

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação Curso de Especialização de Soldagem

Leonardo Luiz da Costa Nunes

**ESTUDO COMPARATIVO NA SOLDAGEM DE AÇOS DISSIMILARES HARDOX
400 E A36, PELOS PROCESSOS GMAW COM ARAME SÓLIDO E MCAW COM
ARAME DE ALMA METÁLICA METAL - CORED**

Belo Horizonte
2025

Leonardo Luiz da Costa Nunes

**ESTUDO COMPARATIVO NA SOLDAGEM DE AÇOS DISSIMILARES HARDOX
400 E A36, PELOS PROCESSOS GMAW COM ARAME SÓLIDO E MCAW COM
ARAME DE ALMA METÁLICA METAL - CORED**

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.

Orientador: Prof^o PhD Alexandre Queiroz
Bracarense

Belo Horizonte
2025

N972e	<p>Nunes, Leonardo Luiz da Costa. Estudo comparativo na soldagem de aços dissimilares <i>hardox</i> 400 e A36, pelos processos GMAW com arame sólido e MCAW com arame de alma metálica metal - cored [recurso eletrônico] / Leonardo Luiz da Costa Nunes. – 2025. 1 recurso online (35 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.</p> <p>Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Soldagem. 2. Análise comparativa. 3. Aço. 4. Arame. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
-------	--

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 de dezembro de 2025, às 14 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: ESTUDO COMPARATIVO NA SOLDAGEM DE AÇOS DISSIMILARES HARDOX 400 E A36, PELOS PROCESSOS GMAW COM ARAME SÓLIDO E MCAW COM ARAME DE ALMA METÁLICA METAL CORED

Nome Completo Aluno: Leonardo Luiz da Costa Nunes

Nº da Matrícula na UFMG: 2024672196

Local: Remotamente via plataforma "TEAMS".

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 10 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 90 e **SEM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 0 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Profº PhD Alexandre Queiroz Bracarense

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE
Data: 19/01/2025 17:04:52-0300
Verifique em <https://validar.br.gov.br/>

Profº PhD Alexandre Queiroz Bracarense
Engenharia da UFMG
Orientador e Avaliador

Documento assinado digitalmente
gov.br LEONARDO LUIZ DA COSTA NUNES
Data: 19/01/2025 17:20:14-0300
Verifique em <https://validar.br.gov.br/>

Leonardo Luiz da Costa Nunes
484.522.718-59

AGRADECIMENTOS

Agradeço à empresa ITW Welding do Brasil pela disponibilização dos equipamentos e pelo suporte técnico essencial para a realização deste trabalho.

À empresa Ética Laboratório, em especial à Gerente Técnica Amarilis Longo Dalamazo, ao Assistente Técnico Mateus Donizeti e ao Diretor Maurício Pires, pelo apoio e pela colaboração indispensável durante as etapas experimentais e de ensaios.

Ao Prof. Me. Edgar Souza Dutra, da Fatec, pelo apoio técnico fundamental e pelas orientações que contribuíram significativamente para a execução e conclusão deste trabalho.

Ao Sr. Alex Moreira, pela disponibilização dos materiais utilizados, contribuição fundamental para o desenvolvimento deste estudo.

Por fim, expresso minha gratidão à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao meu orientador, Prof. Dr.

Alexandre Bracarense, pela orientação, confiança e dedicação ao longo de todo o projeto.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa da soldagem entre materiais dissimilares, especificamente entre o aço estrutural A36, amplamente utilizado em estruturas metálicas, e o aço HARDOX 400, reconhecido por sua elevada resistência ao desgaste e alta dureza. O principal objetivo da pesquisa foi avaliar a viabilidade da união entre esses dois materiais utilizando o processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) com o arame sólido ER70S-6 e o processo MCAW com arame tubular de alma metálica E70C-6M. Foram realizadas soldagem multipasses em juntas com configuração em chanfro duplo V conforme os critérios estabelecidos pelas normas AWS D1.1 e ASME Seção IX, seguindo procedimentos rigorosos de soldagem do aço Hardox, incluindo pré-aquecimento, controle de temperatura de interpasse e controle de aporte térmico. Após a execução das soldas, foram aplicados ensaios não destrutivos e mecânicos, como dobramento, impacto Charpy-V e dureza Vickers, além das análises macrográfica e micrográfica das regiões da junta soldada e uma avaliação comparativa dos aspectos econômicos entre os dois consumíveis. O estudo demonstra-se essencial para a otimização do processo de soldagem entre materiais dissimilares, assegurando que as propriedades mecânicas sejam preservadas na região da união. Os resultados obtidos comprovam a viabilidade técnica do processo e indicam que ambos os consumíveis atenderam aos requisitos normativos, apresentando desempenho satisfatório quanto à integridade metalúrgica e à resistência mecânica da junta soldada.

Palavras-chave: soldagem; materiais dissimilares; GMAW; hardox 400; a36; ensaios mecânicos; viabilidade.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of welding between dissimilar materials, specifically structural steel A36, widely used in metallic structures, and HARDOX 400 steel, recognized for its high wear resistance and elevated hardness. The main objective of the research was to evaluate the feasibility of joining these two materials using the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process with ER70S-6 solid wire and the MCAW process with E70C-6M metal-cored tubular wire. Multipass welding was performed on joints with a double V-groove configuration in accordance with the criteria established by AWS D1.1 and ASME Section IX standards, following strict welding procedures for Hardox steel, including preheating, interpass temperature control, and heat input control. After welding, non-destructive and mechanical tests were conducted, such as bend testing, Charpy V-notch impact testing, and Vickers hardness measurements, in addition to macrographic and micrographic analyses of the welded joint regions and a comparative evaluation of the economic aspects of both consumables.

The study is essential for optimizing the welding process of dissimilar materials, ensuring that mechanical properties are preserved in the joint region. The results demonstrate the technical feasibility of the process and indicate that both consumables met the normative requirements, showing satisfactory performance in terms of metallurgical integrity and mechanical strength of the welded joint.

Keywords: welding; dissimilar materials; GMAW; hardox 400; a36; mechanical testing; feasibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - a) Bobina de pré-aquecimento por indução b) Painel da máquina de pré-aquecimento por indução c) Câmera termográfica, mostrando a temperatura de pré-aquecimento.....	16
Figura 2 - Montagem dos Corpos de Prova. a) Projeto da junta e Chapa de Teste. b) Corpos de prova arame sólido e Tubular de alma metálica Metal Cored. c) Aplicação da Pré-Deformação 6°C.....	17
Figura 3 - Execução do Processo de Soldagem mecanizado.....	17
Figura 4 - Temperatura máxima de interpasse recomendado.....	18
Figura 5 - Controle de Temperatura de Interpasse. a) Câmera Termográfica. b) Lápis Térmico	19
Figura 6 - Aporte Térmico Máximo recomendado de acordo com a espessura utilizada de 19mm.....	20
Figura 7 - Aporte térmico médio em kJ medido para os corpos de prova, antes do procedimento de reparo.	20
Figura 8 - Ensaio de Ultrassom. a) Local da indicação arame sólido. b) Local da indicação arame metal cored. c) Ensaio de ultrassom realizado.....	21
Figura 9 - Esmerilhamento para remoção da descontinuidade nos corpos de prova.....	21
Figura 10 - Ensaio de Líquido Penetrante Após procedimento de Reparo, antes e após aplicação do relevador.	22
Figura 11 - Aporte térmico médio em kJ medido para os corpos de prova, após o procedimento de reparo.	22
Figura 12 - Zona de classificação crítica de Dureza conforme AWS D1.1.....	24
Figura 13 - Croqui das juntas Soldadas antes e após os procedimentos de reparo.....	25
Figura 14 - Diferença Taxa de deposição entre os processos.....	25
Figura 15 - Comparação de tempo por cordão por consumível.	26
Figura 16 - Ensaio de macrografia. a) Arame Sólido b) Arame Tubular Metal Cored	27
Figura 17 - Diferença de Resistência a Tração processos GMAW e MCAW.	28
Figura 18 - Corpo de Prova ensaio de tração.	29
Figura 19 - Perfis de dureza Vickers. a) comparativo de dureza arame sólido e arame Tubular metal Cored. b) regiões do ensaio de dureza na junta soldada.....	30
Figura 20 - Corpos de Prova de impacto após a fratura. a) Arame sólido. b) Arame metal Cored	31

