

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

RAFAEL PEZZINI

ANÁLISE DOS EFEITOS DA DEFASAGEM DE SOLDAS ENTRE CHAPAS  
APLICADO EM UM PARAMENTO DE UMA COMPORTA SEGMENTO

XANXERÊ, SC.

2025

RAFAEL PEZZINI

ANÁLISE DOS EFEITOS DA DEFASAGEM DE SOLDAS ENTRE CHAPAS  
APLICADO EM UM PARAMENTO DE UMA COMPORTA SEGMENTO

Engenharia Mecânica do  
Câmpus Xanxerê do  
Instituto Federal de Santa  
Catarina para a obtenção  
do diploma de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Orientadora: Vanessa  
Milhomem Schmitt

XANXERÊ, SC.

2025

P521a Pezzini, Rafael.  
Análise dos efeitos da defasagem de soldas entre chapas aplicado em um paramento de uma comporta segmento / Rafael Pezzini. — Xanxerê, 2025.  
52 p. : il., color.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina — Câmpus Xanxerê. Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientação: Vanessa Milhomem Schmitt.

Inclui referências.

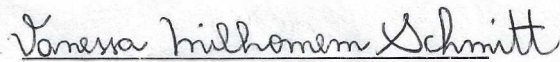
1. Soldagem estrutural. 2. Juntas defasadas. 3. Comportas segmento. I. Schmitt, Vanessa Milhomem. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. Título.

RAFAEL PEZZINI

ANÁLISE DOS EFEITOS DA DEFASAGEM DE SOLDAS ENTRE CHAPAS  
APLICADO EM UM PARAMENTO DE UMA COMPORTA SEGMENTO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão  
avaliadora abaixo indicada.

Xanxerê, 03 de dezembro de 2025.



Prof. Vanessa Milhomem Schmitt , Ma.

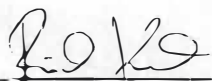
Orientadora

Instituto Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Rogério Ferreira Rezende, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina



Rômulo Silva Kunzler Engenheiro Mecânico

Instituto Federal de Santa Catarina

*“E o caminho  
Da felicidade ainda existe  
É uma trilha estreita  
É em meio a selva triste”  
(Racionais Mc's, 2002)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à minha orientadora, Professora Vanessa Milhomem Schmitt, por toda a dedicação, paciência e suporte ao longo do desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sua orientação foi essencial para a construção deste estudo e para meu crescimento acadêmico.

Manifesto também minha gratidão ao Professor Rogério Ferreira Rezende, membro da banca avaliadora, pelas valiosas contribuições, observações e sugestões que aprimoraram significativamente este trabalho.

Ao Professor Daniel Ecco, registro meu sincero agradecimento por ter sido uma inspiração durante as disciplinas de cálculo e por me motivar a persistir na jornada acadêmica, mesmo diante das maiores dificuldades.

Por fim, agradeço ao meu amigo Jhameson Lucas Geuda, uma das pessoas que sempre acreditou em mim e cuja amizade e apoio foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise técnica e normativa sobre a aplicação da técnica de defasagem longitudinal de juntas soldadas no paramento de comportas tipo segmento, com o objetivo de avaliar seus impactos na integridade estrutural e no comportamento mecânico do componente. A pesquisa adota uma abordagem quali-quantitativa, fundamentada na execução de ensaios laboratoriais destrutivos e não destrutivos. Foram confeccionados corpos de prova representativos das juntas de um paramento real, utilizando chapas metálicas ASTM A572 Grau 50 e o processo de soldagem por arco com arame tubular E71T1, em duas configurações distintas: juntas alinhadas e juntas defasadas. Os ensaios foram conduzidos de acordo com os requisitos normativos aplicáveis, incluindo procedimentos internos e normas técnicas, tais como ASME BPVC Section VIII (2021), além das normas para ensaios não destrutivos e metalográficos pertinentes. As avaliações compreenderam inspeção visual, ensaio por líquido penetrante, ultrassom, análises macrográficas e metalográficas, bem como ensaio de dureza. Os resultados obtidos indicam que a configuração com juntas defasadas reduz a concentração de calor durante o processo de soldagem e promove microestruturas mais estáveis na Zona Termicamente Afetada. Como consequência, a defasagem das juntas apresenta potencial para aumentar a vida útil das soldas sob carregamentos cíclicos e atuar como barreira à propagação de trincas. Conclui-se que a adoção planejada da defasagem de juntas soldadas constitui uma estratégia eficiente e alinhada às melhores práticas da engenharia de soldagem para componentes hidromecânicos críticos. O estudo contribui de forma original ao integrar evidências experimentais e requisitos normativos, fornecendo subsídios técnicos para o aprimoramento de projetos, inspeções e processos de fabricação de comportas utilizadas em sistemas hidrelétricos.

**Palavras-Chave:** Soldagem Estrutural. Juntas Defasadas. Comportas Segmento.

## ABSTRACT

This study presents a technical and normative analysis of the application of longitudinal weld joint offsetting in the skin plate of segment gates, with the aim of evaluating its effects on structural integrity and mechanical behavior. The research adopts a quali-quantitative approach, based on the execution of destructive and non-destructive laboratory tests. Representative test specimens of actual gate joints were fabricated using ASTM A572 Grade 50 steel plates and the flux-cored arc welding process with E71T1 wire, in two configurations: aligned joints and offset joints. The tests were conducted in accordance with the applicable standards, including internal procedures and technical codes such as ASME BPVC Section VIII (2021), in addition to the relevant norms for non-destructive and metallographic examinations. The evaluations included visual inspection, liquid penetrant testing, ultrasonic testing, macrographic and metallographic analyses, as well as hardness testing. The results indicate that the configuration with offset joints reduces heat concentration during welding and promotes more stable microstructures in the Heat-Affected Zone. Consequently, joint offsetting demonstrates potential to increase weld service life under cyclic loading and to act as a barrier to crack propagation. It is concluded that the planned use of offset welded joints constitutes an efficient strategy aligned with best practices in welding engineering for critical hydromechanical components. This study provides an original contribution by integrating experimental evidence with normative requirements, offering technical support for improving the design, inspection, and manufacturing processes of gates used in hydroelectric systems.

**Keywords:** Structural Welding. Staggered Joints. Segment Gates.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
FCAW – *Flux-Cored Arc Welding*  
SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*  
GMAW – *Gas Metal Arc Welding*  
GTAW – *Gas Tungsten Inert Welding*  
SAW – *Submerged Arc Welding*  
ZTA – Zona Termicamente Afetada  
AWS – *American Welding Society*  
ASME – *American Society of Mechanical Engineers*  
EV – Ensaio Visual  
LP – Líquido Penetrante  
UT – Ultrassom  
END – Ensaio Não Destrutivo  
ED – Ensaio Destrutivo  
HRB – *Hardness Rockwell B*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>13</b>
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
<b>2 DESENVOLVIMENTO</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Revisão de Literatura</b>	<b>14</b>
2.1.1 Comportas Segmento	14
2.1.2 Soldagem	16
2.1.2.1 Arame Tubular	17
2.1.2.2 Defeitos de Soldagem	18
2.1.3 Normas de Soldagem AWS e ASME	19
2.1.3.1 AWS	19
2.1.3.2 ASME Seção VIII	20
2.1.4 Ensaio Não Destrutivos	20
2.1.4.1 Inspeção Visual	20
2.1.4.2 Líquido Penetrante	21
2.1.4.3 Ultrassom	22
2.1.5 Ensaio Destrutivos	23
2.1.5.1 Micrografia	23
2.1.5.2 Macrografia	24
2.1.5.3 Ensaio de Dureza Rockwell	25
2.1.6 ASTM A572 GR.50	25
2.1.7 Defasagem de Solda	26
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Materiais e Métodos</b>	<b>27</b>
3.1.1 Ensaio Não Destrutivos	29
3.1.1.1 Ensaio visual	29
3.1.2 Preparação	32
3.1.3 Ensaio Destrutivos	33
3.1.3.1 Análise Macrográfica	34
3.1.3.2 Análise Metalográfica	35
3.1.3.2 Ensaio de dureza Rockwell	36
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>37</b>
<b>4.1. Ensaio Não Destrutivos</b>	<b>37</b>
4.1.1 Inspeção Visual da Solda	37
4.1.2 Ensaio por Líquido Penetrante	37
4.1.3 Ensaio de Ultrassom	39
<b>4.2. Ensaio Destrutivos</b>	<b>39</b>
4.2.1 Análise Macrográfica	39
4.2.2 Análise Metalográfica	40
4.2.3 Ensaio de Dureza	44

<b>4.3. Discussão Integrada dos Resultados</b>	<b>45</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>
<b>APÊNDICE A – Relatório de Ensaio de Ultrassom</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da defasagem entre juntas soldadas no paramento de uma comporta tipo segmento. A relevância desse estudo decorre da necessidade de compreender como diferentes configurações de juntas influenciam o comportamento estrutural de componentes críticos empregados em sistemas hidromecânicos.

A comporta segmento é um elemento estrutural exposto a elevadas pressões hidrodinâmicas. É um tipo de comporta hidráulica utilizada principalmente em barragens, canais e estruturas de controle de água para regular ou interromper o fluxo de água. Esses componentes operam sob condições severas, submetidos a solicitações hidrodinâmicas, térmicas e mecânicas intensas, exigindo técnicas de soldagem que garantam elevada integridade estrutural, durabilidade e conformidade com normas internacionais. “A comporta segmento gira em torno de um eixo horizontal que passa através dos centros dos mancais e que normalmente coincide com o centro do raio de curvatura do paramento” (Erbisti, 2002, p. 47).

A utilização de chapas metálicas soldadas é uma prática consolidada na fabricação de componentes hidromecânicos empregados em usinas hidrelétricas, especialmente em estruturas de grande porte como as comportas segmento.

Neste contexto, a soldagem é definida como um processo de união permanente entre materiais metálicos, realizado por meio da fusão localizada, com ou sem adição de material de enchimento, cuja eficiência e confiabilidade são cruciais para a integridade estrutural de equipamentos industriais de grande porte, como pontes, navios, vasos de pressão e, especialmente, estruturas hidráulicas (Modenesi, 2005).

As operações de soldagem por fusão geram um aporte térmico localizado que provoca dilatação desigual entre as regiões aquecidas e frias, resultando em deformações elásticas e plásticas. Isso leva à formação de tensões residuais e distorções permanentes na junta soldada.

