executada com os mesmos parâmetros de processo, pode não ser realizada com a precisão necessária.

2.3 CONTROLE DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO DE BOBINAS EM SOLDAGEM (RSEW).

Em determinado ponto do processo de produção de bobinas de aços de alta resistência, as chapas são submetidas ao tratamento térmico de recozimento para aumentar a sua ductilidade. Para maximizar o rendimento da produção nesta fase, as chapas soldadas pelo processo RSEW, com o objetivo de formar uma chapa de aço contínua, são conduzidas através do forno de recozimento a uma taxa de velocidade constante (DE PAEPE *et al.*, 2022).

O processo requer uma série de etapas para que as bobinas sejam soldadas de maneira eficaz, porém, durante algumas dessas, diversos fatores podem contribuir para a formação de um cordão de solda com qualidade abaixo do esperado. Entre estes, desgastes, desalinhamento e incrustações nas roldanas do equipamento de soldagem e acabamento, podem afetar a integridade da união. Uma outra questão que afeta a qualidade final da solda é a restrição exercida durante a soldagem. Pressões de soldagem inadequadas podem ocasionar tensões residuais e falta de fusão, levando a soldas de baixa qualidade (MOLLEDA *et al.*, 2012b).

Para evitar ruptura, a junta soldada é inspecionada por um operador que realiza a inspeção visual e manual por meio de martelamento (DE PAEPE *et al.*, 2022).

Cada empresa utiliza procedimentos próprios para avaliação da qualidade da solda, testando o produto soldado e quantificando os resultados, para a definição do critério de aprovação da solda executada. De forma geral os procedimentos de avaliação podem ser divididos em inspeção visual, ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos, todos visando a qualificação da junta realizada (ZHOU *et al.*, 2003, apud BATISTA 2011).

Além dos problemas mecânicos, o processo RSEW pode produzir juntas soldadas sobrepostas defeituosas, exibindo falta de fusão devido à baixa soldabilidade das bobinas. Embora um programa adequado de manutenção da máquina de solda possa reduzir os problemas mecânicos, questões relacionadas à soldabilidade dependem de laboratórios químicos especializados analisarem cada tipo de aço e a sua compatibilidade metalúrgica com outros tipos de aço, a serem utilizados. Isso é de suma importância, especialmente ao lidar com aços de alta resistência, devido à significativa propensão a problemas de soldabilidade (MOLLEDA *et al.*, 2012 b).

O tempo de inspeção nas linhas de fabricação de bobinas de aço é muito escasso. A garantia da continuidade da linha de produção é crucial, pois qualquer interrupção, ainda que breve, pode comprometer as etapas subsequentes de fabricação. Assim, os ensaios não destrutivos realizados devem obedecer rigorosamente aos prazos estabelecidos pelo processo de produção (MOLLEDA *et al.*, 2012 b).

O ensaio de correntes parasitas demonstra ser uma técnica notavelmente

versátil, sobretudo na inspeção de produtos semiacabados, como fios, barras e tubos. Esse método se destaca por sua confiabilidade de uso em uma ampla faixa de temperaturas e em velocidades de produção de até 150 m/s. Além disso, sua insensibilidade à sujeira, umidade, óleo ou materiais dielétricos na região de medição, amplia o espectro de utilização em diversas aplicações (MARTÍN *et al.*, 2011)

2.4 CORRENTES PARASITAS

A técnica de inspeção por correntes parasitas, também conhecida como correntes de Foucault, é um ensaio não destrutivo aplicado em materiais condutores, baseado no princípio da indução eletromagnética. Durante o ensaio, uma corrente elétrica alternada é induzida na estrutura do material estudado e um campo magnético variável se desenvolve, sendo a análise realizada mediante a interação destes elementos com a microestrutura da amostra inspecionada. Seu princípio de funcionamento é análogo ao de um transformador, utilizando uma bobina contida em uma sonda, como componente primário e o material a ser analisado, como componente secundário.

De acordo com as equações de Maxwell, quando um metal estacionário está localizado em um campo magnético variável no tempo, as correntes parasitas induzidas J_e serão geradas no condutor metálico, e podem ser expressas como (YUAN *et al.*, 2020):

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

onde:

σ é a condutividade do material;

A é o potencial do vetor magnético.

Quando o condutor metálico se move a uma certa velocidade (v) no campo magnético, de acordo com a lei da indução eletromagnética de Faraday, as correntes parasitas induzidas J_m serão geradas no condutor metálico, e podem ser expressas

como:

$$J_m = \sigma v \times B' \quad (3)$$

onde:

B' densidade do fluxo magnético.

Quando o condutor metálico se move a uma certa velocidade (v) em um campo magnético variável no tempo, a equação pode ser expressa por:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_0 + J_e + J_m \quad (4)$$

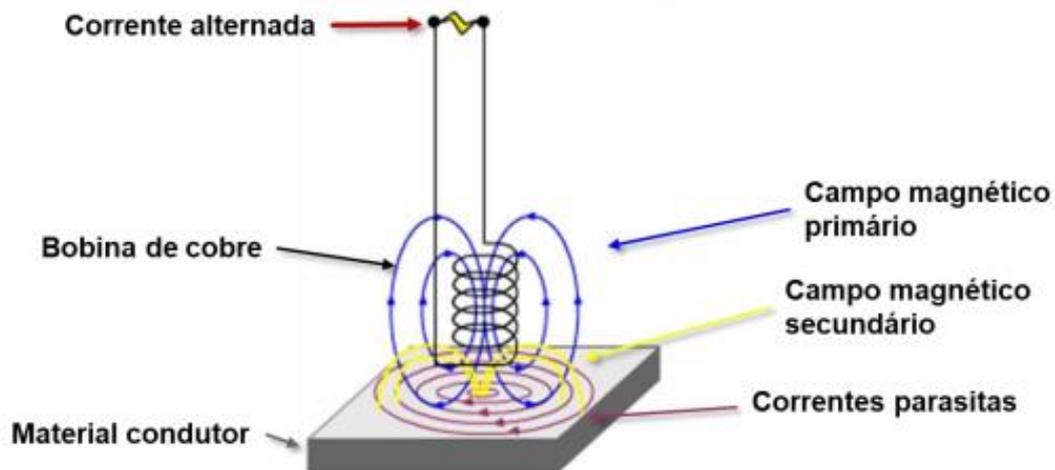
onde:

μ é a permeabilidade magnética do metal;

J_0 é a densidade de corrente.

Sendo assim, ao promover a excitação da bobina através da aplicação de uma corrente alternada, é gerado um campo magnético primário, cuja direção, intensidade e sentido dependem das características da corrente aplicada. Quando aproximamos a bobina excitada de um material condutor, o fluxo magnético primário penetra na estrutura do material, induzindo a formação de correntes parasitas. Estas correntes dão origem a um campo magnético secundário, de menor intensidade e sentido oposto ao campo produzido pela bobina, conforme ilustração esquemática, exibida na Figura 7 (LOUZADA, 2022).

Figura 7 - Princípio de funcionamento do ensaio de correntes parasitas.



Fonte: IOWA STATE UNIVERSITY CENTER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION, (2021 apud BRANDÃO, 2023).

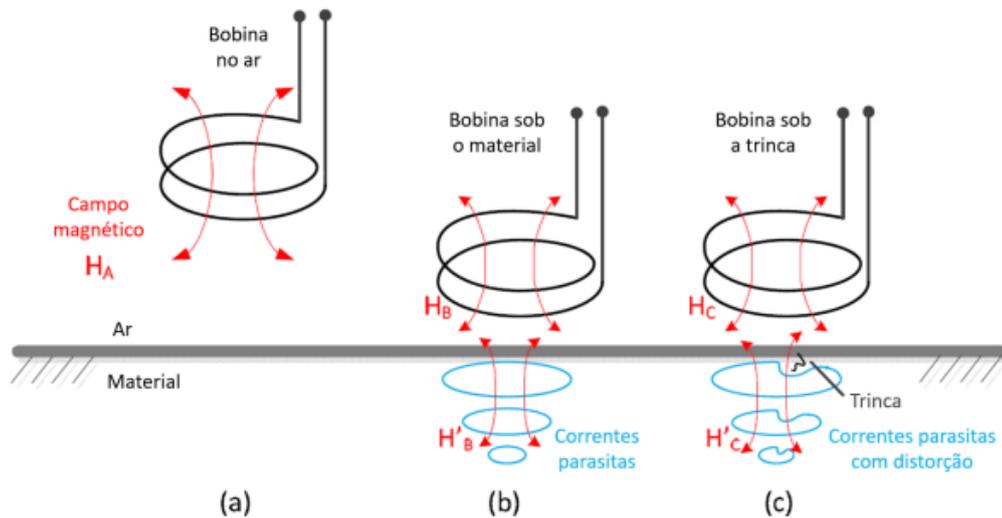
2.4.1 PLANO DE IMPEDÂNCIA

O ensaio de correntes parasitas (ECT, do inglês *Eddy Current Testing*) é uma tecnologia bem estabelecida na indústria aeronáutica e automotiva para a inspeção de componentes metálicos, em busca de falhas superficiais.

O princípio básico do teste consiste em medir a impedância de uma bobina elétrica. A impedância é a sua resistência complexa, que também depende da indutância. A indutância é uma propriedade física de uma bobina, que descreve como um campo magnético é gerado, quando uma corrente elétrica passa através dela. A indutância de uma bobina pode ser verificada, portanto, medindo a sua impedância.

Uma bobina nas proximidades de uma superfície metálica terá uma impedância diferente em comparação com a mesma bobina no ar, devido as correntes parasitas que são induzidas no material metálico. Além disso, uma bobina próxima a uma superfície metálica terá uma impedância diferente conforme a superfície metálica apresente ou não descontinuidades. Isso é ocasionado pela variação no fluxo de propagação das correntes parasitas, conforme ilustrado na Figura 8 (INNOSPECTION, 2017).

Figura 8 - Comportamento das correntes parasitas: (a) bobina no ar; (b) bobina sob o material livre de descontinuidade; (c) bobina sob o material com descontinuidade.



Fonte: RIBEIRO, 2014, apud. FONSECA 2023.

De acordo com a lei da indução eletromagnética, um campo magnético levará à formação de correntes na superfície. Essas correntes, por sua vez, geram um campo magnético que, segundo a Lei de Lenz, se opõe e enfraquece o campo original e, portanto, influencia a indutância da bobina. Qualquer coisa que altere a natureza das correntes parasitas no metal pode, portanto, ser detectada por uma mudança na impedância (INNOSPECTION, 2017).

De acordo com Wasif (2022), a impedância (Z) é a oposição total ao fluxo de corrente alternada, sendo dada pela soma vetorial das propriedades elétricas que afetam o fluxo de corrente ao longo do circuito: Resistência (R) e reatância indutiva (X_L), conforme Equação 5:

$$Z = R + X_L \quad (5)$$

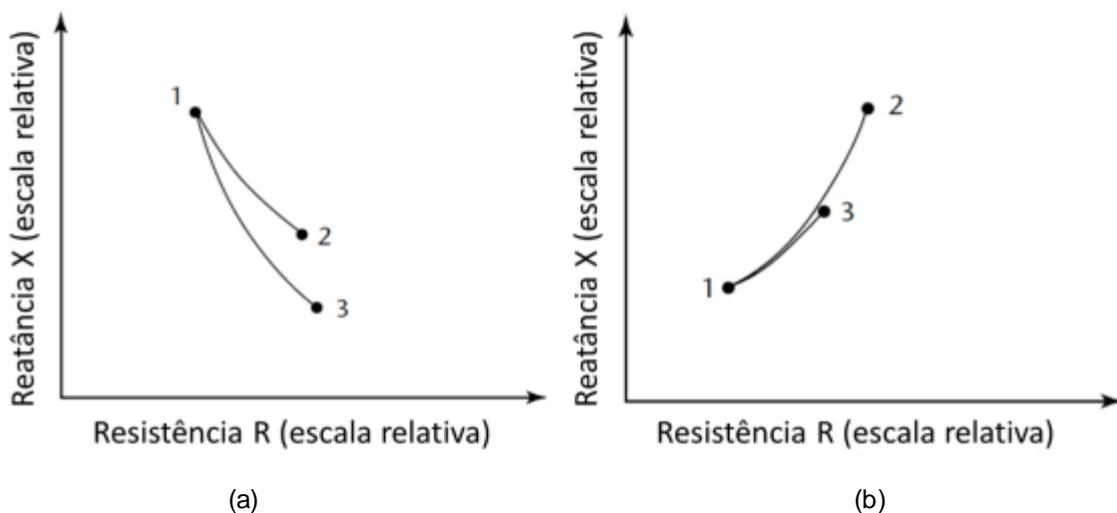
A presença de uma descontinuidade ou heterogeneidade na amostra causa uma redução, bem como uma redistribuição das correntes parasitas.

Conseqüentemente, as mudanças na indutância e resistência da bobina de excitação são correspondentemente menores. Na Figura 9(a), a trajetória 1-2 mostra como a impedância de uma bobina muda quando ela entra em contato com amostras

condutoras paramagnéticas contendo descontinuidades.

A análise do plano de impedância é diferente quando a amostra é ferromagnética. Há uma tendência à diminuição da indutância devido à influência das correntes parasitas induzidas no material, porém, há, ao mesmo tempo, um aumento na indutância devido à maior permeabilidade magnética (μ) do material. O último efeito geralmente predomina, de modo que a indutância da bobina aumenta quando a bobina entra em contato com uma amostra ferromagnética, conforme exibido no gráfico da Figura 9(b), trajetória 1-2 com descontinuidade e 1-3, sem descontinuidade (UDPA, 2004 apud BRANDÃO, 2023).

Figura 9 - Plano de impedância com a representação das trajetórias do sensor (a) sobre uma amostra paramagnética e (b) sobre uma amostra ferromagnética



Fonte: UDPA, 2004 apud BRANDÃO 2023.

A análise das descontinuidades presentes no material, através da leitura dos sinais exibidos no plano de impedância, é considerada uma das limitações da técnica, devido à complexidade dos sinais e da necessidade da habilidade do operador para interpretá-los.

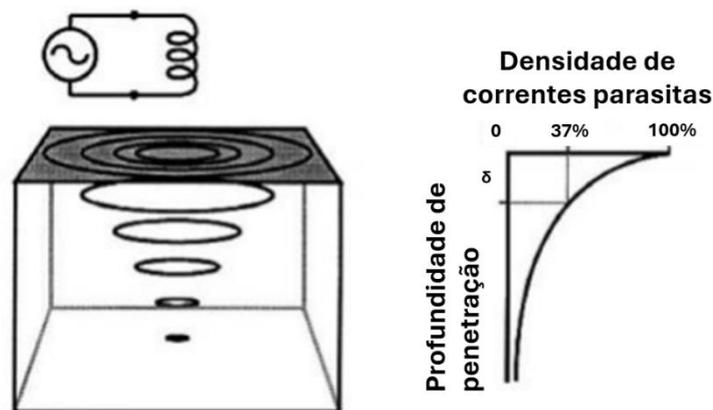
2.4.2 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

Durante o processo de indução, as correntes parasitas e o campo primário

adquirem sua intensidade máxima na superfície da amostra, decrescendo exponencialmente à medida que penetram no material. Esta queda é provocada devido à ocorrência do efeito pelicular, fenômeno físico caracterizado pela repulsão entre os fluxos de correntes elétricas que percorrem um mesmo material (LOUZADA, 2022). Como as correntes parasitas criam um campo magnético secundário que se opõe ao primário, elas acabam reduzindo a intensidade desse campo. Assim, a camada adjacente à superfície sofre influência de um campo primário menor, havendo uma redução da densidade de correntes parasitas nessa região. Esse efeito se repete a cada camada mais interna do material, promovendo uma redução na densidade de correntes parasitas cada vez mais acentuada à medida que a profundidade aumenta (SILVA, 2016 apud FONSECA, 2023).

A profundidade padrão de penetração (δ) do ensaio de correntes parasitas é definida como a distância cuja intensidade das correntes é reduzida a aproximadamente 37% do seu valor na superfície (NDTRESOURCE CENTER, 2022, apud. LOUZADA, 2022). A relação entre a densidade de correntes parasitas e a sua profundidade de penetração é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Efeito pelicular



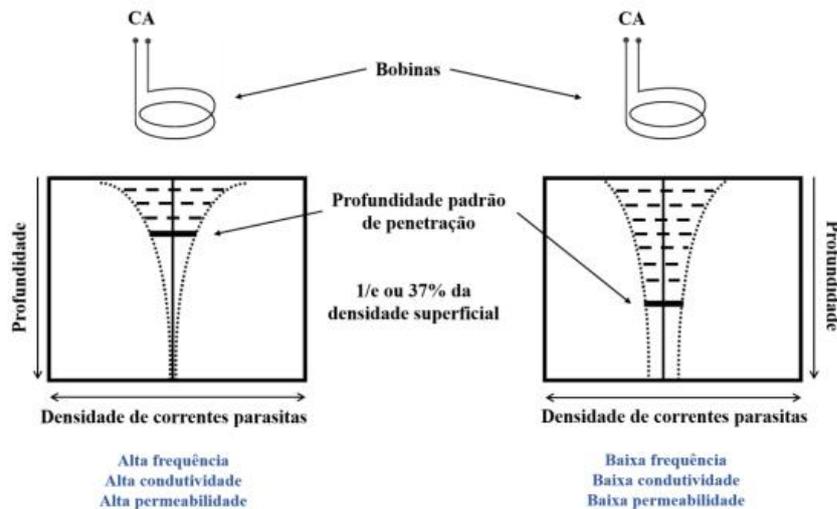
Fonte: HANSEN, 2004 apud LOUZADA, 2022 (adaptado).

É da natureza da indução eletromagnética que as correntes fluam apenas na superfície (efeito pelicular). O grau em que penetrarão na maior parte do material depende das suas propriedades. A teoria eletromagnética mostra que, quanto maior

a frequência das correntes e maior a condutividade e permeabilidade do metal, mais as correntes ficarão confinadas à superfície (INNOSPECTION, 2017). Sendo assim, os fatores que influenciam a profundidade de penetração da técnica de correntes parasitas são a frequência de ensaio e as propriedades eletromagnéticas do material. De forma inversamente proporcional, ambas são limitadores do uso da técnica (BRANDÃO, 2023).

A Figura 11 ilustra a relação entre a profundidade de penetração e a densidade de correntes parasitas, além de comparar a interação desses fatores em duas situações de ensaio distintas (NDT COURSE MATERIAL, 2021 apud FONSECA, 2023).

Figura 11 - Profundidade de penetração das correntes parasitas quando alterado alguns parâmetros.



Fonte: NDT COURSE MATERIAL, 2021, apud FONSECA, 2023.

2.4.3 LIFT-OFF

Pelo exposto, o ensaio de correntes parasitas é uma solução atraente para detectar defeitos superficiais e subsuperficiais, e uma das suas principais características é que não há a necessidade de contato entre a superfície a ser analisada e a sonda.

