

QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM SMAW E FCAW-S PELA NORMA ASME IX

Felipe Grando, felipe.grando208@gmail.com¹

Daniela Lupinacci Villanova, daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, Rua São Vicente, 785 – Cinquentenário, Farroupilha – RS. 95174-274.

Resumo: Este artigo técnico apresenta uma comparação detalhada entre os processos de soldagem SMAW (Shielded Metal Arc Welding) e FCAW-S (Flux-Cored Arc Welding - Self-Shielded), com base em ensaios de tração, macrografia e dobramento, considerando os critérios de aceitação estabelecidos pela norma ASME IX. O objetivo é avaliar a qualidade das juntas soldadas e identificar os principais defeitos que podem comprometer a integridade estrutural das soldas. Os ensaios de tração revelaram que ambos os processos enfrentaram dificuldades em atingir os limites de resistência especificados pela norma ASME IX, com amostras de SMAW apresentando falhas predominantemente por inclusão de escória. As amostras de FCAW-S também mostraram falhas significativas, principalmente devido à falta de fusão e inclusão de escória, sugerindo a necessidade de ajustes nos parâmetros de soldagem e técnicas operacionais. A análise macroscópica das juntas soldadas por FCAW-S evidenciou defeitos internos, falta de fusão e porosidades, que estão diretamente relacionados aos métodos de soldagem utilizados. Os ensaios de dobramento demonstraram que o processo FCAW-S apresentou rupturas significativas, especialmente nas zonas fundidas e ao longo das interfaces de solda. Esses resultados destacam a importância de um controle rigoroso dos parâmetros de soldagem e da preparação adequada das superfícies para minimizar os defeitos e garantir a conformidade com a norma ASME IX. Conclui-se que, embora ambos os processos de soldagem tenham potencial para aplicações industriais, melhorias significativas são necessárias para atender aos requisitos de qualidade estabelecidos pela norma ASME IX.

Palavras-chave: soldagem, asme IX, SMAW, FCAW-S.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem são utilizados por empresas de todos os tamanhos e inclusive em usos domésticos na confecção de artigos metálicos. O processo de soldagem surgiu praticamente ao mesmo tempo que os processos de manufatura dos metais. Nas forjas, eram confeccionados artigos do dia a dia, como artefatos agrícolas e armamentos e, nos primórdios, o processo de soldagem predominante utilizado era o caldeamento. Este consistia em aquecer os blocos de metais a temperatura de rubro, que era um método muito antigo para determinação de temperatura ideal para o caldeamento e tratamento térmico e, então, era pulverizada uma camada de areia para formação da escória e consequente extração das impurezas superficiais. Juntavam-se os blocos ainda em rubro e então eram aplicados golpes de martelos e marretas até a soldagem dos blocos (Marques; Modenesi; Bracarense, 2011).

A soldagem por eletrodo revestido (SMAW, *Shielded Metal Arc Welding*) é um dos pilares da indústria metalúrgica, desempenhando um papel fundamental na união de materiais metálicos desde o início do século 20. Esta técnica é reconhecida por sua versatilidade e simplicidade, sendo amplamente utilizada na indústria devido à sua capacidade de soldar uma variedade de metais e ligas, incluindo aços carbono e de baixa liga. Durante o processo, um eletrodo revestido fornece proteção ao metal fundido contra contaminantes atmosféricos (Modenesi et al., 2017). Durante períodos de conflitos globais, como a Segunda Guerra Mundial, a soldagem por eletrodo revestido demonstrou sua versatilidade e importância estratégica na produção e reparo de equipamentos militares (Moura, 2015). Ao longo dos anos, diversos avanços foram alcançados na formulação de revestimentos de eletrodos e no controle do processo de soldagem, resultando em melhorias substanciais na qualidade das soldas produzidas (Sociedade Brasileira de Soldagem, 2008).

A soldagem com arame tubular auto protegido, ou *flux-cored* (FCAW-S, *Flux-Cored Arc Welding - Self-Shielded*), é um processo amplamente utilizado na indústria metalúrgica devido à sua eficiência e versatilidade. Este método de soldagem utiliza um arame contínuo que contém um fluxo interno, proporcionando proteção contra a atmosfera circundante e permitindo a fusão do metal de adição com maior eficiência comparada a outros processos de arco (Dias, 2004). Desde suas origens, a soldagem com arame auto protegido tem evoluído significativamente, com melhorias na formulação dos fluxos internos dos arames para atender às exigências específicas de diferentes aplicações industriais (Sociedade Brasileira de Soldagem, 2008). A técnica encontrou particular destaque em ambientes de fabricação, nos quais

a mobilidade e a acessibilidade são essenciais, demonstrando sua eficácia na soldagem de materiais espessos e na construção de estruturas de grande escala (Hüttner, 2015).

A elaboração de especificações de processo de soldagem desempenha um papel crucial na garantia da qualidade e segurança das operações de soldagem industriais. Essas especificações detalham os procedimentos necessários para realizar soldagens de maneira eficiente e confiável, abrangendo desde a seleção de materiais e equipamentos até a definição dos parâmetros de soldagem adequados (Senai-SP, 2014). No contexto brasileiro, normas técnicas como as estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) orientam a elaboração dessas especificações, assegurando que as práticas de soldagem estejam alinhadas com padrões de qualidade reconhecidos internacionalmente (ABNT, 2008). A correta aplicação das especificações dos processos de soldagem não apenas otimiza a eficiência e a produtividade, mas também minimiza a ocorrência de defeitos e falhas estruturais, garantindo a integridade dos componentes e estruturas soldadas ao longo de sua vida útil (Dias, 2013).

A literatura especializada destaca a importância de técnicas adequadas de preparação de superfície e de controle de parâmetros de soldagem para garantir a qualidade e a durabilidade das junções soldadas em operações de manutenção (Gonçalves, 2018). Além disso, a aplicação de procedimentos de qualificação conforme normas reconhecidas, como as da American Society of Mechanical Engineers (ASME), é fundamental para assegurar que os reparos atendam aos padrões de segurança e desempenho exigidos (ASME, 2021).

Objetivamente, o trabalho desenvolvido teve por intuito, realizar as qualificações dos processos de eletrodo revestido e arame tubular auto protegido, de forma a realizá-las em campo com garantia de repetibilidade e confiabilidade, tanto na fabricação/construção como em manutenção.

2. Norma ASME IX

A ASME Seção IX estabelece os requisitos para a qualificação de procedimentos de soldagem e brasagem, soldadores, operadores de soldagem e operadores de brasagem. A Seção IX é essencial para garantir que os procedimentos de soldagem atendam aos padrões de qualidade e segurança exigidos para aplicações industriais e de engenharia. A qualificação de processos de soldagem, conforme ASME Seção IX, inclui uma série de testes rigorosos para verificar a conformidade dos processos e a competência dos soldadores (ASME IX, 2021).

A qualificação de procedimentos de soldagem (PQR, *Procedure Qualification Record*) envolve a documentação de todos os parâmetros e variáveis utilizados durante a soldagem de um corpo de prova, seguido de uma série de ensaios mecânicos e não destrutivos para verificar a qualidade da solda. Os ensaios incluem tração, dobramento e análise macro e microscópica. Um procedimento é considerado qualificado se todos os testes forem aprovados conforme os critérios estabelecidos pela ASME Seção IX (Silva & Almeida, 2019).

A qualificação de soldadores (WPQ, *Welder Performance Qualification*) é um processo que verifica a habilidade de um soldador para produzir soldas de qualidade aceitável de acordo com um procedimento de soldagem qualificado. O soldador deve executar soldas de teste que serão submetidas a ensaios destrutivos e não destrutivos para verificar a sua conformidade com os requisitos especificados. A qualificação é específica para cada processo de soldagem e posição de soldagem (Modenesi, 2009).

A ASME Seção IX define variáveis essenciais, não essenciais e suplementares para a qualificação de procedimentos de soldagem. As variáveis essenciais são aquelas que, se alteradas, podem afetar a integridade da solda e requerem uma nova qualificação do procedimento. Essas variáveis incluem, mas não se limitam a: tipo de material base, tipo de material de adição, espessura do material, posição de soldagem, tipo de corrente e polaridade, e parâmetros de pré e pós-aquecimento (Chiaverini, 2000).