As tensões residuais são internas e permanecem na peça mesmo após a remoção de todas as cargas externas, surgindo devido a deformações plásticas não uniformes causadas por efeitos térmicos ou mecânicos (Modenesi, 2005). Esses fenômenos podem comprometer o desempenho estrutural, sendo essencial compreendê-los e aplicar métodos de prevenção e controle, como alívio térmico ou

técnicas de fabricação adequadas.

Diante do exposto, este trabalho propõe a seguinte questão de pesquisa: Como a técnica de defasagem de juntas impacta o comportamento microestruturais e a integridade das juntas soldadas de um paramento de comporta segmento?

O estudo realiza uma análise da técnica de defasagem de juntas soldadas, avaliando seus efeitos sobre a resistência e a integridade estrutural. A pesquisa é justificada tanto pela relevância científica quanto pelo entendimento sobre o comportamento de juntas soldadas, quanto ao impacto industrial, uma vez que seus resultados podem aprimorar práticas de fabricação, inspeção e qualificação.

Espera-se que os achados contribuam para reduzir falhas, retrabalhos e custos, além de aumentar a eficiência, a confiabilidade e a qualidade dos processos de soldagem em aplicações industriais.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar e comparar com embasamento técnico os efeitos da aplicação da técnica de defasagem de juntas soldadas no paramento de uma comporta segmento.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar a influência da defasagem de juntas soldadas no comportamento microestruturais e a integridade das juntas soldadas na Zona Termicamente Afetada (ZTA) e na Zona Fundida;
- Comparar duas configurações – juntas alinhadas (Configuração A) e juntas defasadas (Configuração B).

## 2 DESENVOLVIMENTO

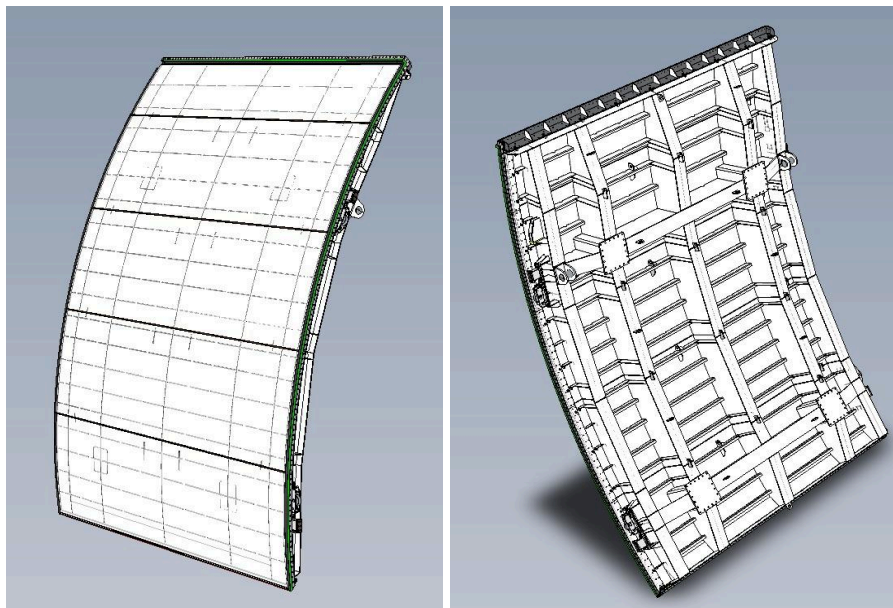
Este trabalho fundamenta-se na análise dos benefícios proporcionados pela defasagem de soldas entre chapas em paramentos de comportas segmento, recorrendo aos conceitos teóricos apresentados na revisão de literatura.

### 2.1 Revisão de Literatura

#### 2.1.1 Comportas Segmento

As comportas segmento são dispositivos hidráulicos utilizados para controlar o fluxo de água em barragens, canais e vertedouros. Possuem formato curvo, semelhante a um segmento de círculo, e operam girando em torno de um eixo horizontal. Essa geometria permite melhor distribuição dos esforços hidráulicos, resultando em estruturas mais leves e eficientes. A Figura 1 exibe um exemplo de Comporta Segmento em três dimensões.

Figura 1 - Comporta Segmento



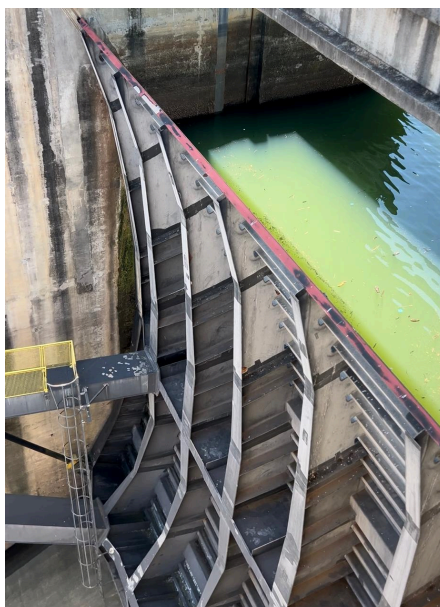
Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Segundo Erbisti em 2002, a comporta segmento é considerada o tipo mais econômico e, geralmente, o mais adequado para vertedouros de grande capacidade, devido à simplicidade de funcionamento e manutenção, facilitada pelo fácil acesso aos mancais e à estrutura, ao pequeno peso e à exigência de guinchos de baixa

potência para sua operação. Afirma-se que a abertura dessas comportas ocorre por meio da ação do guincho, que deve ser dimensionado de acordo com o peso da parte móvel da comporta e com as forças de atrito nos mancais e vedações, resultantes da pressão da água (Erbisti, 2002). Já o fechamento ocorre por gravidade.

Para aumentar a segurança do equipamento, costuma-se prever um sistema de acionamento manual, que permite a abertura da comporta em caso de falta de energia. A ausência de nichos nos pilares é apontada como uma vantagem que simplifica o projeto e melhora o escoamento junto às paredes laterais, tornando o modelo apropriado para funcionamento com aberturas parciais. Ressalta-se ainda que, em comparação com as comportas planas, a instalação da comporta segmento é relativamente mais simples, visto que a montagem e o alinhamento dos mancais e peças fixas não exigem os demorados procedimentos de verificação de afastamento e verticalidade das peças fixas, nem as rigorosas tolerâncias de instalação dos caminhos de rolamento e guias, necessárias para uma distribuição uniforme da carga (Erbisti, 2002. p.57). A Figura 2 exibe um exemplo de Comporta Segmento em funcionamento.

Figura 2 - Comporta Segmento



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Geralmente acionadas por cilindros hidráulicos, são ideais para grandes vazões e permitem controle preciso do nível da água. Sua aplicação é comum em

obras de infraestrutura hídrica, como usinas hidrelétricas e sistemas de irrigação.

### **2.1.2 Soldagem**

A soldagem é um processo de união permanente entre dois ou mais materiais, geralmente metais, por meio da aplicação de calor, com ou sem pressão, e com ou sem a utilização de material de adição. Este processo permite a formação de uma junta contínua e resistente, sendo amplamente empregado na fabricação e na manutenção de estruturas e componentes metálicos (Modenesi, 2005)

De acordo com Modenesi em 2005, os métodos de união dos metais podem ser classificados em duas categorias principais: aqueles que se baseiam na ação de forças macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles fundamentados em forças microscópicas, como as interatômicas e intermoleculares. No primeiro caso, que inclui técnicas como a parafusagem e a rebiteagem, a resistência da junta resulta da resistência ao cisalhamento do elemento de fixação (parafuso ou rebite) somada às forças de atrito entre as superfícies em contato. Já no segundo tipo de união, o processo ocorre por meio da aproximação dos átomos ou moléculas das peças envolvidas ou dessas com um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para permitir a formação de ligações químicas, especialmente ligações metálicas e de Van der Waals. São exemplos dessa categoria a brasagem, a soldagem e a colagem.

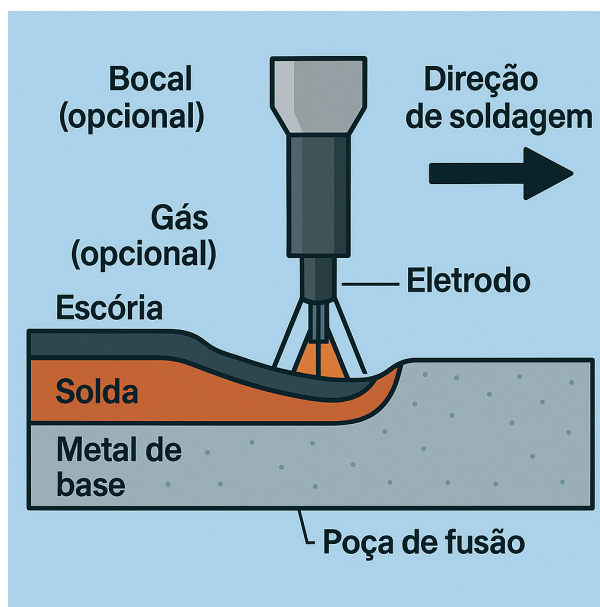
Ressalta-se que a soldagem é o processo de união de metais mais importante na indústria, sendo amplamente utilizado em diversas áreas, desde a microeletrônica até a construção de grandes estruturas, como navios. Além disso, esse método, em conjunto com a brasagem, possui aplicação tanto na fabricação de itens simples, como grades e portões, quanto em componentes de alta responsabilidade, presentes nas indústrias química, petrolífera e nuclear, bem como na produção de peças artesanais, joias e objetos de arte (Modenesi, 2005, p.17)

Os métodos mais comuns de soldagem incluem Eletrodo revestido - *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*, MIG/MAG - *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, Tungsten Inert Gas (TIG) - *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*, Arame tubular - *Flux-Cored Arc Welding (FCAW)* e Arco submerso - *Submerged Arc Welding (SAW)*. A escolha depende do tipo de material, espessura, posição da junta e requisitos estruturais.

### 2.1.2.1 Arame Tubular

O arame tubular, ou arame fluxado, é utilizado em processos de soldagem como o FCAW. Ele possui um formato semelhante ao arame sólido, mas é oco em seu interior, preenchido com um fluxo que pode conter desoxidantes, estabilizantes de arco e agentes formadores de escória (Wainer, 1992). Modenesi (2005) descreve a soldagem a arco com arame tubular, conhecida como FCAW, como um processo de união entre metais realizado por meio do aquecimento gerado por um arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo e consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão de solda é garantida pelo fluxo de soldagem contido no interior do eletrodo, podendo ser complementada por um gás externo. O autor destaca que esses fluxos não apenas atuam na proteção da solda, mas também desempenham funções adicionais, como desoxidar e refinar o metal, introduzir elementos de liga e estabilizar o arco, funções semelhantes às desempenhadas pelos revestimentos dos eletrodos revestidos (Modenesi, 2005). A Figura 3 mostra o esquema do processo de soldagem por Arame Tubular.