Figura 21 - Corpo de prova de dobramento. a) Arame Sólido, b) Arame Metal Cored	32
Figura 22 - Microestrutura ZF – Zona Fundida dos corpos de prova. a) Arame Sólido ER70S-6, b) Arame Metal Cored E70C6-M.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição Química Hardox 400 e ASTM A36. Adaptado	13
Tabela 2 - Propriedades mecânicas Hardox 400 e ASTM A36.....	13
Tabela 3 - Tabela 3 - Composição Química dos Consumíveis ER70S-3 e E70C6-M, conforme ASME II part C SFA-5.18. [1].	14
Tabela 4 - Parâmetros de Soldagem utilizados.....	18
Tabela 5 - Parâmetros de Soldagem passes de reparo.	22
Tabela 6 - Tempo de execução dos corpos de provas. 6.a) Antes do procedimento de reparo. 6.b) Procedimento de reparo	26
Tabela 7 - Resultados dos valores de dureza entre os dois arames.	29
Tabela 8 - Resultado do ensaio de impacto Charpy	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
BM	Base Metal – Metal de Base
CP1	Corpo de Prova 1
CP2	Corpo de Prova 2
CE	Carbono Equivalente
FCAW	Flux-Cored Arc Welding – Soldagem à Arco com Eletrodo Tubular
GMAW	Gas Metal Arc Welding – Soldagem à arco com eletrodo sólido
HV	Dureza Vickers
IIW	International Institute of Welding - Instituto Internacional de Soldagem
LP	Ensaio por Líquido Penetrante
MCAW	Metal Cored Arc Welding
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZTA	Zona Termicamente afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3.1	Taxa de Deposição.....	24
3.2	Tempo de Execução dos Corpos de Prova	26
3.3	Macrografia	27
3.4	Ensaio de Tração	27
3.5	Ensaio de Dureza	29
3.6	Ensaio Charpy	30
3.7	Dobramento	31
3.8	Micrografia	32
4	CONCLUSÃO	33
5	REFERÊNCIAS	35
6	RESPONSABILIDADE AUTORAL	35



ESTUDO COMPARATIVO NA SOLDAGEM DE AÇOS DISSIMILARES HARDOX 400 E A36, PELOS PROCESSOS GMAW COM ARAME SÓLIDO E MCAW COM ARAME DE ALMA METÁLICA – METAL CORED

Autor: Leonardo Luiz da Costa Nunes, leoluizdacosta@hotmail.com

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise comparativa da soldagem entre materiais dissimilares, especificamente entre o aço estrutural A36, amplamente utilizado em estruturas metálicas, e o aço HARDOX 400, reconhecido por sua elevada resistência ao desgaste e alta dureza. O principal objetivo da pesquisa foi avaliar a viabilidade da união entre esses dois materiais utilizando o processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) com o arame sólido ER70S-6 e o processo MCAW com arame tubular de alma metálica E70C-6M. Foram realizadas soldagem multipasses em juntas com configuração em chanfro duplo V conforme os critérios estabelecidos pelas normas AWS D1.1 e ASME Seção IX, seguindo procedimentos rigorosos de soldagem do aço Hardox, incluindo pré-aquecimento, controle de temperatura de interpasse e controle de aporte térmico. Após a execução das soldas, foram aplicados ensaios não destrutivos e mecânicos, como dobramento, impacto Charpy-V e dureza Vickers, além das análises macrográfica e micrográfica das regiões da junta soldada e uma avaliação comparativa dos aspectos econômicos entre os dois consumíveis. O estudo demonstra-se essencial para a otimização do processo de soldagem entre materiais dissimilares, assegurando que as propriedades mecânicas sejam preservadas na região da união. Os resultados obtidos comprovam a viabilidade técnica do processo e indicam que ambos os consumíveis atenderam aos requisitos normativos, apresentando desempenho satisfatório quanto à integridade metalúrgica e à resistência mecânica da junta soldada.

Palavras-chave: Soldagem, materiais dissimilares, GMAW, HARDOX 400, A36, Ensaios mecânicos, Viabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A indústria Metalmeccânica, cada vez mais competitiva e voltada para soluções de alto desempenho, exige o desenvolvimento de componentes e estruturas capazes de atender simultaneamente à critérios de resistência mecânica, durabilidade e custo-benefício. Entrando neste contexto, a aplicação de materiais de características distintas em uma mesma aplicação tem-se tornado mais frequente, especialmente em setores que demandam uma elevada resistência localizada ao desgaste sem renunciar a estruturas de suporte mais econômicas. A soldagem de materiais dissimilares surge, portanto, como alternativa estratégica para conciliar desempenho e viabilidade econômica ampliando ainda mais as possibilidades de projetos e aplicações no campo da engenharia.

Entre muitos materiais de relevância neste cenário, destacam-se alguns como o aço estrutural A-36, largamente empregado em estruturas metálica devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento, e o Aço Hardox 400 reconhecido por sua alta dureza e resistência ao desgaste abrasivo. A combinação destes dois materiais, busca unir o desempenho estrutural e o baixo custo do A36 com a elevada resistência do Hardox 400, resultando em componentes e estruturas com maior capacidade de suportar condições mais severas de operação, como caçambas de mineração, equipamento de transporte pesado chapas de revestimento, implementos agrícolas entre outras. Entretanto, a união de materiais com propriedades mecânicas e químicas tão distintas apresentam desafios consideráveis do ponto de vista metalúrgico e tecnológico. A Tabela 1 ilustra as diferenças de composição química e a Tabela 2 as propriedades mecânicas dos dois diferentes aços utilizada para estudo neste presente trabalho.

Tabela 1- Composição Química Hardox 400 e ASTM A36. Adaptado

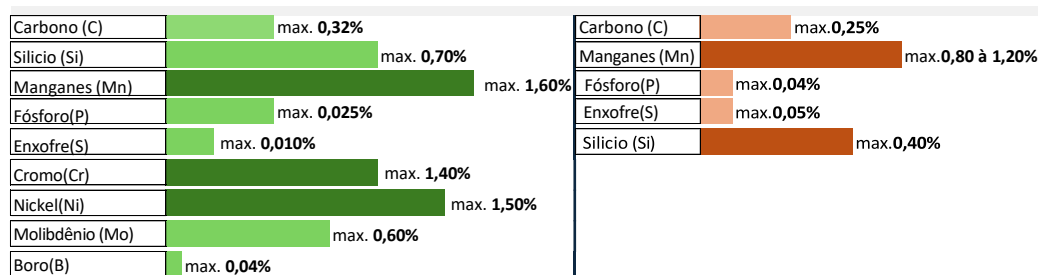


Tabela 2 - Propriedades mecânicas Hardox 400 e ASTM A36.

Hardox 400			A36		
Propriedades	Valores	Valores	Propriedades	Valores	Valores
Resistência a Tração (Mínimo)	1200 Mpa	174045 Psi	Resistência a Tração (Mínimo)	400 Mpa	58,000 Psi
Limite de escoamento (Mínimo)	1100 Mpa	50800 Psi	Limite de escoamento (Mínimo)	250 Mpa	36,000 Psi
Alongamento	4%		Alongamento	20%	
Dureza (HB)	370 - 430		Dureza (HB)	119 - 162	

A soldagem de materiais dissimilares exige atenção especial quanto à escolha do procedimento, do consumível e dos parâmetros operacionais, pois envolvem o risco de trincas, tensões residuais, alterações microestruturais e perda de propriedades mecânicas desejadas. De acordo com a SSAB [11], fabricante de aço Hardox, a soldagem destas chapas requer um controle rigoroso de energia de soldagem e em alguns casos pré-aquecimento, a fim de minimizar o risco de trincas a frio e a Fragilização da zona termicamente afetada ZTA. De maneira semelhante estudos como o de (Baskutis 2023) evidenciam que a união de

aços de elevada dureza, como o HARDOX, com aços estruturais de baixo carbono tende a produzir microestruturas frágeis na ZTA, exigindo cuidados específicos na seleção do processo e do consumível. Para a combinação entre o aço A36 e o HARDOX 400, esses desafios se intensificam devido à elevada dureza e sensibilidade térmica do HARDOX, que podem comprometer a integridade da junta caso não sejam adotados critérios adequados de soldagem.

Dentro os inúmeros processos de soldagem disponíveis, o GMAW (Gas Metal Arc Welding) utilizando o arame sólido ER70S-6 e o processo MCAW utilizando o arame tubular de alma metálica (Metal Cored) E70C6-M, que destacam por sua versatilidade, produtividade e ampla aplicação industrial. Ambos oferecem boas condições de soldabilidade e desempenho mecânico, porém diferem quanto aos seus aspectos operacionais, custo do consumível, taxa de deposição e controle do arco elétrico.

Uma das diferenças importantes entre o arame sólido e o arame tubular de alma metálica (metal cored) está relacionada à densidade de corrente por milímetro do arame. No arame sólido, a densidade de corrente tende a ser menor para o mesmo diâmetro quando comparada aos arames metais cored. O arame Tubular com núcleo metálico consiste em uma bainha metálica preenchida com pós-metálicos, ligas e estabilizadores de arco, cada um conferindo vantagens específicas, como redução da oxidação, aumento da resistência ao impacto e minimização de depósitos de silício na poça de solda. Essa composição química e estrutural faz com que o arame de alma metálica apresente comportamento distinto em relação ao arame sólido, que possui seção transversal completamente maciça, resultando em características diferenciadas de arco e perfil do cordão de solda. As propriedades químicas de cada arame estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Tabela 3 - Composição Química dos Consumíveis ER70S-3 e E70C6-M, conforme ASME II part C SFA-5.18. [1].