A conformidade com a ASME Seção IX é crucial para garantir a segurança e a integridade das estruturas soldadas. A falta de conformidade pode resultar em falhas catastróficas, comprometer a segurança dos trabalhadores e levar a significativas perdas econômicas. Portanto, a adesão rigorosa aos requisitos da ASME Seção IX é fundamental para todas as indústrias que utilizam processos de soldagem (Souza & Pereira, 2020).

3. Metodologia

Para proporcionar repetibilidade e coerência ao trabalho proposto, foram utilizadas as diretrizes descritas na norma ASME seção XI (2021), respeitando-se determinações dos fabricantes dos equipamentos e dos insumos utilizados. Inicialmente, foram determinados os parâmetros elétricos de soldagem, seguindo as etapas de preparação de amostras, execução da soldagem, extração dos corpos de prova, ensaios mecânicos e elaboração de EPS (Especificação de Processo de Soldagem), caso sejam aprovados nos ensaios.

3.1. Determinação de parâmetros

Para determinação dos parâmetros elétricos iniciais foram utilizadas as fichas de especificação dos consumíveis de soldas, sendo analisadas informações de faixa de corrente e tensões e taxas de deposição indicadas conforme Tab. 1 e suas composições químicas conforme Tab. 2. Cruzando os dados preliminares com as capacidades do equipamento utilizado, neste caso uma fonte inversora da marca WWSolda Multiprocesso 140, foi possível redigir as especificações preliminares de soldagem, conforme indicado nas Fig. 01 e Fig. 02.

Tabela 1. Parâmetros elétricos.

Padrões	AWS E6013 (3,25mm)	AWS A5.20 E71T1 GS (0,8mm)
Corrente (A)	90 – 150	100 - 160
Tensão de soldagem (V)	20 - 30	35 - 55
Tensão de alimentação (V)	-	15 - 24
Taxa de deposição (kg/h)	1,5-3,5	1,5-5,5

Tabela 2. Composições químicas.

Consumíveis	C%	Mn%	Si%	S%	P%
AWS E6013 (3,25mm)	0,55 – 0,32	0,41 -0,4	0,15 – 0,14	0,015 -0,014	0,019 – 0,017
AWS A5.20 E71T1 GS (0,8mm)	0,12 – 0,3	2,0 – 0,78	0,9 – 0,33	0,03 – 0,009	0,03 – 0,014

REGISTRO PRELIMINAR DE PROCEDIMENTO DE SOLDA					
TIPO DE JUNTA					
	X				
PROCEDIMENTO		CARACTERÍSTICAS			
	GMAW	CONSUMIVEL	AWS E6013		
X	SMAW	CORRENTE (A)	135	CROQUI DA JUNTA	
	SAW	TENSÃO (V)	32		
	FCAW	TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (V)	-		
	FCAW-S	POLARIDADE DO ELETRODO	P		
	GTAW	GAS DE PROTEÇÃO	-		
		PRE AQUECIMENTO (°C)	-		

Figura 01: EPS preliminar SMAW.

REGISTRO PRELIMINAR DE PROCEDIMENTO DE SOLDA					
TIPO DE JUNTA					
	X				
PROCEDIMENTO		CARACTERÍSTICAS			
	GMAW	CONSUMIVEL	AWS E71T1-GS		
	SMAW	CORRENTE (A)	125	CROQUI DA JUNTA	
	SAW	TENSÃO (V)	32		
	FCAW	TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (V)	22		
X	FCAW-S	POLARIDADE DO ELETRODO	N		
	GTAW	GAS DE PROTEÇÃO	-		
		PRE AQUECIMENTO (°C)	-		

Figura 02: EPS preliminar FCAW-S.

3.2. Preparação metal de base

Idealmente, seguir os procedimentos detalhados na ASME IX confere repetibilidade e confiabilidade nos testes de soldagem. Para tanto, desenvolveu-se uma chapa de aço SAE 1008 com um chanfro conforme Fig. 03. A chapa precisa ser chanfrada pois, pela ASME IX, para espessuras maiores de 1/8” (3,175mm), deve-se chanfrar o metal de base. Para realizar o chanfro foi utilizada a fresadora ferramenta, munida com uma fresa de topo com 4 cortes. Foi utilizada a rotação de 700 rpm, profundidade de corte de 0,25 mm por passo e 50 mm por minuto de avanço (dados retirados do *datasheets* da ferramenta e maquinário).

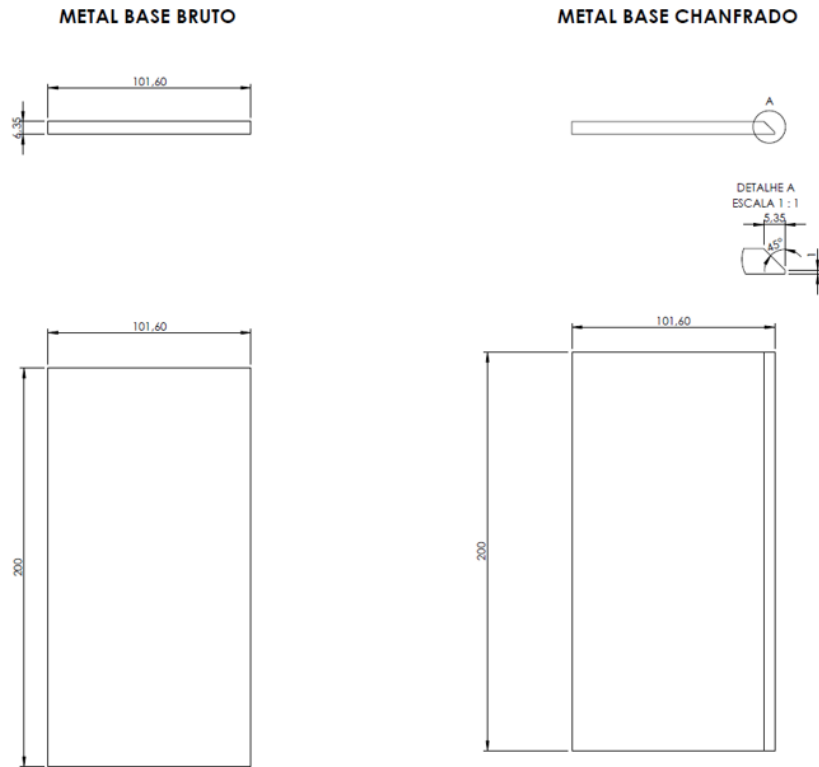


Figura 03. Desenho de preparação corpos de prova.

Após a usinagem, foi necessário proceder a limpeza do metal de base utilizando-se álcool isopropílico, eliminando quaisquer resquícios de óleo, líquido refrigerante e outros possíveis contaminantes. Após a secagem completa foi feita a montagem dos corpos de prova, respeitando-se o nariz de chanfro de 1 mm entre os metais de base, ponteando as mesmas nas posições de início e fim do cordão. Este procedimento não afeta a soldagem pois estas áreas são descartadas na obtenção dos corpos de prova para ensaio. Na Fig. 04 pode-se verificar a disposição dos metais de base conforme o croqui determinado inicialmente.



Figura 04. Montagem dos corpos de prova de soldagem.

3.3. Execução da soldagem

A partir da ficha de procedimento preliminar desenvolvida previamente, foi realizada a soldagem utilizando uma fonte inversora de soldagem com arco sinérgico, apresentada na Fig. 05. Desta forma, o equipamento faz pequenos ajustes nos parâmetros para que a energia de soldagem se mantenha o mais constante possível. A principal vantagem do arco sinérgico é a simplicidade na operação. O soldador precisa apenas ajustar um parâmetro principal (como a corrente de soldagem), e a máquina ajusta automaticamente os outros parâmetros, como a tensão e a tensão de alimentação (Campos, 2010). Também foi determinado que em caso da soldagem do cordão principal não houver o transpasse, será executado o cordão de reforço na face contrária.



Figura 05. Painel frontal da máquina destacando a opção sinérgica.