Figura 3 - Processo de soldagem Arame tubular



Fonte: Processo FCAW (esquemático) Modenesi, 2005.

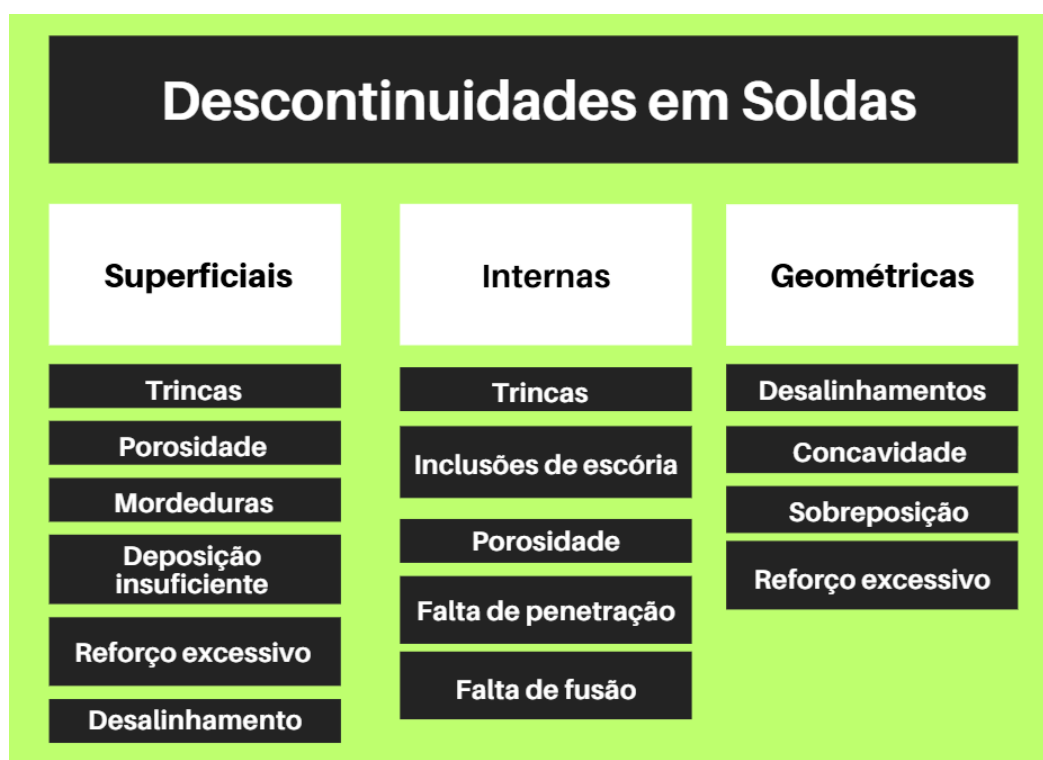
Ainda segundo o autor, esse processo é geralmente semiautomático e apresenta grande semelhança com o processo MIG/MAG no que se refere aos equipamentos e ao princípio de funcionamento, ao mesmo tempo em que se

aproxima da soldagem com eletrodos revestidos do ponto de vista metalúrgico. Por reunir características de ambos os métodos, a soldagem com arame tubular combina vantagens como alto fator de trabalho, elevada taxa de deposição e grande produtividade — típicas do MIG/MAG — com benefícios associados à soldagem com eletrodos revestidos, como versatilidade, possibilidade de ajustes na composição química do metal de solda e facilidade de aplicação em campo. Modenesi em 2005 ressalta, inclusive, que esse processo apresenta níveis de flexibilidade e produtividade superiores, e por vezes significativamente superiores, em comparação tanto à soldagem com eletrodos revestidos quanto ao processo MIG/MAG.

### 2.1.2.2 Defeitos de Soldagem

Os defeitos de soldagem são irregularidades que comprometem a integridade, resistência ou estética da junta soldada. Eles podem ocorrer por falhas no processo, materiais, equipamentos ou técnicas inadequadas. A Figura 4 apresenta um fluxograma ilustrativo dos principais defeitos da soldagem.

Figura 4 - Defeitos de Soldagem



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Conforme descrito pela AWS descontinuidade é toda interrupção ou violação da estrutura típica ou esperada de uma junta soldada. Dependendo dos critérios de qualidade estabelecidos por normas técnicas ou por cláusulas contratuais, essa descontinuidade pode comprometer a integridade da junta e, portanto, ser classificada como um defeito, exigindo a adoção de medidas corretivas. Tais ações, por serem geralmente dispendiosas, tornam imprescindível a prevenção da ocorrência de defeitos durante o processo de soldagem.

Podem incluir porosidades, trincas, inclusões e falta de fusão, afetando a resistência da junta. A correta parametrização e controle do processo são fundamentais para minimizá-los.

### **2.1.3 Normas de Soldagem AWS e ASME**

As normas de soldagem da AWS e da ASME são fundamentais para garantir a qualidade, segurança e confiabilidade em processos de soldagem industrial. Ambas são amplamente utilizadas e, apesar de terem objetivos complementares, apresentam enfoques distintos.

#### **2.1.3.1 AWS**

A AWS é uma organização técnica reconhecida mundialmente por estabelecer normas e diretrizes para os processos de soldagem, corte e ensaios relacionados. Fundada em 1919, a AWS desenvolve códigos e especificações que garantem a qualidade, segurança e padronização das soldas em diversos setores industriais. Define requisitos para qualificação de procedimentos, soldadores e critérios de aceitação para inspeções. Essencial para projetos estruturais metálicos.

Este código contém os requisitos para fabricação e montagem de estruturas de aço soldadas. Quando este código for estipulado em documentos contratuais, a conformidade com todas as suas disposições será exigida, exceto para aquelas que o Engenheiro ou os documentos contratuais modificarem ou isentarem especificamente (AWS, 2020, p. 1).

Entre seus documentos mais utilizados está a norma AWS D1.1, voltada para soldagem de estruturas metálicas em aço. A AWS também certifica profissionais, qualifica procedimentos e promove pesquisas e treinamentos, sendo referência essencial na engenharia de soldagem.

### **2.1.3.2 ASME Seção VIII**

O ASME Seção VIII (*ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section VIII*) é uma norma internacional que estabelece os requisitos para o projeto, fabricação, inspeção e testes de vasos de pressão. Dividido em três divisões, o código cobre desde vasos de pressão padrão até aplicações de alta pressão e projetos especiais. São um conjunto de normas aplicadas para recipientes de pressão, porém com conceitos transferíveis para estruturas críticas como comportas. Estas normas padronizam as práticas de fabricação, ensaio e aceitação das juntas soldadas, promovendo segurança e confiabilidade.

Essa norma garante a segurança e a integridade estrutural dos equipamentos pressurizados, sendo amplamente adotada em indústrias como petroquímica, energética e alimentícia. O cumprimento do ASME VIII é essencial para certificações, exportações e operação segura de sistemas sujeitos a pressão interna ou externa.

### **2.1.4 Ensaios Não Destrutivos**

Os ensaios não destrutivos (ENDs) são técnicas amplamente empregadas na inspeção de materiais, componentes e soldas, com o objetivo de detectar discontinuidades superficiais ou internas sem comprometer a integridade física da peça avaliada. Entre os métodos mais utilizados na indústria estão os ensaios visual (EV), líquido penetrante (LP) e ultrassom (UT), cada um com aplicações específicas e complementares conforme o tipo de material, geometria e criticidade da aplicação (Garcia et. al.,2008)

#### **2.1.4.1 Inspeção Visual**

Segundo Garcia 2008, o ensaio visual (EV) é o método mais simples e direto, sendo frequentemente o primeiro a ser aplicado em qualquer processo de inspeção. Consiste na observação direta ou ampliada da superfície do componente com o uso de instrumentos ópticos (lupas, boroscópios, câmeras, etc.), buscando identificar defeitos como:

- Trincas superficiais;
- Inclusões;

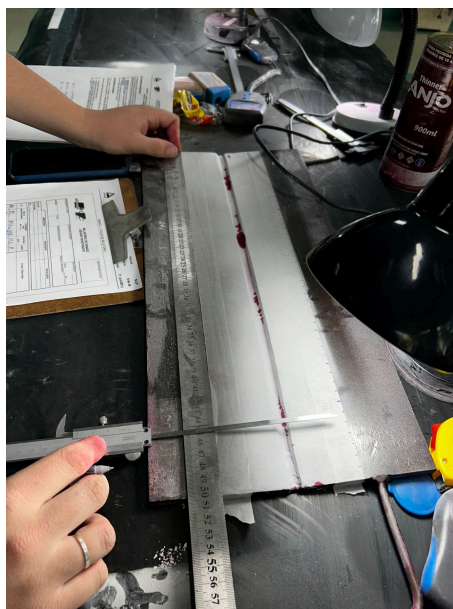
- Porosidade visível;
- Descontinuidades geométricas (rebarbas, desalinhos, falta de penetração ou fusão em soldas).

Para ser eficaz, o EV deve ser realizado sob condições adequadas de iluminação e com superfícies limpas e acessíveis. É normatizado por documentos como a ASME V Artigo 9, AWS D1.1 e também pela ABENDI (Garcia *et. al.*, 2008)

#### 2.1.4.2 Líquido Penetrante

O ensaio por Líquido Penetrante é um método não destrutivo utilizado para detectar descontinuidades superficiais, como trincas, poros ou fissuras, em materiais sólidos e não porosos. O processo consiste na aplicação de um líquido com alta capilaridade sobre a superfície do material. Após certo tempo de penetração, o excesso é removido e aplica-se um revelador, que ajuda a extrair o líquido das falhas, tornando-as visíveis. A Figura 5 exibe uma imagem da realização do ensaio por líquido penetrante.

Figura 5 - Ensaio de Líquido penetrante



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Segundo a NBR NM 334 (2012, p. 10), o ensaio por líquidos penetrantes é um método amplamente utilizado para detectar descontinuidades que afloram à superfície dos materiais. O procedimento consiste na aplicação uniforme do líquido

penetrante sobre a peça a ser inspecionada, permitindo que esse líquido penetre em eventuais descontinuidades superficiais. Após um tempo de penetração adequado, o excesso do produto é cuidadosamente removido e a superfície da peça é seca. Em seguida, aplica-se o revelador, cuja função é absorver o penetrante retido nas falhas, evidenciando sua presença por meio de manchas nos locais afetados. A etapa final do processo envolve a inspeção visual da peça, com o objetivo de verificar a existência ou não de descontinuidades. Os parâmetros do ensaio — como o tipo de limpeza inicial, o tempo de penetração e o método de remoção do excesso — são determinados com base nos materiais utilizados, nas características da peça (incluindo forma, tamanho, condição superficial e composição da liga) e no tipo de descontinuidade que se pretende identificar (NBR NM 334, 2012).