A distância entre a sonda do sensor e a superfície condutora é denominada como *lift-off*, um fator de impacto proeminente no campo de avaliação e testes

eletromagnéticos não destrutivos. O *lift-off* interfere na indutância mútua do campo magnético de excitação e no campo eletromagnético induzido, comprometendo seriamente a sensibilidade da detecção e a precisão da quantificação de descontinuidades (MA *et al.*, 2022).

O avaliador que usa a técnica de correntes parasitas deve estar ciente deste efeito para poder restringi-lo o máximo possível e, com isso, evitar diagnósticos equivocados (LIMA JÚNIOR, 2014).

2.4.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

A microestrutura está diretamente relacionada com a composição química, pois as fases (ferrita, austenita, cementita e martensita) que se formam após tratamentos termomecânicos determinam as propriedades físicas do material, resistividade elétrica, permeabilidade magnética, dureza, dentre outras. Nos trabalhos que avaliam o comportamento do aço de forma não destrutiva, busca-se relacionar as fases presentes, assim como, a concentração de carbono com as mudanças na impedância percebidas pela bobina (LIMA JÚNIOR, 2014).

A inspeção por correntes parasitas vem obtendo grande destaque no estudo de variações microestruturais, devido aos excelentes resultados alcançados nesse tipo de análise. Através dessa técnica, é possível superar a restrição da inspeção pontual ao permitir a varredura de extensas áreas superficiais. Isso facilita a automação das atividades de inspeção, permitindo que a sua metodologia esteja alinhada aos avanços da indústria 4.0 (LOUZADA, 2022).

2.6 CORRENTES PARASITAS MAGNÉTICAS (MEC)

Os ruídos adicionais gerados pela heterogeneidade magnética e estrutural, do material inspecionado, assim como a irregularidade geométrica da sua superfície, constituem um verdadeiro desafio para a prática de inspeção por correntes parasitas. Algumas abordagens são apontadas como possíveis formas de suprimir o ruído específico da referida técnica, sendo uma delas, a magnetização adicional da área inspecionada (UCHANIN *et al.*, 2019).

A técnica que combina a utilização de bobinas de correntes parasitas com uma magnetização em corrente contínua é denominada correntes parasitas magnéticas (do inglês *Magnetic Eddy Current* ou MEC). Essa combinação leva à redução da permeabilidade do material, aumentando assim a sensibilidade do método.

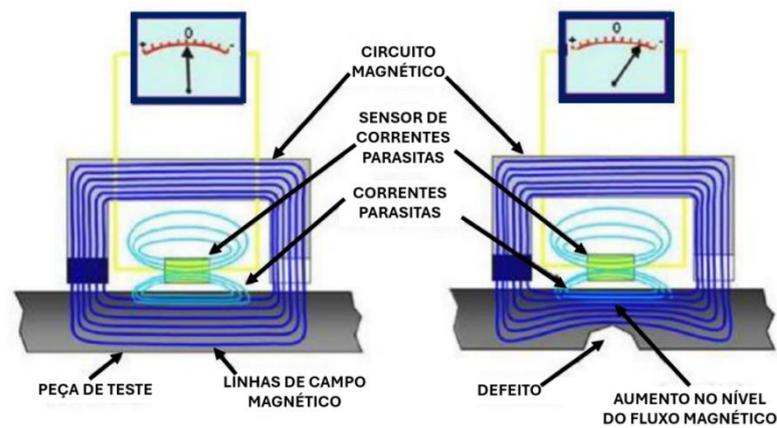
A técnica MEC é uma evolução da SLOFEC (do inglês *Saturation Low Frequency Eddy Current*) ou Correntes de Foucault de Baixa Frequência Saturadas, que já é usada na indústria de petróleo e gás para inspeção de tanques de armazenamento ou área externa de tubulações. O MEC oferece o potencial para uma técnica mais avançada por atender objetivos como maior faixa de espessura de parede, detecção de defeitos de tamanho menor e maior precisão (ASHER *et al.*, 2016).

De acordo com Al-Dhanhani *et al.* (2018), o MEC é uma nova geração de técnica de mapeamento rápido baseada na técnica SLOFEC, que opera com correntes parasitas de alta frequência controladas por campo magnético e usa sensores especificamente desenvolvidos para gerar um campo de maior densidade. Ao combiná-la com frequências operacionais mais altas, a técnica MEC oferece maior sensibilidade e precisão na detecção de defeitos, incluindo a capacidade de inspecionar paredes e revestimentos com espessuras maiores.

A aplicação de um campo magnético externo ao teste de correntes parasitas tradicional induz na amostra, saturação magnética parcial ou total. Dessa forma, a permeabilidade magnética local diminui, provocando o aumento da profundidade de penetração das correntes parasitas. Por isso, a técnica MEC é um método interessante para a detecção de defeitos internos e para a caracterização de materiais, já que permite analisar um volume maior do material (CAMERINI, 2015 apud FONSECA 2023).

Se um material ferromagnético for magnetizado, a redução da permeabilidade do material permitirá que as correntes parasitas penetrem mais profundamente. Sempre que a superfície do material apresentar uma falha, as linhas de fluxo magnético se concentrarão, levando a uma maior magnetização e a uma menor permeabilidade. A mudança na permeabilidade altera a impedância da bobina gerando um sinal. O princípio da técnica MEC é apresentado na Figura 12 (ASHER *et al.*, 2016).

Figura 12 - Princípio da técnica MEC.



Fonte: Asher *et al.*, 2016.

Conforme pode ser observado na imagem acima, quando uma bobina com excitação senoidal é colocada acima da amostra de aço magnetizado, o campo de magnetização afetará o sinal da bobina de correntes parasitas de duas maneiras:

Em primeiro lugar, a profundidade de penetração das correntes parasitas (Δ) é aumentada em alguns milímetros, conforme Equação 6:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (6)$$

onde:

f é a frequência de excitação;

σ é a condutividade elétrica e

μ é a permeabilidade magnética da amostra.

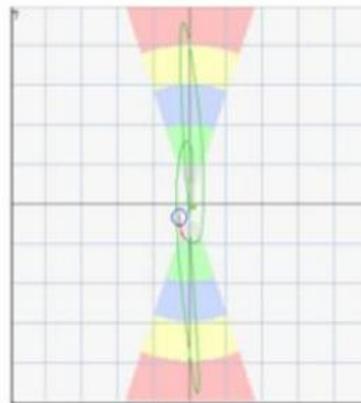
A profundidade de penetração das correntes parasitas, na maioria dos aços ferromagnéticos, é limitada a uma fração de milímetro devido à sua alta permeabilidade. No entanto, com a magnetização da amostra, a profundidade é aumentada em alguns milímetros devido à permeabilidade reduzida.

Em segundo lugar, o campo de correntes parasitas será afetado pelas

perturbações na permeabilidade, causadas pelas descontinuidades. Conseqüentemente, ocorrerá uma variação na impedância da bobina devido aos defeitos na amostra (WASIF, 2022).

Assim como na técnica convencional, o sistema MEC, permite a exibição de um sinal através de um plano de impedância (composto pela resistência e reatância). A amplitude do sinal é codificada por cores para fornecer informações de dimensionamento das descontinuidades presentes no material. Embora os sensores sejam calibrados, não fornecem medidas absolutas, apenas quando comparados com situações conhecidas. A Figura 13 apresenta o plano de impedância e a amplitude do sinal para um sensor MEC. A amplitude do sinal é dada pela distância absoluta da origem, representado pelo eixo horizontal (ASHER *et al.*, 2016 apud RESCALA, 2021).

Figura 13 - Sinal de defeito por correntes parasitas magnéticas. Informação completa do plano de impedância.



Fonte: Adaptado de Asher *et al.*, 2016.

De acordo com a Innospection (2017), uma das vantagens da tecnologia MEC é a capacidade de adaptá-la a diferentes aplicações. Os sensores de correntes parasitas podem ser produzidos de várias maneiras, todas com sua área específica de aplicação. O principal parâmetro para o ajuste a um escopo específico é o tamanho, a força, a frequência e a orientação do campo magnético de detecção. Para fins de discriminação de defeitos, vários parâmetros de detecção podem ser combinados em um sensor. Isto irá gerar vários conjuntos de dados em uma varredura de inspeção e permitirá a classificação de sinais em diferentes tipos de defeitos.

Asher *et al.* (2016) avaliou a viabilidade do uso da técnica de correntes

parasitas magnéticas na inspeção de áreas afetadas por corrosão e trincas em soldas de tubulações de aço carbono, revestidas com Iconel, utilizadas em linhas de oleodutos. Como resultado, foi possível identificar trincas em soldas utilizando o sensor do tipo MEC através da utilização de uma frequência adequada.

Rescala (2021) utilizou redes neurais convolucionais para classificar sinais MEC, coletados durante a inspeção de soldas, com o objetivo de detectar pontos de corrosão. Os sinais foram classificados em duas categorias: soldas sem falhas e defeituosas. Essa pesquisa demonstrou a viabilidade da utilização do MEC em conjunto com redes neurais convolucionais para detectar esse tipo de defeito.

Rocha *et al.*, (2014) conectaram um ímã permanente e diferentes tipos de sondas (bobina diferencial, um sensor do tipo GMR e um sensor do tipo Hall) a um dispositivo móvel para detectar defeitos em chapas de alumínio. Essa abordagem permitiu a medição da variação do campo magnético oposto ao gerado pelas correntes parasitas, demonstrando uma maior sensibilidade da técnica para este tipo de ensaio.

Long *et al.* (2020) utilizaram o método de correntes parasitas magnéticas para distinguir defeitos internos e externos em tubulações de oleodutos. O método demonstrou ser mais robusto e sensível quando comparado com a técnica de vazamento de fluxo magnético (MFL) e à técnica de ECT convencional.

2.6 SIMULADOR TERMOMECÂNICO GLEEBLE

O Gleeble é um equipamento de simulação termomecânica, projetado para simular condições extremas de temperatura, pressão e deformação que os materiais podem encontrar durante processos de fabricação, como forjamento, laminação, soldagem e tratamentos térmicos. Para isso é necessário, a aplicação de forças, as quais atuam simulando condições específicas do processamento, fornecendo deformações no material ensaiado a altas temperaturas. Dentre os esforços que podem ser aplicados no simulador termomecânico, destacam-se a tração, compressão e torção. Também é possível a realização de ensaios com ausência de deformação, apenas com aquecimento, objetivando a simulação de ciclos térmicos, os quais são fundamentais para o estudo de materiais soldados (DOS SANTOS *et al.*,

2015).

Ghosh *et al.* (2020) realizaram ensaios de compressão a quente no simulador termomecânico Gleeble em aço IF, estabilizado com Ti e Nb, com o objetivo de analisar o comportamento da tensão de fluxo do material sob diferentes taxas de deformação, onde foi obtido um alto coeficiente de correlação entre a tensão de fluxo prevista através de simulação e modelagem e os dados experimentais nas regiões das fases γ e α (0,982 e 0,936, respectivamente e um erro absoluto relativamente baixo (7 e 11%, respectivamente).

Chen *et al.* (2019) avaliaram as propriedades mecânicas de um aço com efeito TRIP com 4,5% de Al, quando submetido à tração em alta temperatura em um simulador termomecânico Gleeble. Nesse estudo foi observado pelos autores um aumento da ductilidade ocasionado pelo aumento da ferrita- α e uma boa resistência à trinca em alta temperatura

Guo e Li (2015) investigaram a influência dos elementos de liga, no comportamento de um aço TRIP com alto teor de Mn ao sofrer deformação na faixa de temperatura de 550-650 °C. Os resultados mostraram que a tensão de fluxo aumentou com o aumento do teor de C, Mn, Si e Al, e a energia de ativação de deformação foi aumentada com o teor de Mn e diminuiu com o aumento de C. A transformação da austenita foi promovida pelo aumento do teor de Mn e retardada pelo aumento do teor de C, Si e Al.

O equipamento Gleeble alia a capacidade de aplicar ciclos térmicos e deformação mecânica às amostras de materiais. O aquecimento por resistência direta é aplicado à amostra de teste, de acordo com uma entrada de ciclo de tempo-temperatura, prescrita com o computador da estação de trabalho do sistema. A capacidade de programar um ciclo térmico desejado permite aos usuários, simular processos como soldagem e recozimento contínuo. Além disso, medições de dilatação podem ser feitas durante o programa térmico, que constitui a base para a determinação das temperaturas de transformação de fase. Simultaneamente ao processamento térmico, as amostras podem ser deformadas sob tração ou compressão. Um exemplo de aplicação é o uso de testes de tração em alta temperatura para determinar a ductilidade a quente para produtos específicos de aço (EL-SHENAWY, 2020).

CAPÍTULO III

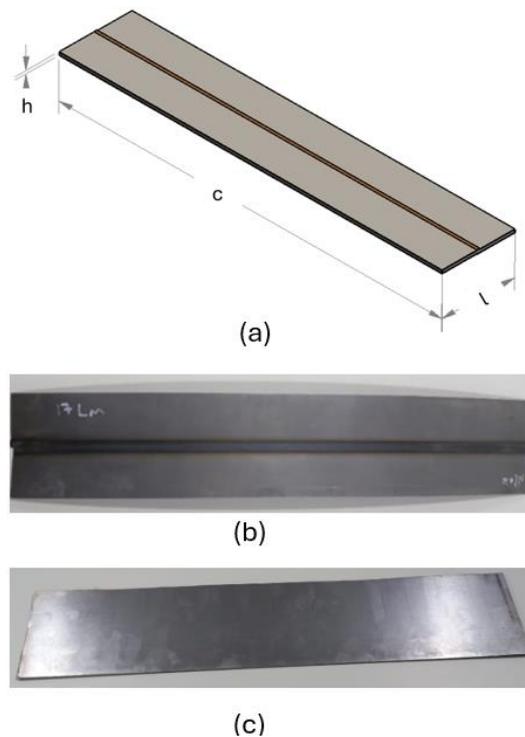
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

O material utilizado neste trabalho foi cedido pela ArcelorMittal, empresa do ramo siderúrgico e de mineração, e consistiu em chapas de aços IF de baixo carbono e TRIP 780, ambas com microestrutura *full-hard* (totalmente encruada), com espessuras de 0,6 mm e 1,5 mm respectivamente.

As chapas foram fornecidas em dois formatos. O primeiro, retirado da própria linha de produção, constando de juntas soldadas sobrepostas de cada tipo de liga. O segundo formato, tratava-se de chapas do metal de base de cada liga, utilizadas na confecção das juntas sobrepostas conforme ilustração e imagens exibidas na Figura 14 e dimensões, na Tabela 1.

Figura 14 - (a) Representação 3D do corpo de prova; (b) corpo de prova soldado; (c) corpo de prova do metal de base .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova

| Material | Dimensões (mm) | | |
|----------|----------------|-----|-----|
| | c | l | h |
| IF | 525 | 100 | 0,6 |
| TRIP780 | 550 | 100 | 1,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da composição química do material foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do SENAI CIMATEC, através de espectrometria de emissão óptica, utilizando o equipamento, marca *Foundry-Master PRO*.

As Tabelas 2 e 3 apresentam respectivamente a composição química das ligas de aços TRIP 780 e IF, de baixo carbono, em porcentagem em peso (%).

Tabela 2 – Análise química do aço TRIP 780, em porcentagem em peso (%).

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,11 | 0,27 | 1,94 | 0,18 | 0,0007 | 0,19 | 0,002 |
| Ni | Al | Cu | Nb | Ti | V | N |
| 0,11 | 0,02 | 0,02 | 0,018 | 0,007 | 0,001 | 0,005 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Análise química do aço IF, em porcentagem em peso (%).

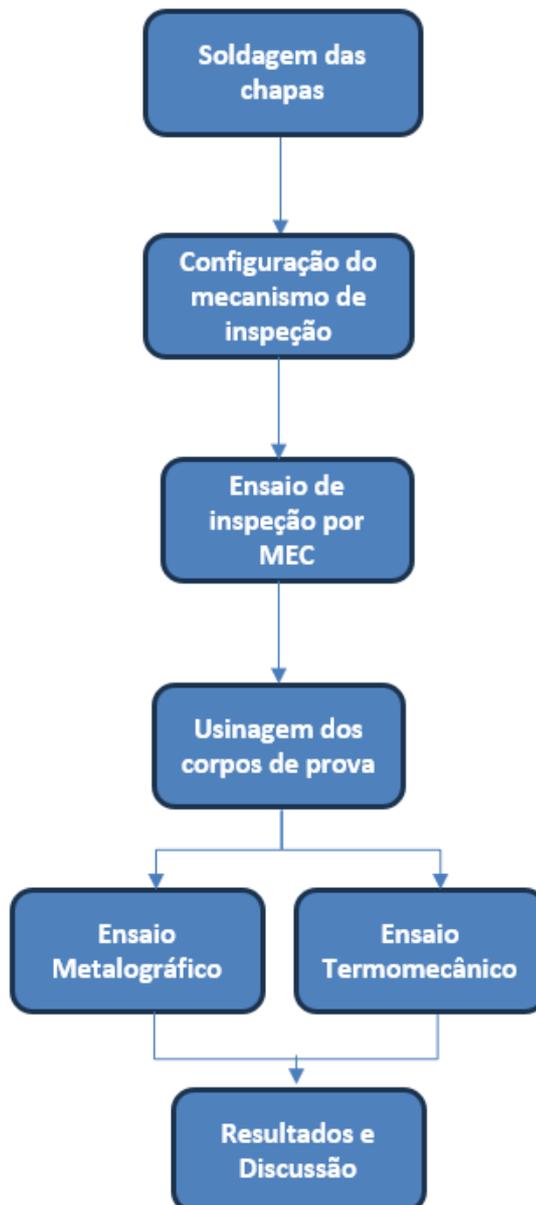
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,0018 | 0,012 | 0,125 | 0,014 | 0,004 | 0,08 | 0,002 |
| Ni | Al | Cu | Nb | Ti | V | N |
| 0,007 | 0,5 | 0,009 | 0,006 | 0,05 | 0,002 | 0,008 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MÉTODOS

A metodologia adotada para a realização desse trabalho pode ser visualizada no fluxograma, exibido na Figura 5, e descrita em uma sequência de etapas, a seguir.

