

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Soldagem**

Mouraci José Siqueira Gallerdo

**IMPACTO DO TIPO DE CHANFRO NA PRODUTIVIDADE DA SOLDAGEM DE  
CHAPAS ESPESSAS COM OS PROCESSOS DE FCAW E SAW**

Belo Horizonte  
2025

Mouraci José Siqueira Gallerdo

**IMPACTO DO TIPO DE CHANFRO NA PRODUTIVIDADE DA SOLDAGEM DE  
CHAPAS ESPESSAS COM OS PROCESSOS DE FCAW E SAW**

Monografia de Especialização apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Tecnologia e Qualificação em Soldagem.

Orientadora: Profa. Dra. Ivanilza Felizardo.

Belo Horizonte  
2025

G166i

Gallerdo, Mouraci José Siqueira.

Impacto do tipo de chanfro na produtividade da soldagem de chapas espessas com os processos de FCAW e SAW [recurso eletrônico] / Mouraci José Siqueira Gallerdo. - 2025.

1 recurso online (33 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Ivanilza Felizardo.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção de título de Especialista em Engenharia da Soldagem.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Soldagem. 2. Chapas de aço. 3. Processos de fabricação. 4. Construção naval. 5. Tratamento térmico. I. Felizardo, Ivanilza. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Programa de Pós-Graduação  
Curso de Especialização em Soldagem



## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 04/12/2025, às 09:30h, a Comissão Examinadora se reuniu presencial para avaliar o trabalho:

**Título:** Impacto do Tipo de Chanfro na Produtividade da Soldagem de Chapas Espessas com os Processos de FCAW e SAW.

**Nome Completo Aluno:** Mouraci José Siqueira Gallerdo

**Nº da Matrícula na UFMG:** 2024672145

**Local:** Sala 03-Escola de Engenharia UFMG

### Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante **20 minutos** e após ter arguido o(a) candidato(a) por **10 minutos**, é de parecer

**FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 97 e **SEM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de \_\_\_\_\_ dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador  
\_\_\_\_\_ (colocar nome do Orientador)

### Assinaturas:



Documento assinado digitalmente  
IVANILZA FELIZARDO  
Data: 17/01/2026 22:18:17-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Dra. Ivanilza FelizarDO**  
Professora

**Dr. Ariel Rodriguez Arias**  
Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da UFMG  
Avaliador da Banca



Documento assinado digitalmente  
MOURACI JOSE SIQUEIRA GALLERDO  
Data: 19/01/2026 09:00:30-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Mouraci José Siqueira Gallerdo**  
223.816.418-90

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre os processos de soldagem FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) e SAW (*Submerged Arc Welding*), aplicados à união de chapas de aço S355J2+N com 31,5 mm de espessura. Avaliaram-se os desempenhos técnico e operacional, considerando número de passes, aporte térmico, propriedades mecânicas, perfil de dureza e viabilidade econômica. A soldagem foi conduzida conforme a norma ASME Seção IX, com controle rigoroso das variáveis e posterior tratamento térmico de alívio de tensões. Foram realizados ensaios de tração, dobramento, impacto Charpy a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dureza Vickers (HV10) e macrografia. Ambos os processos atenderam aos requisitos normativos, mesmo com aportes térmicos elevados. O FCAW (1,8 kJ/mm) apresentou melhor desempenho na ZTA e maior tenacidade, enquanto o SAW (7,6 kJ/mm) destacou-se pela elevada produtividade, com apenas dois passes e tempo total de soldagem 86% inferior que o FCAW. Conclui-se que o SAW é mais indicado para ambientes industriais automatizados e de alta produção, desde que associado a um controle térmico eficaz. O FCAW mostra-se vantajoso em aplicações que exigem robustez metalúrgica e flexibilidade operacional. O estudo contribui para a seleção técnica de processos em soldagem de chapas espessas, com base em critérios de desempenho e custo.

Palavras-chave: tratamento térmico; aço naval; chapas de 31,5 mm de espessura; arco submerso; arame tubular.

## ABSTRACT

This study presents a comparative analysis between the FCAW (Flux Cored Arc Welding) and SAW (Submerged Arc Welding) processes, applied to the joining of S355J2+N steel plates with a thickness of 31.5 mm. Technical and operational performance were evaluated, considering the number of passes, heat input, mechanical properties, hardness profile, and economic feasibility. Welding was carried out in accordance with ASME Section IX, with strict control of process variables and subsequent post-weld stress relief heat treatment. Tensile, bend, and Charpy impact tests at  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  were performed, along with Vickers hardness (HV10) and macrographic examinations. Both processes met the applicable code requirements, even under high heat input conditions. FCAW (1.8 kJ/mm) demonstrated superior performance in the heat-affected zone (HAZ) and higher toughness, while SAW (7.6 kJ/mm) stood out for its high productivity, requiring only two passes and achieving a total welding time 86% shorter than FCAW. It is concluded that SAW is more suitable for automated, high-production industrial environments, provided that effective thermal control is implemented. FCAW, on the other hand, proves advantageous in applications demanding metallurgical robustness and operational flexibility. This study contributes to the technical selection of welding processes for thick plate applications, based on performance and cost criteria.

Keywords: heat treatment; shipbuilding steel; 31.5 mm thick plates; submerged arc welding; flux-cored wire.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Volth Hydro Ltda., em especial ao Diretor de Engenharia Ivan Cristiano, ao Diretor Industrial Rafael Segatin Lacerda e aos soldadores envolvidos, pelo apoio técnico e operacional indispensável à realização deste trabalho. Agradecem também ao CEFET-MG e à UFMG pelas contribuições institucionais para o desenvolvimento da pesquisa.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aparelho de Ultrassom e transdutores .....	16
Figura 2 – Representação esquemática das amostras para os ensaios mecânicos .....	19
Figura 3 – Comparação da emissão de radiação entre os processos FCAW e SAW .....	20
Figura 4 – Conjuntos de corpos de prova preparados para soldagem com FCAW e SAW ...	23
Figura 5 – Conjuntos de corpos de prova preparados para soldagem com FCAW e SAW ...	24
Figura 6 – Goivagem da raiz com eletrodo de grafite e verificação por líquido penetrante ..	24
Figura 7 – Execução dos cordões de solda com o processo SAW nos dois lados da junta.....	25
Figura 8 – Corpos de prova após soldagem completa com os processos FCAW (à esquerda) e SAW (à direita).....	25
Figura 9 – TTPS: corpos de prova do processo FCAW no forno e curva térmica aplicada ao processo SAW .....	26
Figura 10 – Traçagem e corte das amostras para os ensaios mecânicos.....	27
Figura 11 – Macrografias na ordem da esquerda para a direita: CP1F, CP2F, CP1S e CP2S .....	27
Figura 12 – Amostras do ensaio de dobramento: CP1S (não dobrado), CP2S e CP1F (após dobramento).....	27
Figura 13 – Amostras do ensaio de tração: CP1F (antes do ensaio) e CP2S (após fratura)....	28
Figura 14 – Amostras do ensaio de impacto Charpy: CP1S e CP2S, regiões ZF e ZTA .....	28
Figura 15 – Perfil transversal de dureza Vickers (HV10) nas regiões de ZF, ZTA e MB dos corpos de prova.....	30

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Variáveis de soldagem e aporte térmico .....	26
Tabela 2 – Resultados dos ensaios mecânicos de tração e impacto Charpy dos corpos de prova .....	29
Tabela 3 – Comparativo dos tempos operacionais e consumos nos processos FCAW e SAW .....	31

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASAW - Activated Submerged Arc Welding (Soldagem a Arco Submerso Ativado)

ASME - American Society of Mechanical Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)

Ceq - Carbono Equivalente

CP - Corpo de Prova

EM - European Norm (Norma Europeia)