3.4. Cortes e usinagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram inicialmente cortados em tiras de 25 mm de largura no sentido transversal ao cordão de solda em uma serra a fita marca Ronemak modelo MR250. Foram descartadas as porções iniciais onde situam-se os inícios e fim de cordão de solda. No caso do processo de eletrodo revestido também foi necessário retirar as porções intermediárias onde se finalizava e se reiniciava o cordão pela troca do eletrodo. Além disso, foram reservadas porções das amostras para realização das macrografias.

Na sequência da preparação, foi retirado o reforço do cordão de solda na fresadora ferramenta, e procedeu-se o esquadreamento das amostras para medidas de 20 mm de largura e 6 mm de espessura. Para as amostras de tração, foi necessário usinar os entalhes utilizando-se uma fresa esférica de 8 mm.

3.5. Ensaios mecânicos

3.5.1. Macrografia

A macrografia é um método de ensaio utilizado para avaliar a qualidade de soldas através da análise visual de uma seção transversal da junta soldada. Este método é regulamentado por várias normas, incluindo a ASME IX que é a base deste trabalho. As etapas do procedimento de macrografia são:

- **Preparação da Amostra:** Cortar uma seção transversal da junta soldada. O corte deve ser perpendicular ao eixo da solda para assegurar que todas as áreas da junta sejam representadas.
- **Desbaste e Polimento:** Realizar o desbaste inicial da amostra utilizando lixas de diferentes granulometrias (foram utilizadas, 120, 240, 320, 600, 800, e 1200) para obter uma superfície plana e uniforme. Após o desbaste, fazer o polimento fino utilizando pastas de polimento com partículas de diamante ou alumina, até obter uma superfície espelhada sem arranhões visíveis.
- **Ataque químico:** Aplicar um reagente químico apropriado para revelar a microestrutura da solda. O reagente utilizado foi ácido nítrico diluído em álcool (solução de Nital a 3%).
- **Análise macrografia:** Examinar a amostra sob uma lupa ou microscópio óptico de baixa ampliação. Foi utilizada uma Lupa da marca Leica modelo KL300 led, para identificação de características como penetração da solda, porosidades, inclusões, trincas, e a estrutura da zona afetada pelo calor (ZTA).

- **Análise de micrografia:** Examinar a amostra sob um microscópio óptico de alta ampliação. Foi utilizado um microscópio da marca Leica modelo DM2500 M, para identificação das características das microestruturas típicas de cordões de solda, a zona afetada pelo calor e o metal de base.

3.5.2. Ensaio de tração

O ensaio de tração é um dos métodos mais comuns para avaliar as propriedades mecânicas de materiais, incluindo soldas. No contexto da ASME IX, o ensaio de tração é usado para determinar a resistência à tração, alongamento e outras propriedades mecânicas da solda. O procedimento foi realizado na máquina de ensaios universal, Fig. 06, e as etapas do ensaio são descritas a seguir.



Figura 06. Máquina de ensaio universal.

- **Preparação da Amostra:** Cortar uma seção transversal da junta soldada utilizando-se a serra a fita marca Ronemak modelo MR250. O corte deve ser feito de modo a incluir o metal base, a zona afetada pelo calor e o metal de solda. A amostra foi preparada de acordo com as dimensões especificadas pela norma, em forma de barras retangulares, com seção transversal padrão utilizando-se a Fresadora Eurostec FTV1. A Fig. 07 apresenta o desenho técnico da amostra produzida para o ensaio de tração. Certificar-se de que a superfície da amostra esteja livre de imperfeições e defeitos que possam afetar os resultados do ensaio.
- **Realização do Ensaio de Tração:** Colocar a amostra na máquina de ensaio de tração. Foi utilizada uma máquina de ensaio universal marca Quanteq modelo GR300. Aplicar a carga de tração de forma gradual e contínua, registrando a força aplicada e o alongamento correspondente. Continuar aplicando a carga até a ruptura da amostra.
- **Registro e Análise dos Resultados:** Registrar a carga máxima (força de ruptura) e o alongamento total da amostra. Calculando a resistência à tração dividindo a carga máxima pela área da seção transversal original da amostra. Os dados foram adquiridos pelo *software* do equipamento e exportado em forma de tabela, sendo selecionados dados de carga aplicada e do alongamento do corpo de prova. Na sequência os dados foram tratados por meio do *software* Excel, relacionando-os com os dados de seção transversal e comprimento útil de aplicação de carga.

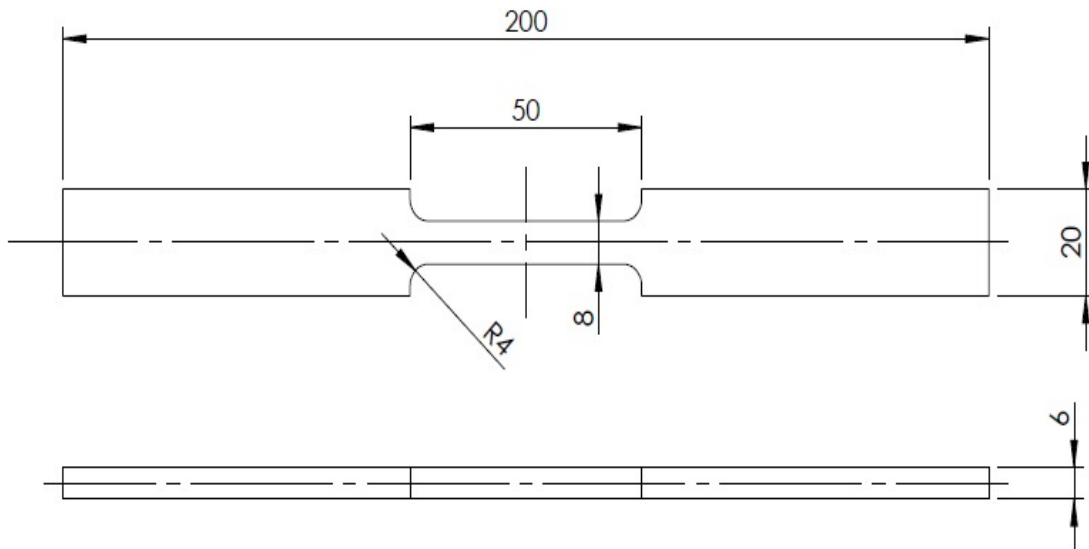


Figura 07. Desenho do corpo de prova.

3.5.3. Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento é amplamente utilizado para avaliar a ductilidade e a integridade de soldas, verificando a presença de defeitos como trincas, porosidades e inclusões. Para realizar este ensaio foi desenvolvido um dispositivo, conforme Fig. 08, para guiar o dobramento e auxiliar na concentração da carga no centro do cordão de solda. Para preparação da amostra:

- **Corte:** Cortar uma seção transversal da junta soldada. O corte deve incluir o metal base, a zona afetada pelo calor e o metal de solda. Da mesma forma que a preparação para o ensaio anterior, o corte foi feito na serra fita. As dimensões da amostra foram especificadas conforme descrito pela ASME IX.
- **Desbaste e Acabamento:** As superfícies da amostra devem ser desbastadas para remover quaisquer imperfeições que possam afetar os resultados do ensaio.
- **Tipos de Ensaio de Dobramento:**
 - **Dobramento de Raio Controlado:** A amostra é dobrada em torno de um pino ou mandril de raio especificado, verificando a resistência ao dobramento, sendo este o procedimento utilizado.
 - **Dobramento Guiado:** A amostra é dobrada entre dois pinos ou rolos, com a face soldada no lado de tração (dobra face) ou no lado de compressão (dobra raiz).
- **Realização do Ensaio:** Colocar a amostra na máquina de dobramento, no caso foi utilizado o gabarito para dobramento em conjunto com um equipamento prensa manual marca Ribeiro modelo 30 Ton., certificando-se de que está alinhada corretamente para evitar cargas adicionais que possam causar falhas prematuras. Aplicar a força de dobramento de forma contínua até que a amostra seja dobrada. Deve-se ter atenção ao alinhamento da punção de dobra para que ele esteja corretamente posicionado sobre o cordão de solda.
- **Inspeção da Amostra:** foi realizada uma inspeção visual após o dobramento com o intuito de detectar trincas, fraturas ou outros defeitos.