Figura 15 - Fluxograma da metodologia empregada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 SOLDAGEM DAS CHAPAS

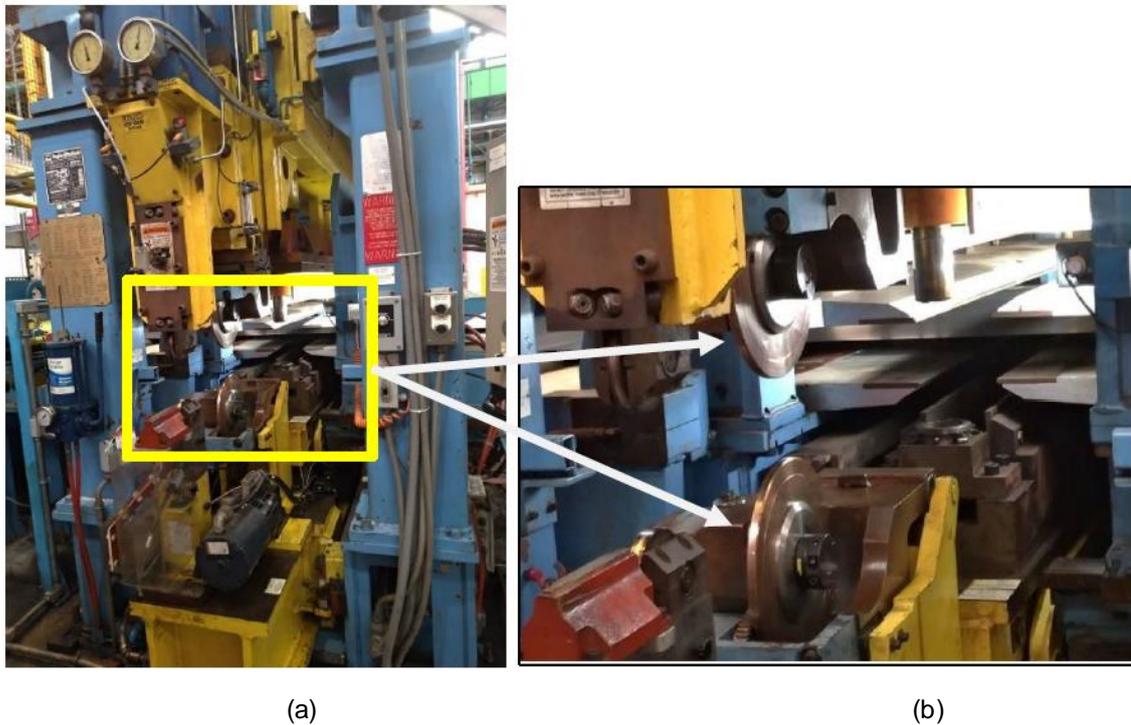
As juntas sobrepostas de cada tipo de aço, IF e TRIP, foram soldadas na linha de produção da ArcelorMittal, pelo processo RSEW. A soldagem é aplicada na união de bobinas de aços laminados a frio, e ocorre na entrada da linha de revestimentos, conforme exibido nas imagens das Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Vista geral da máquina de solda.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - (a) Vista lateral da máquina de solda, (b) detalhe dos discos de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem vários parâmetros do processo RSEW que influenciam a qualidade da solda de forma individual, como força do eletrodo, tempo de ativação e desativação da corrente, corrente e velocidade de soldagem. As propriedades de tração da junta soldada dependem principalmente da corrente e da velocidade de soldagem (KOLEY *et al.*, 2022).

As juntas soldadas de cada tipo de aço, foram obtidas de acordo com dois programas de parâmetros diferentes. No primeiro, foram produzidas em conformidade com os mesmos parâmetros indicados para o processo produtivo de cada tipo de bobina. No segundo, foram produzidas em não conformidade com os parâmetros do processo, com alterações nas correntes de soldagem e do barramento.

As Tabelas 4 e 5 exibem os parâmetros utilizados na soldagem de ambos os tipos de juntas soldadas.

Tabela 4 – Parâmetros de soldagem em conformidade com o processo produtivo.

| Aço | IF | TRIP-780 |
|---------------------------------|-------|----------|
| Espessura (mm) | 0,6 | 1,5 |
| Corrente (A) | 17000 | 16000 |
| Overlap (mm) | 1,7 | 2,4 |
| Força do Disco (N) | 900 | 1725 |
| Força do Aplainador (N) | 1800 | 3000 |
| Corrente do Barramento (A) | 17000 | 16000 |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1200 | 450 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem em não conformidade com o processo produtivo.

| Aço | IF | TRIP-780 |
|---------------------------------|-------|----------|
| Espessura (mm) | 0,6 | 1,5 |
| Corrente (A) | 15000 | 13500 |
| Overlap (mm) | 1,7 | 2,4 |
| Força do Disco (N) | 900 | 1725 |
| Força do Aplainador (N) | 1800 | 3000 |
| Corrente do Barramento (A) | 15000 | 13500 |
| Velocidade de Soldagem (mm/min) | 1200 | 450 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme exibido na Tabela 6, foram produzidos um total de 12 juntas sobrepostas, com o objetivo de avaliar a repetibilidade e a obtenção de um padrão, nos sinais obtidos a partir da inspeção por correntes parasitas magnéticas.

Tabela 6 – Detalhamento dos corpos de prova

| CP | Material | Espessura (mm) | Conformidade | Grupo |
|----|----------|----------------|--------------|-------|
| 1 | IF | 0,6 | OK | 1 |
| 2 | IF | 0,6 | OK | |
| 3 | IF | 0,6 | OK | |
| 4 | IF | 0,6 | N/OK | 2 |
| 5 | IF | 0,6 | N/OK | |
| 6 | IF | 0,6 | N/OK | |
| 7 | TRIP 780 | 1,5 | OK | 3 |
| 8 | TRIP 780 | 1,5 | OK | |
| 9 | TRIP 780 | 1,5 | OK | |
| 10 | TRIP 780 | 1,5 | N/OK | 4 |
| 11 | TRIP 780 | 1,5 | N/OK | |
| 12 | TRIP 780 | 1,5 | N/OK | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 CONFIGURAÇÃO DO MECANISMO DE INSPEÇÃO

As juntas soldadas de cada tipo de aço, IF e TRIP, foram usadas como corpos de prova durante os ensaios de inspeção por MEC.

Para realização dos ensaios, foi necessário fabricar uma estrutura que permitisse fixar os corpos de prova e acomodasse o *scanner* do MEC, conforme imagem exibida na Figura 18. Deste modo, o *lift-off* entre a bobina e as chapas foi estabelecido, assim como a velocidade de escaneamento, mantida a mais constante possível.

Figura 18 - (a) Corpo de prova fixado ao dispositivo; (b) Scanner MEC posicionado sobre dispositivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

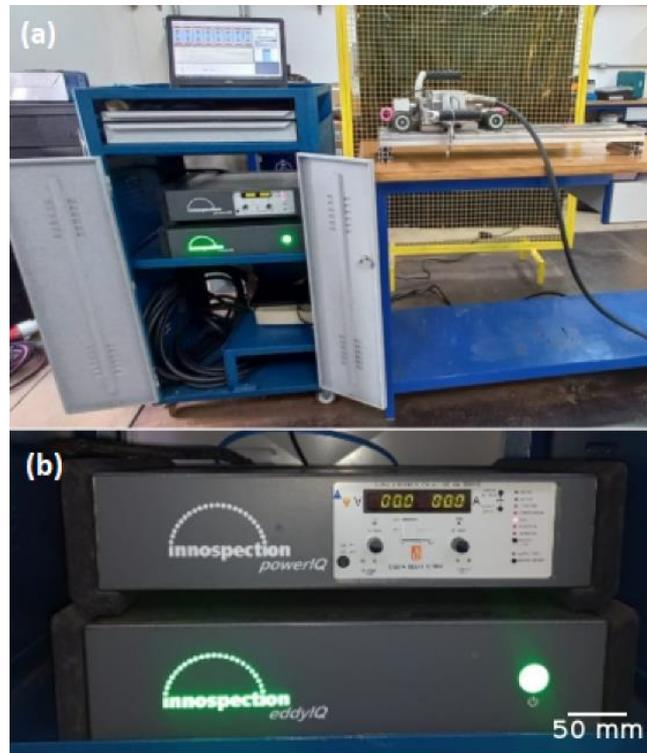
A estrutura facilitou a reprodutibilidade dos ensaios e a eliminação de possíveis fontes de ruído. Além disso, foi responsável por manter a superfície plana do corpo de prova, dado o perfil curvo que adquirem da bobina, como normalmente são transportados.

3.2.3 ENSAIO DE INSPEÇÃO POR MEC

Para o ensaio de correntes parasitas magnéticas, foram utilizados o equipamento MEC-P19TM, uma unidade de escaneamento por varredura, composta por 8 sensores diferenciais; o PowerIQ, uma fonte de alimentação do sistema de inspeção MEC, cuja função é controlar a corrente e a tensão que alimenta o eletroímã; o EddyIQ, responsável por transferir os dados digitalizados para o *software Innospectit*, instalado em um laptop; o dispositivo para fixação das amostras (descrito em 3.2.2) e uma bancada de apoio.

A Figura 19 apresenta a configuração experimental, com os equipamentos acima descritos, para a realização do ensaio de correntes parasitas magnéticas.

Figura 19 - (a) Sistema de inspeção completo, com detalhe da fonte de alimentação (b) PowerIQ e do EddyIQ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

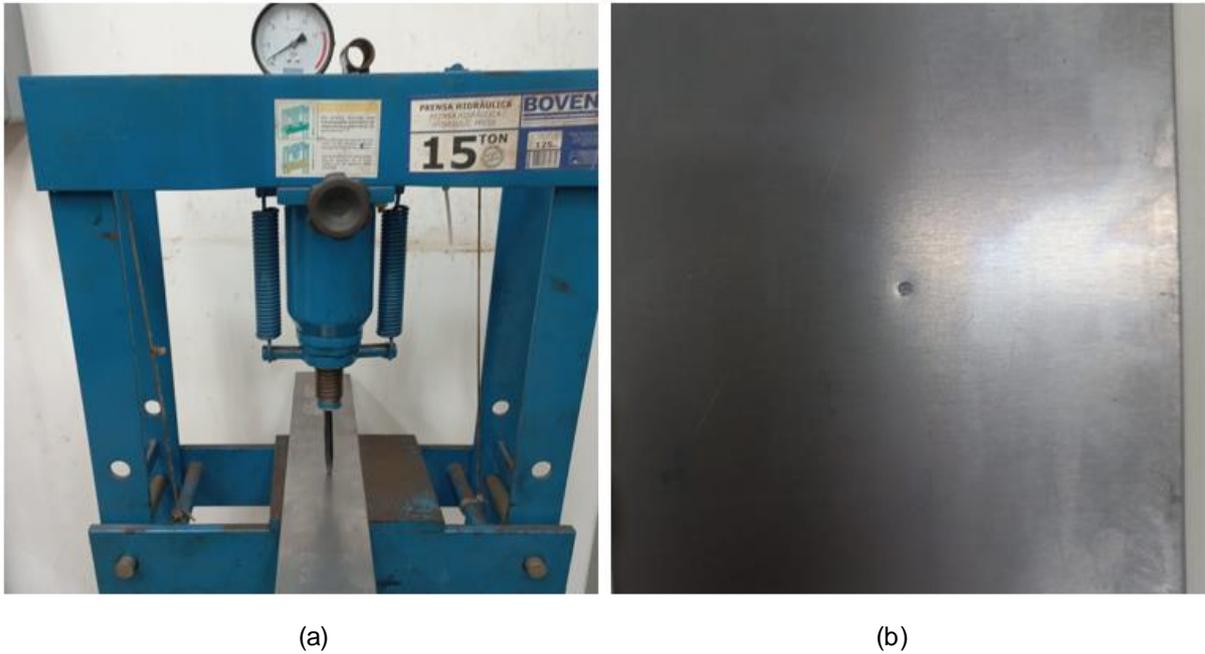
Devido à natureza comparativa da técnica, fez-se necessário calibrar o equipamento antes dos ensaios de correntes parasitas (LOUZADA, 2022).

Foram realizados testes para encontrar os parâmetros funcionais do sensor MEC em corpos de prova do metal de base de cada liga.

Os principais parâmetros definidos foram frequência de excitação das bobinas, ganho e corrente de alimentação do eletroímã. A corrente pode ser ajustada de 0A a 19A. O aumento na intensidade de magnetização leva a uma maior sensibilidade do sistema.

Conforme exibido na Figura 20, cada corpo de prova do metal de base foi puncionado, aplicando-se uma força de compressão de 500N, utilizando uma prensa hidráulica manual, com capacidade de 15 ton, marca *Bonevau*, para criar uma descontinuidade com diâmetro de 6 mm na superfície. Esse procedimento foi feito com o intuito de verificar o comportamento do sinal com e sem a presença do defeito.

Figura 20 - Compressão localizada utilizando prensa hidráulica manual e punção: (a) Corpo de prova montado no equipamento ; (b) descontinuidade formada após compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram testadas diversas combinações de parâmetros com o objetivo de se encontrar a que melhor se adequasse.

Conforme apresentado na Tabela 7, foram utilizados os mesmos parâmetros para a inspeção de ambos os tipos de ligas soldadas, uma vez que não foi possível identificar ganhos significativos com outras combinações.

A repetibilidade dos parâmetros traz vantagens para uma possível futura aplicação industrial, com menos ajustes para a inspeção dos referidos aços.

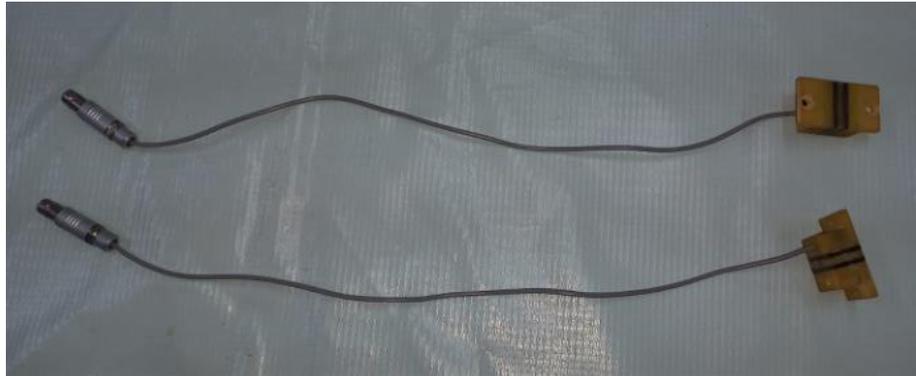
Tabela 7 – Parâmetros MEC utilizados.

| Parâmetros | Aço IF 0,6 | Aço TRIP 1,5 |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| Frequência (Hz) | 80000 | 80000 |
| Ganho (dB) | 45 | 45 |
| Corrente de alimentação (A) | 12 | 12 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A unidade de escaneamento era composta por um conjunto de 8 sensores de correntes parasitas, do tipo diferencial, semelhantes ao apresentado na Figura 21, abaixo.

Figura 21 - Sensor diferencial presente no sistema de escaneamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização de bobina diferencial dupla reduz o ruído causado por leves variações de *lift off* devido ao movimento do scanner (Rocha *et al.*, 2015).

Foram realizadas varreduras longitudinais ao longo do cordão de solda e, para cada uma, foi utilizado apenas os dados do sensor n° 4. Os demais sensores foram desconectados do sistema de escaneamento para evitar ruídos. Devido às limitações do equipamento e da estrutura utilizada para fixar o corpo de prova, todos os testes foram realizados utilizando um *lift-off* de 4 mm.

Para evitar efeito de borda no sinal, cada varredura foi realizada a 100 mm do início e fim da amostra, conforme restrição estabelecida, exibida na Figura 22.

Figura 22 - Indicação dos pontos de início e fim da varredura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 ENSAIO TERMOMECÂNICO

Com o objetivo de se obter uma correlação entre os dados de inspeção por MEC e o comportamento mecânico da solda, quando submetida à tração em altas temperaturas, foram realizados ensaios de tração a quente, usando o simulador termomecânico Gleeble® 540 Welding Simulator, do SENAI CIMATEC, exibido na imagem da Figura 23.

A máquina Gleeble® é uma ferramenta adequada para realização de estudos que envolvam ciclos térmicos complexos, a fim de obter um estado metalúrgico desejado e caracterizar o comportamento mecânico correspondente.

Para realização de testes termomecânicos, o equipamento apresenta elevada confiabilidade no controle de temperatura. As amostras ensaiadas no equipamento Gleeble® são mantidas horizontalmente por garras resfriadas a água e aquecidas por efeito Joule, podendo contar com resfriamento adicional a ar. Um sistema de controle, de circuito fechado, permite o ajuste preciso da entrada de calor com base na temperatura monitorada por termopares, fixados na superfície da amostra (CHOBOUT *et al.*, 2015).

Figura 23 - Simulador Termomecânico Gleeble®



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram testados três corpos de prova de cada grupo exibido na Tabela 6 e mais 3 corpos de prova do metal de base de cada liga, totalizando 18 corpos de prova.

Os corpos de prova testados no referido equipamento foram usinados a partir das juntas sobrepostas das amostras 3, 6, 9 e 12 e de cada metal de base inspecionado por MEC, através do processo de eletroerosão a fio, para evitar aquecimento do material e possíveis alterações na microestrutura do material. A Figura 24 apresenta o equipamento, da marca *Fanuc*, utilizado na fabricação dos corpos de prova.

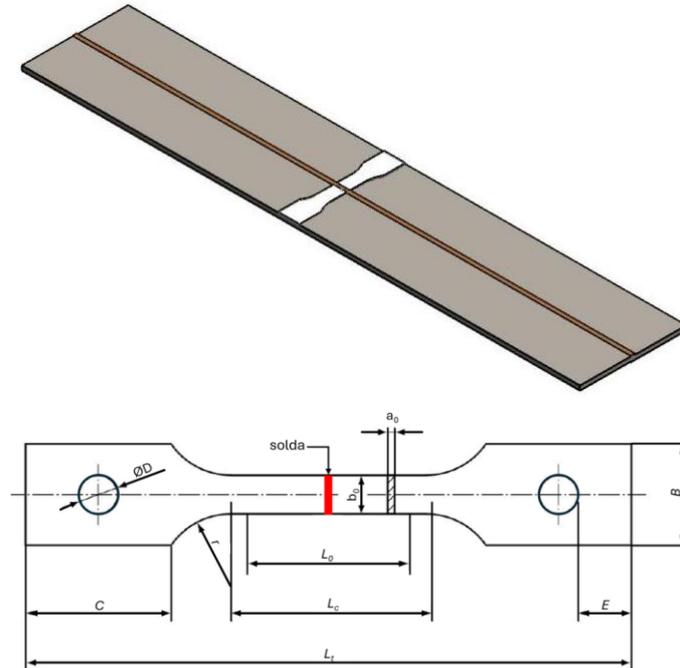
Figura 24 - Máquina de eletroerosão a fio.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os corpos de prova soldados foram usinados transversalmente às juntas sobrepostas, assim como os do metal de base, também no sentido transversal, que corresponde ao sentido de laminação das chapas, seguindo as especificações da norma para ensaios de tração ISO 6892-1 (2019). A Figura 25 ilustra esquematicamente o sentido de extração dos corpos de prova em relação à junta soldada e a Tabela 8, as suas dimensões.