FCAW - Flux Cored Arc Welding (Soldagem com Arame Tubular)

HV10 - Dureza Vickers com carga de 10 kgf

ISO - International Organization for Standardization

LP - Líquido Penetrante

MB - Metal de Base

MPa - Megapascal

SAW - Submerged Arc Welding (Soldagem a Arco Submerso)

SDH - Side Drilled Hole (Furo Lateral Passante)

TTPS - Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (ou Pós-Soldagem)

UV - Ultravioleta

ZF - Zona Fundida

ZTA - Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
2.1 MATERIAIS E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA SOLDAGEM.....	13
2.2 PRÉ-TESTES PARA DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM (APORTE TÉRMICO).....	14
2.3 PESAGEM DOS MATERIAIS .....	15
2.4 ENSAIO DE ULTRASSOM .....	15
2.5 PRÉ-AQUECIMENTO E TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM.....	16
<b>2.5.1 Controle da Temperatura de Interpasse.....</b>	<b>17</b>
2.6 ENSAIOS MECÂNICOS .....	17
<b>3 ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS.....</b>	<b>20</b>
3.1 SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE .....	20
<b>3.1.1 Fumos Metálicos .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.2 Calor Radiante e Radiação Não Ionizante .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.3 Saúde e Segurança .....</b>	<b>21</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>33</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem de aços de alta espessura é uma prática comum e desafiadora em setores industriais como construção naval, fabricação de caldeiras e estruturas metálicas. Entre os processos amplamente utilizados, destacam-se o arco submerso (SAW – *Submerged Arc Welding*) e o arame tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*), ambos reconhecidos por sua alta taxa de deposição e eficiência na união de materiais espessos. O SAW é caracterizado por uma operação mecanizada, na qual o arco elétrico é submerso sob um fluxo granular, proporcionando proteção contra a contaminação atmosférica e resultando em soldas de alta qualidade e penetração profunda. O FCAW utiliza um eletrodo tubular com fluxo interno, podendo ser operado de forma manual, mecanizada ou automatizada. O processo oferece maior flexibilidade, especialmente em ambientes externos ou de difícil acesso, devido à sua capacidade de operar com ou sem gás de proteção (arames autoprotetidos) e fora de posição. Apesar das vantagens individuais de cada processo, a escolha entre SAW e FCAW para aplicações específicas ainda gera debates, especialmente quando se consideram fatores como propriedades mecânicas da junta soldada, eficiência operacional, produtividade e custos envolvidos.

Diversos estudos têm comparado os processos SAW e FCAW na soldagem de chapas espessas. Singh e Singh avaliaram chapas de 63 mm de aço SA 516 Gr.70 com múltiplos passes e TTPS a 620 °C. O SAW (2,3–2,5 kJ/mm) apresentou maior resistência à tração e impacto, enquanto o FCAW (1,1–1,4 kJ/mm) resultou em ZTA mais estreita e microestrutura refinada. Shaikh e Patil, trabalhando com chapas de 10 mm do mesmo aço, também observaram melhor resistência à tração com SAW (1,80 kJ/mm e 510 MPa), enquanto o FCAW (1,17 kJ/mm) foi superior nos ensaios de impacto, especialmente na ZTA.

Singh e Kumar, soldando chapas ASTM A36 de 12 mm, relataram maior resistência com SAW (1,92 kJ/mm, 520 MPa) e melhor controle térmico com FCAW (1,30 kJ/mm), que resultou em ZTA mais estável e microestrutura refinada. Pratikno e Dhanistha, com chapas A36 de 10 mm, também observaram melhor desempenho mecânico e acabamento com SAW (2,5 kJ/mm, 520 MPa, 60 J), enquanto o FCAW (1,4 kJ/mm) apresentou menor resistência (495 MPa) e tenacidade (45 J). Santos *et al.*, avaliando aço AH36 de 20 mm, identificaram maior resistência com SAW (2,38 kJ/mm, 530 MPa), porém resultados melhores de impacto (80 J) e dureza na ZTA com FCAW (1,25 kJ/mm), associado à microestrutura mais homogênea. Lima *et al.*, em estudo industrial com chapas de aço carbono de 20 mm, indicaram o SAW como mais adequado para produção automatizada, enquanto o FCAW oferece maior

flexibilidade operacional. Singh *et al.*, em 2023, testaram o processo ASAW (*Activated SAW*) em aço ASTM A709 Gr.36 de 20 mm, com 2,94 kJ/mm de aporte, obtendo maior penetração, refinamento da ZTA e resistência mecânica (540 MPa), sem alterar os parâmetros do SAW convencional.

Com base nos estudos analisados, observam-se padrões relevantes quanto ao comportamento dos processos. O SAW opera com aporte térmico mais elevado (1,8 a 2,9 kJ/mm), associado à alta taxa de deposição e cordões largos, favorecendo a produtividade, mas ampliando a ZTA. O FCAW, com aportes mais baixos (1,1 a 1,4 kJ/mm), proporciona menor extensão da ZTA, melhor controle térmico e microestrutura mais refinada, especialmente em aplicações multipasse. Em termos de resistência à tração, o SAW apresentou valores entre 510 e 540 MPa na maioria dos estudos, atribuídos à deposição contínua e à estabilidade do arco. O FCAW obteve valores entre 495 e 520 MPa, com destaque para maior estabilidade microestrutural e melhor desempenho em regiões críticas como a ZTA. Quanto à tenacidade, o FCAW demonstrou superioridade, com impactos de até 80 J, favorecido pelo menor aporte e grãos mais finos. O SAW, apesar de alcançar até 60 J, apresentou em alguns casos microestruturas mais grosseiras e maior dureza na ZTA, o que pode afetar o desempenho sob impacto ou baixas temperaturas.

Esses padrões reforçam a importância de avaliar variáveis operacionais e metalúrgicas na escolha do processo. Neste contexto, o presente estudo propõe uma análise comparativa entre SAW e FCAW na soldagem de chapas de aço S355J2+N com 31,5 mm de espessura, incluindo número de passes, propriedades mecânicas, características metalúrgicas e avaliação econômica. O trabalho também investiga a viabilidade de reduzir o número de passes, especialmente no SAW, visando maior produtividade e menor custo operacional.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAIS E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA SOLDAGEM

O aço S355J2+N é um material estrutural de baixa liga e alta resistência, especificado pela norma europeia EN 10025. Na designação, “S” indica aço estrutural; “355” refere-se ao limite mínimo de escoamento de 355 MPa; “J2” indica que o material foi ensaiado ao impacto a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; e “N” informa que o aço foi fornecido no estado normalizado. Trata-se de um material amplamente utilizado em aplicações como construção civil, pontes, estruturas metálicas e equipamentos industriais, devido à sua boa soldabilidade e à combinação equilibrada entre resistência mecânica e tenacidade. De acordo com o certificado de inspeção da chapa fornecida pela Usiminas para o desenvolvimento desta investigação, tem-se: carbono equivalente (Ceq) de 0,42%; tensão de escoamento de 429 MPa; tensão de ruptura de 572 MPa; e energia absorvida no ensaio Charpy a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 173 J. Para fins comparativos, a norma EN 10025-2 estabelece como valores típicos: tensão de escoamento mínima de 355 MPa, tensão de ruptura entre 470 e 630 MPa, e energia mínima de impacto de 27 J a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Foram preparadas oito chapas com dimensões de  $400 \times 175 \times 31,5$  mm, sendo quatro destinadas à montagem de dois conjuntos para soldagem com FCAW e quatro para dois conjuntos destinados ao SAW. A preparação das bordas, com definição do tipo de chanfro, seguiu as recomendações das normas ISO 9692-1:2013 e ISO 9692-2:1998, que estabelecem as geometrias e dimensões padronizadas para juntas de soldagem por fusão de materiais metálicos, considerando o processo utilizado e o modo de execução (manual, mecanizado ou automático). Em todos os conjuntos, foram utilizadas chapas auxiliares nas extremidades das amostras, com dupla função: permitir a ignição e extinção do arco elétrico fora da região avaliada de soldagem e auxiliar no posicionamento, fixação e manipulação dos conjuntos durante o procedimento de soldagem.