Figura 08. Foto do dispositivo fabricado.

4. RESULTADOS

4.1. Inspeção visual inicial

A partir da execução da soldagem foi realizada uma inspeção visual dos corpos de prova, com o intuito de verificar a qualidade visual e defeitos aparentes como porosidades e trincas. Ao se verificar as condições dos dois corpos de prova pós soldagem, pode-se observar uma quantidade grande de salpicos no processo por arame tubular auto protegido (Fig. 09), maior que no eletrodo revestido (Fig. 10). No procedimento de remoção de escória e limpeza dos cordões, o processo eletrodo revestido se mostrou muito mais fácil, ficando assim com um acabamento melhor.



Figura 09. Soldagem FCAW-S.



Figura 10. Soldagem SMAW.

Ao analisar os cordões pós limpeza, o processo eletrodo revestido se mostrou mais homogêneo, coeso e com menor quantidade de reforço, conforme visto na Fig. 11, indo ao encontro do trabalho de Oliveira et al. (2017). Neste, o autor comenta que o cordão de solda produzido pelo processo eletrodo revestido tende a apresentar uma aparência uniforme, com boa formação e penetração. O processo por arame tubular auto protegido, mostrado na Fig. 12, apresentou reforços de solda mais proeminentes, porém no aspecto geral, ele mostrou muita variação na altura e largura deste reforço, se mostrando conforme o trabalho de Santos e Ferreira (2018), os quais relataram que o cordão de solda produzido pelo processo por arame tubular auto protegido apresenta uma aparência mais robusta, com mais salpicos, porém de fácil remoção e uma cobertura de escória mais incrustada. De modo geral, o processo de soldagem por arame tubular auto protegido teve uma vantagem em questão de tempo geral de processamento e facilidade de soldagem, já em questões de

limpeza e homogeneidade, a soldagem por eletrodo revestido teve melhores resultados. Na Tab. 3 pode-se verificar os resultados de tempos de processamento e limpeza.



Figura 11. Pós limpeza SMAW.



Figura 12. Pós limpeza FCAW-S.

Tabela 3. Levantamento de tempos de processamento.

Tempos (min)	SMAW	FCAW-S
Tempo total de processo	4:00	4:43
Tempo total de soldagem	2:45	1:53
Tempo de arco aberto	2:10	1:53
Troca de consumíveis	0:35	0
Limpeza	1:15	2:50

O processo de eletrodo revestido é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e baixo custo. No entanto, este método possui uma taxa de deposição de material relativamente baixa e requer pausas frequentes para a troca do eletrodo. Segundo estudo de Santos et al. (2019), o tempo de processo para o eletrodo revestido é impactado pela necessidade de remoção da escória após cada reinício de cordão pela troca do eletrodo. Em contraste, o processo por arame tubular auto protegido oferece uma maior taxa de deposição e uma maior velocidade de soldagem, devido ao uso de um arame tubular contínuo. Este processo também dispensa a troca frequente de consumíveis, o que reduz significativamente o tempo de parada. Conforme destacado por Oliveira e Silva (2020), o arame tubular auto protegido permite uma soldagem mais rápida e eficiente, com menos interrupções para troca de consumíveis dispensando a limpeza de escória, resultando em um tempo de processo total menor em comparação com o eletrodo revestido. De acordo com a pesquisa de Lima e Almeida (2021), o tempo médio para completar uma soldagem com arame tubular auto protegido é aproximadamente 30% menor do que com o eletrodo revestido.

4.2. Macroscopia e Microscopia

A macroestrutura foi examinada na lupa (microscópio estereoscópio) com ampliação de até 50x. Os principais resultados para o processo de eletrodo revestido foram a uniformidade do cordão, que se mostrou satisfatória, indicando controle adequado dos parâmetros de soldagem e não foram detectadas variações significativas na largura do cordão ao longo da solda, indo ao encontro da literatura descrita por Caverini, 2015. Também se verificou a penetração, sendo a mesma adequada conforme observado na Fig. 13. A fusão completa entre o metal de base e o metal de solda foi confirmada. Não foram detectados defeitos críticos como porosidade, fissuras ou inclusões de escória. Pequenas discontinuidades superficiais foram observadas, mas que não comprometem a integridade da solda.

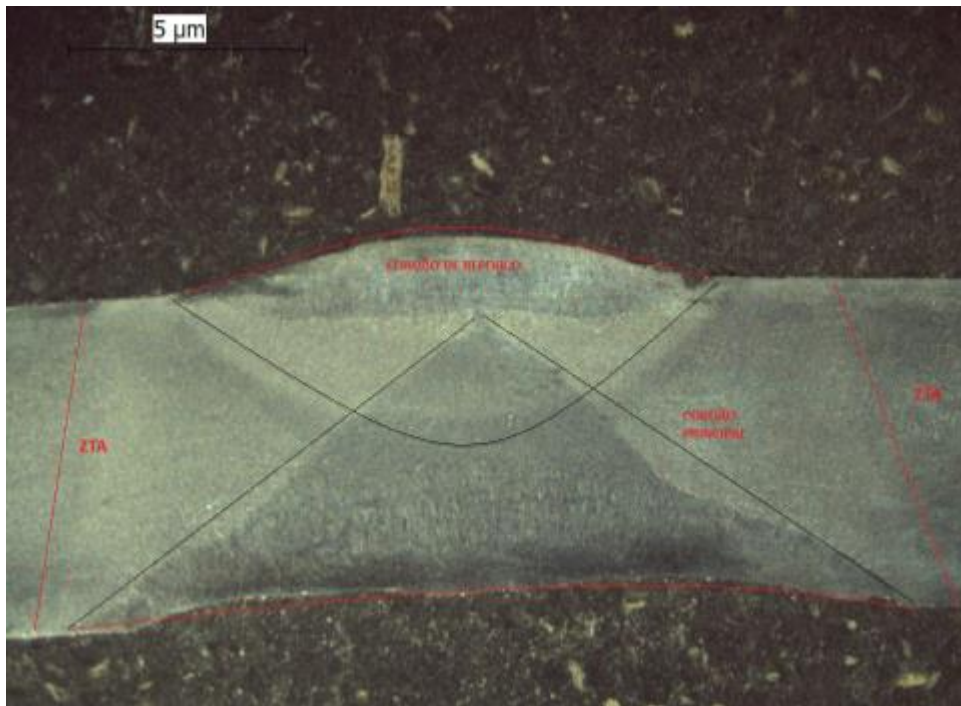


Figura 13. Macrografias SMAW cordão de solda com ampliação de 50 vezes nas zonas de metal de base, metal de solda e ZTA.

A análise microestrutural foi realizada com microscopia óptica com aumento de até 1000x, revelando as características do metal de base, da ZTA e do metal de solda, sendo:

- Metal de Solda: A microestrutura predominante do metal de solda (Fig 14a e Fig 14c) foi ferrita com grãos alongados e provável presença de ferrita acicular, em função da morfologia observada e do rápido resfriamento do processo. A composição química do eletrodo também influencia na formação da martensita conforme indicado em Caverini, 2015, e verificado no trabalho de Bernardi, 2023. Estas transformações impactam diretamente a dureza e tenacidade da ZTA.
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): A ZTA (Fig 14d) apresentou grãos grosseiros próximos ao metal de solda, com transição para grãos refinados em direção ao metal de base. Transformações de fase foram observadas. Houve um crescimento significativo dos grãos na ZTA devido ao aquecimento. Grãos grosseiros foram observados próximos ao metal de solda, diminuindo em tamanho em direção ao metal de base, já previsto em Modenesi, 2017.
- Metal de Base: A microestrutura do metal de base permaneceu inalterada fora da ZTA, com uma estrutura predominantemente ferrítica-perlítica (Fig 14b), típica dos aços carbono de baixa liga (SAE 1008). A microestrutura original do metal de base permaneceu intacta fora da ZTA. A estrutura ferrítica-perlítica indicou que o material não foi submetido a temperaturas elevadas suficientes para causar recristalização ou outras mudanças microestruturais, conforme indicado em Barbosa, 2019.