Esse tipo de ensaio é muito utilizado em metais, cerâmicas e plásticos, sendo eficaz para inspeção de soldas, fundidos e peças usinadas, com baixo custo e boa sensibilidade.

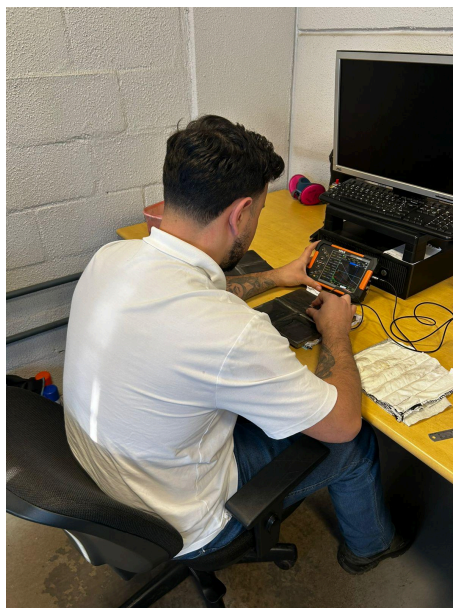
#### **2.1.4.3 Ultrassom**

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo que utiliza ondas sonoras de alta frequência para detectar descontinuidades internas em materiais sólidos, como trincas, inclusões ou falta de fusão. Um transdutor emite pulsos ultrassônicos que atravessam o material e geram ecos ao encontrar interfaces ou defeitos. Esses sinais são analisados para determinar a localização, tamanho e tipo da descontinuidade (Garcia et. al., 2008).

De acordo com a NBR NM 330 (2011, p. 11), o ensaio por ultrassom fundamenta-se na propagação de ondas ultrassônicas através da peça a ser inspecionada, podendo empregar a técnica de transmissão — na qual se acompanha o sinal transmitido ou a técnica de reflexão, que se baseia na detecção de sinais refletidos ou difratados por superfícies internas ou descontinuidades.

Ambas as abordagens podem utilizar um único cabeçote, que funciona como emissor e receptor simultaneamente, ou cabeçotes distintos para emissão e recepção, inclusive em configuração dupla. Essas técnicas também podem envolver reflexões intermediárias provenientes de uma ou mais superfícies internas do objeto examinado. A Figura 6 exhibe o processo do ensaio de ultrassom no corpo de prova.

Figura 6 - Ensaio de Ultrassom



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

O ensaio pode ser conduzido manualmente ou com auxílio de dispositivos semi ou totalmente automatizados, utilizando varredura por contato direto, imersão em meio líquido ou outros métodos de acoplamento apropriados à complexidade do problema a ser analisado.

É amplamente utilizado na inspeção de soldas, estruturas metálicas, tubulações e componentes críticos, devido à sua alta precisão, profundidade de alcance e capacidade de fornecer resultados em tempo real.

## **2.1.5 Ensaio Destrutivos**

### **2.1.5.1 Micrografia**

A análise metalográfica é realizada com o auxílio de microscópios ópticos ou eletrônicos, que permitem observar microestruturas, fases presentes e ZTA em materiais metálicos.

Para que essa observação seja possível, a amostra deve ser previamente submetida a uma preparação adequada, que envolve etapas como corte, lixamento, polimento e ataque químico, de modo a revelar suas características estruturais (Rohde, 2010).

A micrografia é uma técnica utilizada para observar e registrar a

microestrutura de materiais através de microscópios ópticos ou eletrônicos. É fundamental na metalurgia e na engenharia de materiais para analisar grãos, fases, inclusões e defeitos internos que influenciam nas propriedades mecânicas do material (Rohde, 2010)

A micrografia resultante dessa análise fornece informações valiosas sobre tratamentos térmicos aplicados, processos de soldagem utilizados e a qualidade das ligas metálicas. Por isso, trata-se de uma ferramenta essencial tanto para o controle de qualidade quanto para o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias na área da engenharia metalúrgica (Rohde, 2010).

### 2.1.5.2 Macrografia

A macrografia é uma técnica utilizada para examinar a estrutura de materiais metálicos a olho nu ou com baixo aumento, geralmente após ataque químico. Permite observar defeitos visíveis, como trincas, poros, falta de fusão, penetração e alinhamento em soldas ou regiões afetadas por processos mecânicos e térmicos. Análise em baixa ampliação de cortes transversais das soldas, útil para verificar penetração, forma do cordão e homogeneidade. A Figura 7, exibe uma junta soldada onde foi realizado um ensaio macrográfico.

Figura 7 - Ensaio Macrográfico



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Aplicada na inspeção de soldas e análise de seções transversais de

componentes, sendo uma ferramenta importante no controle de qualidade e na verificação da conformidade com normas técnicas (Rohde, 2010).

### **2.1.5.3 Ensaio de Dureza Rockwell**

O ensaio de dureza Rockwell determina a dureza por meio da medição da profundidade residual da indentação após a aplicação das cargas de ensaio. A relação entre profundidade de penetração e dureza é inversamente proporcional, ou seja, maiores profundidades indicam menor dureza do material (Zwick Roell, 2025).

O ensaio de dureza Rockwell ocorre em três etapas: aplicação da pré-carga, aplicação da carga e remoção da carga adicional, resultando na profundidade residual  $h$  utilizada no cálculo da dureza conforme a ISO 6508 (Zwick Roell, 2025).

Apresenta vantagens como rapidez, leitura direta e baixo custo, além de não exigir preparação complexa. Entretanto, é sensível a pequenas variações de profundidade, depende do bom estado do penetrador e requer superfície limpa.

### **2.1.6 Aço ASTM A572 GR.50**

O aço ASTM A572 Grau 50 é amplamente utilizado em aplicações que exigem boa soldabilidade, tenacidade e desempenho mecânico elevado. Sua composição química apresenta baixo teor de carbono e pequenas quantidades de elementos microligantes, como vanádio, nióbio e titânio. De acordo com Yizheng (2021) o aço ASTM A572 Grau 50 é classificado como um aço estrutural de alta resistência e baixa liga, apresentando limite de escoamento de 50 ksi (345 MPa) e resistência à tração de 65 ksi (450 MPa). Suas propriedades mecânicas são superiores as do aço ASTM A36. A norma ASTM A572 contempla cinco classes distintas de resistência ao escoamento: Grau 42, Grau 50, Grau 55, Grau 60 e Grau 65, aplicáveis a perfis estruturais, chapas e barras.

Esse aço pode ser submetido a tratamentos térmicos como normalização e alívio de tensões, utilizados para refinamento estrutural e redução de tensões residuais. Para proteção contra corrosão, são empregados revestimentos como pintura epóxi, galvanização e metalização. Graças à combinação de resistência, boa soldabilidade e estabilidade metalúrgica, o ASTM A572 Gr.50 é amplamente utilizado em estruturas metálicas, componentes hidromecânicos e aplicações onde desempenho estrutural confiável é essencial.

### **2.1.7 Defasagem de Solda**

A defasagem de solda, segundo a ASME Seção VIII, refere-se ao deslocamento intencional entre as juntas de solda em diferentes camadas ou passadas, especialmente em emendas longitudinais e circunferenciais de vasos de pressão. O objetivo é evitar a concentração de tensões e reduzir o risco de falhas estruturais.

Ainda, conforme a ASME Seção VIII (2021, p. 100), em vasos de pressão compostos por dois ou mais cursos, os centros das juntas longitudinais soldadas dos cursos adjacentes devem ser desencontrados ou espaçados entre si por uma distância mínima equivalente a cinco vezes a espessura da chapa mais espessa.

Essa exigência pode ser dispensada apenas nos casos em que as juntas longitudinais forem radiografadas em uma extensão de 100 mm (4 polegadas) em cada lado de toda interseção com uma solda circunferencial.

A norma exige que haja uma defasagem mínima entre as emendas de solda, geralmente especificada em função da espessura do material, garantindo a integridade estrutural do componente. Esse controle é fundamental para atender aos requisitos de segurança e desempenho definidos pelo código.

### 3. METODOLOGIA

Esta pesquisa, de natureza aplicada, adota uma abordagem quali-quantitativa. Seus objetivos alinham-se aos de uma pesquisa explicativa, sendo conduzida por meio de procedimentos técnicos característicos de uma pesquisa experimental. Em conformidade com os critérios estabelecidos pelas normas técnicas, o estudo analisa os efeitos estruturais da aplicação da técnica de defasagem de juntas soldadas no paramento de comportas do tipo segmento.

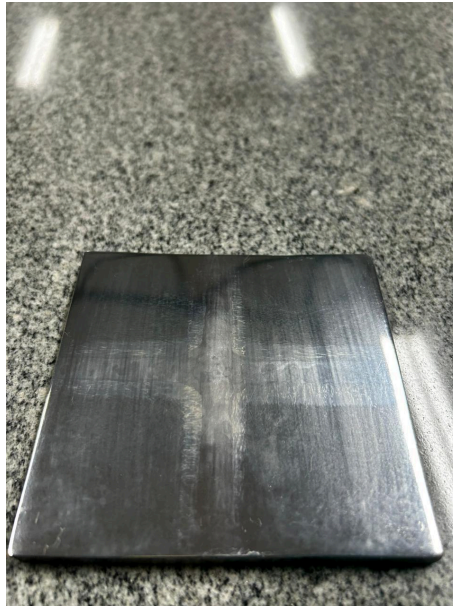
#### 3.1 Materiais e Métodos

Com base nos objetivos propostos foram fabricados corpos de prova simulando um paramento em aço estrutural de alta resistência ASTM A572 Grau 50, material amplamente utilizado em aplicações hidromecânicas devido à sua excelente combinação de resistência mecânica, tenacidade e boa soldabilidade. Para a execução das juntas, foi adotado o processo de soldagem FCAW, utilizando o arame E71T1 de 1,2mm de diâmetro e gás de proteção dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os parâmetros utilizados na fonte de soldagem foram tensão de 25,1 V, corrente de 191 A e fluxo de gás de proteção de CO<sub>2</sub> a 12,7 L/min, com velocidade de soldagem de 60 cm/min. As juntas das duas configurações foram executadas em três passes, compreendendo o passe de raiz e o passe de acabamento aplicados tanto na face quanto no lado da raiz.