A norma ISO 9692-1:2013 trata da preparação de juntas para soldagem manual ou semimecanizada, conforme a espessura da chapa, tipo de junta e processo empregado. Para o FCAW, foi adotada junta de topo com chanfro em duplo V, abertura de raiz de 3 mm e nariz de 2 mm, com ângulo de  $40^{\circ}$ , adequado ao arame de 1,6 mm, favorecendo a soldagem multipasse em chapas espessas.

A ISO 9692-2:1998, voltada à soldagem mecanizada ou automática por SAW, recomenda geometrias que garantem penetração total com menor volume de metal. Para o SAW, utilizou-se junta de topo sem chanfro, com abertura de raiz de 0,5 mm, aproveitando a

alta penetração e estabilidade do processo, reduzindo o tempo e o volume de solda sem comprometer a qualidade da fusão.

## 2.2 PRÉ-TESTES PARA DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM (APORTE TÉRMICO)

As soldagens dos corpos de prova seguiram a norma ASME Seção IX, com foco na qualificação dos procedimentos. Os parâmetros foram definidos visando o menor número de passes: utilizou-se arame tubular AWS E71T- 1 (1,6 mm) com CO<sub>2</sub> no processo FCAW, executado por soldador qualificado; e arame maciço AWS EM12K (4 mm) com fluxo F7A2-EM12 / F7P2-EM12 no processo SAW, de forma mecanizada. O fluxo aglomerado empregado apresenta resistência à tração mínima de 70 ksi (490 MPa) e tenacidade superior a 27 J a – 20°C, sendo indicado para aplicações estruturais críticas em aços carbono e de baixa liga, com controle refinado da composição do metal depositado.

Durante os pré-testes, a vazão de gás no FCAW foi monitorada com bicômetro na ponta da tocha, garantindo repetibilidade entre os passes. A corrente foi conferida com multímetro, e o tempo de cada passe cronometrado para cálculo da velocidade de soldagem. A tensão do arco foi ajustada empiricamente, buscando cordões com boa aparência, perfil regular e fusão lateral adequada, em compatibilidade com os demais parâmetros operacionais. Com base nesses critérios, os parâmetros foram definidos de forma satisfatória, garantindo condições técnicas adequadas para a soldagem e continuidade do estudo. O aporte térmico foi calculado pela fórmula clássica da AWS, Eq. (1), com base em valores médios de tensão, corrente e velocidade, sem correção por fator de eficiência, conforme prática usual em comparações entre processos.

$$\text{Aporte Térmico} \left( \frac{KJ}{mm} \right) = \frac{V \times I \times 60}{1000 \times S} \quad (1)$$

Onde: V = Tensão do arco (Volts); I = Corrente de soldagem (Amperes); S = Velocidade de soldagem (mm/min); O fator 60 converte minutos para segundos e a divisão por 1000 converte Joules para KJ.

Para estimativas mais realistas da energia efetivamente absorvida pelo material, recomenda-se a aplicação de um fator de eficiência térmica específico por processo, que varia tipicamente de 90 a 95% para o SAW e de 75 a 85% para o FCAW. Contudo, para os fins

comparativos deste estudo, optou-se por não incluir esse fator, visando manter a neutralidade dos cálculos e a comparabilidade direta entre os procedimentos avaliados.

Na soldagem realizada com o processo FCAW, foi empregada a goivagem da raiz da junta com o uso de eletrodo de grafite, visando à remoção de impurezas, descontinuidades e irregularidades provenientes da soldagem do primeiro lado. Esse procedimento teve como objetivo preparar adequadamente a raiz para a execução dos passes do segundo lado, assegurando uma superfície metálica limpa, homogênea e livre de descontinuidades superficiais.

Após a goivagem, foi realizado ensaio de líquido penetrante na face preparada, com o intuito de detectar trincas superficiais ou defeitos abertos à superfície que pudessem comprometer a integridade da junta. Apenas após a aprovação nessa verificação foi dada continuidade à soldagem. Essa sequência de goivagem com ensaio não destrutivo está alinhada às boas práticas aplicadas em soldagem de chapas espessas, contribuindo para a qualidade metalúrgica, continuidade da fusão e redução de defeitos internos no cordão final.

### 2.3 PESAGEM DOS MATERIAIS

Após a montagem dos conjuntos de chapas para cada processo (incluindo a preparação dos chanfros e a fixação das chapas auxiliares), todos os corpos de prova (CP) foram pesados individualmente, totalizando dois conjuntos para o processo FCAW (CP1F e CP2F) e dois para o processo SAW (CP1S e CP2S). Antes da execução da soldagem de cada conjunto, foram também pesados os rolos de arame consumível – maciço (SAW) e tubular (FCAW) – bem como a quantidade de fluxo utilizada no processo SAW.

Após a soldagem, foram novamente realizadas as pesagens dos corpos de prova, dos rolos de arame remanescentes e do fluxo utilizado. A pesagem do fluxo seguiu o procedimento: foram colocados 5 kg de fluxo no porta-fluxo da máquina de soldagem antes da operação; após a soldagem, foi removida e pesada a escória formada, e o fluxo não convertido em escória (remanescente na peça e no porta-fluxo) também foi coletado e pesado separadamente. A comparação entre os pesos antes e depois da soldagem é fundamental para a estimativa do consumo real de insumos, o que possibilita uma avaliação mais precisa dos custos operacionais de cada processo.

### 2.4 ENSAIO DE ULTRASSOM

Após a soldagem e as etapas de pesagem, foi realizada uma limpeza cuidadosa em todos os corpos de prova, visando garantir condições adequadas para a execução do ensaio de ultrassom e assegurar a continuidade dos demais ensaios previstos. A Figura 1 apresenta o equipamento e os transdutores utilizados no ensaio. O aparelho empregado foi um GE USM 35X, com os seguintes transdutores: MSEB4-0° (normal), MWB45-4, MWB60-4 e MWB70-4 (angulados). Como bloco de referência, utilizou-se um bloco padrão ASME de 19 mm, com refletor tipo SDH (*Side Drilled Hole*) de 2,4 mm de diâmetro.

Figura 1 – Aparelho de Ultrassom e transdutores



Fonte: o autor, 2025.

A avaliação da integridade das juntas por ultrassom foi realizada com base nos requisitos estabelecidos pelas normas ASME Seção V (Ensaio Não Destrutivo) e ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice 12, que fornecem critérios técnicos para execução, calibração e aceitação de descontinuidades detectáveis por ondas ultrassônicas em juntas soldadas.