Classificação AWS A5.18 [A5.18M]	UNS Number	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
		ER70S-6g [ER49S-6g]	K11140	0.06 a 0.15	1.40 à 1.85	0.80 à 1.15	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15
Classificação AWS A5.18 [A5.18M]	UNS Number	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
		E70C-6X [E49C-6X]	W07706	0.12	1,75	0.90	0.03	0.03	0.50	0.20	0.30

Neste trabalho, apresenta-se um estudo experimental e comparativo da soldagem de aços dissimilares A36 e Hardox 400, utilizando os processos GMAW. O estudo contempla a análise técnica das juntas soldadas, considerando aspectos como propriedades mecânicas,

qualidade da solda e desempenho estrutural, bem como os custos associados à execução de cada processo. O objetivo é fornecer subsídios para a tomada de decisão sobre o processo mais adequado em aplicações industriais, promovendo soluções eficientes e alinhadas às demandas do setor.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Antes da execução dos corpos de prova, foi realizada a análise química dos metais de base (A36 e Hardox 400), com o objetivo de confirmar a composição e verificar a conformidade com as especificações do fabricante. A análise foi conduzida por Espectrometria de Emissão Óptica, utilizando o equipamento SpectroMaxx (marca SPECTRO Analytical Instruments), conforme os procedimentos da norma ASTM E415.

Para a execução dos testes e processos, foram utilizadas duas chapas de ASTM A36 e duas chapas de Hardox 400, destinadas à montagem dos corpos de prova. Todas as chapas possuíam dimensões de 150 mm de largura por 350 mm de comprimento, permitindo a confecção de dois corpos de prova com 350 mm de comprimento por 300 mm de largura cada. Os processos de soldagem aplicados foram GMAW utilizando-se arame sólido ER70S-6 e o MCAW utilizando o arame tubular metal cored E70C6-M conforme ASME II part C [1], ambos com diâmetro de 1,2mm. O gás de proteção utilizado foi uma mistura de Argônio (Ar) 80% com Dióxido de carbono (CO₂) 20%.

O cálculo de Carbono Equivalente (CE) realizado nos dois materiais com base nas equações recomendadas pelo recomendadas pelo International Institute of Welding (IIW), a fim de avaliar a necessidade de pré-aquecimento e as formações de trincas durante o processo de soldagem. Conforme cálculo realizado de acordo com a Equação 1, o aço Hardox 400 apresentou-se um valor de Carbono Equivalente (CE) mais elevado: CE=1,9%, indicando sua maior susceptibilidade à formação de trincas, indicando a necessidade pré-aquecimento. Por outro lado, o aço ASTM A36, apresentou um CE significativamente inferior: CE=0,4%, caracterizando-se como um material de boa soldabilidade, que dispensa, em condições normais, a aplicação de pré-aquecimento.

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

Onde: CE = Carbono Equivalente; C=Teor de Carbono; Mn=Teor de manganês; Cr=Teor

de Cromo; Mo= Teor de molibdênio; V=Teor de vanádio; Ni=Teor de níquel; Cu=Teor de cobre;

Considerando os resultados obtidos, o aço Hardox 400 foi submetido a pré-aquecimento controlado a 100 °C, temperatura estabelecida em conformidade com as recomendações do fabricante SSAB 2021[11] e literatura técnica. Conforme apresentado na Figura 1 o aquecimento foi realizado por meio do processo de indução magnética, técnica que assegura uma elevação uniforme da temperatura, minimizando gradientes térmicos indesejáveis. Para o monitoramento da temperatura, foram utilizados termopares fixados a aproximadamente 70 mm da junta de soldagem no lado do material de maior susceptibilidade (Hardox 400), garantindo a confiabilidade do processo e a conformidade com critérios técnicos de controle térmico.



Figura 1 - a) Bobina de pré-aquecimento por indução b) Painel da máquina de pré-aquecimento por indução c) Câmera termográfica, mostrando a temperatura de pré-aquecimento.

A preparação do chanfro para a execução da soldagem foi realizada conforme a Figura 2, adotando-se uma abertura de raiz de 5 mm, com ângulo de chanfro de 60° e configuração em nariz de faca. Adicionalmente, aplicou-se uma pré-deformação de 6°, com o objetivo de compensar as distorções decorrentes do processo de soldagem, de acordo como mostrado na Figura 3 -- C.

Para a deposição do passe de raiz, utilizou-se backing cerâmico, assegurando adequada retenção do metal fundido, melhor formação do cordão na face oposta e redução do risco de defeitos típicos, como falta de fusão ou penetração incompleta.

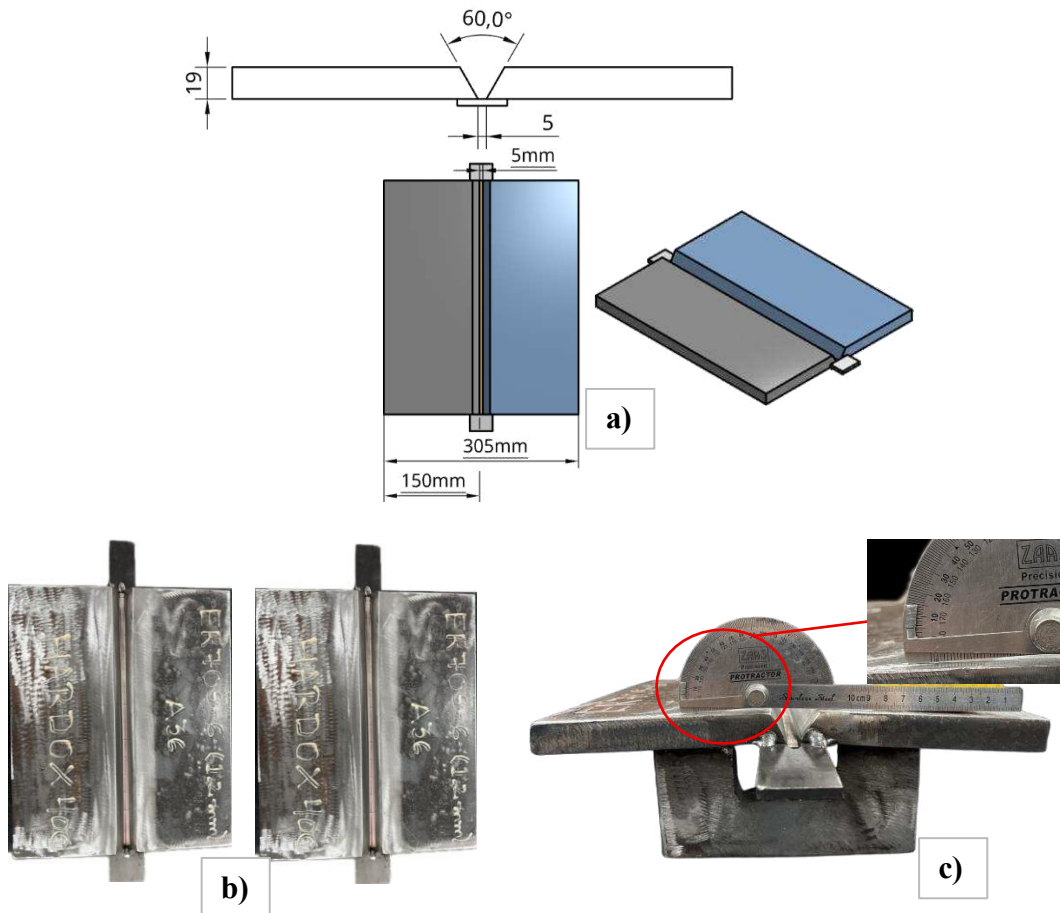


Figura 2 - Montagem dos Corpos de Prova. a) Projeto da junta e Chapa de Teste. b) Corpos de prova arame sólido e Tubular de alma metálica Metal Cored. c) Aplicação da Prê-Deformação $6^{\circ}C$

A execução do processo de soldagem foi realizada de forma mecanizada, conforme apresentado na Figura 3, empregando-se um trator de soldagem, o que possibilitou manter as condições operacionais mais uniformes possíveis durante a execução dos dois corpos de prova. Essa abordagem buscou reduzir a influência de variáveis manuais, assegurando maior repetibilidade e confiabilidade na comparação entre os processos avaliados.