Figura 25 - Diagrama esquemático da localização de extração dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 - Dimensões (em mm) dos corpos de prova usados para ensaio de tração.

| c | bo | Lo | Lc | Lt | D | E | B |
|----|------|----|----|----|---|---|----|
| 15 | 12,5 | 50 | 60 | 90 | 9 | 8 | 20 |

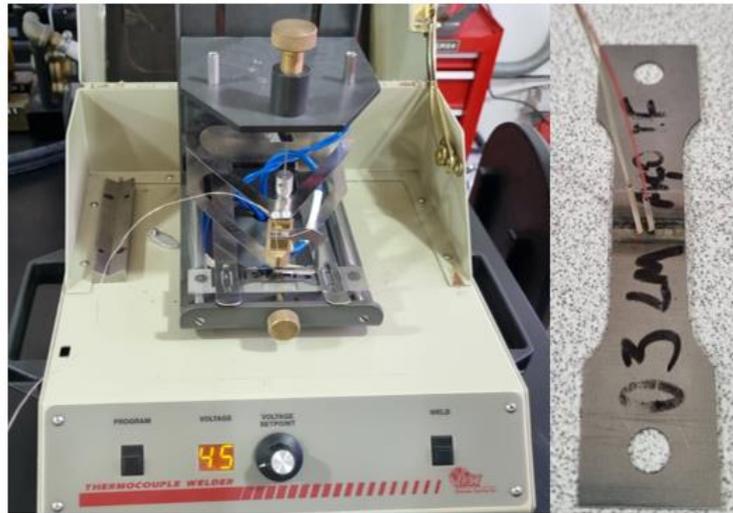
Fonte: Adaptado de ISO 6892-1:2019 Anexo A.

O monitoramento da temperatura foi feito através de um termopar do tipo K (chromel x alumel), com uma faixa de temperatura de trabalho, variando de 0 a 1250°C. Antes dos corpos de prova serem introduzidos na câmara de ensaios da Gleeble®, foi realizada a fixação dos fios do termopar.

O termopar foi soldado na região central da amostra, sobre o cordão de solda, utilizando uma máquina de solda de termopares, marca *DSI*, conforme exibido nas imagens da Figura 26.

Conforme exibido na imagem da Figura 27, as amostras foram mantidas dentro da câmara do simulador termomecânico Gleeble® na posição horizontal e fixadas pelas garras, responsáveis pelo movimento simétrico, realizado durante o ensaio.

Figura 26 - (a) Equipamento utilizado na soldagem do termopar (b) Termopar fixado sobre o cordão de solda.

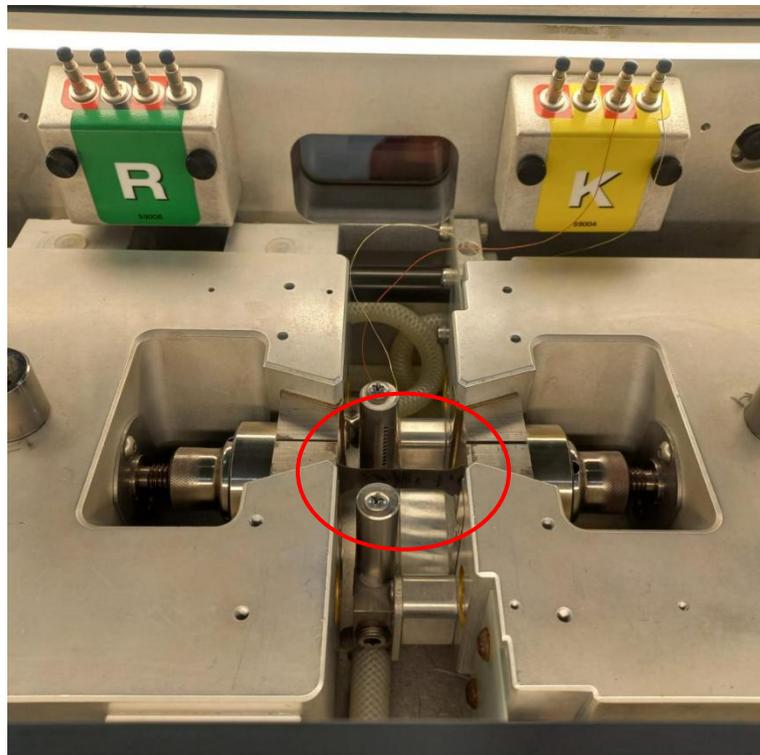


(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 - Corpo de prova montado na câmara do simulador termomecânico Gleeble®.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os ciclos térmicos utilizados nos ensaios, exibidos na Tabela 9, foram fornecidos pela ArcelorMittal, com base nos registros de processo. O procedimento adotado para o ensaio de tração a quente consistiu no aquecimento do corpo de prova até a temperatura de patamar, seguindo a taxa de aquecimento indicada. Em seguida, com a uniformização da temperatura, de acordo com o tempo de encharque indicado para cada material, foi aplicada a carga de tração até o ponto de ruptura.

Tabela 9 – Ciclos térmicos aplicados às amostras no Gleeble.

| Amostra | Temperatura de patamar | Tempo de encharque | Taxa de aquecimento | Taxa de resfriamento | Taxa de deformação |
|----------|------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| IF | 810°C | 40 s | 10°C/s | 50°C/s | 0,0014 m/s |
| TRIP 780 | 850°C | 100 s | 3°C/s | 30°C/s | 0,0014 m/s |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.5 ENSAIO METALGRÁFICO

A análise metalográfica foi realizada utilizando os equipamentos instalados no Laboratório de Caracterização do SENAI CIMATEC.

As amostras foram retiradas da seção transversal do cordão de solda, embutidas a frio com resina poliéster e, posteriormente, lixadas manualmente em uma lixadeira metalográfica orbital, da marca *Arotec*, utilizando lixas d'água de granulometrias 60, 320, 600, 800 e 1200 mesh.

Em seguida, as amostras foram polidas em uma politriz, da marca *Pantec*, com um disco de feltro e partículas de alumina, FORTEL, com 3 µm, em meio líquido.

Para revelação macroestrutural, foi realizado o ataque químico por imersão, utilizando Nital, uma solução de ácido nítrico diluído em álcool etílico a 2%, durante 15 segundos. Após o ataque, as amostras foram lavadas em água corrente e, em seguida, secas utilizando soprador térmico.

Após a preparação metalográfica, as amostras foram observadas utilizando-se um microscópio óptico, modelo MT7100, da empresa MEIJI.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de tração, realizados no simulador termomecânico Gleeble®. O comportamento mecânico foi correlacionado aos planos de impedância obtidos da inspeção feita por MEC.

Os ensaios de inspeção e de tração foram realizados em corpos de prova obtidos de chapas de aços IF e TRIP, soldadas com parâmetros com e sem conformidade com o processo produtivo de bobinas e em corpos de prova do metal de base de cada liga.

Para a inspeção MEC, foram testados 12 corpos de provas, subdivididos em 4 grupos, cada um com 3 corpos de prova de cada condição, conforme Tabela 6. Para efeito de comparação, foram testados ainda, 2 corpos de prova do metal de base, um para cada liga, chamados de amostras de referência, totalizando, portanto, 14 amostras.

Para os ensaios de tração, foram testados dezoito corpos de prova, três de cada grupo de aço soldado, e mais seis, chamadas amostras de referência, sendo três do metal de base de cada liga.

Além disso, são exibidos os resultados dos ensaios macrográficos, conduzidos com o objetivo de avaliar a homogeneidade dos cordões de solda e a presença de possíveis descontinuidades.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO NO SIMULADOR TERMOMECÂNICO GLEEBLE - CORPOS DE PROVA DE AÇOS IF (GRUPOS 1 E 2)

Na Tabela 10 são apresentadas, as propriedades mecânicas dos corpos de prova dos Grupos 1 e 2 do aço IF, soldado com parâmetros com e sem conformidade com o processo produtivo, e das amostras de referência.

O gráfico da Figura 28, exhibe as curvas tensão-deformação levantadas durante os ensaios.

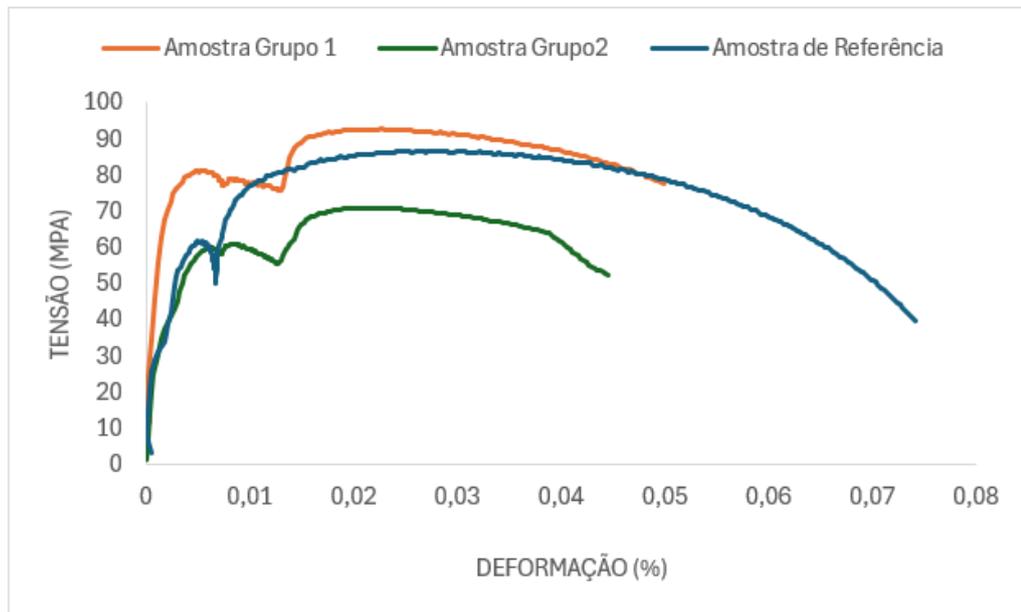
Tabela 10 – Propriedades de tração das amostras dos grupos 1, 2 comparadas às amostras de referência do aço IF.

| | Corpo de Prova | Limite de Escoamento (MPa) | Limite de Resistência (MPa) | Alongamento (%) |
|------------------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Grupo 1 | 1 | 89 | 99 | 5,4 |
| | 2 | 73 | 91 | 5,1 |
| | 3 | 79 | 90 | 5,9 |
| | Média ± Desvio | 83,66 ± 7,4 | 93,3 ± 4 | 5,45 ± 0,14 |
| Grupo 2 | 4 | 63 | 73 | 4,6 |
| | 5 | 55 | 75 | 5,1 |
| | 6 | 62 | 74 | 4,2 |
| | Média ± Desvio | 60 ± 3,55 | 74 ± 1 | 4,6 ± 0,74 |
| Amostras de Referência | R1 | 68 | 88 | 8,5 |
| | R2 | 62 | 82 | 7,3 |
| | R3 | 60 | 90 | 8,3 |
| | Média ± Desvio | 63,3 ± 3,4 | 86,6 ± 3,4 | 8 ± 0,52 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível verificar, através dos valores médios, dispostos na Tabela 10 para os corpos de prova do Grupo I, a soldagem realizada com parâmetros em conformidade com o processo produtivo promoveu juntas soldadas mais resistentes que o metal de base. Os valores de resistência ao escoamento e de resistência à tração, aumentados em cerca de 24% e 7% respectivamente, podem ser atribuídos a um ou mais fatores combinados, como o refinamento da microestrutura na zona fundida, e ao controle preciso da energia de soldagem.

Figura 28 – Curva Tensão x Deformação IF.



Fonte: Elaborado pelo autor

O processo de soldagem RSEW envolve aquecimento e resfriamento rápidos, que podem causar mudanças significativas na microestrutura do aço, as quais afetam consideravelmente o comportamento da junta soldada (GONÇALVES, *et al.*, 2020).

O controle de soldagem obtido por este processo ocasiona redução na taxa de resfriamento da zona fundida (ZF), aumentando a profundidade de penetração e, conseqüentemente, a resistência da solda. Na soldagem do aço IF, a redução do ciclo térmico pode contribuir para a formação de grãos de ferrita relativamente finos na ZF, ocasionando aumento da resistência mecânica, comparada ao metal de base (BENI, *et al.*, 2019; JANARDHANA, *et al.*, 2020).

Por outro lado, ao mesmo tempo em que se observou um aumento nas propriedades de resistência à tração e ao escoamento, ocorreu uma redução da ductilidade com a soldagem.

Santos (2017) afirma que o baixo teor de carbono e a estabilização da matriz, livre de intersticiais proporcionam elevada ductilidade, levando aos altos níveis de estampabilidade e alto alongamento uniforme, peculiares às ligas de aço IF.

Com o rápido ciclo térmico envolvido durante a união por RSEW, a possível formação de precipitados de Ti e Nb dispersos na matriz pode ter contribuído para a

redução de cerca de 33% na ductilidade. No entanto, investigações posteriores são necessárias para confirmar esta hipótese e determinar com precisão, os mecanismos responsáveis por essa redução na capacidade de deformação.

Comparando o comportamento mecânico dos corpos de prova do Grupo 1 aos do Grupo 2, houve uma tendência de redução das propriedades medidas em tração, quando a soldagem foi realizada com parâmetros distintos do processo produtivo.

Considerando a média dos resultados nos 3 ensaios realizados, para cada corpo de prova, a redução observada para os corpos de prova do Grupo 2, comparada aos corpos de prova do Grupo 1, foi de cerca de 28% para a tensão limite de escoamento e 21%, para a resistência à tração.

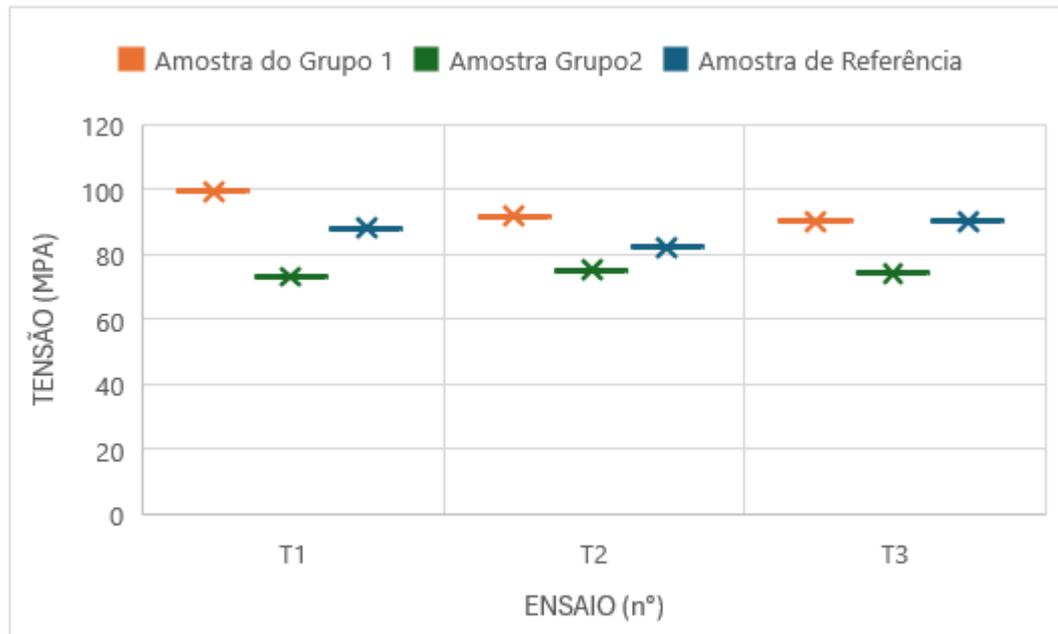
A tendência de redução nas propriedades observadas pode ser atribuída às mudanças microestruturais, já que análise macrográfica não revelou defeitos nas juntas produzidas com níveis de corrente, cerca de 20% inferiores aos que costumam ser usados durante o processo produtivo.

Em uma situação em que as demais variáveis do processo se mantenham constantes, a redução na corrente de soldagem acarreta numa diminuição da energia de soldagem fornecida à junta. A menor quantidade de calor cedida para a união das peças poderá comprometer a integridade mecânica da junta, já que afeta diretamente a profundidade e largura do cordão de solda (KOLEY *et al.*, 2022, MOREIRA, 2008).

Em seu trabalho, Soares *et al.* (2021), ao avaliar a influência da variação da corrente elétrica no processo de soldagem a resistência por pontos, aplicados na montagem de carrocerias em uma indústria automotiva, observou que a redução nos valores de corrente influenciaram negativamente a qualidade dos pontos de solda. Os mesmos se desprenderam após a soldagem e com a realização de ensaio com talhadeira, quando utilizados valores de corrente cerca de 43% e 22% inferiores ao que conferiu bons resultados.

A Figura 29 apresenta um gráfico com o agrupamento dos valores de resistência à tração em intervalos definidos.

Figura 29 – Valores de resistência a tração do aço IF de 0,6mm obtidos do ensaio no Gleeble.



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que os valores dessa propriedade para os corpos de prova do Grupo 2 estão abaixo de 80 MPa, já para as amostras de referência e do Grupo 1, estão variando entre 80 MPa e 100 MPa.

4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO NO SIMULADOR TERMOMECÂNICO GLEEBLE - CORPOS DE PROVA DE AÇOS TRIP (GRUPOS 3 E 4)

Na Tabela 11 são apresentadas, as propriedades mecânicas dos corpos de prova dos Grupos 3 e 4, do aço TRIP, soldado com parâmetros com e sem conformidade com o processo produtivo, e das amostras de referência.

O gráfico da Figura 30 exibe as respectivas curvas tensão-deformação, levantadas durante os ensaios.

Tabela 11 – Propriedades obtidas da curva tensão deformação para as amostras do aço TRIP.

| | Corpo de Prova | Limite de Escoamento (MPa) | Limite de Resistência (MPa) | Alongamento (%) |
|------------------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Grupo 3 | 7 | 122 | 142 | 6 |
| | 8 | 113 | 120 | 4,0 |
| | 9 | 119 | 141 | 4,7 |
| | Média ± Desvio | 118 ± 3,74 | 134,3 ± 14 | 4,9 ± 0,82 |
| Grupo 4 | 4 | 84 | 118 | 3,9 |
| | 5 | 112 | 112 | 3,2 |
| | 6 | 104 | 105 | 3 |
| | Média ± Desvio | 100 ± 11,7 | 111,7 ± 5,31 | 3,36 ± 0,38 |
| Amostras de Referência | R4 | 118 | 136 | 7,9 |
| | R5 | 112 | 127 | 7,9 |
| | R6 | 134 | 157 | 10 |
| | Média ± Desvio | 121,3 ± 9,28 | 140 ± 12,56 | 8,6 ± 1 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível verificar, através dos valores médios, dispostos na Tabela 11, a soldagem realizada com parâmetros em conformidade com o processo produtivo não promoveu diferenças significativas entre os valores das propriedades, resistência ao escoamento e resistência à tração. Quando são comparados os corpos de prova do Grupo 3 às amostras de referência do metal de base, a diferença relativa observada para os valores médios de resistência ao escoamento e de resistência à tração, foi de cerca de 3% e 4% respectivamente. Já quando se observa a ductilidade, verificou-se uma queda de 43% na capacidade de deformação.