## 2.5 PRÉ-AQUECIMENTO E TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM

Antes do início da soldagem, os corpos de prova foram submetidos a pré-aquecimento uniforme a 100 °C, realizado com auxílio de maçarico e aferida com lápis térmico. Embora a estimativa empírica baseada no carbono equivalente ( $C_{eq} = 0,42\%$ ) e na espessura da chapa (31,5 mm) indicasse uma temperatura em torno de 143 °C, Eq. (2), optou-se pela aplicação de 100 °C, com base na norma EN 1011-2:2001, que permite a redução da temperatura mínima de pré-aquecimento quando há controle rigoroso dos parâmetros de soldagem, boa soldabilidade do material e posterior realização de tratamento térmico de alívio. O aço S355J2+N apresenta estrutura ferrita-perlítica estável e tenacidade adequada, sendo classificado como de baixa sensibilidade à trinca a frio, o que contribuiu para a definição dessa faixa de temperatura.

$$T_{pré} = 350 \times C_{eq} - 0,10 + 25 \left( \frac{\text{espessura em mm}}{25,4} \right) \quad (2)$$

Após a soldagem, todos os corpos de prova passaram por tratamento térmico de alívio de tensões (TTPS) em forno controlado. O ciclo térmico adotado seguiu as seguintes etapas:

- Aquecimento em rampa de 30 °C por hora até 570 °C;
- Permanência a 570 °C por 8 horas;
- Resfriamento controlado a 30 °C por hora até 80 °C;
- Retirada das peças do forno.

Esse procedimento visou reduzir as tensões residuais geradas durante a soldagem, melhorar a homogeneidade microestrutural da ZF e da ZTA e aumentar a tenacidade e estabilidade dimensional das juntas, conforme prática recomendada para soldagem de componentes de grande espessura e aplicações críticas.

### 2.5.1 Controle da Temperatura de Interpasse

Na soldagem multipasse, foi realizado o controle da temperatura de interpasse, que foi mantida em 200 °C, aferida com o uso de lápis térmico. Segundo a norma EN 1011-2:2001, a temperatura de interpasse máxima recomendada para aços carbono e baixa liga com  $C_{eq} \leq 0,45\%$  geralmente varia entre 150 e 250 °C, dependendo do processo de soldagem, da espessura do material e da sensibilidade do aço à formação de trincas.

A escolha do valor de 200 °C, neste estudo, é tecnicamente justificada pela boa soldabilidade do aço S355J2+N ( $C_{eq} = 0,42\%$ ), pela execução controlada e contínua dos passes, com o uso de parâmetros ajustados durante os pré-testes, e pela realização de tratamento térmico de alívio de tensões após a soldagem, o que contribui para a redução das tensões residuais e a homogeneização microestrutural da junta. Esse controle térmico foi essencial para garantir a estabilidade metalúrgica entre os passes, evitando o sobreaquecimento excessivo da ZTA e assegurando a qualidade e regularidade dos cordões depositados.

## 2.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Após o ciclo de alívio de tensões, os corpos de prova passaram por processo de limpeza e remoção do reforço da junta soldada por esmerilhamento. Essa etapa é fundamental para garantir que a superfície esteja livre de descontinuidades externas ou resíduos que possam interferir nos ensaios subsequentes. Em seguida, foi realizado novo ensaio de ultrassom, com o objetivo de confirmar a integridade da junta após o tratamento térmico. Após a aprovação,

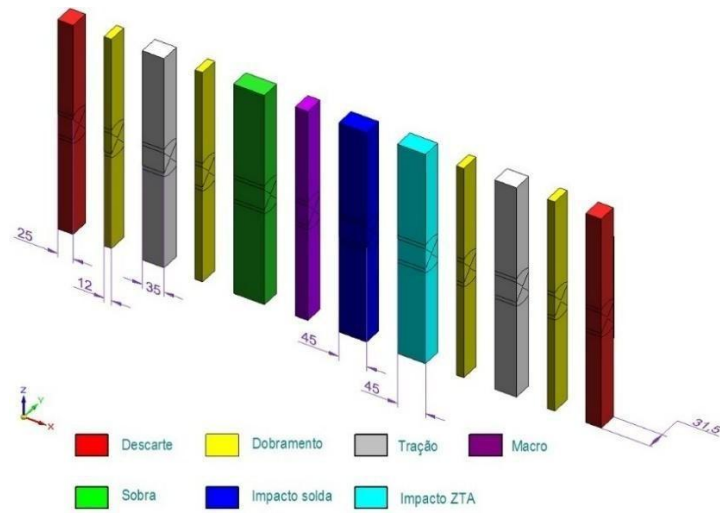
procedeu-se à traçagem e corte dos corpos de prova, com a retirada das amostras destinadas aos ensaios mecânicos. Neste estudo investigativo, foram realizados os seguintes ensaios:

- Dobramento guiado, para avaliação da ductilidade da junta;
- Tração, para determinação da tensão de escoamento, tensão de ruptura e alongamento;
- Impacto Charpy a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com amostras extraídas da ZF e da ZTA, para verificação da tenacidade;
- Dureza Vickers (HV10), para caracterização do perfil de dureza transversal;
- E macrografia da junta soldada, para análise visual da penetração e homogeneidade dos cordões.

Os ensaios foram realizados em laboratório especializado, seguindo as diretrizes estabelecidas pela ASME Seção IX [11], com atenção às exigências referentes às dimensões dos corpos de prova, à localização das amostras na junta soldada e aos critérios de aceitação definidos para tração (QW-150), dobramento guiado (QW-160), impacto Charpy (QW-170) e dureza (QW-290). O ensaio de dureza foi conduzido pelo método Vickers (HV10), com aplicação de carga de 10 kgf e espaçamento regular entre os pontos de medição. Foram realizadas três medições em cada região da junta: ZF, ZTA e metal de base (MB). Para as análises metalográficas, as amostras foram preparadas com polimento até lixa 600, seguido de polimento fino com pasta de diamante de 3 micrômetros. A revelação da microestrutura da junta soldada foi realizada por ataque químico com Nital a 3%.

De cada corpo de prova, foram retiradas 2 amostras para tração, 4 para dobramento, 3 para impacto na ZF, 3 para impacto na ZTA, e 1 amostra para macro e ensaio de dureza. A Figura 2 apresenta de forma esquemática a disposição das amostras extraídas dos corpos de prova, indicando as dimensões e o destino de cada segmento conforme o tipo de ensaio.

Figura 2 – Representação esquemática das amostras para os ensaios mecânicos



Fonte: o autor, 2025.

### 3 ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS

Além dos aspectos técnicos e mecânicos, foi realizada uma análise comparativa de custos entre os dois processos, considerando:

- Tempo total de soldagem;
- Quantidade de passes e consumíveis utilizados;
- Custos associados à preparação e execução da soldagem;
- Eficiência de deposição e produtividade.

#### 3.1 SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

##### 3.1.1 Fumos Metálicos

A soldagem FCAW gera significativamente mais fumos de soldagem do que a soldagem SAW, pois esta submerge o arco e o metal fundido sob uma camada protetora de fluxo, reduzindo consideravelmente a liberação de fumos metálicos no ambiente. Embora ambos os processos utilizem fluxo, o fluxo da soldagem FCAW fica contido em um arame tubular, resultando em maior geração de fumos e escória, enquanto o fluxo granular da soldagem SAW cobre todo o arco. Conseqüentemente, a soldagem FCAW está associada a uma maior taxa de geração de fumos, especialmente para aço carbono.

Figura 3 – Comparação da emissão de radiação entre os processos FCAW e SAW



Fonte: o autor, 2025.

### **3.1.2 Calor Radiante e Radiação Não Ionizante**

A exposição aos riscos ocupacionais de calor radiante e radiação não ionizante (UV) durante o processo de soldagem, apesar da indisponibilidade de dados quantitativos em comparação aos dois processos (FCAW e SAW), foi evidenciado relato dos soldadores de uma diferença significativa no conforto térmico devido à baixa entrada de calor e atenuação da luz intensa do arco de soldagem coberto pelo fluxo granular.

Dessa Maneira conclui-se dentro de uma avaliação qualitativa que o processo de soldagem por arco submerso (SAW), assim sendo o arco elétrico cria um ambiente de trabalho mais seguro, o que minimiza a exposição do soldador ao calor radiante, emissão da radiação ultravioleta e redução da concentração dos agentes químicos.