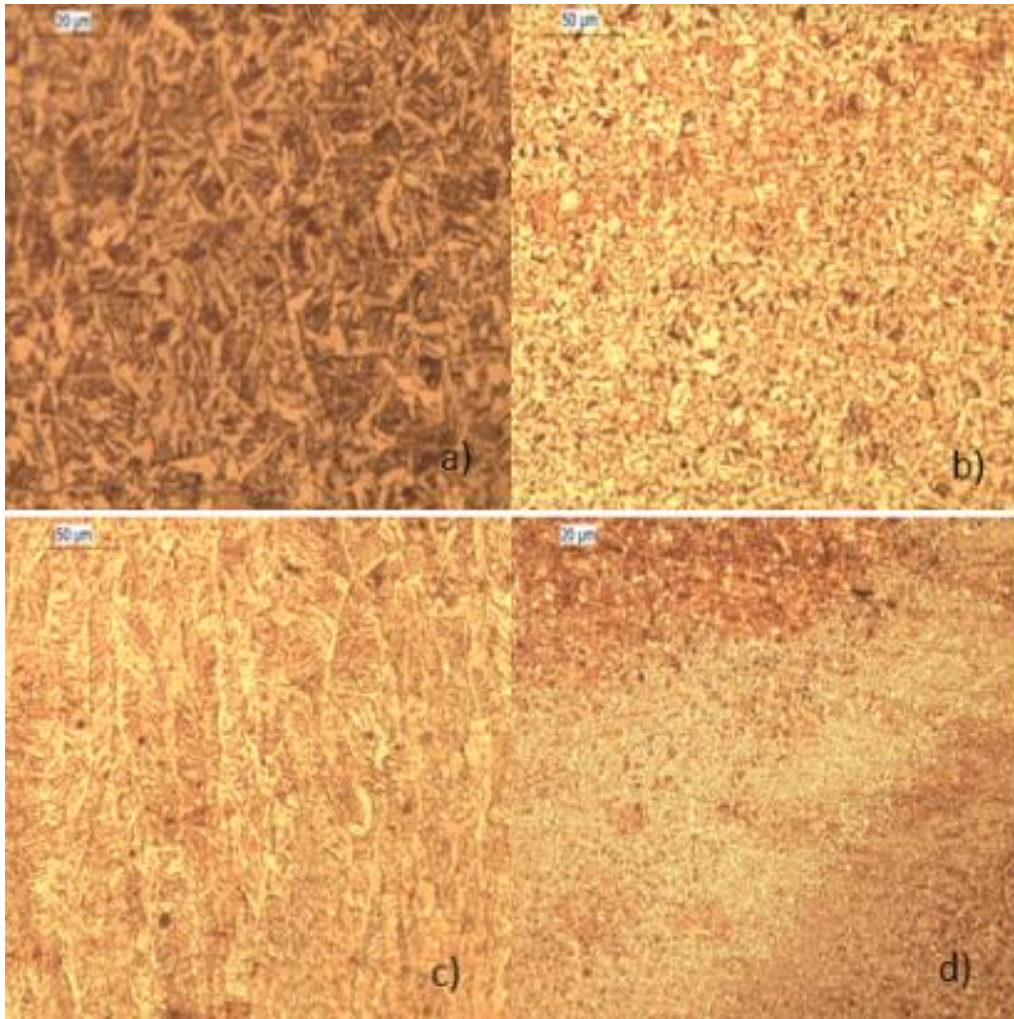


Figura 14. Micrografias SMAW cordão de solda a) Metal de solda 500x, b) Metal de base 200x, c) Metal de solda 200x e d) Zona transição ZTA e metal de base 50x.

Da mesma forma que o processo de eletrodo revestido, o processo por arame tubular auto protegido foi analisado via macroscopia e microscopia, com resultados muito próximos, tanto nas características de metal de solda como na ZTA e no metal de base. Conforme Fig. 15, pode-se verificar que houve penetração com fusão total do metal de base e metal de solda, e uniformidade de cordão. Quanto a discontinuidades, foi verificada a possibilidade de falta de fusão na região de nariz do chanfro, bem como possíveis porosidades próximas a borda do material.

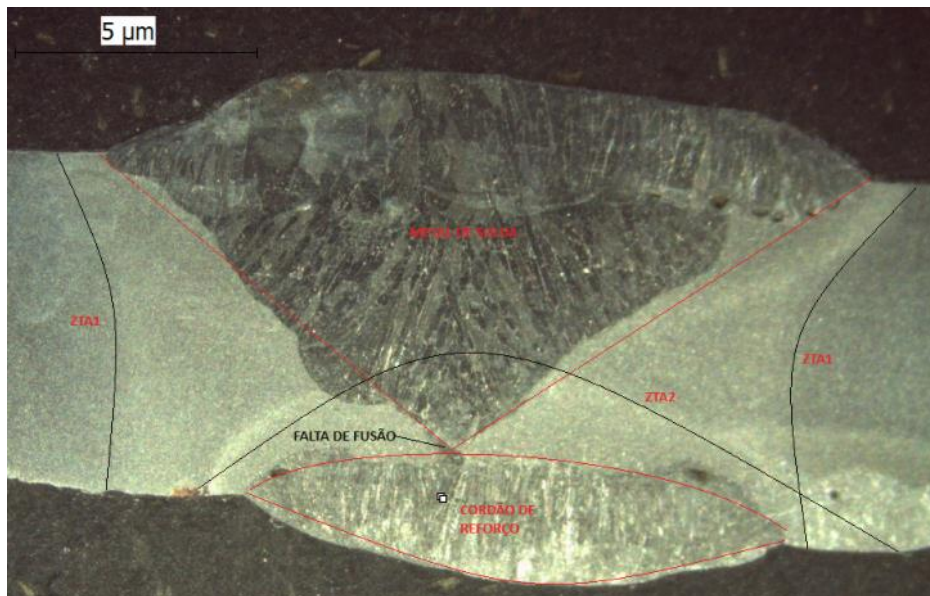


Figura 15. Macrografias FCAW cordão de solda 50 vezes nas zonas de metal de base, metal de solda e ZTA.

Analisando-se as micrografias, foi possível verificar estruturas muito similares as do processo de eletrodo revestido, com uma estrutura do metal de solda predominantemente martensítica com provável presença de ferrita acicular como visto na Fig. 16a. Esta microestrutura é característica de um rápido resfriamento. A Fig. 16c apresenta a transição típica na ZTA e a microestrutura para metal de base não afetada. Como apresentado nas macrografias foi possível verificar a possível presença de porosidades próximas ao exterior do cordão de solda e a possível falta de fusão no nariz do chanfro, conforme Fig. 17. A porosidade pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a composição do fluxo do eletrodo e a presença de contaminantes na superfície do material base ou nos consumíveis, segundo Barbosa, 2019. A insuficiência na proteção gasosa inerente ao processo por arame tubular auto protegido também contribui para a formação de poros conforme observado no trabalho de Freitas, 2020.