A fim de possibilitar a análise comparativa, foram produzidas duas configurações construtivas:

- Configuração A: juntas soldadas alinhadas longitudinalmente Figura 8;

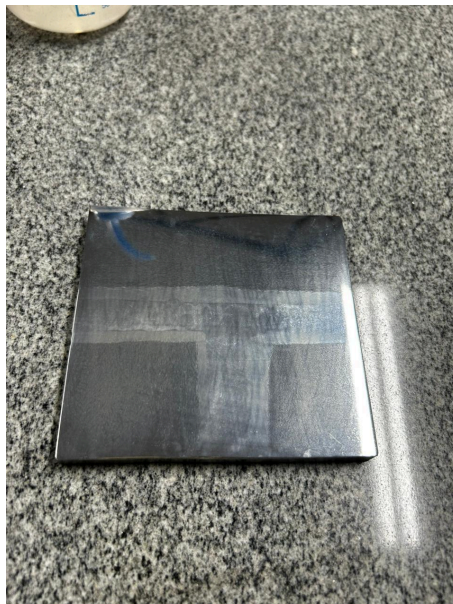
Figura 8 - Configuração A



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

- Configuração B: juntas soldadas defasadas longitudinalmente Figura 9.

Figura 9 - Configuração B



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

O estudo foi conduzido por meio de ensaios laboratoriais, de forma a garantir resultados representativos. Os ensaios não destrutivos realizados, são os descritos a seguir:

### **3.1.1 Ensaios Não Destrutivos**

Os ensaios não destrutivos foram empregados com o objetivo de assegurar que ambas as configurações de corpos de prova juntas alinhadas e juntas defasadas apresentassem a mesma condição inicial de integridade. A aplicação dos métodos de inspeção visual, líquido penetrante e ultrassom permitiu verificar a ausência de descontinuidades superficiais ou internas que pudessem comprometer a comparação entre os resultados. Dessa forma, garantiu-se que eventuais diferenças observadas nos ensaios destrutivos ou análises mecânicas e metalúrgicas fossem decorrentes exclusivamente da configuração construtiva adotada, e não de falhas de fabricação. Esse procedimento foi essencial para assegurar a confiabilidade, a repetibilidade e a validade científica dos resultados obtidos.

#### **3.1.1.1 Ensaio visual**

A inspeção visual tem o intuito de identificar se não existem descontinuidades superficiais no cordão de solda, esse ensaio foi feito a olho nu com o auxílio de uma lanterna, conforme o PR-050. A inspeção visual foi realizada após a limpeza da superfície da solda e das áreas adjacentes, utilizando iluminação adequada. Durante a avaliação, foram examinados a geometria do cordão e possíveis descontinuidades superficiais, como poros, trincas, mordeduras e falta de fusão. Não foram identificadas descontinuidades na solda ao longo de toda a extensão inspecionada. A Figura 10 exibe a inspeção realizada;

Figura 10 - Ensaio Visual



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

### 3.1.1.2 Ensaio por líquido penetrante

O ensaio por líquido penetrante foi utilizado para detecção de trincas, poros, falta de fusão e mordeduras, conforme o PR-001. O ensaio por líquido penetrante foi aplicado na raiz da solda do corpo de prova. A superfície foi previamente limpa e seca, permitindo a aplicação adequada do penetrante conforme a Figura 11;

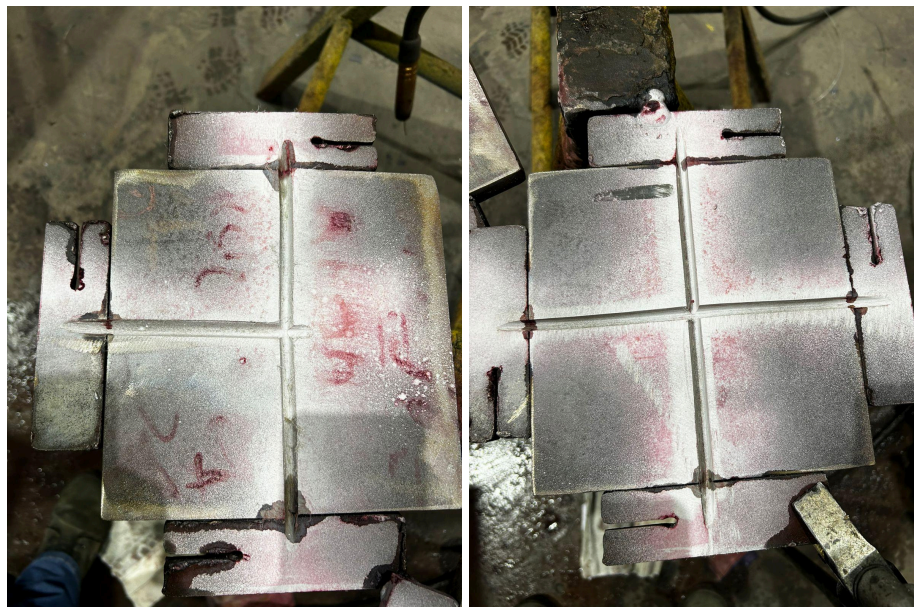
Figura 11 - Ensaio por Líquido Penetrante



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Após o tempo de penetração de 10 minutos conforme o procedimento para aços carbono de baixa liga, o excesso foi removido com água e a área novamente seca, seguido da aplicação uniforme do revelador conforme a Figura 12.

Figura 12 - Ensaio por Líquido Penetrante



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A inspeção visual final foi conduzida sob iluminação apropriada, não sendo identificadas descontinuidades relevantes na região avaliada. Após essa etapa, procedeu-se à soldagem da raiz. O ensaio na raiz foi realizado para garantir a inexistência de descontinuidades na região central da junta, assegurando a qualidade inicial do cordão. Posteriormente, o ensaio por ultrassom foi executado para confirmar que a junta soldada permanecia livre de descontinuidades internas.

### 3.1.1.3 Ensaio por ultrassom

O ensaio por ultrassom foi utilizado para identificação de descontinuidades internas como poros, trincas, inclusões de escórias e falta de fusão, conforme PR-011. O ensaio por ultrassom foi executado nos dois corpos de prova confeccionados. Inicialmente, o equipamento foi preparado e calibrado utilizando o bloco padrão V1, com ajustes de sensibilidade, alcance e zero eletrônico. As superfícies dos corpos de prova foram limpas e receberam acoplante à base de metilcelulose, garantindo a adequada transmissão das ondas ultrassônicas. A inspeção foi conduzida utilizando transdutor reto de duplo cristal a 90° e transdutores

angulares de 60° e 70°, possibilitando tanto a verificação da espessura nominal quanto a avaliação completa da região soldada conforme Figura 13.

Figura 13 - Ensaio de Ultrassom



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Foram realizadas varreduras longitudinais e transversais ao longo de toda a extensão dos corpos de prova, monitorando-se a presença de ecos anteriores ao eco de fundo, os quais indicariam potenciais descontinuidades internas. Todas as indicações observadas foram analisadas conforme os critérios de aceitação estabelecidos no procedimento do ensaio por ultrassom. Ao final, não foram registradas descontinuidades relevantes em nenhum dos corpos de prova, conforme os limites de aceitação aplicáveis. O relatório do ensaio de ultrassom está nos apêndices.

### 3.1.2 Preparação

Os corpos de prova foram preparados para a realização dos ensaios destrutivos, sendo necessárias etapas de usinagem e polimento das superfícies, de modo a garantir a qualidade e a precisão das análises subsequentes conforme Figuras 14 e 15;

Figura 14 - Usinagem dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Figura 15 - Lixamento dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

### 3.1.3 Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos foram aplicados às duas configurações de corpos de prova com o objetivo de avaliar, de forma comparativa e aprofundada, o comportamento mecânico e metalúrgico das juntas soldadas. A realização desses

ensaios permite identificar diferenças reais na penetração, no perfil de fusão, nas microestruturas formadas e na distribuição de durezas entre as configurações analisadas. Como os ensaios não destrutivos já haviam assegurado que todos os corpos de prova apresentavam integridade equivalente antes do rompimento, os ensaios destrutivos puderam ser utilizados para verificar se a geometria e o posicionamento das juntas influenciam a resistência, a morfologia da ZTA e a qualidade da solda. Dessa forma, esses ensaios foram fundamentais para caracterizar as propriedades internas do material e validar, com rigor científico, o impacto da defasagem das juntas na integridade estrutural do componente.

### 3.1.3.1 Análise Macrográfica

A análise macrográfica foi utilizada para avaliação da penetração, perfil de fusão e integridade da ZTA. As Figuras 16 e 17 exibem a realização do ensaio macroográfico.

Figura 16 - Ensaio Macroográfico



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Figura 17 - Ensaio Macrográfico

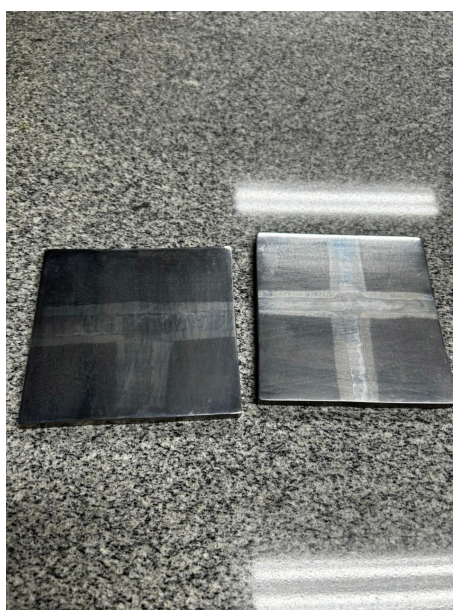


Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

### 3.1.3.2 Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada com preparação de amostras, ataque químico e observação em microscópio ótico, para análise detalhada da microestrutura das regiões soldadas e da ZTA, visando detectar eventuais descontinuidades, segregações e transformações metalúrgicas. A Figura 18 exibe as amostras utilizadas na micrografia;

Figura 18 - Amostras



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Devido às dimensões dos corpos de prova serem maiores que o convencional, o processo de lixamento usando as lixas de carbeto de silício de granulometria de 80 a 1200, sequencialmente, e do polimento com uso de alunima foram realizados com o auxílio do equipamento lixadeira orbital. Após, as amostras foram atacadas com o reagente Nital 5%, composto por uma solução de 95% de álcool e 5% de ácido nítrico, e em seguida as amostras foram levadas ao microscópio ótico para visualização.