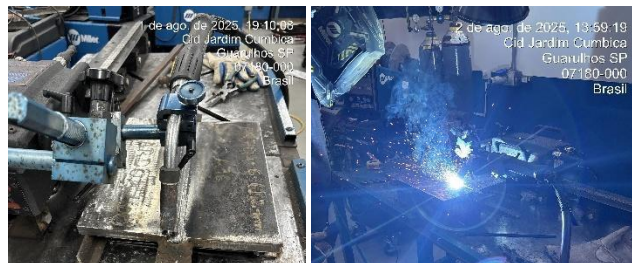


Figura 3 - Execução do Processo de Soldagem mecanizado

Para o monitoramento em tempo real dos parâmetros de soldagem em arco aberto, utilizou-se o sistema Insight CenterPoint, desenvolvido pela empresa Miller Electric, o qual permitiu registrar e acompanhar valores de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame, Heat input, taxa de deposição, contribuindo para a análise da estabilidade do arco e

do desempenho dos consumíveis empregados. As condições de soldagem estão detalhadas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de Soldagem utilizados

	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	Pré-aquecimento mínimo (C°)	Temperatura de Interpasse máxima (C°)	Heat Input (Kj/mm)	Duração média (Segundos)
CPI - Arame Sólido (ER70S-6)							
Passe de Raiz	24 V	214 A	87,12 mm/min	100°C	150°C	3,53 kJ	241s
Demais Passes	26 V	256 A	367,7 mm/min	100°C	150°C	1,8 kJ	57,1s
CP2 - Arame Metal Cored (E70C6-M)							
Passe de Raiz	26 V	224 A	125 mm/min	100°C	150°C	2,79 kJ	168s
Demais Passes	27,5 V	270 A	388,1 mm/min	100°C	150°C	1,15 kJ	54,1s

Durante o processo de soldagem foi realizado o controle da temperatura de interpasse, parâmetro essencial para a manutenção das propriedades mecânicas do aço Hardox 400 e para a redução do risco de trincas a frio. Os valores de referência foram definidos a partir do manual de soldagem do Hardox (SSAB, 2021), que estabelece a temperatura máxima de interpasse de 225 °C para chapas desse material, conforme apresentado na Tabela 5.

Neste trabalho, optou-se por adotar um limite mais restritivo de 150 °C como temperatura máxima de interpasse, a fim de assegurar maior controle sobre o aporte térmico e minimizar alterações microestruturais indesejadas. O monitoramento da temperatura foi conduzido por meio do uso combinado de lápis térmico calibrado e de câmera termográfica, garantindo medições confiáveis e em conformidade com as recomendações de posicionamento da leitura na região próxima à junta de soldagem.

Hardox® HiTemp**	300°C (572°F)
Hardox® HiTuf**	300°C (572°F)
Hardox® HiAce	225°C (437°F)
Hardox® 400/400 Tube e barras redondas	225°C (437°F)
Hardox® 450	225°C (437°F)
Hardox® 500/500 Tube	225°C (437°F)
Hardox® 500 Tuf	225°C (437°F)
Hardox® 550	225°C (437°F)
Hardox® 600	225°C (437°F)
Hardox® Extreme	100°C (212°F)

Figura 4 - Temperatura máxima de interpasse recomendado.



Figura 5 - Controle de Temperatura de Interpasse. **a)** Câmera Termográfica. **b)** Lápis Térmico

Outro fator relevante neste estudo foi o controle do aporte térmico, uma vez que este parâmetro exerce influência direta sobre a largura da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e, conseqüentemente, sobre as propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste da junta soldada. Um aporte térmico excessivo tende a ampliar a ZTA, favorecendo o amolecimento localizado e a redução da dureza, enquanto valores mais baixos contribuem para preservar a resistência ao desgaste, reduzir distorções em juntas de passe único, aumentar a tenacidade e melhorar a integridade mecânica da união.

O aporte térmico é função de diversos fatores, entre eles a eficiência térmica do processo de soldagem. Para este trabalho, foi adotada a eficiência de 0,8 para os processos GMAW, conforme valores geralmente aceitos na literatura técnica. A medição do aporte térmico foi realizada por meio de recursos disponibilizados tanto pelo próprio equipamento de soldagem quanto pelo sistema de monitoramento Insight Centerpoint (Miller Electric), que registrou corrente, tensão e velocidade de soldagem ao longo de todos os passes.

Para a determinação e validação dos valores de aporte térmico, seguiram-se as recomendações descritas no Manual de Soldagem do Hardox (SSAB, 2021), considerando também a espessura das chapas utilizadas 19 mm. Como referência, utilizou-se valores conforme apresentado na Figura 6, que apresenta limites orientativos para a soldagem deste material. Essa metodologia permitiu estabelecer um controle efetivo do aporte térmico, assegurando que os parâmetros aplicados se mantivessem dentro da faixa recomendada para preservar as propriedades do Hardox 400 e garantir a confiabilidade do procedimento.



Figura 6 - Aporte Térmico Máximo recomendado de acordo com a espessura utilizada de 19mm.

Um aspecto importante do trabalho comparativo foi a manutenção de valores médios de aporte térmico semelhantes entre os dois arames, de forma a permitir uma análise equitativa dos resultados. Esse controle assegurou que as diferenças observadas entre as juntas estivessem mais relacionadas às características dos consumíveis e da transferência metálica, do que a variações térmicas. Os valores médios de aporte térmico medidos durante o processo de soldagem, encontram-se na Figura 7, servindo de referência para a avaliação comparativa entre o arame sólido ER70S-6 e o arame de alma metálica E70C6-M.

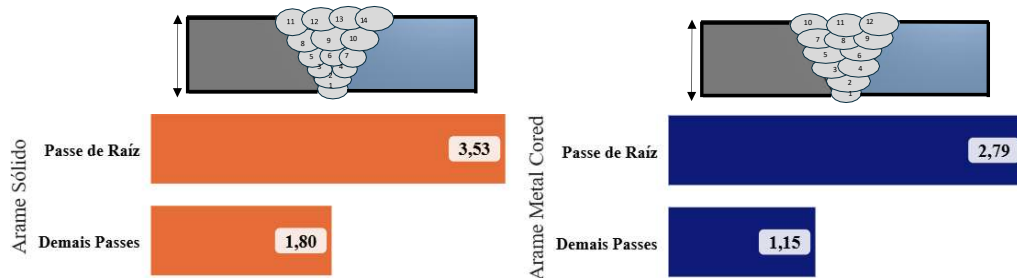


Figura 7 - Aporte térmico médio em kJ medido para os corpos de prova, antes do procedimento de reparo.

Após a soldagem dos corpos de prova, foi realizado ensaio não destrutivo por ultrassom com transdutores de 45° e 60°. No CP1 (arame sólido), identificou-se descontinuidade a 11 mm de profundidade em aproximadamente 70% da junta, enquanto no CP2 a descontinuidade ocorreu a 15 mm, abrangendo cerca de 64% da junta. Tais indicações configuram descontinuidades classificadas como Classe A, que segundo os critérios de aceitação da AWS D1.1 [4] item 8.13, Tabelas 8.2 e 8.3) devem ser rejeitadas independentemente do comprimento. Dessa forma, tornou-se necessário realizar o reparo das

juntas para viabilizar a execução dos ensaios destrutivos. A figura 8 demonstra o local aproximado das indicações encontradas e o ensaio de ultrassom realizado.

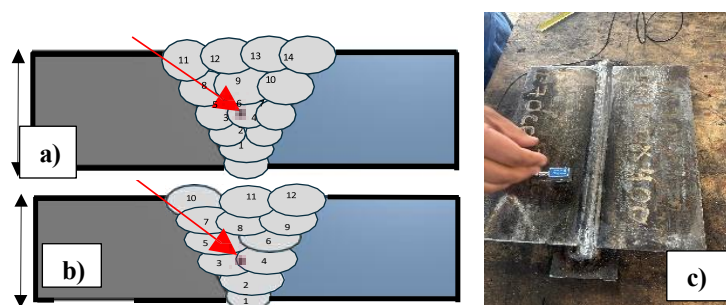


Figura 8 - Ensaio de Ultrassom. a) Local da indicação arame sólido. b) Local da indicação arame metal cored. c) Ensaio de ultrassom realizado

Para a execução do procedimento de reparo, realizou-se o esmerilhamento a partir da face da raiz da solda em cada corpo de prova, removendo aproximadamente 2 mm acima de cada descontinuidade, garantindo a completa eliminação das falhas antes da recomposição da junta. A escolha de remover o material pela face da raiz, e não pelo reforço, foi feita para compensar a distorção, facilitar o acesso ao local de reparo e garantir penetração total. Para manter a comparabilidade entre os processos, ambos os corpos de prova foram esmerilhados até 12 mm, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 9 - Esmerilhamento para remoção da descontinuidade nos corpos de prova.

Após a remoção do material visando eliminar as descontinuidades identificadas, foi realizado o ensaio por líquido penetrante (LP) para verificar a completa remoção dos defeitos. De acordo com a figura 10, não há descontinuidades visíveis nos ensaios realizados. Em decorrência do processo de remoção, a região da raiz da solda foi completamente eliminada, o que resultou em uma alteração da geometria da junta. O chanfro originalmente em formato em “V” simples passou, após o procedimento de reparo, a apresentar configuração em duplo “V”.



Figura 10 - Ensaio de Líquido Penetrante Após procedimento de Reparo, antes e após aplicação do relevador.