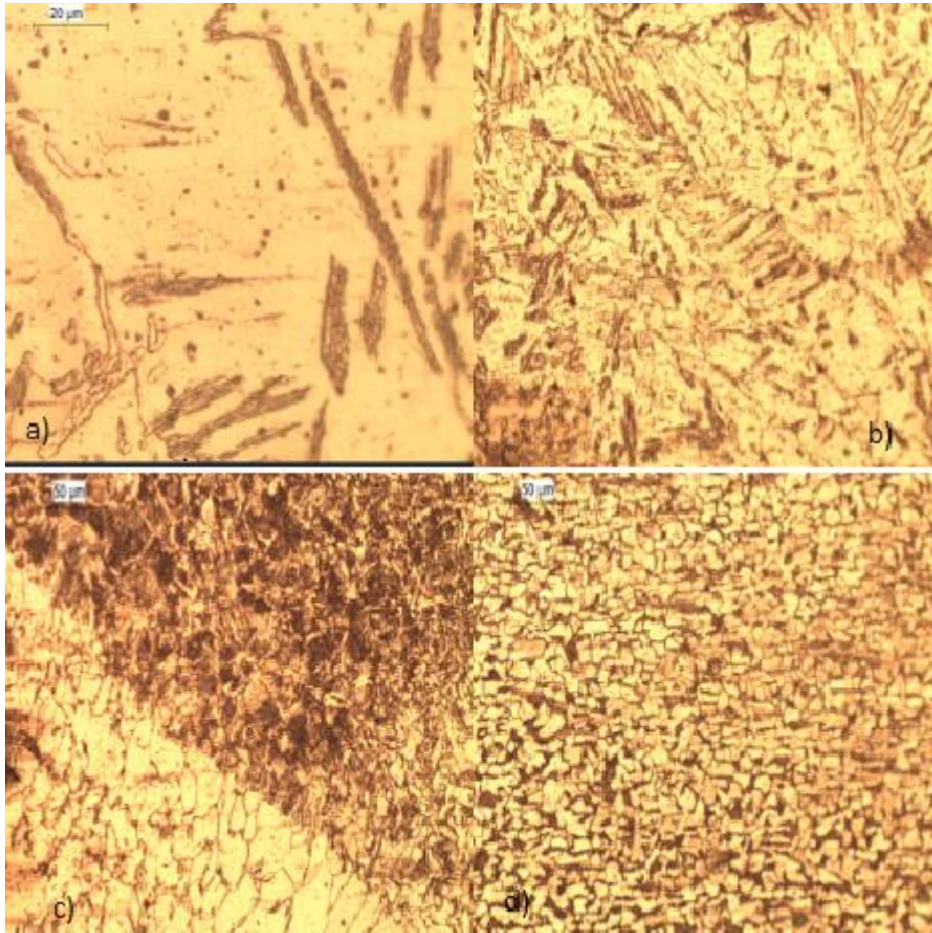


Figura 16. Micrografias cordão de solda FCAW-S a) Metal de solda 500x, b) Metal de base 200x, c) Zona de transição 200x e d) Metal de base 200x.

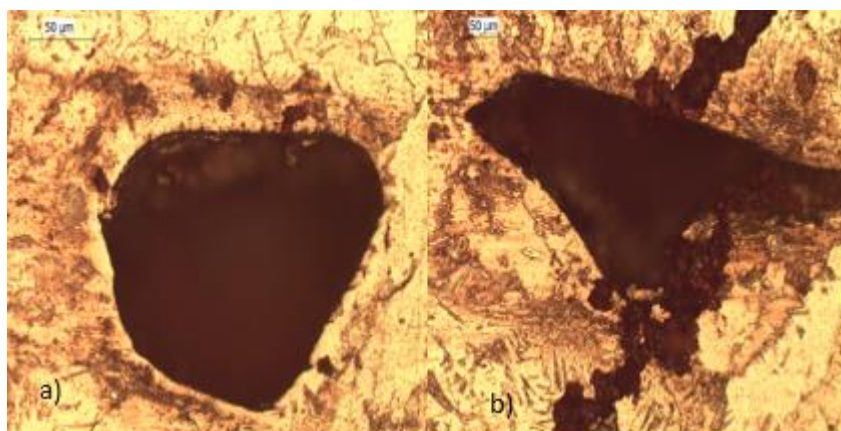


Figura 17. Micrografias das discontinuidades de solda do arame auto protegido a) Descontinuidade encontrada na borda ampliação 500x, b) Descontinuidade no nariz do chanfro ampliação 500x.

4.3. Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento é uma ferramenta eficaz para avaliar a qualidade das soldas. Os resultados obtidos identificam se a técnica de soldagem e a limpeza estão adequadas para evitar defeitos como trincas e inclusões de escória (Machado e Oliveira, 2021). Conforme Fig. 18, pode-se verificar que uma das amostras do processo de eletrodo revestido apresentou uma pequena trinca perto da borda, já as outras duas mostraram integridade no dobramento.



Figura 18. Análise da face de dobra para SMAW.

Na Fig. 19, pode-se verificar que todas as amostras do processo por arame tubular auto protegido apresentaram uma ruptura completa antes de apresentar uma angulação de dobra considerável, conforme a norma aplicada as amostras devem ser dobradas a 180° para 1 amostras, porém optou-se por fazer o teste em 3 corpos de prova para maior confiabilidade. Também foi possível verificar a formação de deformações na face onde se encontram os cordões de solda. Os resultados do ensaio de dobramento demonstraram que os corpos de prova apresentaram falhas significativas, indicando a necessidade de melhorias nos parâmetros de soldagem e técnicas de preparação da superfície para evitar rupturas e garantir a integridade das juntas soldadas.



Figura 19. Análise da face de dobra para FCAW-S.

4.4. Ensaio de tração

Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova soldados pelo processo eletrodo revestido seguiram a norma ASME IX. Os resultados, conforme Fig. 20, demonstram grande variação entre eles, como pode ser percebido através das curvas tensão x deformação obtidas. Ao se analisar visualmente os corpos de prova rompidos, apenas o CPE02 teria sido aprovado pelos critérios da ASME IX, pois foi o único que o rompimento se deu no metal de base.

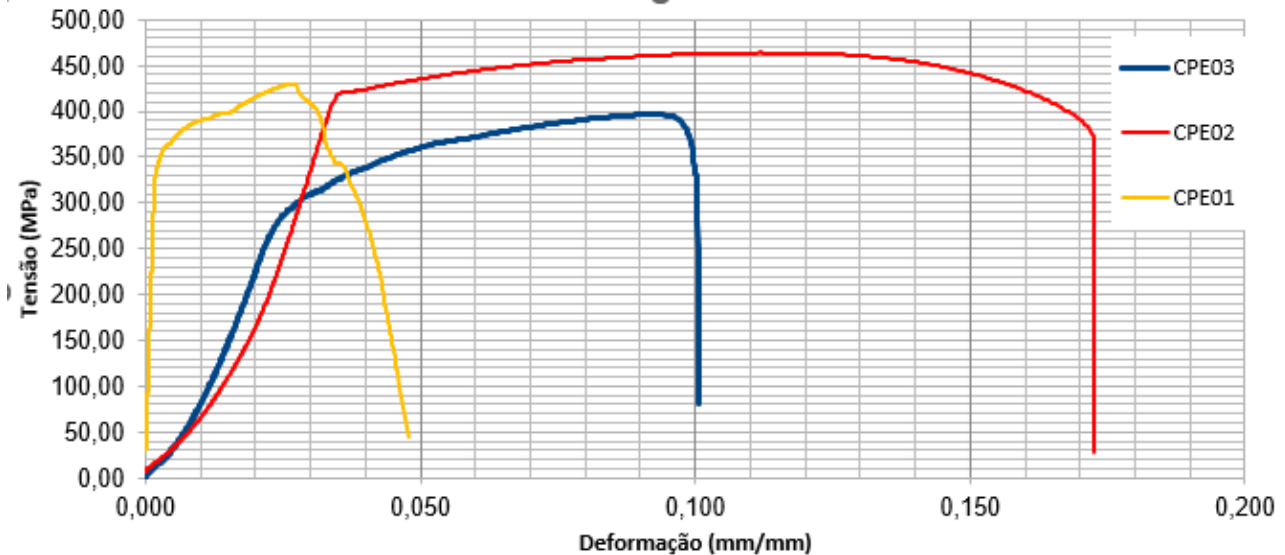


Figura 20. Gráfico tensão deformação gerados pelo ensaio de tração – SMAW.

Da mesma forma, os corpos de prova do arame tubular auto protegido também foram ensaiados com base na norma ASME IX, e os três corpos de prova apresentaram fraturas na região do metal de adição. Pelos diagramas da Fig. 21, foi possível visualizar que apenas a amostra CPM03 teve valor de tensão próximos ao metal de base (o aço SAE 1008 tem resistência à tração de 340 MPa), porém este seria reprovado pelos critérios da ASME IX pois também rompeu na área do cordão de solda.