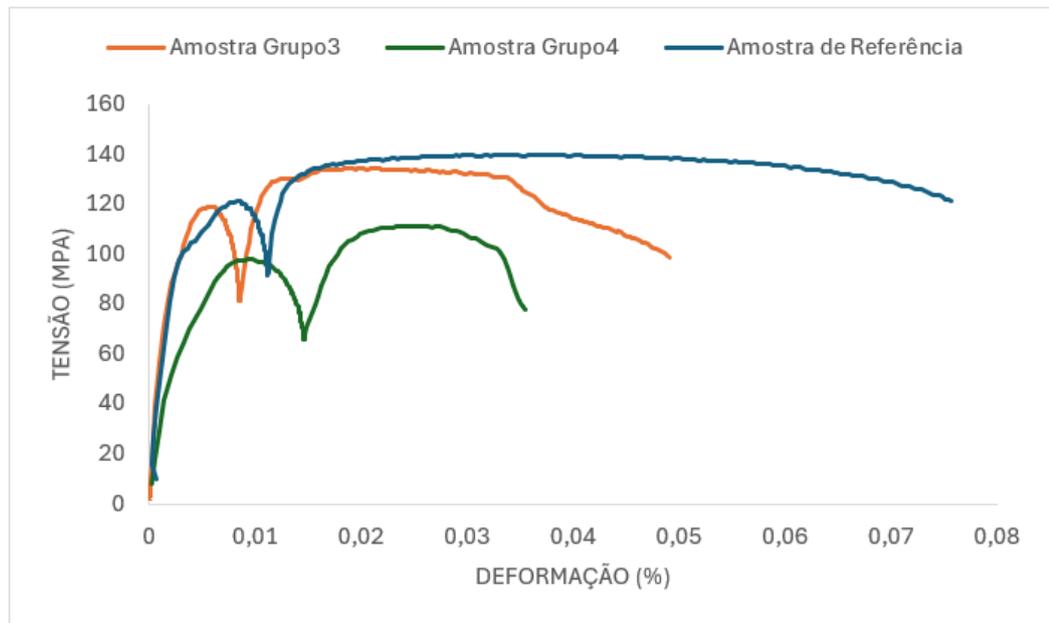
No entanto, ao comparar os corpos de prova dos Grupos 3 e 4, verificou-se uma tendência de redução das propriedades medidas em tração, para o aço TRIP quando a soldagem foi realizada com parâmetros distintos do processo produtivo.

Considerando a média dos resultados dos 3 ensaios realizados para cada corpo de prova, a redução observada para o Grupo 4, comparada ao Grupo 3, foi de cerca

de 15% para a tensão limite de escoamento e 17%, para a resistência à tração.

Como a soldagem foi realizada com parâmetros distintos do processo produtivo, sobretudo com valores de corrente 16% inferiores ao normalmente empregado, vários fatores podem ter contribuído para o decréscimo das propriedades, entre estes, os relacionados à formação de microestruturas menos favoráveis, combinados à presença de defeitos, os quais comprometem a integridade da solda (MAZAFERRO, 2008).

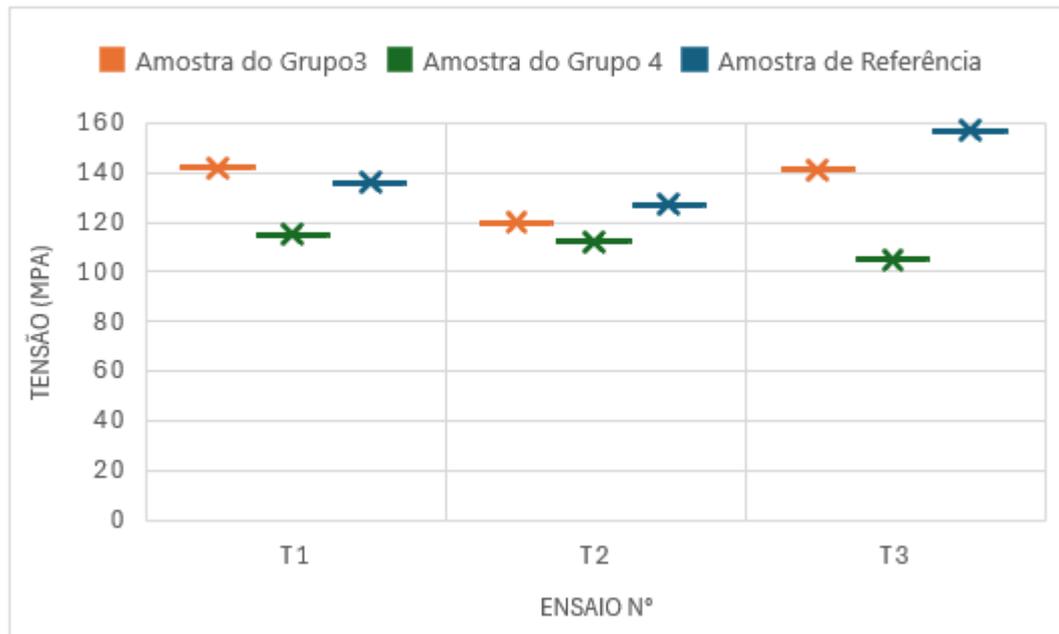
Figura 30 – Curva Tensão x Deformação aço TRIP.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 31 apresenta um gráfico com o agrupamento dos valores de resistência à tração em intervalos definidos.

Figura 31 - Valores de resistência a tração do aço TRIP com 1,5 mm de espessura, obtidos do ensaio no Gleeble.



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que os valores de resistência à tração dos corpos de prova do Grupo 4 estão entre 100 MPa e 120 MPa, já a das amostras de referência e do Grupo 3 estão com os valores variando entre 120 MPa e 160 MPa.

A otimização dos parâmetros de soldagem RSEW, garantindo a formação de uma linha de solda contínua e homogênea é fundamental para o seu desempenho mecânico satisfatório, sendo a corrente de soldagem, conforme demonstrado nos resultados acima expostos, o fator que mais afeta a qualidade da união (BENI, *et al.*, 2019).

4.3 ANÁLISE MACROGRÁFICA

Conforme descrito em 3.7, a análise macrográfica foi realizada em amostras retiradas da seção transversal do cordão de solda e observadas em microscópio

óptico, com o objetivo de avaliar a homogeneidade dos cordões e a presença de descontinuidades.

Quando a soldagem é utilizada em processos de produção em massa, as dimensões da zona fundida costumam ser usadas para medir a qualidade da solda, correlacionando esse parâmetro à sua resistência (Akulwar *et. al.*, 2021)

Akulwar *et. al.*, (2021) correlacionaram a influência da variação da corrente na soldagem a ponto por resistência com a mudança do diâmetro da zona fundida e da resistência à tração em quatro classe de aços automotivos, IF 270, TRIP 690, TRIP 780, DP 780, comprovando que a resistência mecânica é diretamente proporcional ao diâmetro da zona fundida.

Neste trabalho, o dimensionamento da zona fundida foi realizado utilizando o *software* para processamento de imagem de domínio público, *ImageJ*, com o objetivo de auxiliar na correlação dos sinais de impedância, obtidos através da inspeção MEC, com o comportamento mecânico das juntas soldadas.

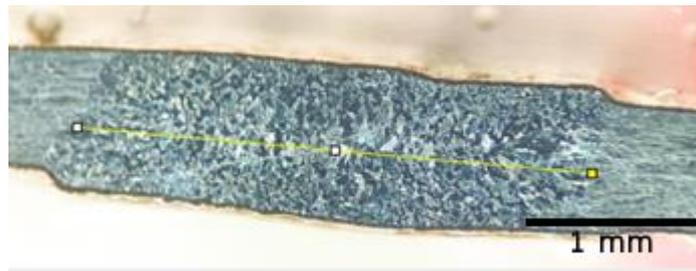
4.3.1 ANÁLISE MACROGRÁFICA DO AÇO IF (GRUPOS 1 E 2)

As Figuras – 32 e 33 apresentam as seções transversais das juntas soldadas obtidas de corpos de prova do aço IF, Grupos 1 e 2 respectivamente.

Figura 32 – Macrografia do aço IF (Grupo1). Aumento: 20x.



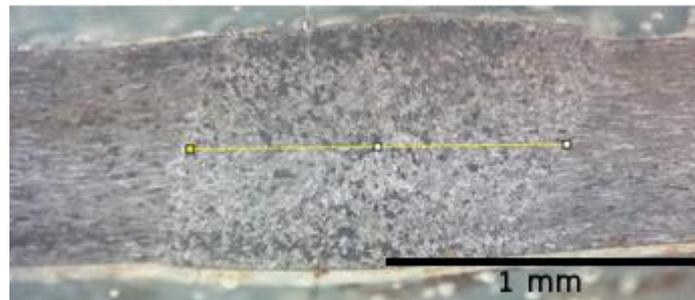
(a)



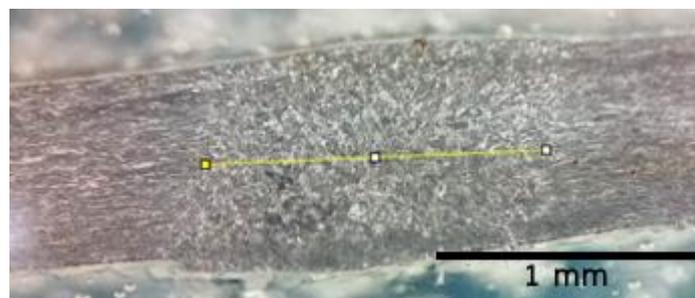
(b)

Fonte: Elaborado pelo auto

Figura 33 – Macrografia do aço IF (Grupo2). Aumento: 30x.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Para ambos os grupos, é possível verificar uma solda homogênea, totalmente fundida, sem defeitos que possam comprometer sua integridade. No entanto, percebe-se uma redução na zona de transformação microestrutural para o corpo de prova do Grupo 2, soldado com parâmetros fora de conformidade.

A Tabela 12 apresenta a extensão da região de transformação microestrutural para os corpos de prova dos Grupos 1 e 2.

Tabela 12 – Extensão da região de transformação microestrutural dos corpos de prova de aços IF (Grupos 1 e 2).

| | Corpo de Prova | Região de transformação microestrutural (mm) |
|---------|----------------|--|
| Grupo 1 | 1 | 2,64 |
| | 2 | 2,71 |
| | Média ± Desvio | 2,68 ± 0,35 |
| Grupo 2 | 1 | 1,05 |
| | 2 | 1,07 |
| | Média ± Desvio | 1,06 ± 0,01 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme observado na Tabela 12, a região de transformação microestrutural dos corpos de prova do Grupo 1 foi cerca de 60% maior que a do Grupo 2, onde a corrente de soldagem foi reduzida em 20%.

A corrente de soldagem mais alta, usada na soldagem dos corpos de prova do Grupo 1, resultou em uma junta sem defeitos, provavelmente com uma microestrutura mais refinada, com precipitados estáveis, que aumentaram a resistência à tração e ao escoamento. No caso dos corpos de prova do Grupo 2, a menor corrente de soldagem não foi suficiente para otimizar a microestrutura da mesma forma, resultando em valores de resistência inferiores, apesar da integridade visual da solda.

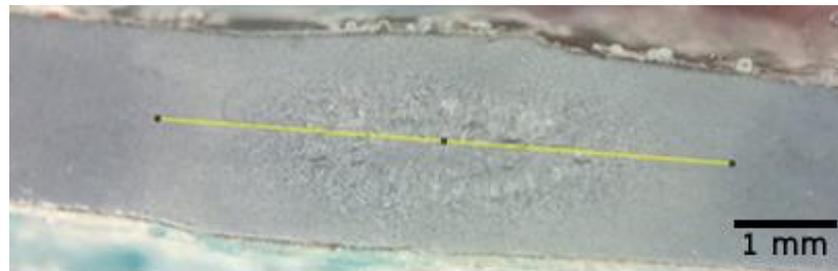
4.3.2 ANÁLISE MACROGRÁFICA DO AÇO TRIP (GRUPOS 3 E 4)

As Figuras 34 e 35 apresentam as seções transversais das juntas soldadas obtidas de corpos de prova do aço TRIP, Grupos 3 e 4, respectivamente e a Tabela 13, a extensão da região de transformação microestrutural para os corpos de prova dos Grupos 3 e 4.

Figura 34 – Macrografia do aço TRIP (Grupo3). Aumento: 20x.



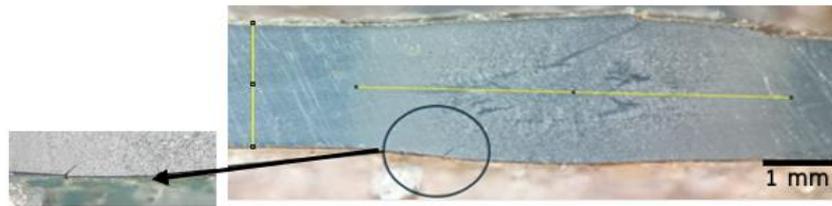
(a)



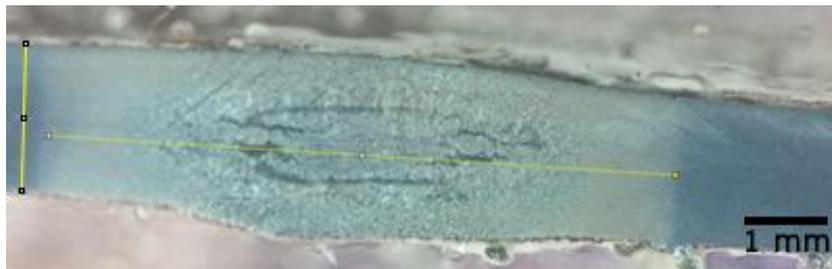
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Macrografia do aço TRIP (Grupo 4). Aumento: 20x.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 – Extensão da região de transformação microestrutural dos corpos de prova de aços TRIP (Grupos 3 e 4).

| | Corpo de Prova | Região de transformação microestrutural (mm) |
|---------|----------------|--|
| Grupo 3 | 1 | 4,6 |
| | 2 | 4,44 |
| | Média ± Desvio | 4,52 ± 0,08 |
| Grupo 4 | 1 | 4,23 |
| | 2 | 4,32 |
| | Média ± Desvio | 4,27 ± 0,045 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Não foram observadas diferenças significativas na extensão da região de transformação microestrutural, entre os corpos de prova dos grupos 3 e 4, com a redução da corrente de soldagem. No entanto, o aspecto visual da solda revelou falta

de homogeneidade em ambos os casos, sendo esta mais acentuada nos corpos de prova do Grupo 4.

A falta de homogeneidade ocorre quando o calor de soldagem é insuficiente para a consolidação da união. Esse problema comprometeu a integridade da junta soldada, resultando em uma resistência mecânica e capacidade de deformação inferiores ao metal de base da referida liga. Para evitar fratura da solda é essencial que a união seja homogênea e esteja livre de qualquer tipo de defeito (BONIKILA, *et al.*, 2022, BATISTA, 2011).

Além da menor homogeneidade nos corpos de prova do grupo 4, foi observado uma falta de fusão na interface da junta, conforme destacado na imagem da Figura 35a, o que justifica a redução nos valores de resistência para as soldas desse grupo.

A observação de falta de homogeneidade nas juntas soldadas de aço TRIP, obtidas com parâmetros de soldagem com e sem conformidade com o processo produtivo aponta para a necessidade de ajustes dos parâmetros do processo, incluindo a corrente de soldagem, velocidade de soldagem e pressão dos eletrodos. A otimização das variáveis é essencial para garantir uma fusão completa e a formação de uma solda forte e homogênea.

4.3 ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS MAGNÉTICAS

Conforme descrito no item 3.2.3, foram realizadas varreduras longitudinais ao longo do cordão de solda de cada corpo de prova, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 7. O objetivo foi o de avaliar o comportamento do sinal MEC no que diz respeito aos corpos de prova de aços IF e TRIP, soldados com parâmetros com e sem conformidade com o processo produtivo.

4.3.1 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS FUNCIONAIS PARA O ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS MAGNÉTICAS

Com o objetivo de se obter os parâmetros funcionais do ensaio de inspeção MEC, descritos na Tabela 7, os sinais foram coletados sob duas condições distintas: na primeira, a partir das chapas dos aços IF e TRIP, na condição como recebido, e na

segunda, após o punctionamento, para simular a presença de um defeito superficial, conforme explicado no item 3.2.3.

Muitas variáveis podem afetar o comportamento do plano de impedância, essas variáveis consistem em temperatura da amostra, *lift-off*, efeito de borda e frequência da corrente (SHEIK AMIRI, *et. a.*, 2010).

Ao analisar amostras soldadas com defeitos induzidos, Rescala (2021) apontou uma maior sensibilidade no comportamento da reatância para homogeneidades localizadas abaixo da superfície do que para o componente de resistência.

Ao aplicar a técnica de correntes parasitas em ambiente industrial e o efeito da temperatura resultar em análises incorretas sobre a resistência, Mao *et. al.*, (2016) avaliaram apenas o comportamento da reatância para medição de espessura de tubos metálicos.

Considerando as observações anteriores e percebendo uma maior sensibilidade no sinal da reatância durante os ajustes de parâmetros para as amostras de referência, com e sem defeito superficial, neste trabalho foi analisado apenas o comportamento da reatância indutiva no sinal de correntes parasitas magnéticas.

A Figura 36 apresenta os gráficos com a reatância indutiva, obtida a partir dos sinais de correntes parasitas das amostras de referência com e sem o defeito superficial.