### 3.1.3.2 Ensaio de dureza Rockwell

O ensaio de dureza foi realizado com o auxílio do durômetro analógico. Para realização deste ensaio, foi utilizado o indentador esférico de carbeto de tungstênio, e pré - carga de 10 kgf e carga de 100 kgf. Foram realizadas seis medidas na região da ZTA e seis medidas na região do metal de base, sendo descartadas a primeira medição de cada região, isso para cada amostra. A Figura 19 exibe o durômetro utilizado no ensaio.

Figura 19 - Durômetro



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

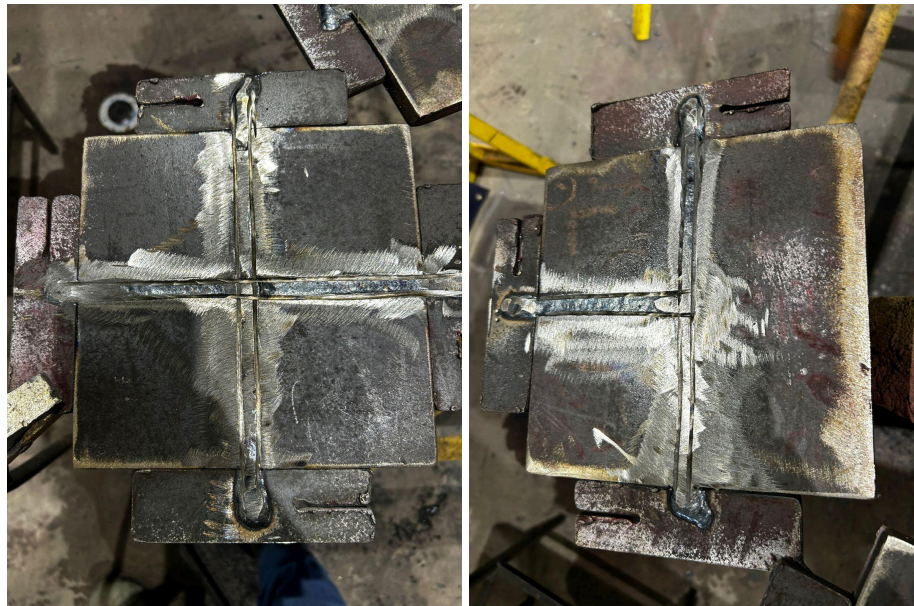
A avaliação comparativa entre as duas configurações construtivas propostas Configuração A, com juntas soldadas alinhadas longitudinalmente, e Configuração B, com juntas defasadas permitiu identificar diferenças importantes no comportamento da microestrutura das regiões fundidas e da ZTA.

### 4.1. Ensaios Não Destrutivos

#### 4.1.1 Inspeção Visual da Solda

A inspeção visual demonstrou que ambas as configurações atenderam aos critérios de aceitação de acordo com o procedimento PR-50, não sendo observadas descontinuidades superficiais significativas como trincas, mordeduras, porosidade aberta ou falta de enchimento. A Figura 20 apresenta a inspeção visual da raiz da solda, a direita a configuração A e a esquerda a configuração B.

Figura 20 - Ensaio Visual



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

#### 4.1.2 Ensaio por Líquido Penetrante

O ensaio de líquido penetrante não identificou trincas superficiais nem porosidade aberta relevante em nenhuma das amostras. Na Figura 21, observa-se a aplicação do líquido penetrante e na Figura 22 observa-se a aplicação do revelador,

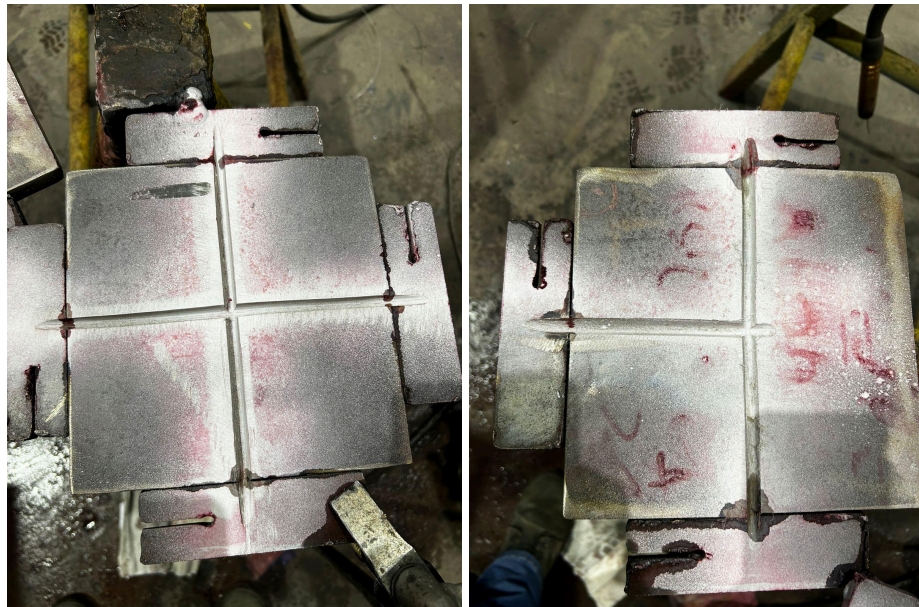
a direita a configuração A e a esquerda a configuração B.

Figura 21 - Ensaio por Líquido Penetrante



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Figura 22 - Ensaio por Líquido Penetrante



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Na Configuração A foram observadas indicações lineares de baixa intensidade, então foi realizada a limpeza da junta com uma esmerilhadeira com um disco de corte. A Configuração B não apresentou tais indicações.

### 4.1.3 Ensaio de Ultrassom

O ensaio por ultrassom indicou que ambas as configurações não apresentaram descontinuidades que fossem reprovadas pelos critérios de aceitação estabelecidos pelo procedimento PR-011 conforme a Figura 23. No ensaio de ultrassom, todas as indicações que ultrapassarem 20% da curva de referência devem ser analisadas para caracterização. Indicações com refletividade superior a 50% da curva de referência devem ser registradas, incluindo posição, nível de resposta, dimensão e profundidade. Descontinuidades que excederem 100% da curva de referência são consideradas rejeitáveis quando o comprimento ultrapassar 6,3 mm para juntas com espessura até 19 mm, ou 1/3 da espessura para juntas entre 19 mm e 58 mm, considerando-se sempre a menor espessura em juntas desiguais.

Figura 23 - Ensaio de Ultrassom



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

## 4.2. Ensaio Destrutivos

### 4.2.1 Análise Macrográfica

As macrografias mostraram que:

- Ambas as configurações apresentaram boa penetração, com perfil de fusão

adequado ao processo FCAW e ao arame E71T1.

- A Configuração A apresentou ZTA mais larga e simétrica, consequência da repetição térmica longitudinal.
- A Configuração B exibiu uma ZTA menos extensa e mais distribuída ao longo do componente, reduzindo o acúmulo de energia térmica em regiões específicas.

Na Figura 24 é possível observar a ZTA e a zona fundida dos dois corpos de prova.

Figura 24 - Ensaio Macrográfico



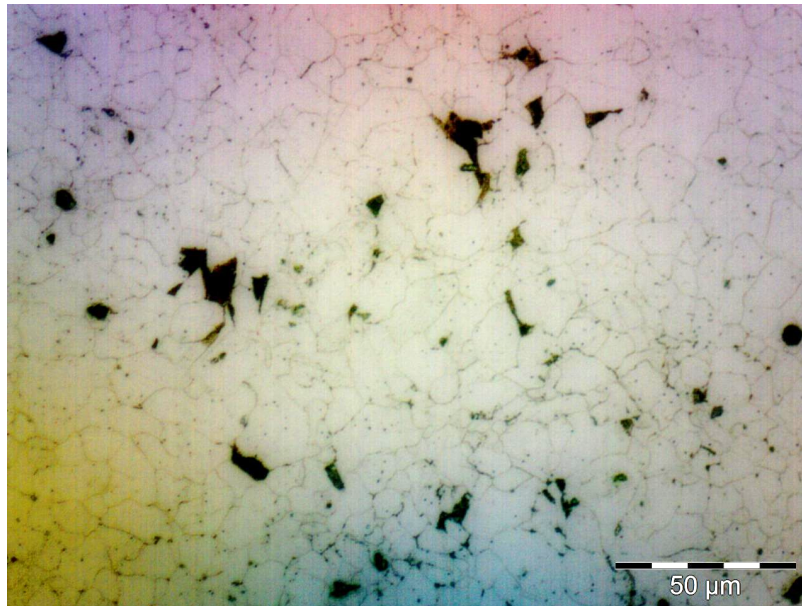
Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

#### 4.2.2 Análise Metalográfica

As análises microscópicas permitiram observar:

- Microestruturas típicas de aço ASTM A572 Gr.50 soldado por FCAW, compostas por ferrita e perlita em proporções variáveis. A Figura 26 exibe a microestrutura típica sendo a parte clara representada pela ferrita e a escura pela perlita.

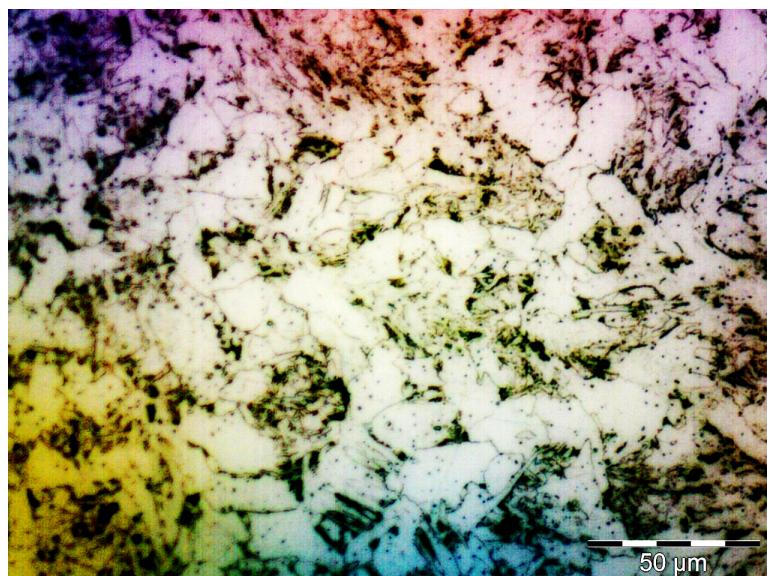
Figura 26 - Amostra do metal de base do corpo de prova com soldas alinhadas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

- A Configuração A apresentou na região de transição entre o metal de base e a ZTA as microestruturas de ferrita (parte clara), início de grãos martensíticos (agulhas) e perlita (parte escura), conforme exibido na Figura 27, compatíveis com resfriamento desigual e gradientes mais intensos devido à continuidade da junta.