### **3.1.3 Saúde e Segurança**

A reestruturação do processo de soldagem de flanges resultou em aprimoramentos relevantes sob os aspectos ergonômicos, organizacionais e sustentáveis. As mudanças implementadas favoreceram a adoção de posturas de trabalho mais adequadas, com redução de movimentos continuados, gerando maior equilíbrio entre esforço e recuperação.

A eliminação de ângulos posturais incongruentes ou desconfortáveis da atividade, que favoreciam posturas acorçado e/ou com tronco em flexão, e eliminação do processo manual de solda o do esforço físico contínuo e com exigência de concentração prolongada contribuíram para um ritmo de trabalho mais estável com maior controle sobre a possível fadiga física e mental. Cabe a ressalva de que no processo anterior, os trabalhadores dispunham de total autonomia sobre o ritmo de sua atividade, alternâncias posturais, pausas e micropausas, inclusive com orientativo operacional de realizar 10 minutos de pausa a cada hora trabalhada em local apropriado e adjacente ao posto de trabalho, justamente para garantir a efetividade da ação preventiva e de recuperação. No processo atual, a autonomia sobre o ritmo, micropausas e pausas se mantem, porém de forma mais intuitiva, refletindo em melhor fluidez das tarefas e garantindo ao trabalhador maior controle e autonomia sobre os processos e suas atividades.

Do ponto de vista da sustentabilidade e gestão operacional, observou-se uso mais racional de recursos e otimização das etapas produtivas, com impactos positivos sobre a eficiência e a organização do trabalho. O ambiente apresenta-se mais limpo, seguro e compatível com os princípios da ergonomia aplicada à produção, reforçando o compromisso com a saúde ocupacional e a melhoria contínua dos processos.

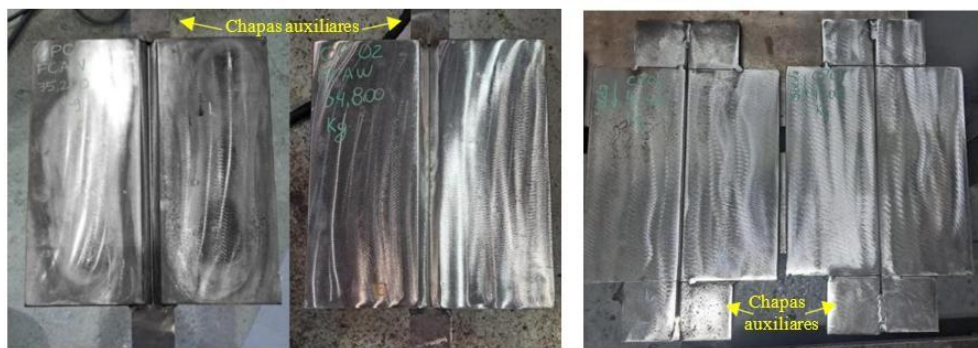
Com a nova configuração, as tarefas passaram a ser realizadas de forma mais fluida, segura e previsível, refletindo em melhor aproveitamento do tempo de trabalho e ambiente mais estável e organizado. O processo tornou-se mais sustentável, com uso racional de recursos e redução de desperdícios, fortalecendo o compromisso da empresa com a eficiência produtiva e a saúde ocupacional.

Essas melhorias reforçam uma cultura voltada à inovação, à qualidade de vida no trabalho e à responsabilidade socioambiental, pilares que sustentam a busca contínua por processos mais inteligentes, seguros e sustentáveis.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os conjuntos de corpos de prova montados para a realização da soldagem. À esquerda, observam-se os dois conjuntos preparados para o processo FCAW, com chanfro em duplo V, enquanto à direita estão os conjuntos destinados ao processo SAW, com junta tipo I (sem chanfro). As peças foram previamente fixadas com chapas auxiliares nas extremidades, assegurando o posicionamento correto e a repetibilidade da montagem. Cada conjunto foi pesado individualmente antes da execução da soldagem, exatamente nas condições mostradas na figura.

Figura 4 – Conjuntos de corpos de prova preparados para soldagem com FCAW e SAW



Fonte: o autor, 2025.

A Figura 5 apresenta uma sequência de quatro imagens ilustrando etapas fundamentais do preparo térmico e da execução da soldagem. A primeira imagem (da esquerda para a direita) mostra o processo de pré-aquecimento dos corpos de prova, realizado com auxílio de maçarico. A segunda registra o monitoramento da temperatura de pré-aquecimento, utilizando lápis térmico. A terceira imagem apresenta o passe de raiz executado com o processo FCAW e a quarta mostra a face oposta da junta após a execução da raiz, evidenciando a penetração obtida. Destaca-se que o controle da temperatura de interpasse durante a soldagem com FCAW também foi aferido por meio de lápis térmico, conforme exemplificado na segunda imagem.

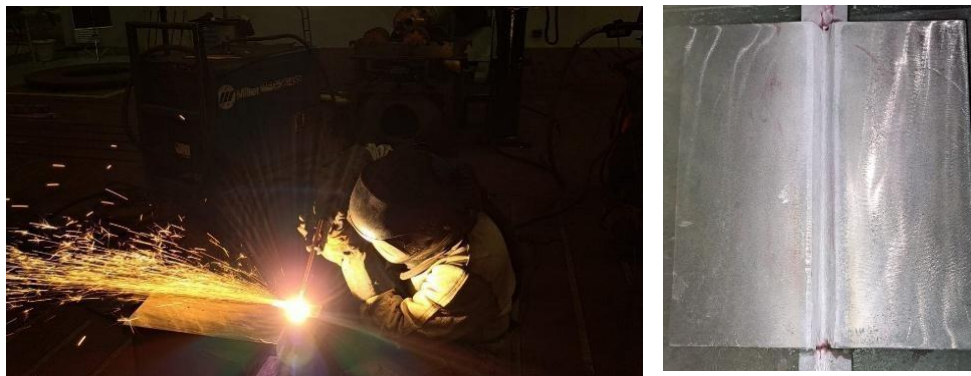
Figura 5 – Conjuntos de corpos de prova preparados para soldagem com FCAW e SAW



Fonte: o autor, 2025.

A Figura 6 apresenta duas imagens representativas das etapas de preparação da raiz para a execução dos passes subsequentes. A primeira imagem ilustra o processo de goivagem com eletrodo de grafite, realizado para a remoção de possíveis impurezas e irregularidades na raiz da solda. A segunda imagem mostra o resultado final do ensaio por líquido penetrante, evidenciando a ausência de descontinuidades superficiais após a goivagem, o que confirmou a integridade da região antes da continuidade da soldagem com o processo FCAW.

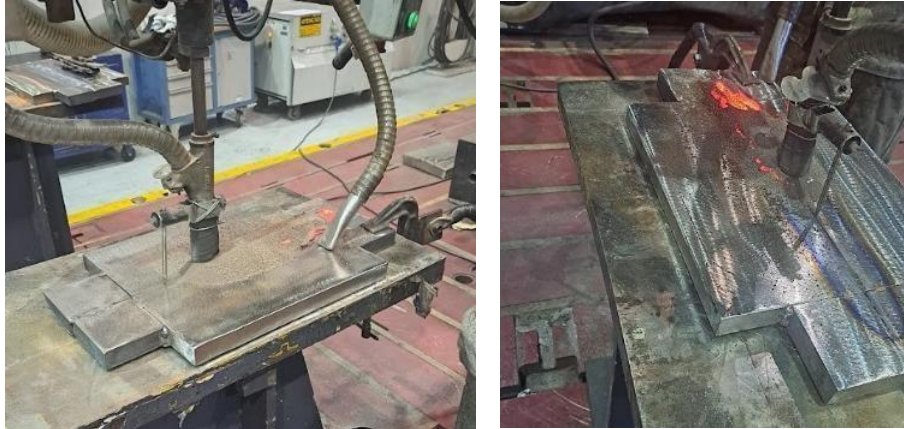
Figura 6 – Goivagem da raiz com eletrodo de grafite e verificação por líquido penetrante



Fonte: o autor, 2025.