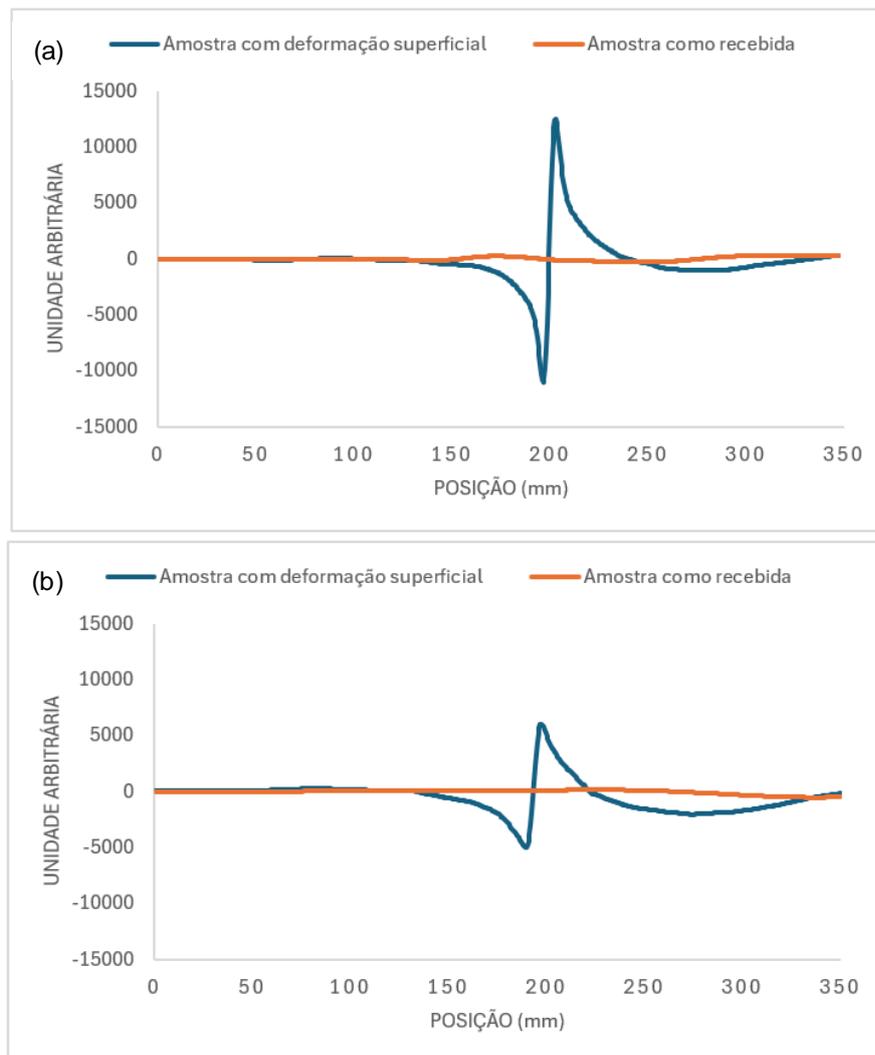
O eixo horizontal representa a posição em que ocorre a aquisição dos sinais, em mm, e o eixo vertical, a amplitude do sinal. A amplitude do sinal é dada no *software Innospectit* como a distância euclidiana máxima entre dois pontos, sendo que a amplitude de pico do sinal é dada em centésimo de divisões. Como a conversão dos dados de amplitude por meio do *Innospectit* para uma unidade de medida do SI não é clara e o objetivo desse trabalho é avaliar o comportamento do sinal, foi utilizado para o eixo vertical uma unidade arbitrária.

Buscou-se identificar mudanças na forma ou na posição das curvas que pudessem ser associadas aos parâmetros de soldagem usados na obtenção das juntas. Conforme já demonstrado, as juntas de ambos tipos de aço, IF e TRIP, soldadas com parâmetros de soldagem distintos do processo produtivo exibiram comportamento mecânico inferior.

De acordo com os gráficos da Figura 36, é possível verificar um pico no sinal na

região central dos corpos de prova, que corresponde ao local deformado, produzido pelo funcionamento.

Figura 36 - Comportamento da reatância indutiva do sinal MEC para as amostras de referência: (a) Aço IF; (b) Aço TRIP.



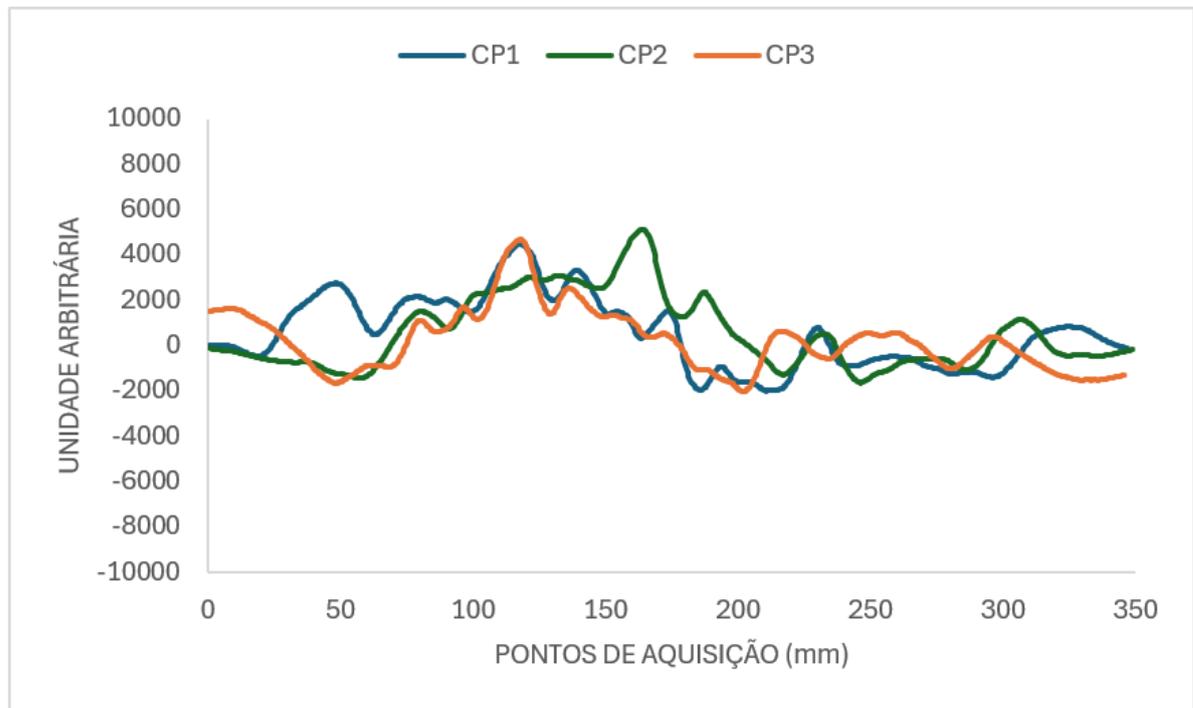
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS EM AMOSTRAS DE AÇOS IF (GRUPOS 1 E 2)

O comportamento da reatância indutiva obtido da inspeção MEC nos corpos de prova do Grupo 1, feitos de aço IF, soldado com parâmetros em conformidade com o

processo produtivo, pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 - Comportamento da reatância indutiva dos corpos de prova de Aços IF (Grupo1)

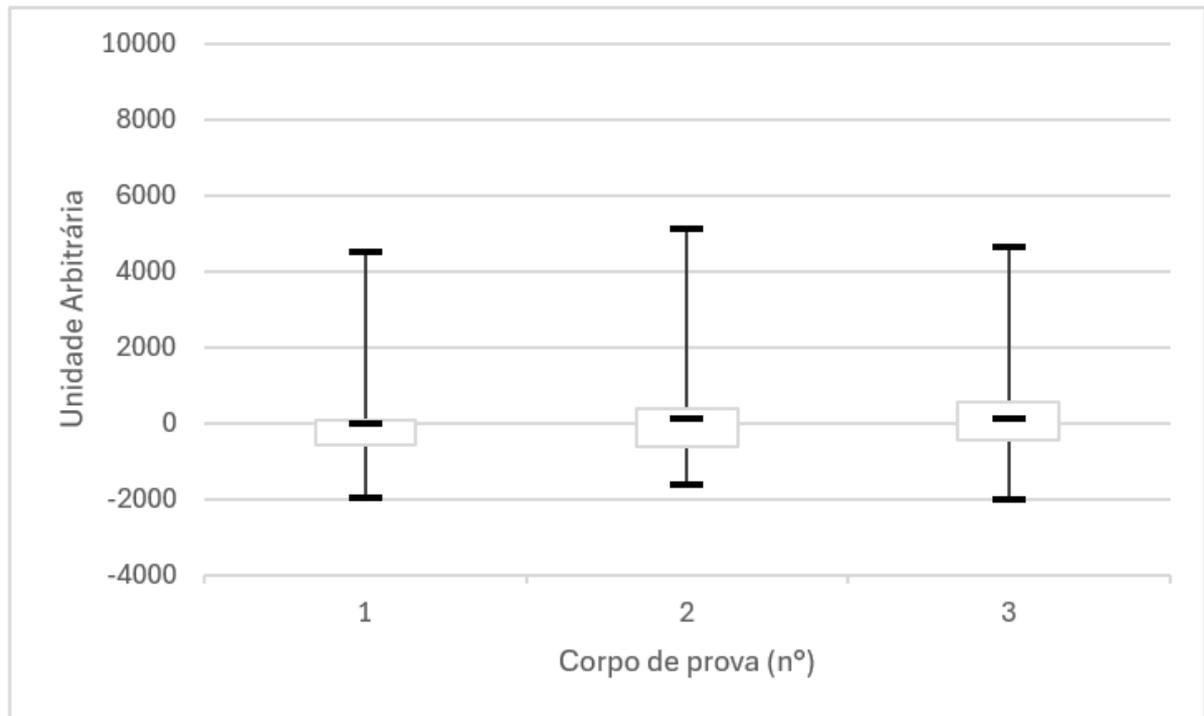


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 38 apresenta um *boxplot* dos sinais de MEC obtidos dos corpos de prova de aço IF, pertencentes ao Grupo 1. O *boxplot* exibe a distribuição das medidas de reatância com a mediana, quartis (Q1 e Q3), os intervalos de variação, e nenhum valor atípico fora dos intervalos.

A linha dentro da caixa representa a mediana do conjunto de dados, que é o valor que divide o conjunto em duas metades iguais. A caixa se estende do primeiro quartil (Q1) ao terceiro quartil (Q3). O primeiro quartil é o valor abaixo do qual se encontra 25% dos dados, e o terceiro quartil é o valor abaixo do qual se encontra 75% dos dados. A largura da caixa ($Q3 - Q1$) é chamada de intervalo interquartil (IQR) e representa a dispersão central dos dados. As linhas que se estendem das extremidades da caixa indicam a faixa de valores que não são considerados valores atípicos (NETO, *et. al.*, 2017).

Figura 37 - Boxplot dos sinais MEC para os Corpos de Prova de Aço IF (Grupo 1).



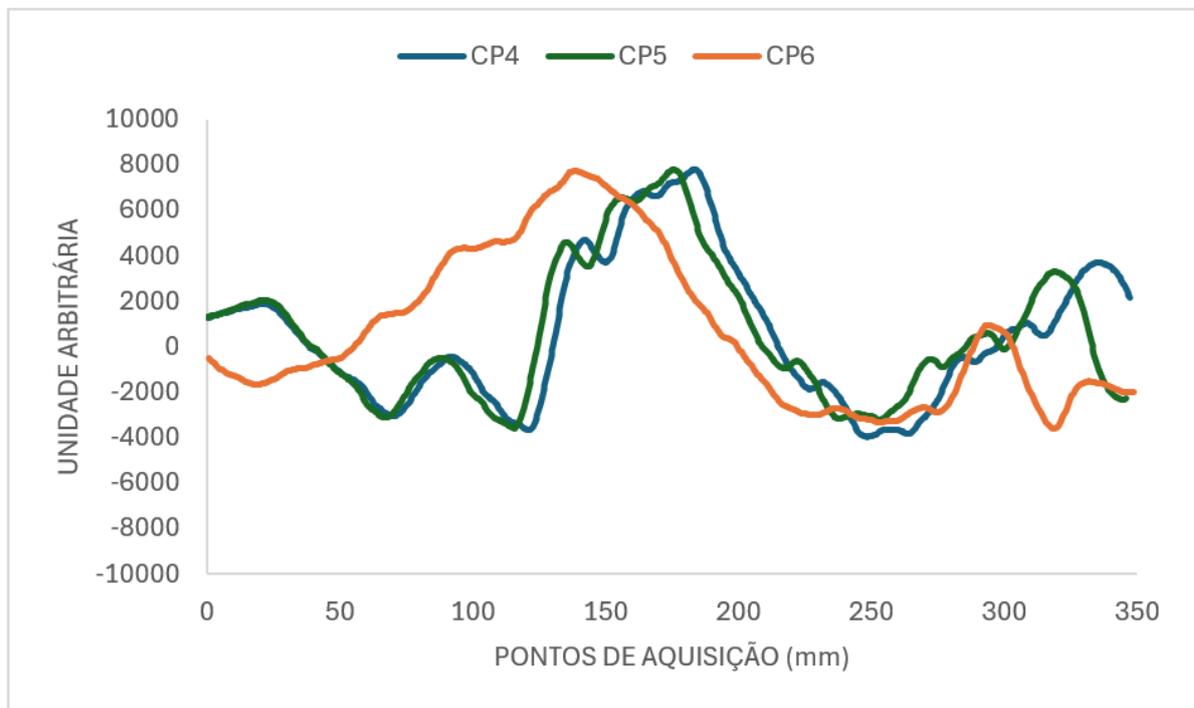
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como é possível observar no *boxplot* exibido na Figura 38, a largura das caixas sugere uma variabilidade moderada entre as amostras. Já quando se observa a mediana, verifica-se uma assimetria para os corpos de prova 1 e 2 e maior simetria para o corpo de prova 3. Comparando-se os três intervalos de variação, os limites superior e inferior são relativamente próximos.

Os dados indicam que o processo de soldagem está produzindo juntas soldadas consistentes, como evidenciado pela variabilidade discreta nas medidas de reatância. A ausência de valores atípicos reflete o controle de qualidade no processo produtivo, demonstrando que as amostras de aço soldadas mantêm propriedades uniformes e dentro das especificações desejadas.

O comportamento da reatância indutiva obtido da inspeção MEC para os corpos de prova do Grupo 2, feitos de aço IF, soldado com parâmetros sem conformidade com o processo produtivo, pode ser observado na Figura 39.

Figura 38 - Comportamento da reatância indutiva dos Corpos de Prova de Aços IF (Grupo 2).

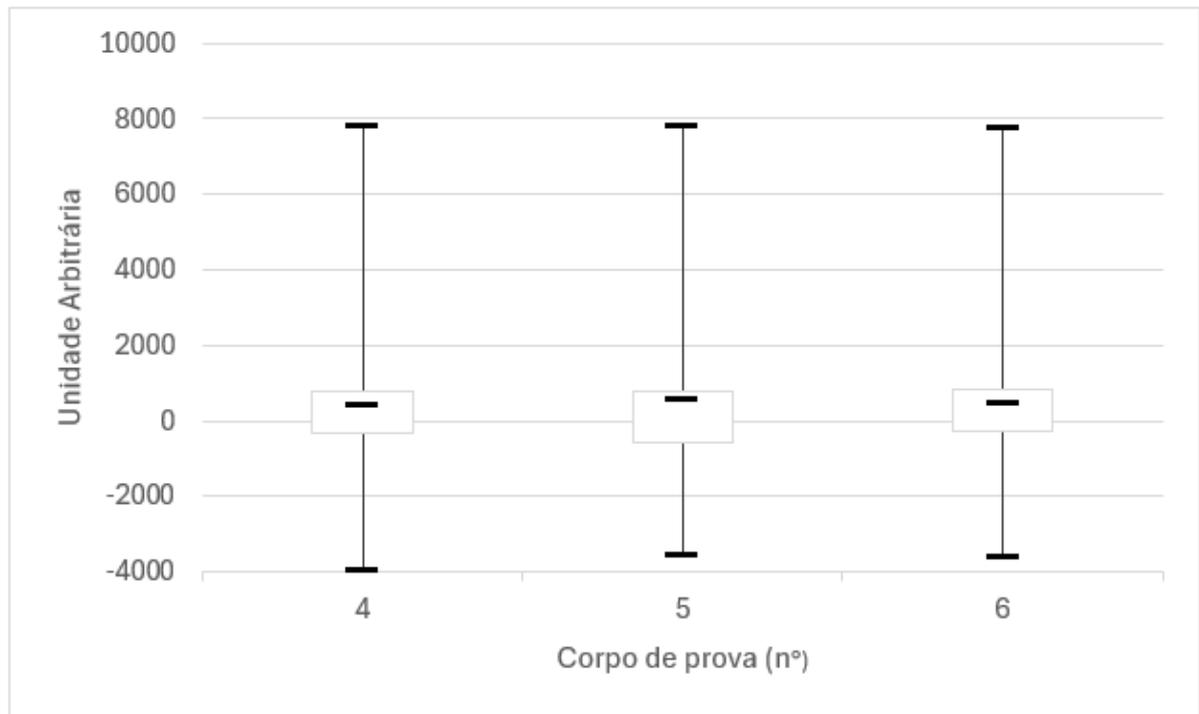


Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que os sinais das soldas do Grupo 2 apresentam um comportamento semelhante entre si, porém uma resposta distinta, quando comparados com os sinais das soldas do Grupo 1. Observa-se um amplo intervalo, onde as amplitudes dos sinais das amostras do Grupo 2 são maiores.

Essa resposta se reflete em maiores larguras de caixa e intervalos de variação, conforme pode ser observado no *boxplot* exibido na Figura 40, para as respectivas reatâncias indutivas dos corpos de prova do Grupo 2.

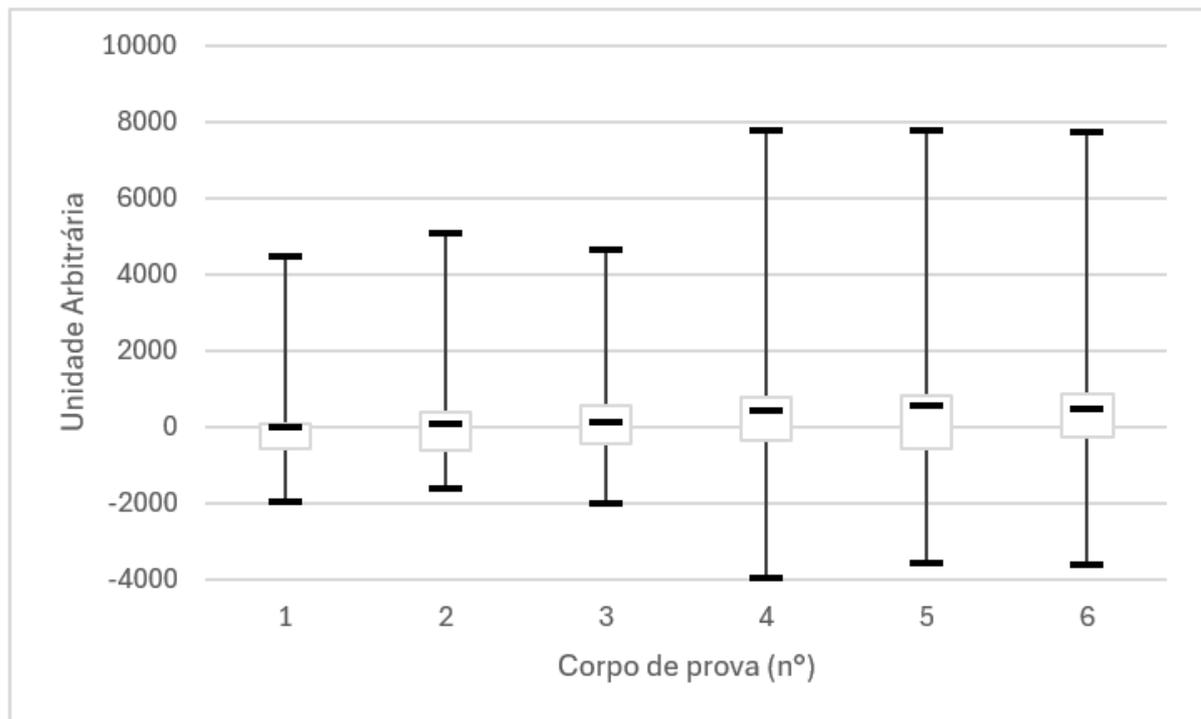
Figura 39 - Boxplot dos sinais MEC para os corpos de prova de Aço IF (Grupo 2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação de ambos *boxplots*, exibida na Figura 41, revela que os corpos de prova do Grupo 1 (CPs 1, 2 e 3) exibem uma distribuição de reatância mais consistente, com uma mediana e IQR menores. Por outro lado, os corpos de prova do Grupo 2 (CPs 4, 5 e 6) mostram uma maior dispersão nos valores de reatância, provavelmente associada à uma qualidade inferior das soldas.