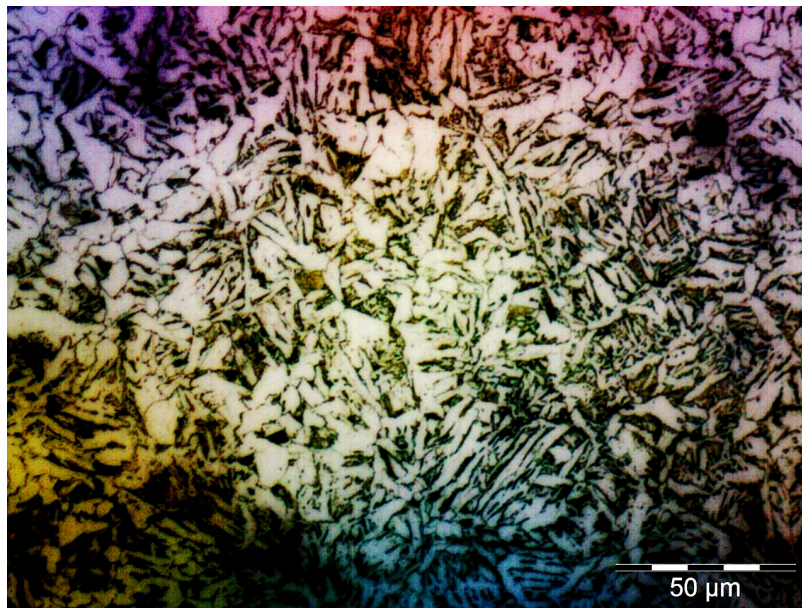
Figura 27 - Região de transição entre metal de base e a ZTA (Configuração A)



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

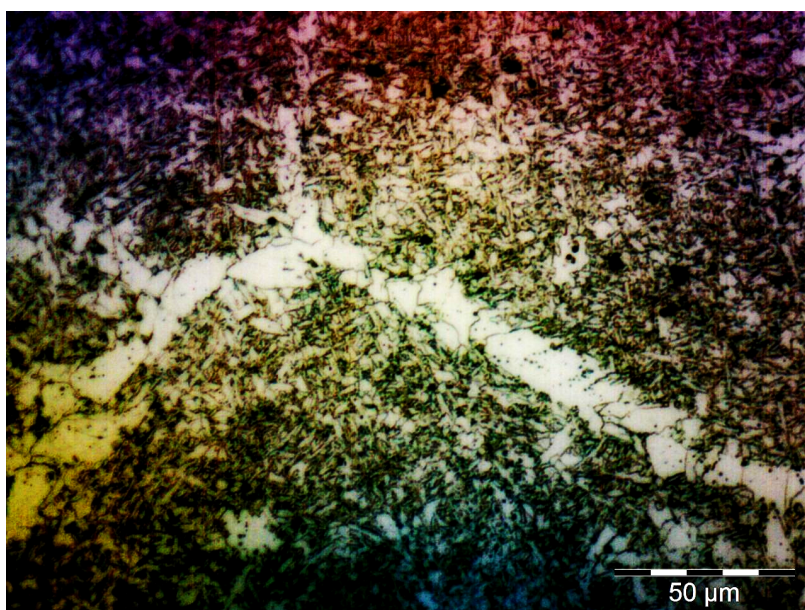
- Na ZTA da configuração A pode-se observar a microestrutura dominante martensítica (agulhas), exibida pela Figura 28. E no centro da zona fundida foram analisadas regiões predominantes martensíticas (agulhas) e no centro grãos ferríticos (parte clara), ilustrado na Figura 29. Devido ao resfriamento e tensões originadas.

Figura 28 - ZTA



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

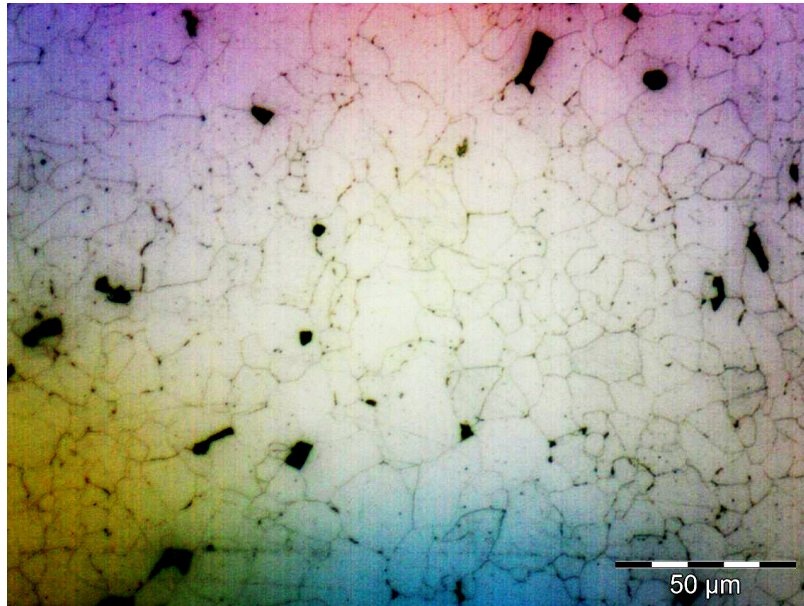
Figura 29 - Centro da zona fundida na interseção do "X" das juntas soldadas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

- Na Configuração B, a microestrutura mostrou-se mais refinada, com maior homogeneidade e predomínio de ferrita acicular fina, indicando resfriamento mais uniforme, conforme observado na Figura 30.

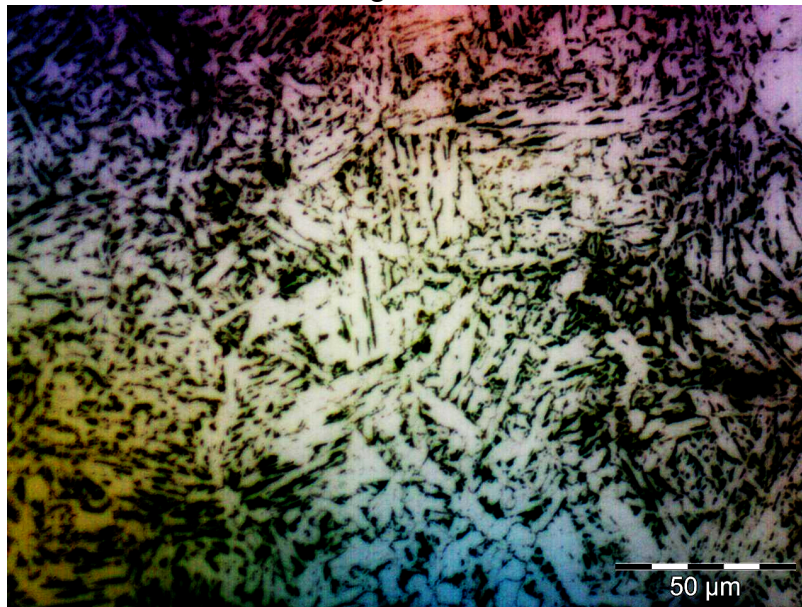
Figura 30 - Amostra do metal de base do corpo de prova com soldas defasadas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025

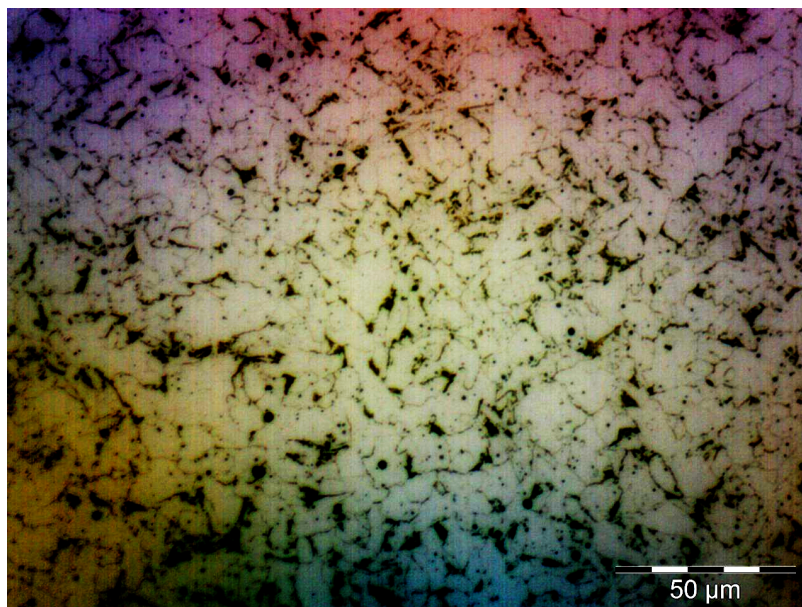
- A ZTA da configuração B também demonstrou uma região predominante martensítica, causada pelo resfriamento e temperabilidade do aço, ilustrado na Figura 31. Já a região fundida da configuração B não apresentou a microestrutura martensítica, evidenciado na Figura 32.

Figura 31 - ZTA



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025

Figura 32 - Zona fundida



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025

#### 4.2.3 Ensaio de Dureza

A Configuração A apresentou picos de dureza superiores na ZTA, indicando maior severidade térmica e potencial fragilização local. O metal de base ficou com uma dureza variando entre 81 a 83 rockwell b (HRB). A ZTA ficou entre 88 HRB e 91 HRB. A zona fundida variou de 86 HRB a 90 HRB.

A Configuração B obteve valores de dureza muito parecidos e até um pouco superiores. O metal de base ficou com a mesma dureza que o corpo de prova com a

configuração A. A ZTA ficou entre 87 HRB e 92 HRB. A zona fundida variou de 86 HRB a 91 HRB. Visualizado no Quadro 1.

Quadro 01

Região Avaliada	CP A (HRB)	CP B (HRB)	Observações
<b>Metal de Base</b>	81 – 83	81 – 83	Mesma faixa para ambas as configurações.
<b>Zona Termicamente Afetada (ZTA)</b>	88 – 91	87 – 92	A Configuração A apresentou picos ligeiramente maiores; Configuração B teve variação semelhante e ligeiramente superior no limite máximo.
<b>Zona Fundida (ZF)</b>	86 – 90	86 – 91	Variações muito próximas entre as duas configurações.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025

Os valores de dureza obtidos apresentaram pouca variação entre as amostras, o que impede afirmar que a configuração da junta tenha provocado diferenças significativas no comportamento mecânico do material.