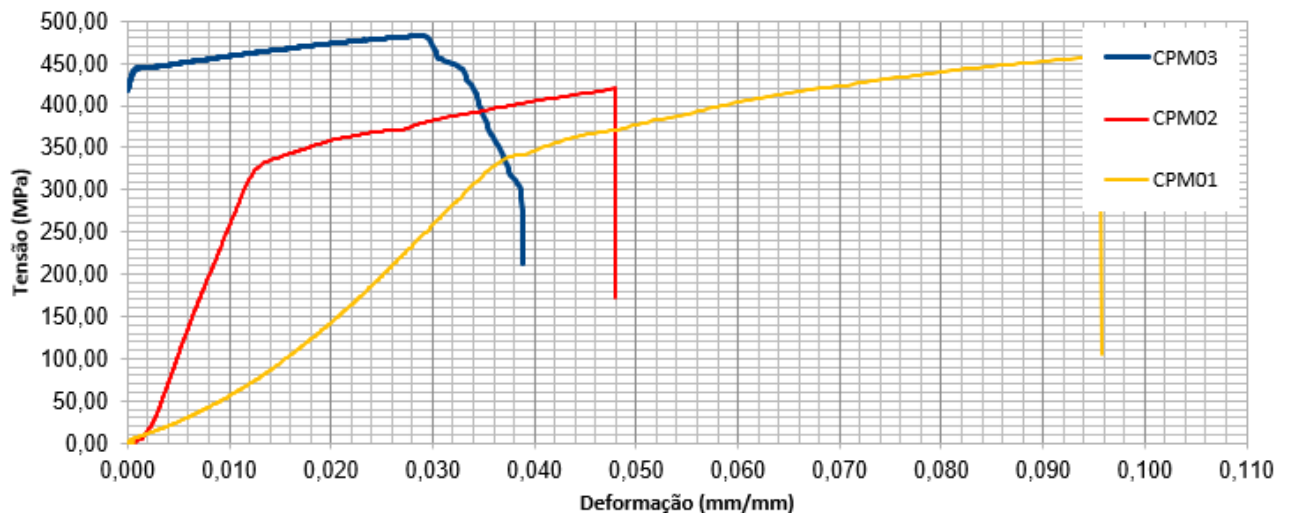


Figura 21. Gráfico tensão deformação gerados pelo ensaio de tração - FCAW-S.

Para avaliar a causa dos resultados do ensaio de tração para o eletrodo revestido, os quais indicaram resistência à tração significativamente inferior ao esperado e com a falha ocorrendo na zona de solda em duas das três amostras, avaliou-se as fraturas dos corpos de prova. A inspeção visual e macroscópica revelou a presença de descontinuidades nos CPE01 e CPE03, como é possível observar na Fig. 22.

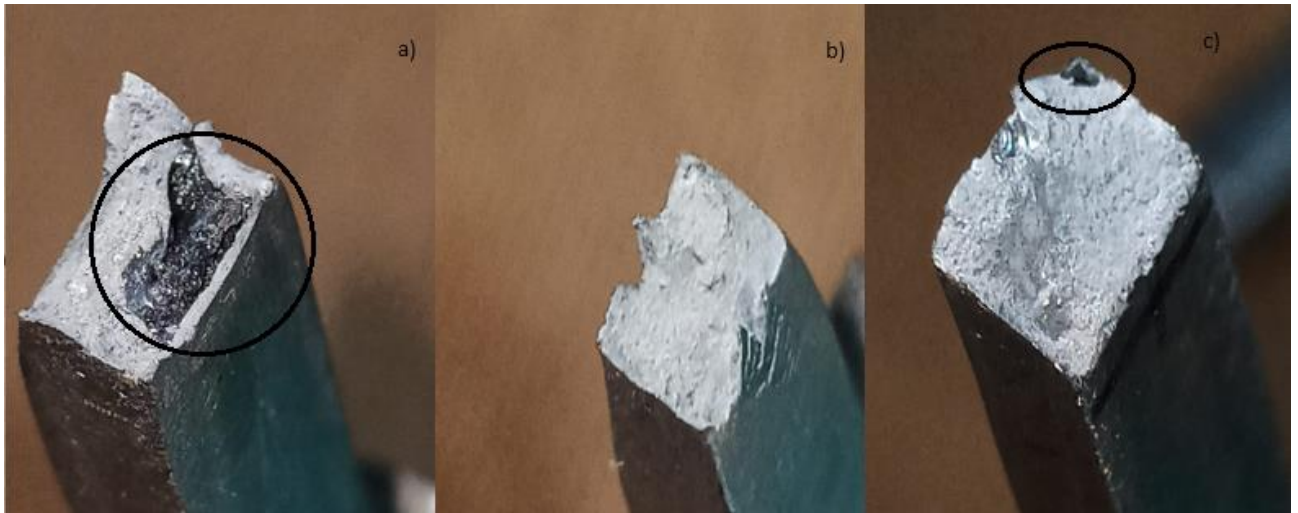


Figura 22: Análise das fraturas a) CPE01, b) CPE02 e c) CPE03 ampliadas a 8x para o processo SMAW.

Na análise das fraturas oriundas dos corpos de prova dos processos por arame tubular auto protegido, conforme Fig. 23, pode-se verificar a incidência de descontinuidades nas 3 amostras. As descontinuidades são defeitos críticos que pode comprometer a integridade da junta soldada.

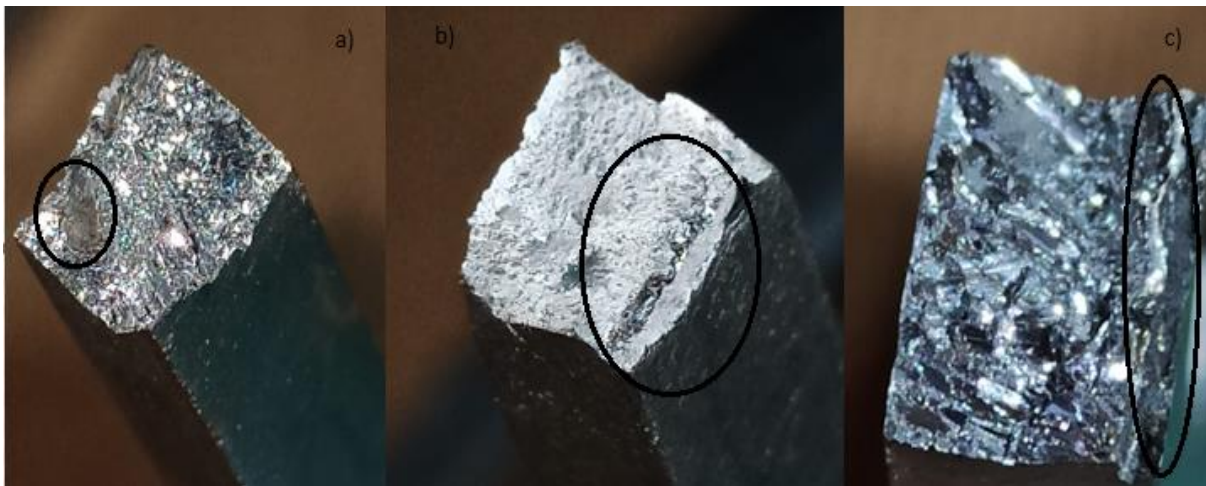


Figura 23: Análise das fraturas a) CPM01, b) CPM02 e c) CPM03 ampliadas a 8x para processo FCAW-S.

Essas inclusões resultam da solidificação dos resíduos do revestimento do eletrodo ou do fluxo do arame na zona de fusão e podem ocorrer devido a técnicas inadequadas de soldagem, parâmetros de soldagem incorretos e limpeza insuficiente entre os passes de solda (Silva et al., 2020). As inclusões de escória atuam como descontinuidades dentro do material soldado, criando pontos de concentração de tensão que comprometem a integridade mecânica da junta soldada. Esses pontos de concentração de tensão são especialmente críticos sob cargas dinâmicas ou cíclicas, e podem iniciar trincas que se propagam sob condições de fadiga (Ferreira et al., 2018).

Os resultados também podem indicar a falta de fusão, que é uma descontinuidade que pode reduzir significativamente a resistência mecânica das juntas soldadas. A falta de fusão também origina descontinuidades internas que atuam como pontos de concentração de tensão, facilitando a iniciação e propagação de trincas sob carga (Machado e Oliveira, 2021).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma comparação detalhada entre os processos de soldagem SMAW (Shielded Metal Arc Welding) e FCAW-S (Flux-Cored Arc Welding - Self-Shielded) com base em ensaios de tração, dobramento e macrografia, considerando os critérios de aceitação estabelecidos pela norma ASME IX.