Figura 40 - Boxplot dos sinais MEC para os Corpos de Prova dos aços IF (Grupos 1 e 2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

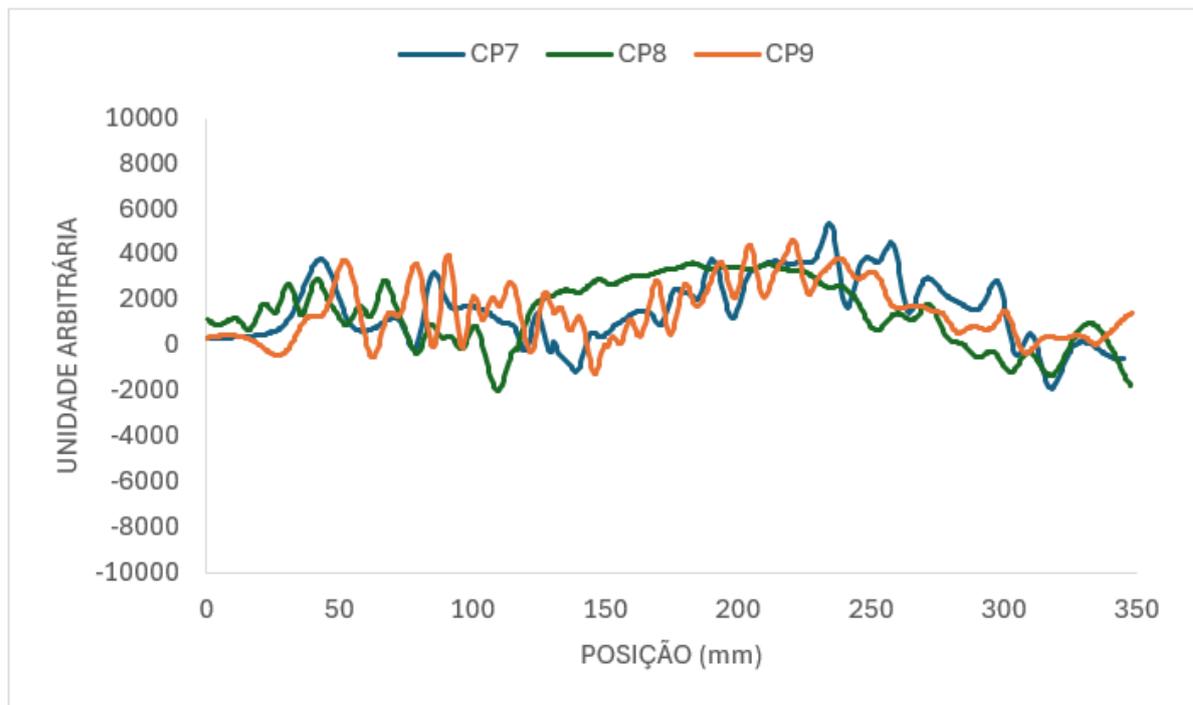
Ao correlacionar esses achados com os resultados dos ensaios de tração, observa-se que os corpos de prova do Grupo 2 também apresentaram um comportamento mecânico inferior, comparado ao Grupo 1, com uma redução de cerca de 28% na resistência ao escoamento, 21% na resistência à tração e 15% na capacidade de deformação.

A associação dos *boxplots* dos sinais MEC aos resultados dos ensaios de tração e da análise macrográfica, indicam que a adoção de parâmetros em conformidade com o processo produtivo, sobretudo da corrente, é essencial para garantir a integridade mecânica das soldas. A maior uniformidade nas medidas de reatância dos corpos de prova do Grupo 1 se traduz em melhores propriedades mecânicas, como maior resistência à tração e capacidade de deformação, necessárias durante o processamento das bobinas.

4.3.3 ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS EM AMOSTRAS DE AÇOS TRIP (GRUPOS 3 E 4)

O comportamento da reatância indutiva obtido da inspeção MEC nos corpos de prova do Grupo 3 (corpos de prova 7, 8 e 9), feitos de aço TRIP, soldado com parâmetros em conformidade com o processo produtivo, pode ser observado na Figura 42.

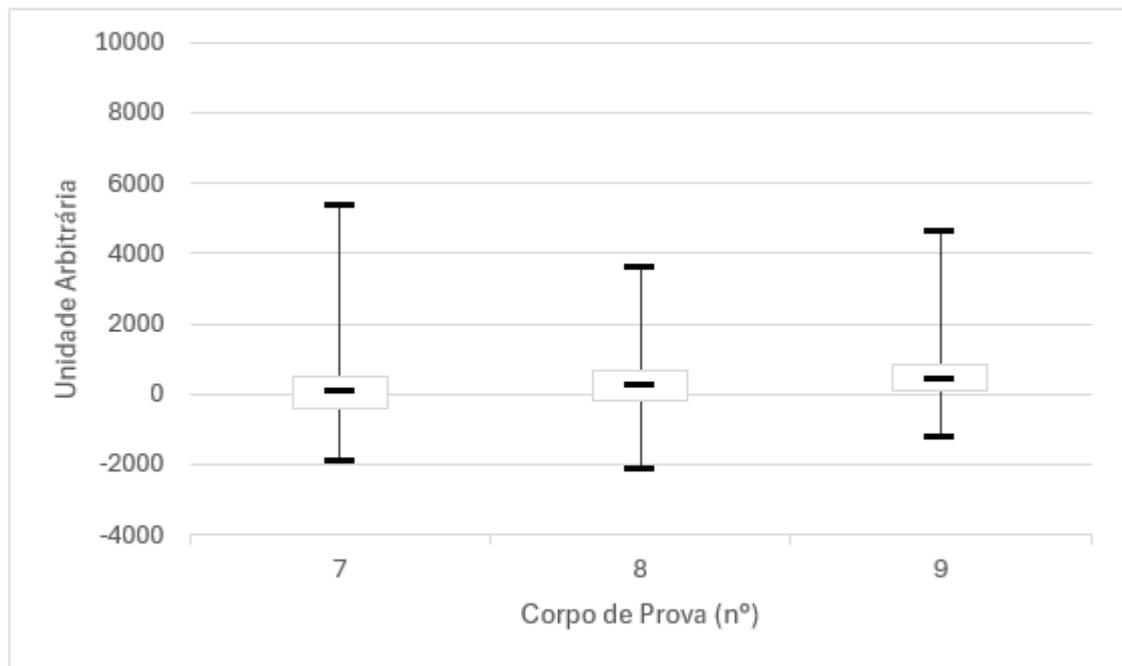
Figura 41 - Comportamento da reatância indutiva dos corpos de prova de Aços TRIP (Grupo 3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 43 apresenta um *boxplot* dos referidos sinais de reatância dos corpos de prova de aço TRIP, pertencentes ao Grupo 3.

Figura 42 - Boxplot dos sinais MEC para os corpos de prova de Aço TRIP (Grupo 3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

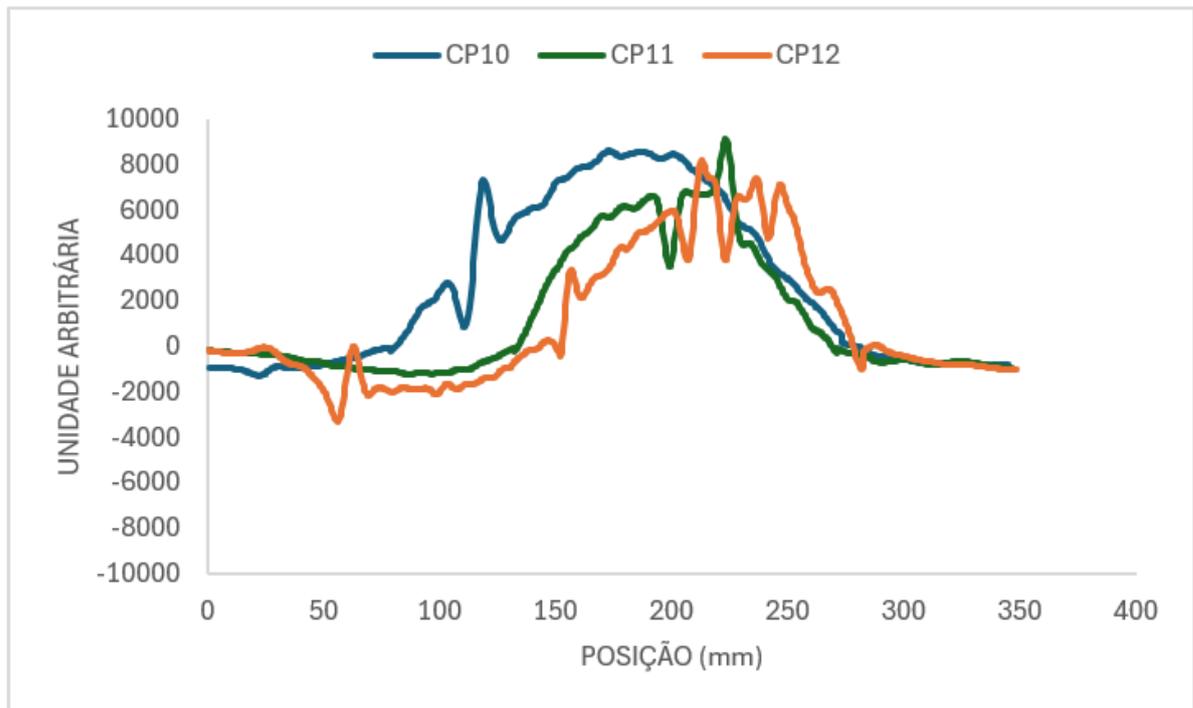
Apesar dos corpos de prova terem sido soldados com parâmetros de soldagem, em conformidade com o processo produtivo, foram observadas diferenças na distribuição dos valores de reatância.

Como é possível observar no *boxplot* exibido na Figura acima, a largura das caixas sugere uma variabilidade nos valores de reatância, no entanto, a maioria dos dados está relativamente concentrada, não apresentando grandes dispersões ou valores atípicos (*outliers*).

A análise do *boxplot* revela as linhas das medianas posicionadas no centro do IRQ. É possível observar, no entanto, uma pequena assimetria para os corpos de prova 7 e 9, e uma maior simetria para o corpo de prova 8, em termos do intervalo máximo e mínimo.

Os sinais da reatância obtidos da inspeção MEC para o Grupo 4 (corpos de prova 10, 11 e 12), feitos de aço TRIP, soldado com parâmetros distintos do processo produtivo, podem ser observados na Figura 44.

Figura 43 - Comportamento da reatância indutiva dos corpos de prova de Aços TRIP (Grupo 4).

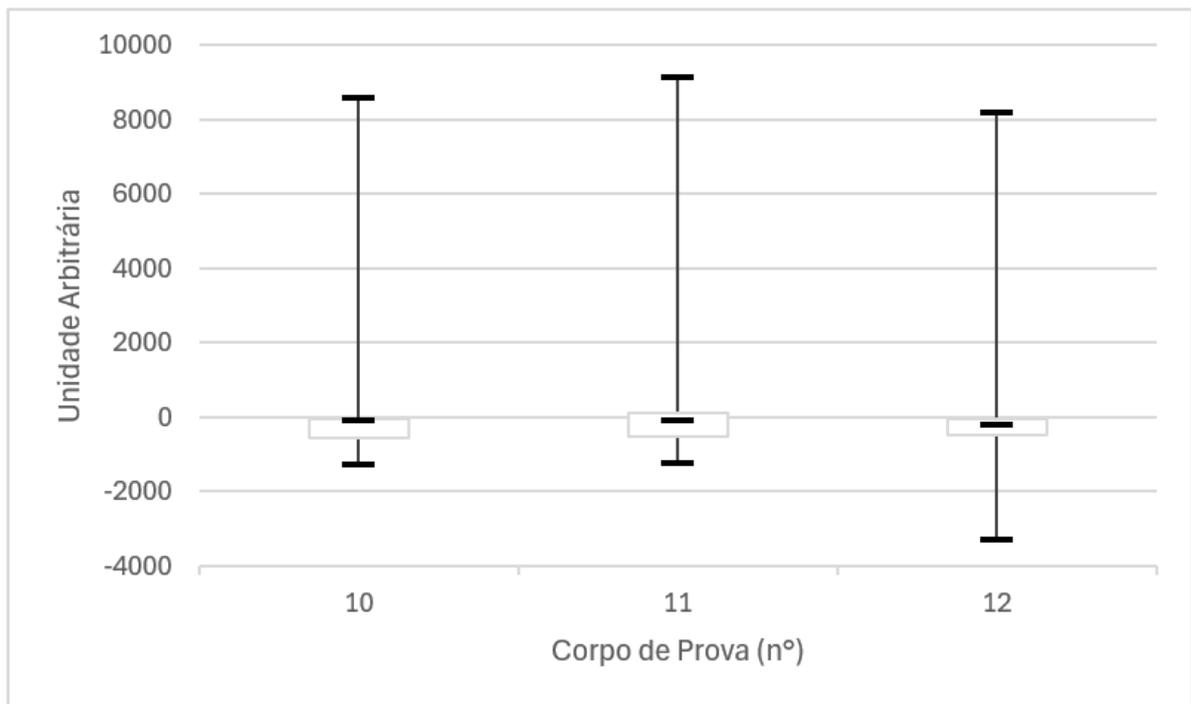


Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que os sinais das soldas do Grupo 4 apresentaram um comportamento semelhante entre si, porém uma resposta distinta, quando comparados aos sinais das soldas do Grupo 3. Observa-se um amplo intervalo, onde as amplitudes dos sinais das amostras do Grupo 4 são maiores.

Esse comportamento pode ser observado no *boxplot* exibido na Figura 45, que apresenta elevada variação absoluta e distribuição assimétrica dos dados, conforme as linhas da mediana e intervalos máximos e mínimos.

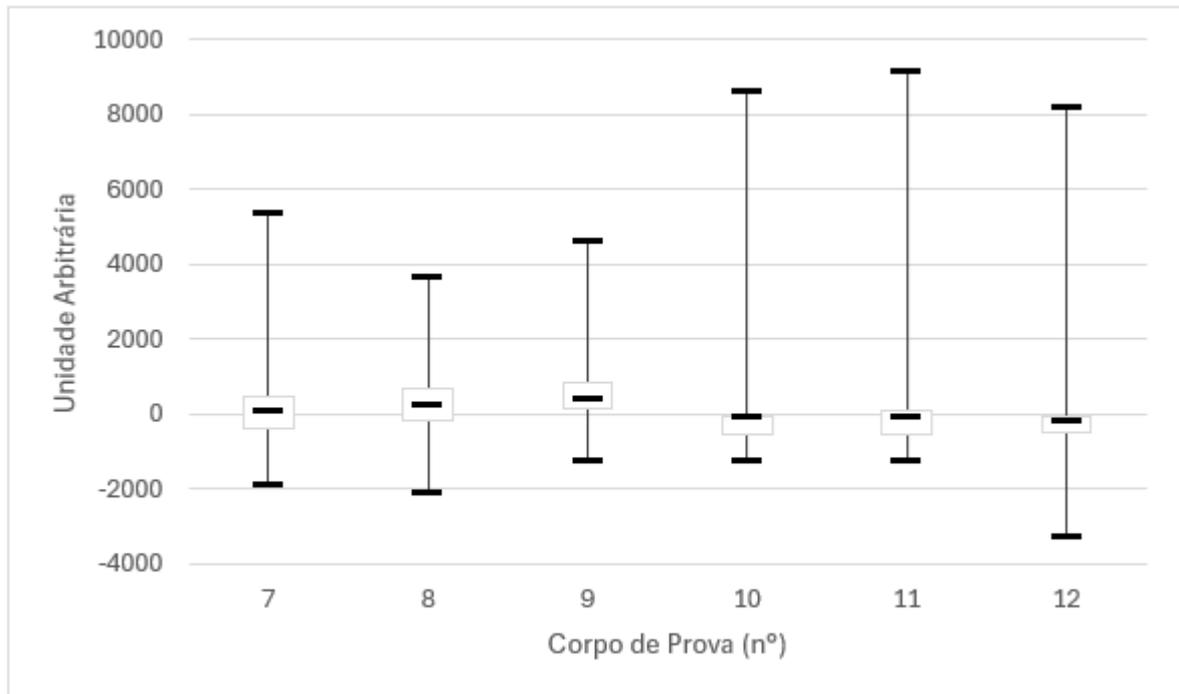
Figura 44 - Boxplot dos sinais MEC para os corpos de prova de Aço TRIP (Grupo 4).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação dos *boxplots*, exibida na Figura 46, revela que os corpos de prova do Grupo 4 (corpos de prova 10, 11 e 12) exibem uma distribuição de reatância mais assimétrica, com as medianas próximas ao terceiro quartil e intervalos maiores quando comparados ao Grupo 3 (corpos de prova 7, 8 e 9).

Figura 45 - Boxplot dos sinais MEC para os corpos de prova de Aço TRIP (Grupos 3 e 4).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal obtido pela inspeção MEC demonstrou ser um bom indicador da qualidade da solda. Valores estáveis e menos variáveis, como os observados no Grupo 3, ainda indicam problemas de falta de homogeneidade, porém em menor grau que os encontrados nos corpos de prova do Grupo 4, com intervalos maiores de variação.

Mesmo usando parâmetros de soldagem em conformidade com o processo produtivo, os corpos de prova do Grupo 3 tiveram a integridade da solda comprometida, sugerindo que talvez outros ajustes precisam ser feitos para otimizar a fusão completa.