A Figura 7 apresenta duas imagens relativas à soldagem dos corpos de prova com o processo SAW. A primeira imagem mostra a execução do cordão de solda pelo lado inicial da junta, utilizando o equipamento de arco submerso. A segunda imagem registra a soldagem do lado oposto do corpo de prova, completando a união da junta conforme o procedimento estabelecido.

Figura 7 – Execução dos cordões de solda com o processo SAW nos dois lados da junta



Fonte: o autor, 2025.

Figura 8 – Corpos de prova após soldagem completa com os processos FCAW (à esquerda) e SAW (à direita)



Fonte: o autor, 2025.

A Figura 8 apresenta os corpos de prova após a execução completa da soldagem e remoção das chapas auxiliares utilizadas no posicionamento e apoio inicial. A primeira imagem refere-se aos corpos de prova soldados com o processo FCAW, e a segunda, aos corpos de prova soldados com o processo SAW, evidenciando as diferenças visuais nos cordões depositados por cada processo.

Com a conclusão da soldagem dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 8, os principais parâmetros operacionais adotados em cada processo foram consolidados. A definição das variáveis de soldagem e do aporte térmico teve como objetivo principal viabilizar a execução da soldagem com o menor número possível de passes, especialmente considerando a elevada espessura do material (31,5 mm). A Tabela 1 apresenta as condições estabelecidas, incluindo o número de passes e aporte térmico calculado para cada processo.

Tabela 1 – Variáveis de soldagem e aporte térmico

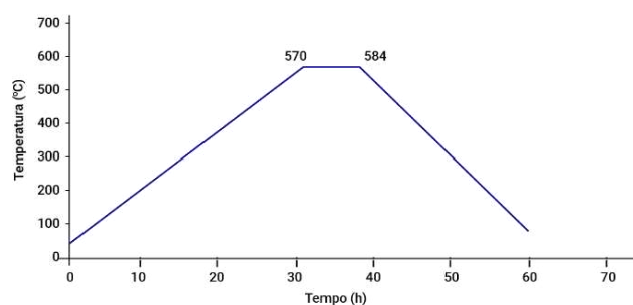
Identificações	Arame AWS	Diâmetro do arame (mm)	Proteção	Número de passes	Aporte térmico (KJ/mm)
FCAW	E71T-1	1,6	Gasosa CO <sub>2</sub>	7 do lado da raiz 6 do lado oposto	1,8
SAW	EM12K	4	Fluxo	1 de cada lado	7,6

Fonte: o autor, 2025.

Destaca-se que foi possível realizar a soldagem com o processo SAW utilizando apenas dois passes, um de cada lado da junta. A principal consequência dessa estratégia foi o aporte térmico elevado, com valor calculado de 7,6 kJ/mm. Mesmo no caso do processo FCAW, o aporte obtido (1,8 kJ/mm) ultrapassou os valores comumente recomendados na literatura técnica, artigos científicos e catálogos de fabricantes de consumíveis. Essa abordagem, embora fora da faixa típica, foi tecnicamente viável graças ao controle térmico rigoroso, ao tratamento térmico pós-soldagem e à qualidade das juntas obtidas, que apresentaram boa integridade estrutural.

A Figura 9 apresenta, à esquerda, os corpos de prova soldados pelo processo FCAW posicionados no interior do forno, no início do ciclo de tratamento térmico pós-soldagem (TTPS). À direita, é ilustrada a curva térmica aplicada aos corpos de prova do processo SAW, evidenciando a rampa de aquecimento controlado de 30 °C por hora até 570 °C, a manutenção a essa temperatura por 8 horas, e o resfriamento também controlado de 30 °C por hora até 80 °C. O mesmo ciclo de TTPS foi adotado para os corpos de prova dos dois processos (FCAW e SAW), garantindo uniformidade no alívio de tensões e na comparação dos resultados.

Figura 9 – TTPS: corpos de prova do processo FCAW no forno e curva térmica aplicada ao processo SAW



Fonte: o autor, 2025.

A Figura 10 apresenta, à esquerda, a traçagem realizada sobre um dos corpos de prova

para marcação dos cortes destinados à retirada das amostras. À direita, observam-se as amostras seccionadas para os ensaios mecânicos de tração, dobramento, impacto, macrografia e dureza.

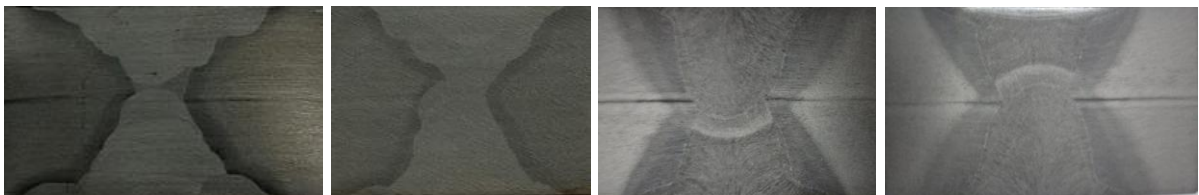
Figura 10 –Traçagem e corte das amostras para os ensaios mecânicos



Fonte: o autor, 2025.

As Figuras 11 até 15 apresentam os registros fotográficos das amostras obtidas após análise macrográfica e ensaios mecânicos. Todas as legendas fazem referência às imagens dispostas da esquerda para a direita. Na Figura 10 estão as macrografias transversais dos corpos de prova do processo FCAW (CP1F e CP2F) e do processo SAW (CP1S e CP2S), permitindo a análise visual do perfil dos cordões, penetração, simetria, continuidade e ausência de descontinuidades internas. A Figura 11 mostra as amostras utilizadas no ensaio de dobramento guiado. São apresentadas as amostras não dobradas do CP1S e as amostras dobradas do CP2S e do CP1F, evidenciando a ductilidade das juntas (todas as amostras foram aprovadas).

Figura 11 – Macrografias na ordem da esquerda para a direita: CP1F, CP2F, CP1S e CP2S



Fonte: o autor, 2025.

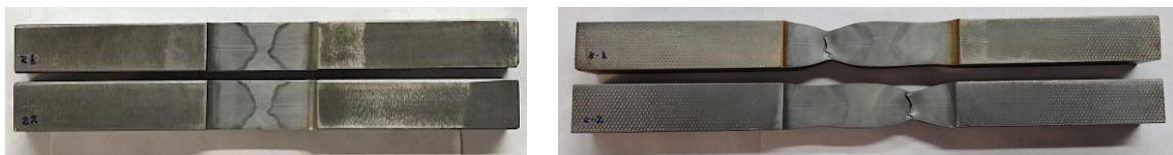
Figura 12 – Amostras do ensaio de dobramento: CP1S (não dobrado), CP2S e CP1F (após dobramento)



Fonte: o autor, 2025.