Após a aplicação do ensaio por líquido penetrante, deu-se sequência ao procedimento de reparo, realizando então o processo de soldagem, utilizando-se os parâmetros indicados na Tabela 5. A execução do processo de soldagem para o procedimento de reparo foi realizada de forma manual.

Tabela 5 - Parâmetros de Soldagem passes de reparo.

	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	Pré-aquecimento mínimo (C°)	Temperatura de Interpasse máxima (C°)	Heat Input (Kj/mm)	Duração média (Segundos)
CP1 - Arame Sólido (ER70S-6)							
Passes de Reparo	28,63V	242,56A	262,5 mm/min	100°C	150°C	1,58 kJ	80s
CP2 - Arame Metal Cored (E70C6-M)							
Passes de Reparo	31V	270A	296,4 mm/min	100°C	150°C	1,70 kJ	70,85s

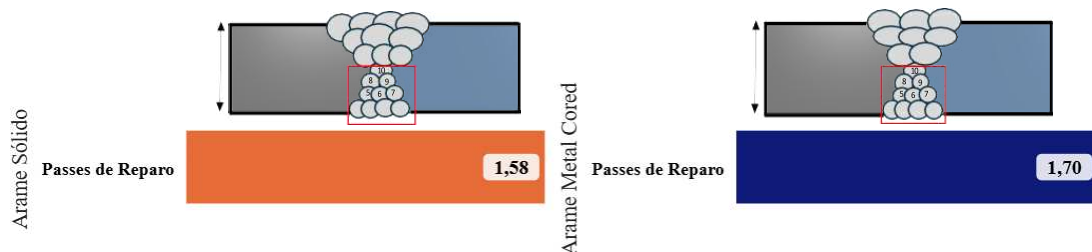


Figura 11 - Aporte térmico médio em kJ medido para os corpos de prova, após o procedimento de reparo.

Após a conclusão de todo o processo de soldagem, as chapas foram encaminhadas ao laboratório para a extração dos corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos. Foram realizados quatro ensaios de dobramento lateral (side bend) para avaliação da qualidade da solda em chapas de Hardox 400 e A36, seguindo o procedimento Jig, conforme AWS D1.1 [4], item 6.10.3.1 e figura 6.11, e atendendo também às recomendações da ASME Section IX [2], figura QW-466.1. Com o intuito de aprimorar a análise do ensaio de dobramento e evitar possíveis desvios ou deslizamentos da dobra durante a execução — em razão das diferenças significativas de propriedades mecânicas entre o Hardox 400 e o aço A36 — foi também realizado um ensaio de tração no metal base Hardox 400, por se tratar do material de maior resistência mecânica. Este ensaio adicional teve como objetivo avaliar o comportamento real do material, determinando seus valores de limite de escoamento (LE),

limite de resistência (LR) e alongamento (AL), além de validar o dimensionamento adequado do cutelo utilizado no ensaio de dobramento. Os ensaios de dobramento lateral (side bend) foram realizados em corpos de prova com dimensões de 19,00 mm × 10,00 mm × 300,00 mm. O ensaio foi conduzido utilizando o equipamento de ensaio Amsler 699/492, com ângulo de dobra de 180°, cutelo (ram) de 50,80 mm e distância entre roletes de 73 mm.

Para a avaliação da resistência mecânica da solda, foram realizados dois ensaios de tração para cada corpo de prova, seguindo as diretrizes da AWS D1.1 [4], item 6.10.3.4 e figura 6.10. Os ensaios foram avaliados de acordo com os critérios de aceitação da AWS D1.1 [4], item 6.10.3.5, que especifica que a resistência à tração da junta soldada não deve ser inferior ao valor mínimo da faixa de tração estabelecida para o metal base utilizado.

Para a avaliação da tenacidade à fratura, foram preparados três corpos de prova para o ensaio Charpy em cada junta soldada. Os locais de retirada das amostras seguiram as orientações da AWS D1.1 [4], item 6.27 e figura 6.28, em conformidade com a geometria da junta adotada neste trabalho, do tipo duplo V. A quantidade de amostras foi definida conforme o item 6.27.2, sendo retirada três amostras do metal de solda, e as dimensões dos corpos de prova de acordo com o item 6.27.3 da mesma norma. A temperatura de ensaio foi estabelecida em -30 °C, conforme especificado pela ASME BPVC Section II, Part C – 2025 [1], Tabela 4 – Requisitos de Propriedades Mecânicas para Ensaio GMAW e GTAW. Os critérios de aceitação seguiram as diretrizes da AWS D1.1 [4], item 6.27.7, sendo avaliados conforme os valores de energia mínima absorvida em função da quantidade de corpos de prova extraídos. Conforme o referido item, quando três corpos de prova são ensaiados de acordo com item 6.27.2, todos, exceto um, devem apresentar valores iguais ou superiores à energia média mínima absorvida especificada para a temperatura de ensaio. No presente trabalho, a energia mínima de referência foi definida conforme o especificado na Tabela 4 da ASME BPVC Section II, Part C – 2025 [1], atendendo aos requisitos de propriedades mecânicas para os processos GMAW e GTAW.

Foi realizado o ensaio de macrografia de cada junta soldada, com o objetivo de analisar e dimensionar a penetração, a fusão a extensão da (ZAC). Os corpos de prova foram seccionados transversalmente à junta, polidos e atacados quimicamente com reagente Nital a 5%, permitindo a visualização das interfaces entre o metal base e o metal de solda.

O ensaio de dureza foi realizado com o objetivo de avaliar as diferenças de dureza entre os materiais e nas diferentes regiões da junta soldada, especialmente na Zona Afetada pelo

Calor (ZAC). Segundo a norma AWS D1.1 [4], anexo B, item B3.1, propõe um método para evitar trincas em soldas controlando a dureza da (ZAC) abaixo de um valor crítico, adotado neste estudo como 350 HV, conforme a Figura 12. Segundo o Manual de Soldagem SAAB [11] Hardox® 400, material de alta resistência e destinado a aplicações de desgaste, a dureza do metal base é naturalmente elevada, sendo essencial controlar a dureza do cordão soldado para compatibilizar resistência e tenacidade.

Após a realização do ensaio de dureza, foi executado o ensaio de micrografia, com o objetivo de observar as microestruturas da junta soldada e das diferentes regiões da Zona Afetada pelo Calor (ZAC).

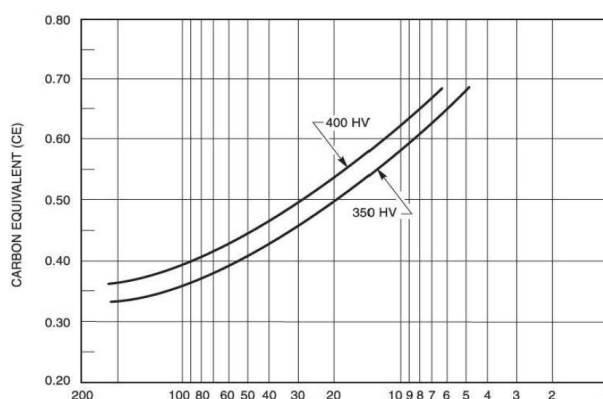


Figura 12 - Zona de classificação crítica de Dureza conforme AWS D1.1

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Taxa de Deposição

Para a determinação da taxa de deposição de cada processo, foi utilizado o sistema de monitoramento de parâmetros Insight CenterPoint. O software possibilitou o registro em tempo real da taxa de deposição durante todo o processo de soldagem, o qual foi dividido em duas etapas: antes e após o procedimento de reparo. Conforme ilustrado na Figura 13, são apresentados o croqui do chanfro e o número de passes realizados em cada etapa. A partir dos dados obtidos, foi determinada a média final da taxa de deposição para cada arame conforme apresentado na Figura 14.

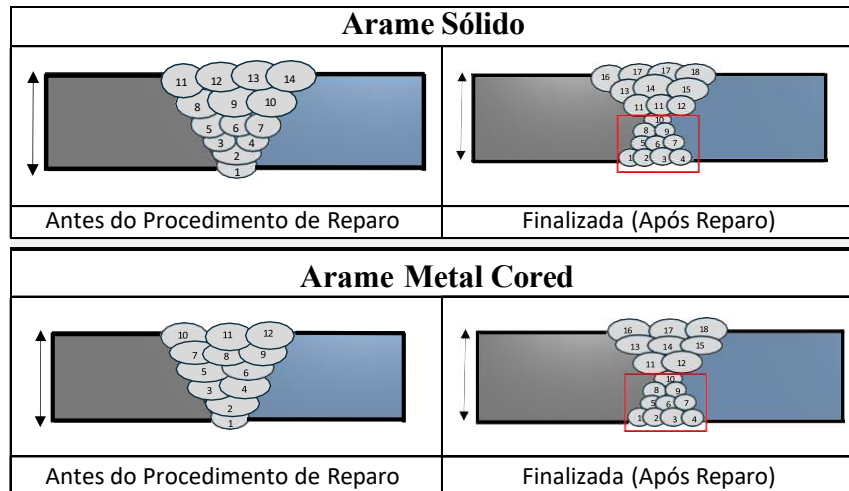


Figura 13 - Croqui das juntas Soldadas antes e após os procedimentos de reparo.