A maior amplitude e variabilidade dos sinais dos corpos de prova do Grupo 4 estão correlacionadas ao comportamento mecânico inferior, a uma falta de homogeneidade mais pronunciada, comparada a que foi observada nos corpos de prova do grupo 3. Além disso também foi observado a presença do defeito falta de fusão. A redução da corrente evidenciou ainda mais esses problemas, resultando em juntas soldadas com propriedades mecânicas reduzidas.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Com o objetivo de avaliar a aplicação da técnica de correntes parasitas magnéticas na inspeção de juntas soldadas de chapas de aços de alto desempenho, soldadas pelo processo RSEW e utilizadas na produção contínua de bobinas laminadas, pode-se concluir que:

Foi possível estabelecer uma correlação entre o comportamento dos sinais obtidos através da técnica MEC e o desempenho mecânico das juntas soldadas dos aços IF e TRIP.

Para as juntas soldadas do aço IF, a técnica MEC permitiu diferenciar as soldas obtidas com e sem conformidade com o processo produtivo. A maior uniformidade nas medidas de reatância dos corpos de prova do Grupo 1 se traduziu em melhores propriedades mecânicas, como maior resistência à tração e capacidade de deformação, necessárias durante o processamento das bobinas.

A análise macrográfica mostrou uma zona de transformação microestrutural maior nos corpos de prova do Grupo 1 em comparação ao Grupo 2, evidenciando a importância do uso de parâmetros corretos para garantia de uma solda homogênea e resistente.

No aço TRIP 780, através da técnica MEC, foi possível identificar diferenças significativas nos sinais de reatância das juntas soldadas, as quais foram associadas à redução do comportamento mecânico das amostras do Grupo 4, em relação ao Grupo 3.

A maior variabilidade e amplitude dos sinais de reatância nas soldas do Grupo 4 indicaram uma menor qualidade dessas juntas. A falta de homogeneidade observada macroestruturalmente nas amostras de ambos os grupos, foi consistente com os sinais de reatância elevados e variáveis, sendo mais intensa nas amostras do Grupo 4, devido à redução da corrente de soldagem.

Os resultados obtidos indicam que a técnica de correntes parasitas magnéticas pode ser integrada aos processos de produção contínua de aços de alto desempenho. Futuras pesquisas poderão focar na calibração e no seu aprimoramento para inspeção

de diferentes tipos de aços, espessuras e condições de soldagem, visando ampliar sua aplicação e eficiência.

CAPÍTULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de contribuição para trabalhos futuros, sugere-se:

Avaliar o uso de técnicas de processamento e classificação na análise dos sinais MEC, com o objetivo de automatizar o processo de inspeção das juntas RSEW na linha de produção de bobinas laminadas de aços de alto desempenho.

A utilização de algoritmos de classificação pode otimizar a etapa de inspeção e eliminar a necessidade de o operador analisar manualmente os sinais MEC, resultando em análises e identificações mais precisas das juntas obtidas em não conformidade.

Desenvolver corpos de provas com presença de descontinuidades como, porosidade e trincas, com o objetivo de reforçar o potencial do uso prático da técnica MEC na detecção de descontinuidades representativas.

Além disso, integrar os dados obtidos com análises microestruturais e de dureza das juntas correspondentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-DHANHANI, K., GOVINDAVILAS, D. S., PALMER, J. C. W., AL-MUKHMARI, H., AL-MARZOOQI, M., & AL-SAYED, T. **Aging Offshore well Conductors Structural Integrity Issues and Challenges in their Life Extension**. In Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, p. D011S015R001, 2018.

ANDRADE, E. P. **Caracterização mecânica e análise microestrutural de chapas obtidas pelo processo de Tailor Welded Blank (TWB)** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, MG, 2019.

Sheikh Amiri, M., Kashefi, M. **Investigation of Variables Affecting Impedance Plane in Eddy Current Testing of Carburized Steels**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 20, p. 476–480, 2011.

ASHER, S. L., BOENISCH, A., REBER, K. **Development of a magnetic Eddy current in-line inspection tool**. American Society of Mechanical Engineers - International Pipeline Conference, v 50251, p. V001T03A063, 2016.

BATISTA, M. **Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para a indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo – São Paulo, SP, 2011.

BENI, SALIMI S., ATAPOUR, M., SLMANI, M. R., ASHIRI, R. **Resistance spot welding metallurgy of thin sheets of zinc-coated Interstitia-Free steel**. Metallurgical and Materials Transactions A, V. 50, p. 2218-2234, 2019.

BONIKILA, P. R.; INDIMATH, S. S.; SHAJAN, N. **Failure assessment of mash seam weld breakage and development of online weld inspection system for early detection on weld failure**. Engineerin failure analysis, v. 133, p. 105967, 2022.

BRANDÃO, A. C. P. S. **Detecção de trincas de fluência em tubo de aço austenítico HP de fornos de reforma a vapor empregando uma nova metodologia de inspeção de correntes parasitas.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, RJ, 2023.

CASTRO, G.G. P. D. **Estudo da evolução microestrutural e da cinética de recristalização de um aço livre de intersticiais estabilizado ao titânio deformado a frio via prensagem em canais equiangulares pela rota BA e posteriormente recozido.** Tese (Doutorado) – Curso de Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense – Volta Redonda, RJ, 2019.

CAMERINI, C., SACRAMENTO, R., AREIZA, M. C. **Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization,** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 388, p. 96–100, 2015.

CHEN, D., CUI, H., WANG, R. **High-temperature mechanical properties of 4.5% Al δ -TRIP Steel.** Applied Sciences, v. 9, n. 23, p. 5094, 2019.

CHOBOUT, N., CARRON, D., ARSENE, S., SCHLOTH, P., DREZET, J. M. **Quench induced residual stress prediction in heat treatable 7xxx aluminium alloy thick plates using Gleeble interrupted quench tests.** Journal of Materials Processing Technology, v. 222, p. 373-380, 2015.

DE PAEPE, D.; VAN YPEREN-DE DEYNE, A.; DEFEVER, J.; VAN HOECKE, S. **An incremental grey-box current regression model for anomaly detection of resistance mash seam elding in steel mills.** Applied Sciences, v. 12, n.2, p. 913, 2022.

DEUS, V. D.; CORRÊA, S. R.; CASTRO, J. D. **Correlação do aporte térmico com os parâmetros do processo de soldagem por costura aplicada em aço baixo**

carbono. 73º Congresso Anual da ABM. São Paulo: ABM, 2018.

DOS SANTOS, M. W. B.; FARIA, A. BATALHA, G. F. **Simulação termomecânica por compressão aplicada a conformação a quente da liga de titânio Ti-6Al-4V.** 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador – Bahia São Paulo: ABCM, 2015.

EL-SHENAWY, E. H. **Physical simulation technology for thermo-mechanical processing of metallic alloys using Gleeble system.** Materials Today: Proceedings, v. 28, p. 998-1004, 2020.

FONSECA, A. B. D. **Análise dos estados de envelhecimento em tubo de aço HP por correntes parasitas e aprendizado de máquina.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, RJ, 2023.

FONSTEIN, N. **Advanced high strength sheet steels.** Springer International Publishing, New York, NY, USA 2015.

FRICKE, W. **Fatigue analysis of welded joints: state of development.** Marine structures, v. 16, n. 3, p. 185-200, 2003.

FREITAS, F. H. C. D. **Estudo da influência dos parâmetros de solda a laser em juntas sobrepostas dos aços DP982 e TRIP780 com a utilização de ferramentas estatísticas.** Tese (Doutorado) – Curso de Doutorado em Engenharia de Materiais, Universidade Estadual Paulista - Guaratinguetá, SP, 2022.

GONÇALVES, T. S., DE FARIA, G. L., DE SIQUEIRA, R. H. M., DE LIMA, M. S. F. **Weldability and mechanical behavior of laser-welded TRIP 750 steel sheets.** The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 107, p. 2807-2815, 2020.

GONZAGA, J. M., SOARES, L. W. **Soldagem de costura de um aço TRIP**. Curso de Pós-graduação em Engenharia de Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, MG, 2016.

GRAJCAR, A.; KUZIĄK, R.; ZALECKI, W. **Third generation of AHSS with increased fraction of retained austenite for the automotive industry**. Archives of civil and mechanical engineering, v. 12, p. 334-341, 2012.

GHOSH, S., SOMANI, M. C., SETMAN, D., MULA, S. (2021). **Hot deformation characteristic and strain dependent constitutive flow stress modelling of Ti+ Nb stabilized interstitial free steel**. Metals and Materials International. v. 27, p. 2481—2498, 2021.

HANSEN, J. **The eddy current inspection method**. Insight, v. 46, n. 5, p. 279-281, 2004.

HODGSON, P. D.; TIMOKINA, I. B.; BELADI, H.; MUKHERJEE, S. **Nanostructural engineering for TMCP steels**. Advanced steels: The Recent Scenario in Steel Science and Technology, v.1, s.4, p.309-316, Berlin, 2011.

INÁCIO, G. A. **Desenvolvimento de um modelo de rede neural para estudo da cinética de recristalização de um aço IF**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense – Volta Redonda, RJ, 2013.

INNOPECTION. **Inspection of pipelines through thick coating**. Disponível em: <<https://ppsa-online.com/papers/14-Aberdeen/2014-09-Innospection-paper.pdf>>[Acesso em: 04/10/2023].

International Organization for Standardization. **ISO 6892-1:2019: Metallic Materials – Tensile Testing: Method of test at room temperature**. 2019.

IOWA STATE UNIVERSITY CENTER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION (CNDE). **Basic Principles of Eddy Current Inspection**. American Society of Nondestructive Testing and the National Science Foundation, 2021. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/eddycurrenttesting.xhtml>. Acesso em: 29 mar. 2023.

JANARDHAN, G., MUKHOPADHYAY, G., KISHORE, K., & DUTTA, K. **Resistance spot welding of dissimilar interstitial-free and high-strength low-alloy steels**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 29, p. 3383-3394, 2020.

JEON, W. S.; SHARMA, A.; JUNG, J. P. **Liquid metal embrittlement of galvanized TRIP steels in resistance spot welding**. Metals, v. 10, n. 6, p. 787, 2020.

KEELER, S.; Kimchi, M. **Advanced High Strength Steel Application Guidelines**. World Auto Steel, v 5., 2014.

KOLEY, S., AKHTAR, M. T., KUMAR, N., KUNDU, A., SHOME, M. **Effect of secondary coating on weldability, joint performance, and electrode life in resistance seam welding of galvanized Interstitial Free steel**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 1, n. 3, p. 2432-2444, 2022.

KRIZAN, D.; STEINER, K.; KAAR, S.; HEBESBERGER, T. **Development of third Generation advanced high strength steels for automotive applications**. In: Proceedings of the 19th International Scientific Conference Transfer, p. 1-15, 2018.

LIMA JÚNIOR, J. V. D. **Avaliação microestrutural do aço ASTM A516 grau 60, através de técnicas não destrutivas: ruído magnético Barkhausen (RMB) e correntes parasitas (CP)**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará – Fortaleza, Ceará, 2014.

LONG, Y., HUANG, S., ZHENG, Y., WANG, S., ZHAO, Q. **A method using magnetic**

Eddy current testing for distinguishing ID and OD defects of pipelines under saturation magnetization. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), v. 35, n. 9, p. 1089-1098, 2020.

LOUZADA, M. Z. **Viabilidade do uso do ensaio não destrutivo de correntes parasitas para caracterização da sensitização de aços inoxidáveis AISI 304.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, RJ, 2022.

MA, Q., TIAN, G. Y., GAO, B., ZHAO, X., RU, G., LI, H. **Lift-off suppression based on combination of bridge and transformer signal conditioning of Eddy current testing.** NDT & E International, v. 132, p. 102724, 2022.

Mao, X., Lei, Y. **Thickness measurement of metal pipe using swept-frequency eddy current testing.** NDT & E International, v. 78, p. 10-19, 2016.

MAGALHÃES, C. H. X. M., MOURÃO, G. M. M., CAMPOS, P. H. K., FARIA, G. L. **Caracterização das transformações de fases sob resfriamento contínuo de um aço do tipo TRIP780.** IN Anais do 74º Congresso Anual da ABM, p. 1-3, 2019.

MARTÍN, G. J., GÓMEZ, G. J., VÁZQUEZ, S. E. **Non-destructive technique based on Eddy current testing.** Sensors, v. 11, n. 3, p. 2525-2565, 2011.

MAZAFERRO, C.C.P. **Soldagem a Ponto por Fricção e Mistura Mecânica de um Aço TRIP 800: Processo, Microestrutura e Propriedades.** Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS, 2008.

MIJAJLOVIC, M. M.; ĆIRIĆ, D.; VIDOJKOVIĆ, S. **Effective temperature based algorithm for achieving constant quality resistance seam weld.** Thermal Science, v. 25, n. 4A, p. 2459-2469, 2021.

MOLLEDA, J.; CARUS, J. L.; USAMENTIAGA, R.; GARCÍA, D. F.; GRANDA, J. C.; RENDUELES, J. L. **A fast and robust decision support system for in-line quality assessment of resistance seam welds in the steelmaking industry.** Computers in industry, v. 63, n. 3, p. 222-230, 2012a.

MOLLEDA, J.; USAMENTIAGA, R.; GARCÍA, D. F.; GRANDA, J. C.; LAURENSEN, D. **A quality inspection system for resistance seam welds in endless production of steel coils using anomaly detection techniques.** In 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, p. 1-8, 2012b.

Moraes, G. B. D. (2016) **Avaliação do método de correntes parasitas convencional e SLOFEC para detecção de trincas em aço HP.**

MOREIRA, H. S. **Estudo da influencia dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas em um eixo traseiro veicular.** 2008. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia metalúrgica e de materiais) – Escola politécnica de São Paulo, São Paulo, 2008.

NDT Course Material - EC Testing. [S.d.]. Disponível em: <https://legacy-nde.engineering.iastate.edu/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.php>. Acesso em: 14 abr. 2021.

NDT RESOURCE CENTER. **Introduction to Eddy Current Testing.** Disponível em: <https://www.nde-ed.org/NDETTechniques/EddyCurrent/index.xhtml>. Acesso em: 14 out. 2020.

NETO, J. V., DOS SANOTS, C. B., TORRES, E. M., ETRELA, C. **Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos.** Revista Odontológica do Brasil Central, v. 26, n. 76, 2017.

PARANTHAMAN, V.; SHANMUGA S, K.; NATRAYAN, L. Effect of silica content on mechanical and microstructure behaviour of resistance spot welded advanced

automotive TRIP steels. *Silicon*, v. 14, n. 7, p. 3429-3438, 2022.

PAWAR, S; SAHOO, S; MUKHOPADHYAY, G. **Failure analysis of weld joint of high strength quality steel sheets in cold rolling mill**. *Engineering failure Analysis*, v. 103, p. 392-399, 2019.

RESCALA, J. **O uso de corrente parasitas magnéticas na inspeção de corrosão localizada**. Disponível em: <<https://doity.com.br/media/doity/submissoes/5cd9c148ea34-4868-8072-7a8343cda1d7-joao-paulo-rescala--resumo-expandido-sapct-cimatec-2019-corrigidopdf.pdf>> Acesso em 06 set 2023.

RIBEIRO, A. L., RAMOS, H. G. **Present and future impact of magnetic sensors in NDE**, *Procedia Engineering*, v. 86, p. 406–419, 2014.

ROCHA, T. J., RAMOS, H. G., RIBEIRO, A. L., PASADAS, D. J. **Magnetic sensors assessment in velocity induced Eddy current testing**. *Sensor and Actuators A: Physical*, v. 228, 2014, p. 55-61, 2015.

ROMANYUK, M., AVALOS, M. C., BENAVIDEZ, E. R., BRANDALEZE, E. **Correlation between structural aspects and mechanical properties of na Interstitial Free steel for automotive application**. *Advanced Materials Proceedings*, v. 3, n. 6, p. 408-413, 2018.

SAMPAIO, A. P.; ZWIRMAN, N. C. S.; RENÓ R. T.; MACHADO E. A. **Desenvolvimento de Aços Livres de Interciais IF via Recozimento Contínuo e em Caixa**. Seminário Tecnológico- CSN, 18 p. Volta Redonda, RJ, 1998.

SANTOS, A. P. R. **Análise de textura cristalográfica por difração de raios X em aços IF com diferentes adições de titânio, nióbio e fósforo**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017

SINGH, M K. **Application of steel in automotive industry**. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, v. 6, n. 7, p. 246-253, 2016.

SILVA, V. M. de A. **Caracterização por Correntes Parasitas de Aços Inoxidáveis Austeníticos Deformados a Frio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2016.

SOARES, E. F., SANTOS, J. P., SILVA, L. M., FERNANDES, E. F. Influência da Corrente Elétrica no Processo de Soldagem a Resistência por Pontos Aplicados na Montagem de Carrocerias em uma Indústria Automotiva. Disponível em <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/18832>> Acesso em 15 maio 2024.

SOPHIAN, A., TIAN, G. Y., TAYLOR, D., & RUDLIN, J. **Electromagnetic and eddy current NDT: a review**. Insight, v. 43 n. 5, p. 302-306, 2021.

SOLEMANI, M., KALHOR, A., MIRZADEH, H. **Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: a review**. Materials Science and Engineering, v. 795, p.140023, 2020.

TISZA, M.; CZINEGE, I. **Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts**. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, v. 1, n. 4, p. 229-238, 2018.

UCHANIN, V., NARDONI, G. **Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative Eddy current techniques**. Procedia Structura Integrity, v. 16, p. 198-204, 2019.

UDPA, S. S., MOORE, P. O. **Nondestructive testing handbook**. American Society for Nondestructive Testing, v. 5, 3a ed 3a ed. [S.l.], ASNT, 2004.

ZHOU, M.; ZHANG, H.; HU, S. J. **Relationships between quality and attributes of spot welds**. Welding Journal, v. 82, n. 4, p. 72-S, New York, 2003.

YUAN, F., YU, Y., LIU, B., & TIAN, G. **Investigation on velocity effect in pulsed eddy current technique for detection cracks in ferromagnetic material.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 56, n. 99, p.1-8, 2020.

WASIF, R.; TOKHI, M. O.; SHIRKOOHI, G.; MARKS, R.; RUDLIN, J. **Development of permanently installed magnetic Eddy current sensor for corrosion monitoring of ferromagnetic pipelines.** Applied Sciences, v. 12, n. 3, p. 1037, 2022.

WINTJES, E.; DIGIOVANNI, C.; HE, L.; BIRO, E.; ZHOU, Y.N. **Quantifying the link between crack distribution and resistance spot weld strength reduction in liquid metal embrittlement susceptible steels.** Welding in the World, v. 63, p. 807–814, 2019.