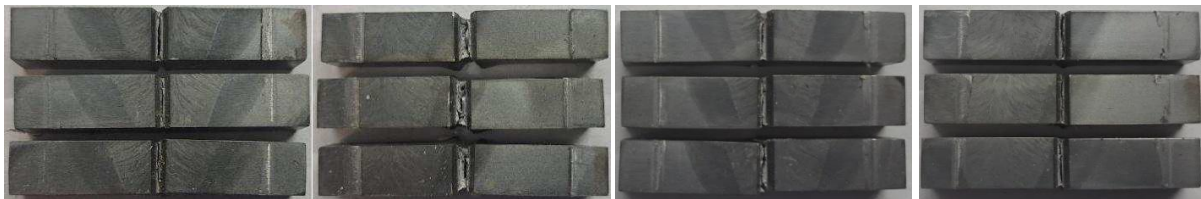
A Figura 13 apresenta as amostras para o ensaio de tração: à esquerda, as amostras extraídas do CP1F antes do ensaio; à direita, os corpos de prova tracionados do CP2S, mostrando a fratura típica. As Figuras 13 e 14 reúnem as amostras ensaiadas no impacto Charpy a -18 °C, com identificação da região testada. A Figura 12 mostra os corpos de prova CP1S e CP2S, com amostras retiradas da ZF e da ZTA. A Figura 13 apresenta os resultados equivalentes para os corpos de prova CP1F e CP2F, também com amostras das mesmas regiões.

Figura 13 – Amostras do ensaio de tração: CP1F (antes do ensaio) e CP2S (após fratura)

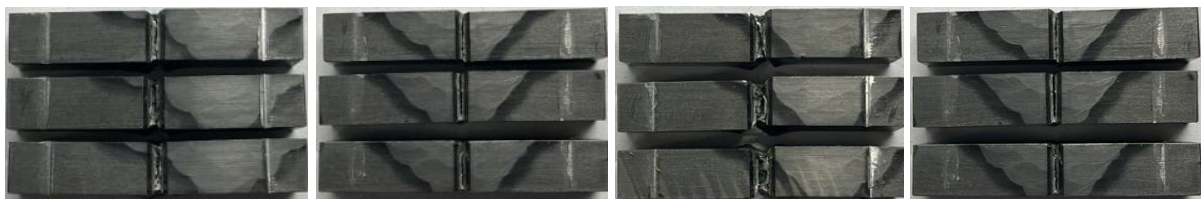


Fonte: o autor, 2025.

Figura 14 – Amostras do ensaio de impacto Charpy: CP1S e CP2S, regiões ZF e ZTA



Fonte: o autor, 2025.



Fonte: o autor, 2025.

A Tabela 2 apresenta os resultados numéricos obtidos nos ensaios de tração e impacto Charpy. Para cada corpo de prova, são exibidos os valores individuais das duas amostras ensaiadas em tração, bem como das três amostras submetidas ao impacto na ZF e na ZTA. Os valores médios de cada conjunto estão indicados entre parênteses. Com base nos resultados apresentados, em relação à resistência à tração, ambos os processos superaram os requisitos mínimos normativos para o aço S355J2+N (470 a 630 MPa), com destaque para os corpos de prova soldados por FCAW, que atingiram valores médios de 585 MPa. Os corpos de prova soldados por SAW apresentaram resistência um pouco inferior, porém dentro do intervalo

esperado, com média de 563 MPa. O limite de escoamento seguiu tendência semelhante, mantendo-se acima dos 355 MPa exigidos, com valores de 413 MPa para o FCAW e 397 MPa para o SAW.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios mecânicos de tração e impacto Charpy dos corpos de prova

Identificação	Resistência à tração (Mpa)			Limite de escoamento (Mpa)			Impacto ZF (J)				Impacto ZTA (J)			
CP1F	596	595	(595)	421	425	(423)	35	29	39	(34)	145	177	193	(172)
CP2F	576	574	(575)	408	399	(403)	34	30	35	(33)	109	106	124	(113)
CP1S	557	555	(556)	388	396	(393)	41	31	32	(35)	135	129	147	(137)
CP2S	572	570	(571)	403	399	(401)	55	40	55	(50)	112	134	121	(122)

Fonte: o autor, 2025.

Esses resultados estão em consonância com os dados reportados na literatura. Singh e Kumar, por exemplo, também observaram maior resistência à tração em juntas soldadas por FCAW, em comparação ao SAW, quando aplicado em chapas de aço ASTM A36 com espessura de 12 mm, associando esse comportamento à microestrutura mais refinada gerada pelo menor aporte térmico do FCAW. No presente estudo, mesmo com um aporte térmico relativamente elevado (1,8 kJ/mm), o FCAW manteve um perfil mecânico mais elevado, possivelmente favorecido pela sequência multipasse, que promoveu ciclos térmicos múltiplos e refinamento da ZTA.

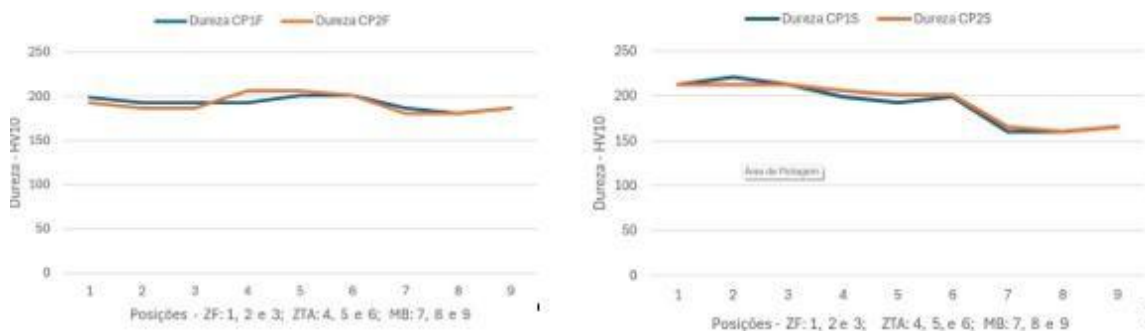
Quanto à tenacidade, os resultados do ensaio de impacto indicam que todos os corpos de prova superaram o valor mínimo exigido pela norma (27 J), inclusive nas regiões mais críticas como a ZTA. O processo FCAW apresentou média de 142 J na ZTA, indicando excelente ductilidade e integridade metalúrgica, apesar da elevada espessura da junta e do aporte térmico acima da faixa recomendada na literatura e na ZF, a energia média foi de 33 J. O processo SAW, por sua vez, apresentou energia média de 129 J na ZTA, valor ainda elevado, mas inferior ao FCAW, refletindo a ação de um aporte térmico mais intenso (7,6 kJ/mm) com menor número de passes. Na ZF, contudo, o SAW apresentou média de 42 J, valor 27% superior ao obtido com FCAW, o que pode estar relacionado à melhor continuidade da fusão com menor número de interrupções e maior estabilidade do arco em passes longos.

Santos *et al.*, ao compararem juntas soldadas por FCAW e SAW em aço AH36, também observaram valores superiores de tenacidade na ZTA para o FCAW, com menor dureza e transições térmicas mais suaves, reforçando que esse processo é especialmente eficaz em manter integridade em regiões sensíveis. O desempenho superior do SAW na ZF observado neste estudo indica que, quando bem parametrizado e complementado por tratamento

térmico, esse processo pode manter bom equilíbrio entre resistência e tenacidade, mesmo com elevado aporte térmico.

A Figura 16 mostra o perfil de dureza Vickers (HV10) obtido a partir de duas amostras por corpo de prova, com medições realizadas na ZF, ZTA e no MB, permitindo avaliar as transições metalúrgicas e o comportamento térmico decorrente de cada processo de soldagem.

Figura 15 – Perfil transversal de dureza Vickers (HV10) nas regiões de ZF, ZTA e MB dos corpos de prova



Fonte: o autor, 2025.

Os perfis de dureza apresentados na Figura 15 indicam uma transição gradual e controlada entre a ZF, a ZTA e o MB, o que revela a eficácia do controle térmico pré e pós soldagem. Não foram observados picos críticos de dureza na ZTA, região geralmente mais sensível ao endurecimento térmico, o que sugere que a composição química do aço S355J2+N, associada ao alívio de tensões a 570 °C por 8 horas, foi suficiente para evitar a formação de estruturas frágeis, como martensita ou bainita com alto teor de carbono.