De acordo com os resultados obtidos, a taxa de deposição do arame tubular metal cored (E70C-6M) apresentou um valor aproximadamente 13% superior em relação ao arame sólido ER70S-6. Esse comportamento pode ser atribuído principalmente à maior eficiência de fusão e ao maior rendimento metálico característico dos arames tubulares metálicos, que proporcionam uma maior taxa de deposição para a mesma corrente de soldagem segundo, [9] MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2017.

Além disso, o arame tubular de alma metálica metal cored tende a apresentar melhor estabilidade do arco elétrico e maior eficiência térmica devido à presença de elementos de liga e agentes desoxidantes no núcleo do arame, o que favorece uma transferência metálica mais estável e maior produtividade, segundo [12] SCOTTI; PONOMAREV, 2008.

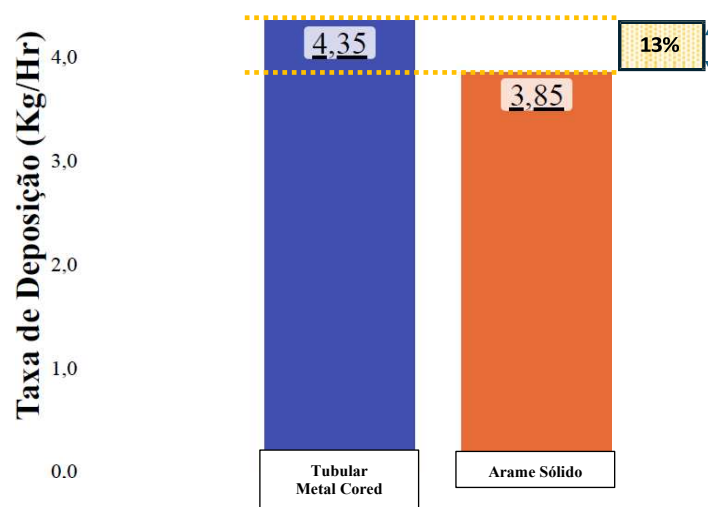


Figura 14 - Diferença Taxa de deposição entre os processos.

3.2 Tempo de Execução dos Corpos de Prova

Conforme apresentado nas Tabelas 6a e 6b, observa-se a comparação entre os tempos totais de execução dos corpos de prova antes e após o procedimento de reparo. Analisando os tempos de execução, verifica-se que o processo MCAW com arame tubular de alma metálica, metal cored apresentou menor tempo total de deposição por cordão, refletindo maior produtividade em comparação ao arame sólido. Esse desempenho é atribuído à maior taxa de deposição característica do arame metal cored, que possibilita maior volume de metal depositado em menor tempo, mantendo níveis adequados de fusão e penetração.

Tabela 6 - Tempo de execução dos corpos de provas. 6.a) Antes do procedimento de reparo. 6.b) Procedimento de reparo

	Quantidade de Passes	Tempo total dos Cordões	Tempo Total de interpasse	Tempo de Pré-Aquecimento até 100° C	Tempo Total (Horas)		
Arame Sólido	14	16 Min	210 Min	3 Min	3,8 h	a)	
Arame Metal Cored	12	13 Min	180 Min	3 Min	3,2 h		
	Esmerilhamento + LP	Quantidade de Passes	Tempo total dos Cordões	Tempo Total de interpasse	Tempo de Pré-Aquecimento até 100° C	Tempo Total (Horas)	
Arame Sólido	90 Min	10	13,3 Min	150 Min	3 Min	4,27 h	b)
Arame Metal Cored	90 Min	10	11 Min	150 Min	3 Min	4,23 h	

De modo geral, o processo com arame metal cored proporcionou uma redução média de aproximadamente 12 a 15% no tempo total de soldagem por cordão, de acordo com a representação na Figura 15, tanto antes quanto após o procedimento de reparo. Tal ganho representa uma vantagem produtiva significativa.

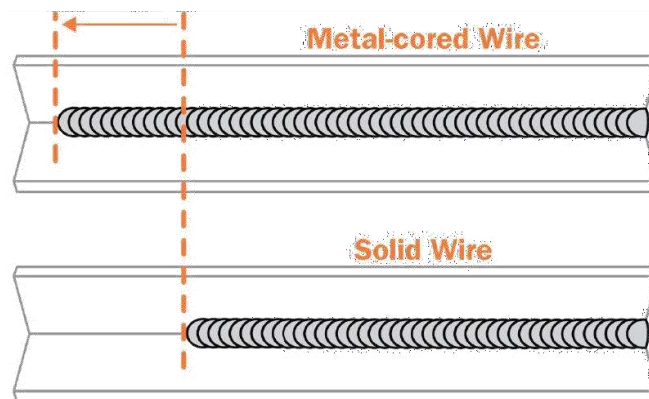


Figura 15 - Comparação de tempo por cordão por consumível.

3.3 Macrografia

A Figura 16 apresenta as macrografias das juntas soldadas obtidas com os dois consumíveis avaliados: (a) arame sólido ER70S-6 e (b) arame tubular metal cored E70C6-M. Em ambas as amostras se observou boa formação dos cordões de solda, com ausência de descontinuidades macroscópicas, como mordeduras, falta de fusão ou porosidades, indicando adequado controle dos parâmetros de soldagem.

Para o arame sólido (ER70S-6), as medidas da ZAC foram de 4,3 mm no lado A (Hardox) e 3,4 mm no lado B (A36). Já para o arame tubular metal cored (E70C6-M), observou-se 5 mm no lado A (Hardox) e 4 mm no lado B (A36), evidenciando que o processo com arame tubular metal cored gerou ligeiramente maior aporte térmico, o que ampliou a ZAC, conforme também observado no monitoramento térmico da junta durante o processo.

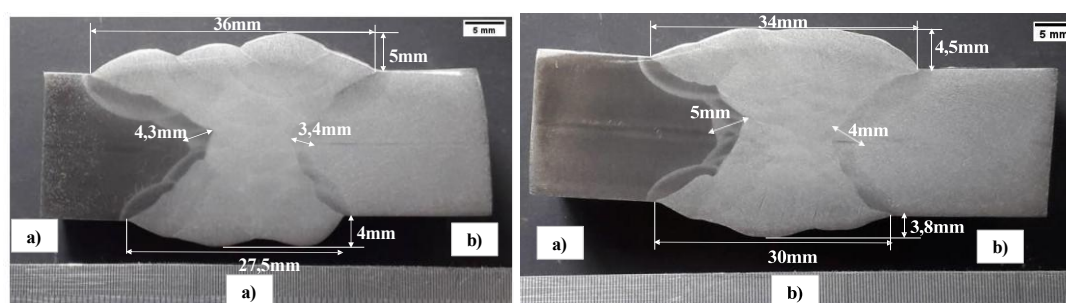


Figura 16 - Ensaios de macrografia. a) Arame Sólido b) Arame Tubular Metal Cored

3.4 Ensaio de Tração

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de tração conforme Figura 17, observa-se que os corpos de prova soldados pelo processo GMAW (ER70S-6) apresentaram resistência média ligeiramente superior, atingindo 464,93 MPa e 438,31 MPa, quando comparados aos corpos de prova soldados com arame Tubular metal cored (E70C6-M), que apresentaram 445,89 MPa e 434,91 MPa. Ambos os corpos de prova apresentaram ruptura no metal de base ASTM A36, conforme ilustrado na Figura 10, atendendo aos critérios de aceitação estabelecidos pela norma AWS D1.1 (2025)[4], a qual estabelece que a resistência à tração do metal de solda deve ser igual ou superior à resistência mínima especificada do metal de base de menor limite, neste caso o aço A36, com valor mínimo de 400 MPa.

A diferença observada entre os processos pode ser explicada pelo Heat Input médio medido durante o procedimento de soldagem e processo de reparo. Conforme demonstrado nas Figuras 7, o processo GMAW (arame sólido) apresentou maior aporte térmico no passe de raiz (3,53 kJ/mm) quando comparado ao arame metal cored (2,79 kJ/mm). Entretanto, durante o procedimento de reparo, a região correspondente ao passe de raiz foi completamente removida, sendo o novo aporte térmico médio inferior (1,58 kJ/mm) ao registrado no processo com arame metal cored (1,70 kJ/mm). Essa diferença justifica a pequena superioridade de resistência mecânica observada no processo GMAW com arame sólido.