### 4.3. Discussão Integrada dos Resultados

A análise combinada dos END e ED evidencia que a Configuração B juntas defasadas apresenta desempenho superior, conforme verificado no Quadro 2.

Quadro 02

Critério Avaliado	Configuração A	Configuração B
<b>Distribuição térmica</b>	Menos uniforme, com zonas de concentração de calor	Mais homogênea, com melhor dissipação térmica
<b>ZTA</b>	Mais extensa e heterogênea	Menor extensão e maior uniformidade
<b>Microestrutura</b>	Regiões localmente mais grosseiras	Microestrutura mais refinada e estável
<b>Concentração de tensões</b>	Maior probabilidade de tensões residuais	Redução de tensões devido à defasagem
<b>Risco de distorções</b>	Moderado a elevado	Reduzido

<b>Integridade nos END (VT, LP, US)</b>	Aceitável, porém com maior variação térmica	Aceitável e mais consistente
<b>Desempenho em longo prazo</b>	Suscetível a fadiga térmica e mecânica	Melhor desempenho sob cargas cíclicas
<b>Adequação para estruturas hidromecânicas</b>	Adequado, porém menos eficiente	Mais indicado pela estabilidade estrutural

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025

Esses aspectos podem comprometer o desempenho estrutural em longo prazo, especialmente em estruturas hidromecânicas sujeitas a carregamentos cíclicos ou dinâmicos.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou responder à questão central: “Como a técnica de defasagem de juntas impacta o comportamento microestrutural e a integridade das juntas soldadas em um paramento de comporta segmento?”. Para isso, definiu-se como objetivo geral analisar comparativamente os efeitos da aplicação da defasagem de juntas soldadas em chapas de aço ASTM A572 Gr.50, simulando a estrutura de um paramento. Os objetivos específicos incluíram:

- Avaliar as influências da defasagem sobre a ZTA e a Zona Fundida;
- Comparar duas configurações – juntas alinhadas (Configuração A) e juntas defasadas (Configuração B).

Com base nos ensaios não destrutivos (visual, líquido penetrante e ultrassom), verificou-se que ambas as configurações apresentaram integridade adequada, sem descontinuidades relevantes. Isso assegurou que as diferenças observadas nos ensaios destrutivos decorreram exclusivamente da geometria das juntas.

Os ensaios macrográficos, metalográficos e de dureza revelaram que a Configuração B (juntas defasadas) promoveu uma distribuição térmica mais uniforme, gerando microestruturas mais refinadas e ZTA menos extensa. Já a Configuração A (juntas alinhadas) apresentou maior concentração térmica, ZTA mais larga, microestruturas localmente mais grosseiras e picos de dureza ligeiramente maiores fatores que potencializam tensões residuais e podem comprometer o desempenho em longos ciclos de serviço.

Embora as diferenças de dureza entre as configurações tenham sido pequenas, a análise metalúrgica indica que a defasagem de soldas tende a proporcionar comportamento microestrutural mais homogêneo, alinhando-se ao propósito normativo da ASME e confirmando o benefício da técnica para estruturas submetidas a solicitações severas, como ocorre em comportas segmento.

Entretanto, o estudo apresenta limitações inerentes ao número reduzido de corpos de prova e à análise restrita a três tipos de ensaios destrutivos. Assim, para ampliar a robustez científica da pesquisa, recomenda-se a realização de ensaios complementares, tais como:

- Aquisição de dados de temperatura das juntas durante e após a soldagem, por meio de termopares;

- Ensaio de tração, para avaliar limites de resistência, escoamento e alongamento;  
Ensaio de dobramento, para investigar ductilidade da junta e possíveis fragilizações;
- Ensaio de impacto Charpy, analisando tenacidade em diferentes regiões da solda;
- Medição de tensões residuais, por difração de raios X ou método do furo cego;
- Simulações numéricas, utilizando método dos elementos finitos para prever distribuição de tensões, distorções e efeitos térmicos;
- Análises de fadiga, especialmente relevantes devido aos ciclos hidrodinâmicos das comportas;
- Avaliação de tratamentos térmicos pós-soldagem, como alívio de tensões;
- Ensaio de corrosão, considerando o ambiente agressivo em instalações hidrelétricas.

Conclui-se, portanto, que a defasagem de juntas soldadas apresenta benefícios técnicos significativos para a integridade estrutural de parâmetros de comportas segmento, contribuindo para maior confiabilidade operacional, redução de tensões localizadas e melhoria da qualidade metalúrgica. Estudos futuros, incorporando os ensaios adicionais sugeridos, poderão consolidar ainda mais o entendimento do comportamento dessas juntas e fornecer subsídios práticos para a otimização de processos de fabricação e inspeção no setor hidromecânico.

## REFERÊNCIAS

MODENESI, Paulo José. **Soldagem - fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

ERBISTI, Paulo Cezar Ferreira. **Comportas Hidráulicas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code**: Section VIII, Division 1 – Rules for Construction of Pressure Vessels. New York: ASME, 2021.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M**: – Structural Welding Code – Steel. Miami: AWS, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBRNM 330**. Ensaio não destrutivo — Ensaio por Ultrassom — Princípios gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBRNM 334**. Ensaio não destrutivo — Líquidos penetrantes — Detecção de descontinuidades. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. **PR-001**: Procedimento de Ensaio Não Destrutivo por Líquido Penetrante. Revisão 8, [S.I.]: ABENDI, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. **PR-011**: Procedimento de Ensaio Não Destrutivo por Ultrassom em Soldas. Revisão 11, [S.I.]: ABENDI, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. **PR-050**: Procedimento de ensaio não destrutivo - Ensaio visual e dimensional de soldas. Revisão 4. [S.I.]: ABENDI, 2024.

ROHDE, Regis Almir. **Metalografia preparação de amostras**. Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões, 3. Ed. Rio Grande do Sul, 2010.

WAINER, J. *et al.* **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1992. GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Álvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaio dos materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ZWICK ROELL. **Rockwell ensaio de dureza ISO 6508 / ASTM E18**. Campinas - SP  
zwickroell. Disponível em:  
<<https://www.zwickroell.com/pt/branchen/metall/normen-metall/rockwell-ensaio-iso-6508/>>. Acesso em: 20 nov. 2025.

CANGZHOU YIZENG INDUSTRY CO., LTD. **ASTM A572 Steel Equivalent, Properties, Tensile Yield Strength.** Cangzhou City, Hebei Province, China. Yizeng Industry Co., LTD 2021. Disponível em: <<https://www.yizengpipe.com/info/astm-a572-steel-equivalent-properties-tensil-65418354.html>>. Acesso em: 02 dez. 2025.

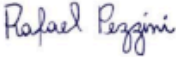
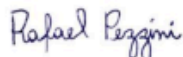
## APÊNDICE A – Relatório de Ensaio de Ultrassom

RELATÓRIO DE ENSAIO ULTRASSOM - SOLDAS ULTRASONIC REPORT – WELDING							Número: Report nº:				
							Data: 22/08/2025 Date:				
Cliente: Client:		Local de Ensaio: CBHIDRO Test Location:		Ordem de Serviço: Service Order:							
Obra/Projeto: Job/Project:		Equipamento: Equipment:		Desenho / Isométrico: Drawing / Isometric:							
Peça: CP 01 / CP 02 Part:		Metal Base: ASTM A572 GR.50 Base Metal:		Espessura: 12,7 mm Thickness:							
Norma de Referência: ASME Sec. VIII Div. 1 Reference Standard:		Procedimento Ensaio: PR-UT-01 Testing Procedure:		Sinete Soldador: 01 Welder Stamp:							
Bloco de Referência: ASME 20 Reference Block		Cond. Superfície: Escovada Surface Condition:		Acoplante: Metil Celulose Couplant:							
EQUIPAMENTO DE ENSAIO TESTING EQUIPMENT:											
Fabricante: SIUI Manufacturer:		Modelo: SMARTOR Model:		Número de Serie: M06320200176R Serial Number:							
CABEÇOTE							DADOS DA CALIBRAÇÃO				
Tipo Type	Fabricante Manufacturer	Modelo Model	Nº de Série Serial Number	Ângulo Real Real Angle	Dimensões Dimensions (mm)	Frequência Frequency (MHz)	Esp. Bloco Thickness Block (mm)	GP (dB)	PT (dB)	GV (dB)	
Duplo Cristal Double Crystal	SIUI	TR4-10L	H2001303R	0	10	4Mhz	A própria peça	51,5	+2,0	53,5	
Normal Straight Beam	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Angular Angle Beam	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Angular Angle Beam	SIUI	AFN4-89-60L	02006062R	60°	8X9	4Mhz	20mm	39,0	+2,0	47,0	
Angular Angle Beam	SIUI	AFN4-89-70L	02030066R	70°	8X9	4Mhz	20mm	46,5	+2,0	54,5	
Detalhe Junta / Croqui: Joint Detail / Sketch: <div style="text-align: center;"> </div>											
Descontinuidades Discontinuities											
Solda / Posição Weld / Position	Nº	Cabeçote Transducer	Ganho Gain (dB)	Localização Localization (mm)	Dimen. Dimensions (mm)	Profun. Depth (mm)	Perc. Sônico Sound Path (mm)	Dist. Proj. Project Distance (mm)	Superfície Detecção Detection Surface	Laudo Evaluation	Laudo Pós Reparo Evaluation after repair
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Legenda: A – Aprovado Approved R – Reprovado Reproved NEC – Exame Complementar Complementary Testing <div style="float: right;">             GP – Ganho Primário Primary Gain              PT – Perda por Transferência Transfer Loss              GV – Ganho de varredura Scanning Gain           </div>											
<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado Approved		<input type="checkbox"/> Reprovado Reproved			<input type="checkbox"/> Exame Complementar Complementary Testing						
Assinatura Inspetor: Inspector Signature   Rafael Pezzini UT 10901 – Level II Data: 22/08/2025 Date:				Assinatura CQ: Inspector Signature   Rafael Pezzini Data: 22/08/2025 Date:				Assinatura Cliente:   Data: Date:			

<b>RELATÓRIO DE ENSAIO ULTRASSOM - SOLDAS</b>  <b>ULTRASONIC REPORT - WELDING</b>	Número: Report nº.:
	Data: 22/08/2025 Date:

**Registro Fotográfico:**  
Photographic Record:



Assinatura Inspetor: Inspector Signature   Rafael Pezzini UT 10901 – Level II  Data: 22/08/2025 Date:	Assinatura CQ: Inspector Signature   Rafael Pezzini  Data: 22/08/2025 Date:	Assinatura Cliente:      Data: Date:
--	---	---