Essa distribuição uniforme corrobora os bons resultados de tenacidade obtidos, especialmente para o processo FCAW, e está de acordo com estudos como os de Shaikh e Patil, que relacionaram a redução da dureza na ZTA à aplicação de ciclos térmicos controlados e múltiplos passes. A semelhança entre os valores de dureza obtidos na ZF (~213 HV) e na ZTA (entre 193 e 206 HV) também indica que não houve concentração excessiva de tensões internas, favorecendo o desempenho mecânico global da junta. No metal-base, os valores de dureza permaneceram na faixa esperada para o aço S355J2+N, com média entre 160 e 166 HV.

Além dos aspectos técnicos e metalúrgicos, torna-se relevante considerar também as condições operacionais associadas a cada processo. Para fins comparativos, a Tabela 3 apresenta uma estimativa dos principais elementos relacionados ao custo operacional de execução dos processos FCAW e SAW. Estão listados os tempos envolvidos nas etapas de

preparação, execução e inspeção, bem como o tempo total para execução de todo o procedimento de soldagem, além do consumo de arame e do material de proteção: gás para FCAW e fluxo para SAW.

Tabela 3 – Comparativo dos tempos operacionais e consumos nos processos FCAW e SAW

Especificações	FCAW	SAW
Tempo de preparação dos chanfros e montagem dos conjuntos	30 min	10 min
Tempo de goivagem	15 min	NA
Tempo de limpeza da raiz	20 min	NA
Ensaio de LP na raiz pós goivagem	20 min	NA
Tempo de arco aberto	17 min	4 min
Tempo total do processo	102 min	14 min
Peso do arame consumido	2,4 Kg	0,76 Kg
Quantidade da proteção	306 L	1,8 Kg

Fonte: o autor, 2025.

Em termos de tempo de execução, consumo de insumos e complexidade operacional, os resultados obtidos evidenciam diferenças marcantes entre os processos. O FCAW demandou 102 minutos para a execução completa, enquanto o SAW foi concluído em apenas 14 minutos, diferença atribuída à maior quantidade de passes e à necessidade de goivagem, limpeza e inspeção com líquido penetrante no FCAW – etapas dispensadas no SAW pela execução em apenas dois passes, com penetração total e operação automatizada.

No que se refere ao consumo de materiais, o FCAW utilizou 2,4 kg de arame e 306 L de gás, contra 0,76 kg de arame e 1,8 kg de fluxo granulado no SAW, refletindo uma operação mais manual. Ainda assim, o FCAW apresentou melhor desempenho mecânico na ZTA e maior tenacidade, o que reforça sua aplicabilidade em contextos que exigem maior robustez metalúrgica em regiões críticas.

Por outro lado, o SAW, mesmo com aporte térmico elevado, demonstrou excelente desempenho produtivo, com menor tempo de arco aberto, menor consumo de insumos e alta eficiência global, sendo ideal para aplicações com foco em produtividade, repetibilidade e automação – desde que se mantenha um rigoroso controle térmico e, quando necessário, tratamento pós-soldagem.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo comparativo entre os processos FCAW e SAW, aplicados à soldagem de chapas de aço S355J2+N com 31,5 mm de espessura, permitiu as seguintes conclusões:

- **Eficiência Operacional:** O processo SAW demonstrou superioridade em termos de tempo total de soldagem, número de passes e consumo de insumos. Sua execução mecanizada, com apenas dois passes, favoreceu alta produtividade e menor intervenção manual, sendo ideal para ambientes automatizados e de alta repetibilidade.

- **Aporte Térmico:** O SAW operou com aporte térmico elevado (7,6 kJ/mm), reflexo da estratégia de reduzir o número de passes, sem comprometer a qualidade da junta. Já o FCAW apresentou aporte de 1,8 kJ/mm, ainda acima dos valores recomendados, mas compatível com a espessura e a execução multipasse.

- **Propriedades Mecânicas:** Ambos os processos atenderam aos critérios normativos de resistência e tenacidade. O FCAW apresentou melhor desempenho na ZTA (impacto médio de 142 J), enquanto o SAW obteve maior tenacidade na ZF. O FCAW também apresentou maior resistência à tração média (585 MPa contra 563 MPa do SAW).

- **Perfil de Dureza e Integridade:** Os ensaios de dureza demonstraram perfis contínuos e equilibrados, sem picos críticos na ZTA. A eficácia do tratamento térmico pós-soldagem foi comprovada pela homogeneidade metalúrgica e ausência de descontinuidades.

- **Aplicações Recomendadas:** De modo geral, o SAW é o processo mais indicado para aplicações que priorizam alta produtividade, menor tempo de ciclo e condições controladas de operação, desde que acompanhado por tratamento térmico adequado. O FCAW é mais vantajoso em contextos que exigem robustez metalúrgica em regiões críticas, maior adaptabilidade e boa tenacidade na ZTA, como em soldagens em campo ou posições não planas.

Esses resultados reforçam que a escolha do processo mais adequado deve considerar o equilíbrio entre desempenho mecânico, controle térmico e viabilidade produtiva conforme os requisitos da aplicação.

## REFERÊNCIAS

- ASME. **ASME boiler and pressure vessel code**: section V: nondestructive examination. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- ASME. **ASME boiler and pressure vessel code**: section VIII: rules for construction of pressure vessels: division 1: appendix 12: ultrasonic examination. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- ASME. **ASME boiler and pressure vessel code**: section IX: welding, brazing, and fusing qualifications. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1011-2:2001**: welding: Recommendations for welding of metallic materials: part 2: arc welding of ferritic steels. Brussels: CEN, 2001.
- FELIZARDO, I.; BRACARENSE, A. Q. Método de aplicação da soldagem: manual, mecanizado ou automatizado. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 32., 2006, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: ABS, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9692-1**: welding and allied processes: recommendations for joint preparation: part 1: manual metal arc welding, gas-shielded metal arc welding, gas welding. Geneva: ISO, 2013.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9692-2**: welding and allied processes: recommendations for joint preparation: part 2: submerged arc welding. Geneva: ISO, 1998.
- PRATIKNO, H.; DHANISTHA, W. L. Comparison of welding process SAW and FCAW on ASTM A36. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, [S. I.], v. 15, n. 1, p. 261-266, 2020. ISSN: 1816-949X.
- SANTOS, D. M. *et al.* Evaluation of AH36 microalloyed steel welded joint by submerged arc welding and flux cored arc welding. **Materials Research**, [S. I.], v. 23, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/rq6fgQ6fnNjCDjXvjtmBYHk/?lang=en>. Acesso em: 20 jan 2026.
- SHAIKH, Md. R.; PATIL, M. M. Comparison between FCAW and SAW welding process for SA 516 Gr.70 steel. **International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)**, [S. I.], v. 5, n. 2, 2018.
- SINGH, A. B. *et al.* Comparative study of SAW and ASAW process on ASTM A709 grade 36 steel welds. **Materials Today: Proceedings**, [S. I.], 2023. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323000822>. Acesso em: 20 jan 2026.
- SINGH, H; KUMAR, R. Comparison of welding process SAW and FCAW on ASTM A36. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, [S. I.], 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/336924995\\_Comparison\\_of\\_Welding\\_Process\\_SAW\\_and\\_FCAW\\_on\\_ASTM\\_A36](https://www.researchgate.net/publication/336924995_Comparison_of_Welding_Process_SAW_and_FCAW_on_ASTM_A36). Acesso em: 20 jan 2026.
- SINGH, N.; SINGH, J. Effect of FCAW & SAW welding process on the tensile, impact and

all weld properties of multipass butt welded joints of high carbon steel. **International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)**, [S. l.], v. 3, n. 2, 2018.