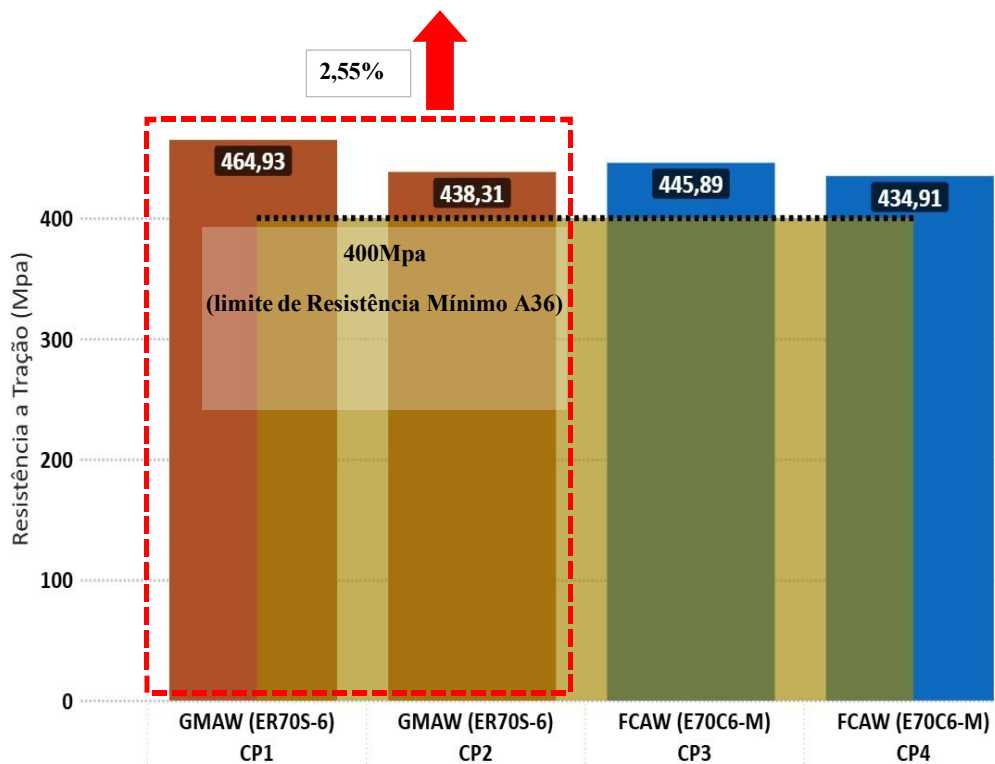


Figura 17 - Diferença de Resistência a Tração processos GMAW e MCAW.

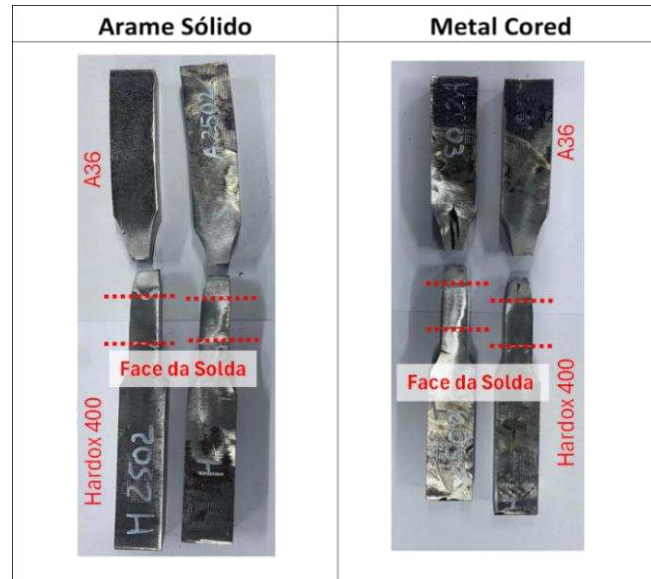


Figura 18 - Corpo de Prova ensaio de tração.

3.5 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza Vickers foi realizado ao longo da seção transversal da junta soldada, abrangendo as regiões do metal de base 1 (MB1 – Hardox 400), zona afetada pelo calor (ZAC), metal de solda (MS) e metal de base 2 (MB2 – Aço A36), conforme ilustrado na Figura 19 b. Observa-se que os valores obtidos para o MB1, mantiveram-se elevados, com durezas médias entre 390 e 420 HV, valores característicos de aços de alta resistência e abrasão. Já o MB2 apresentou durezas significativamente inferiores, variando de 145 a 155 HV, coerentes com a natureza de um aço estrutural.

Comparando os arames utilizados, verifica-se que o (E70C6-M), representado pela linha azul, apresentou valores ligeiramente mais elevados de dureza no metal de solda (MS), com médias entre 228 e 233 HV, enquanto o (ER70S-6), linha laranja, apresentou médias entre 175 e 178 HV. Essa diferença pode ser atribuída à composição química mais rica do arame tubular metal cored. Apesar dessa variação, ambos os arames mantiveram valores abaixo do limite crítico de 350 HV nas regiões da ZAC e MS.

Tabela 7 - Resultados dos valores de dureza entre os dois arames.

GMAW - ER70S-6				
MB1 - Hardox 400	ZAC	MS	ZAC	MB2-A36

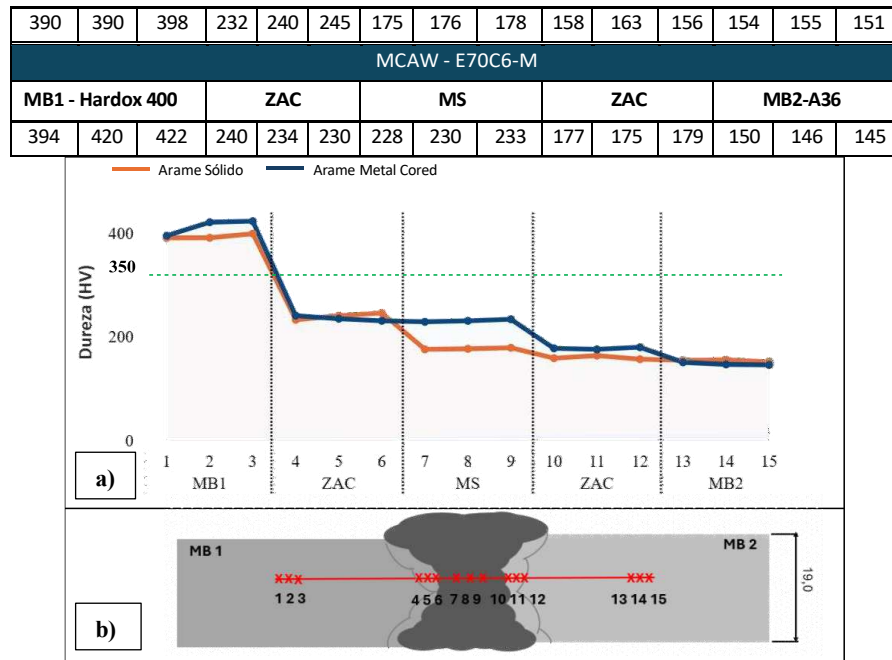


Figura 19 - Perfis de dureza Vickers. **a)** comparativo de dureza arame sólido e arame Tubular metal Cored. **b)** regiões do ensaio de dureza na junta soldada.

3.6 Ensaio Charpy

Os resultados do ensaio Charpy-V na região do metal de solda (MS) demonstraram valores médios para os dois consumíveis avaliados, conforme mostrado na Tabela 7: o arame sólido ER70S-6 obteve média de 192,86 J, enquanto o arame de alma metálica E70C6-M apresentou média de 149,06J, ambos os corpos de provas superaram o valor mínimo de tenacidade 27j conforme especificado pela norma. A diferença observada na tenacidade entre os dois consumíveis pode ser atribuída, à quantidade de passes e ao aporte térmico empregado em cada procedimento. No caso do arame sólido, foram realizados 20 passes, enquanto no arame Tubular metal cored 18 passes.

Essa diferença influencia o comportamento térmico e microestrutural da junta, uma vez que um maior número de passes tende a gerar reaquecimento sucessivo nas camadas previamente depositadas, promovendo o refinamento de grão e o aumento da tenacidade do metal de solda [5]. Dessa forma, o maior número de passes e o menor aporte térmico médio por passe observados no processo com arame sólido justificam a maior energia absorvida no ensaio Charpy, evidenciando uma melhor combinação entre ductilidade e resistência ao impacto quando comparado ao arame Tubular Metal cored.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de impacto Charpy

Arame	Impacto MS (J)
Arame Sólido (ER70S-6)	196,13 / 196,13 / 186,32 (192,86)
Arame Metal Cored (E70C6-M)	147,09 / 152,98 / 147,09 (149,06)

A Figura 20 apresenta os corpos de prova após o ensaio de impacto, evidenciando fraturas predominantemente dúcteis. Observa-se que os corpos de prova submetidos ao arame sólido ER70S-6 (Figura 20a) e ao arame de alma metálica E70C6-M (Figura 20b) exibem superfícies com aparência fibrosa e significativa deformação plástica, indicando boa capacidade de absorção de energia antes da ruptura. Nota-se ainda que, embora ambas as fraturas sejam dúcteis, os corpos de prova da Figura 19b apresentam áreas de cisalhamento mais acentuadas, sugerindo menor tenacidade em comparação com os corpos de prova da Figura 19a. Essas características são consistentes com os valores obtidos no ensaio de impacto.