Os resultados dos ensaios revelaram que ambos os processos enfrentaram desafios significativos, com amostras reprovadas em tração e dobramento. A análise dos corpos de prova indicou que os principais defeitos responsáveis pelas falhas foram a inclusão de escória e a falta de fusão, defeitos críticos que comprometem a integridade estrutural das juntas soldadas.

O processo de eletrodo revestido, apesar de ser amplamente utilizado e bem estabelecido, mostrou uma maior incidência de defeitos relacionados à inclusão de escória. Esses defeitos resultaram em trincas e rupturas nos ensaios de

tração, indicando que a técnica de soldagem e a limpeza inadequada entre os passes são fatores que precisam ser rigorosamente controlados para melhorar a qualidade das soldas.

O processo por arame tubular auto protegido apresentou resultados semelhantes, com falhas significativas nos ensaios de tração e dobramento devido a defeitos inclusão de escória e de falta de fusão, principalmente. No entanto, o arame tubular auto protegido mostrou uma tendência a maior falta de fusão, o que pode ser atribuído a parâmetros de soldagem inadequados e técnica insuficiente de soldagem.

A comparação entre os procedimentos eletrodo revestido e arame tubular auto protegido, considerando a norma ASME IX, evidenciou que ambos os métodos necessitam de melhorias significativas para atender aos critérios de aceitação. Recomenda-se a implementação de controles mais rigorosos nos parâmetros de soldagem, técnicas de preparação da superfície e limpeza entre passes de solda para minimizar os defeitos e garantir a integridade das juntas soldadas, mesmo para soldagem em campo. Apesar da reprovação de ambos os procedimentos, reitera-se que estes processos são consolidados na fabricação mecânica, ficando ainda mais evidenciado a importância das qualificações e estudos de procedimentos para garantia da qualidade das juntas soldadas.

6. AGRADECIMENTOS

A família e amigos próximos, em especial minha esposa e filha, que estiveram dando apoio e me suportando em tantos momentos.

À minha orientadora, pelo empenho, confiança e afinho e que em diversos momento mostrou apoio e incentivo.

A todos colegas de curso e colegas de empresa, pela paciência ao transmitir conhecimento e parceria na caminhada.

Ao IFRS Campus Farroupilha, pela oportunidade de formação tanto técnica como pessoal nesses mais de 10 anos.

Às pessoas que compõem o *campus* pelo zelo, carinho e paixão pela administração dele, para continuar dando oportunidade à comunidade.

7. REFERÊNCIAS

- American Welding Society. (2015). *Welding Handbook: Fundamentals of Welding*. Miami, FL: American Welding Society.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16101:2008 - Soldagem - Documentos e sua Redação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- Barbosa, C. (2019). *Análise Microestrutural de Soldas SMAW*. Editora DEF.
- Campos, J. (2010). *Manual de Soldagem*. São Paulo: Editora ABC.
- Caverini, J. L. (2015). *Soldagem: Fundamentos e Aplicações* (2ª ed.). Editora XYZ.
- Chiaverini, V. (2000). "Aços e Ligas Especiais." 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- Dias, Paulo. *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia*. São Paulo: Hemus, 2004.
- Dias, Paulo. *Tecnologia de Soldagem*. 3ª ed. São Paulo: Hemus, 2013.
- Ferreira, J. F.; Lima, M. S.; Carvalho, N. P. *Processos de Soldagem e Ensaio Destrutivos*. Rio de Janeiro: Editora XYZ, 2018.
- Freitas, P. S. (2020). *Qualidade de Soldas e Ensaio Metalográficos*. Editora GHI.
- Gonçalves, A. (2018). *Práticas de Soldagem na Manutenção Industrial*. São Paulo: Editora Senai-SP.
- Hüttner, Paulo Henrique. *Tecnologia da Soldagem: Processos e Aplicações*. 2ª ed. São Paulo: LTC, 2015.
- Lima, C. S., & Almeida, T. M. (2021). Comparação do tempo de processo entre SMAW e FCAW-S. *Revista de Tecnologia de Soldagem*, 19(2), 78-87.
- Machado, P. L.; Oliveira, R. S. Avaliação da Qualidade das Juntas Soldadas pelo Processo FCAW-S. *Revista Brasileira de Soldagem*, v. 45, n. 3, p. 123-135, 2021
- Marques, Paulo Villani; Modenesi, Paulo José; Bracarense, Alexandre Queiroz. "Soldagem: fundamentos e tecnologia." 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- Modenesi, P. J. (2009). "Soldagem: Fundamentos e Tecnologia." Edgard Blücher.
- Modenesi, P. J. (2017). *Metalurgia da Soldagem* (3ª ed.). Editora ABC.
- Modenesi, P., Bracarense, A., & Costa, E. (2017). *Soldagem: Processos e Metalurgia*. Rio de Janeiro: LTC
- Moura, Márcio Ferreira de. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2015.
- Oliveira, J. F., Silva, M. R., & Souza, L. F. (2017). Avaliação da qualidade visual do cordão de solda no processo SMAW. *Revista Brasileira de Soldagem*, 12(3), 89-98.
- Oliveira, P. H., & Silva, D. L. (2020). Eficiência do tempo de processo no FCAW-S comparado ao SMAW. *Jornal de Engenharia de Materiais*, 26(1), 56-65.
- Santos, A. P., & Ferreira, T. M. (2018). Análise comparativa entre os processos SMAW e FCAW-S na qualidade do cordão de solda. *Jornal de Engenharia de Materiais*, 25(2), 45-54.
- Santos, R. M., Silva, J. F., & Souza, L. A. (2019). Tempo de processo no SMAW: Desafios e soluções. *Revista Brasileira de Soldagem*, 15(3), 112-121.
- Silva, A. A.; Souza, C. D.; Pereira, E. M. *Técnicas de Ensaio de Tração em Soldagem*. São Paulo: Editora ABC, 2020.
- Silva, J. P., & Almeida, R. L. (2019). "Comparação dos processos de soldagem SMAW e FCAW." *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 7(3), 45-56.

Sociedade Brasileira de Soldagem (Núcleo Regional de São Paulo). Manual de Soldagem - Processos de Soldagem e Corte. São Paulo: SBS/NR-SP, 2008.

Souza, M. A., & Pereira, L. F. (2020). "Análise de desempenho dos processos de soldagem: um estudo de caso." Revista Brasileira de Soldagem, 29(2), 12-23.

QUALIFICATION OF SMAW AND FCAW-S WELDING PROCEDURES ACCORDING TO ASME IX STANDARDS

Felipe Grando, felipe.grando208@gmail.com¹

Daniela Lupinacci Villanova, daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Farroupilha, Rua São Vicente, 785 – Cinquentenário, Farroupilha – RS. 95174-274.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Farroupilha, Rua São Vicente, 785 – Cinquentenário, Farroupilha – RS. 95174-274.

Abstract. *This technical article presents a detailed comparison between the SMAW (Shielded Metal Arc Welding) and FCAW-S (Flux-Cored Arc Welding - Self-Shielded) welding processes, based on tensile tests, macrography, and bending tests, considering the acceptance criteria established by ASME IX standards. The objective is to evaluate the quality of welded joints and identify the main defects that can compromise the structural integrity of the welds. The tensile tests revealed that both processes faced difficulties in meeting the specified strength limits, with SMAW samples predominantly failing due to slag inclusion. FCAW-S samples also showed significant failures, mainly due to lack of fusion and slag inclusion, suggesting the need for adjustments in welding parameters and operational techniques. The macroscopic analysis of the FCAW-S welded joints highlighted internal defects, lack of fusion, and porosities, which are directly related to the welding methods used. The bending tests demonstrated that the FCAW-S process presented significant ruptures, especially in the fusion zones and along the weld interfaces. These results underscore the importance of stringent control of welding parameters and proper surface preparation to minimize defects and ensure compliance with ASME IX standards. It is concluded that, although both welding processes have potential for industrial applications, significant improvements are necessary to meet the quality requirements established by ASME IX standards.*

Keywords: *welding, asme IX, SMAW and FCAW-S.*