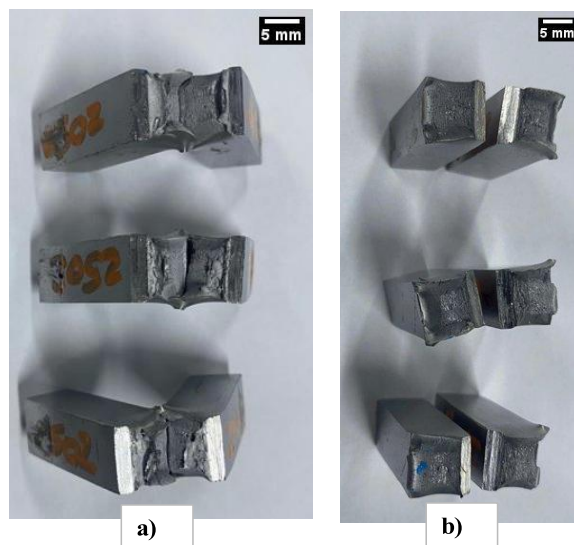


Figura 20 - Corpos de Prova de impacto após a fratura. a) Arame sólido. b) Arame metal Cored

3.7 Dobramento

Conforme apresentado na figura 13 foram realizados quatro ensaios de dobramento lateral (side bend) para cada corpo de prova, com o objetivo de avaliar a integridade da junta

soldada entre os materiais dissimilares Hardox 400 e A36. As amostras das Figuras 21(a) e 21(b) correspondem, respectivamente, às soldagens realizadas com arame sólido ER70S-6 e arame de alma metálica E70C6-M.

Observa-se que todas as amostras apresentaram deformação satisfatória sem ocorrência de trincas ou descontinuidades superficiais visíveis, atendendo aos critérios de aceitação estabelecidos pelas normas AWS D1.1 (2025) [4] e ASME Section IX (2025) [2], que determinam que não devem existir aberturas ou falhas superiores a 3,2 mm na superfície de tração após o ensaio.

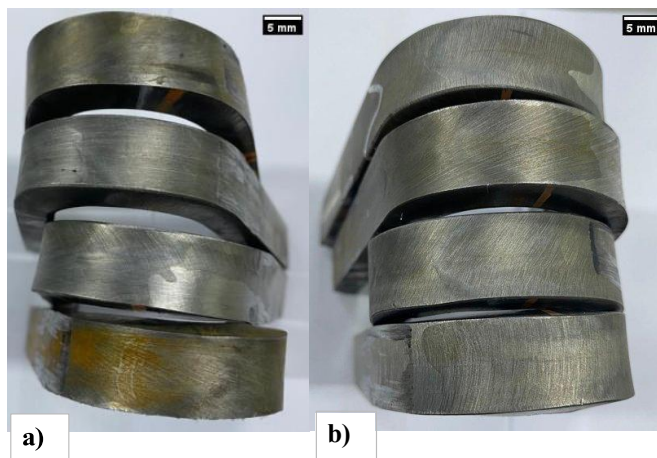


Figura 21 - Corpo de prova de dobramento. a) Arame Sólido, b) Arame Metal Cored

3.8 Micrografia

As Figura 22 apresentam as micrografias obtidas na região do metal de solda (MS) dos corpos de prova soldados com os arames ER70S-6 (sólido) e E70C6-M (Tubular metal cored). Na micrografia correspondente ao arame sólido (Figura 22a), observa-se uma microestrutura predominantemente composta por ferrita e perlita, o que indica um resfriamento relativamente controlado e moderado. Esse tipo de microestrutura está associado a uma boa combinação entre resistência mecânica e ductilidade, resultado compatível com o menor aporte térmico médio observado. Já na micrografia referente ao arame de alma metálica (Figura 22b), nota-se a presença marcante de ferrita acicular e perlita, o que denota um resfriamento mais rápido e uma maior taxa de nucleação durante a solidificação.

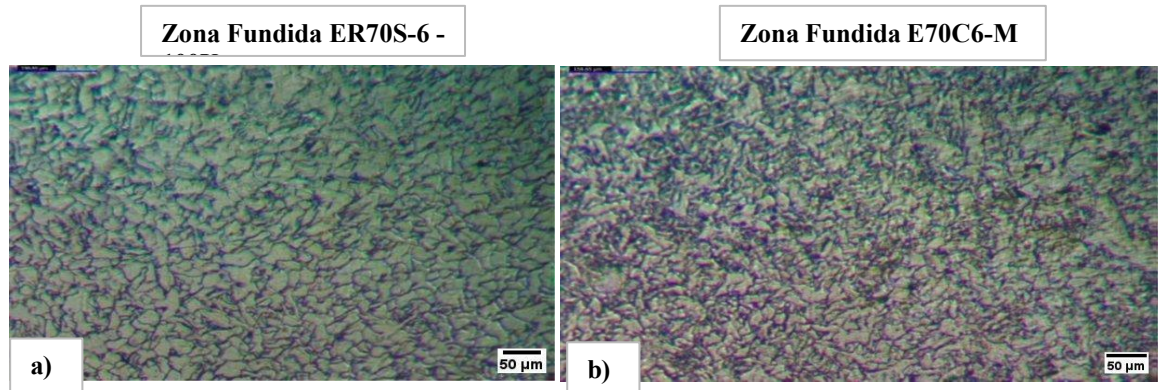


Figura 22 - Microestrutura ZF – Zona Fundida dos corpos de prova. a) Arame Sólido ER70S-6, b) Arame Metal Cored E70C6-M

4 CONCLUSÃO

As análises entre a soldagem dos dois corpos de provas, concluíram que:

- A taxa de deposição do arame Tubular de Alma metálica (metal cored) apresentou-se cerca de 13% superior em relação ao arame sólido de mesmo diâmetro, possibilitando maiores velocidades de soldagem e, conseqüentemente, ganhos de produtividade no processo.
- As análises macrográficas mostraram-se livres de descontinuidades, com ZAC mais ampla do lado do Hardox 400 em ambos os corpos de prova, sendo ligeiramente superior para o arame metal cored, devido ao maior aporte térmico característico do processo.
- Os ensaios de tração indicaram que todas as amostras apresentaram ruptura no metal de base A36, confirmando que a resistência da junta soldada foi superior ao limite mínimo exigido pelas normas AWS D1.1 e ASME Seção IX.
- O ensaio de impacto Charpy-V evidenciou maior tenacidade para o arame sólido (ER70S-6), resultado atribuído ao maior número de passes e menor aporte térmico médio por passe, fatores que favoreceram o refinamento de grão.
- Os valores de dureza Vickers (HV) permaneceram inferiores a 350 HV para

ambos os arames, abaixo dos valores críticos de acordo com a norma AWS D1.1

- De forma geral, conclui-se que ambos os consumíveis são tecnicamente adequados para a união dos aços dissimilares Hardox 400 e A36. O arame sólido apresentou desempenho ligeiramente superior quanto ao equilíbrio entre resistência e tenacidade, fortemente influenciado pelo controle dos parâmetros de soldagem, enquanto o arame metal cored se destacou por sua maior produtividade e bom desempenho mecânico global

5 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A36/A36M-01: Standard specification for carbon structural steel**. West Conshohocken: ASTM International, 2001.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Section II, Part C: Specification for welding rods, electrodes, and filler metals**. New York: ASME, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Section IX: Qualification standard for welding**. New York: ASME, 2015.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M: Structural welding code – steel**. Miami: AWS, 2025.

BANG, Kook-Soo et al. **Low heat input welding to improve impact toughness of multipass FCAW-S weld metal**. [S.l.]: [s.n.], [s.d.].

COSTA, Vagner Machado; CUNHA, Pedro Henrique Costa Pereira da; VIEIRA, Eduardo da Rosa. Impact toughness analysis of a high strength steel Hardox 450 welded joint. **Soldagem & Inspeção**, v. 28, p. e2802, 2023.

EN, B. S. 1011-2: 2001: 'Welding: Recommendations for welding of metallic materials. Arc welding of ferritic steels'. **British Standards Institution**, 2001.

HOBART BROTHERS LLC. **The advantages of Hobart® FabCOR® metal cored wire**. Troy: Hobart Brothers, 2020

LANCASTER, R. W. **The physics of welding**. Cambridge: Abington Publishing, 1999.

MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2017.

SAAB. **Hardox 400: data sheet 151en**. Oxelösund: SSAB, 2023.

SAAB. **Guia de soldagem Hardox Wear Plate PT 103 V2**. Oxelösund: SSAB, 2020.

6 RESPONSABILIDADE AUTORAL

O autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.