

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Soldagem

Ricardo Cordeiro da Silva

**QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE AÇO CROMO-
MOLIBDÊNIO ASTM A387 GR.22 CL 2**

Belo Horizonte

2024

Ricardo Cordeiro da Silva

**QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE AÇO CROMO-
MOLIBDÊNIO ASTM A387 GR.22 CL.2**

Monografia de especialização apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Orientador (a): Prof. Ariel Rodriguez Arias

Belo Horizonte
2024

S586q

Silva, Ricardo Cordeiro da.

Qualificação de procedimento de soldagem de aço cromo-molibdênio ASTM A387 GR.22 CL.2 [recurso eletrônico] / Ricardo Cordeiro da Silva. – 2024.

1 recurso online (59 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodríguez Arias.

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.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Aço cromo. 3. Molibdênio. I. Rodrigues Arias, Ariel.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 621.791



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO RICARDO CORDEIRO DA SILVA

Realizou-se, no dia 31 de outubro de 2024, às 14:00 horas, RUA VALENCIA 561, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada **QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE AÇO CROMO-MOLIBDÊNIO ASTM A387 GR.22 CL 2**, apresentada por RICARDO CORDEIRO DA SILVA, número de registro 2022688117, graduado no curso de TECNOLOGIA EM SOLDAGEM, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em SOLDAGEM, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Ariel Rodriguez Arias - Orientador (UFMG), Prof(a). Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (UFMG), Prof(a). Eduardo Anacleto Barcelos (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada (90) Nota

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 31 de outubro de 2024.

Prof(a). Ariel Rodriguez Arias (Doutor)

Prof(a). Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (Doutor)

Eduardo A. Barcelos
Eng. Mecânica
CREA-MG-210977 D

Prof(a). Eduardo Anacleto Barcelos (Especialista)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, perseverança e sabedoria para seguir na busca do conhecimento. Aos meus professores, pela orientação e ensinamentos ao longo dessa jornada acadêmica, e aos meus colegas de curso, por compartilharem suas experiências e apoio. Um agradecimento especial à minha esposa, Thiêssa, cujo incentivo e ajuda foram fundamentais, especialmente nos momentos mais desafiadores. Sem o suporte e a compreensão dela, essa conquista não seria possível.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a qualificação do procedimento de soldagem do aço cromo-molibdênio ASTM A387 Gr.22 Classe 2, amplamente utilizado em ambientes de alta temperatura, como vasos de pressão e convertedores LD. A partir de uma análise técnica e prática, o estudo foca no processo de soldagem FCAW (Flux-Cored Arc Welding), que oferece vantagens em termos de produtividade e qualidade da solda, quando comparado a outros métodos. A qualificação do procedimento de soldagem segue os rigorosos padrões estabelecidos pelas normas ASME Seção VIII Divisão 1 e ASME Seção IX. A primeira define os requisitos para a construção de vasos de pressão, enquanto a segunda especifica os critérios para a qualificação de processos de soldagem. Entre os principais desafios enfrentados, destacam-se o controle do aporte de calor, a necessidade de pré-aquecimento e a realização de tratamentos térmicos pós-soldagem (PWHT) para evitar tensões residuais e fragilização do material. O trabalho se estrutura em uma revisão de literatura, que aborda as características do aço ASTM A387 Gr.22, os desafios na sua soldagem e a aplicação das normas ASME. Em seguida, descreve-se a qualificação prática do procedimento, onde são detalhados os parâmetros de soldagem utilizados, as condições do tratamento térmico e os ensaios destrutivos e não destrutivos realizados. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade do processo FCAW para soldagem desse tipo de aço, atendendo aos critérios de qualidade estabelecidos. O estudo, ao final, fornece uma compreensão abrangente sobre a qualificação de soldagem em aço cromo-molibdênio, identificando os principais desafios e propondo soluções para otimizar a segurança e a eficiência do processo.

Palavras-chave: Aço cromo-molibdênio. Soldagem FCAW. ASME Seção VIII. ASME Seção IX. Qualificação de Procedimento de Soldagem.

ABSTRACT

This study aims to qualify the welding procedure for ASTM A387 Gr.22 Class 2 chrome-molybdenum steel, widely used in high-temperature environments such as pressure vessels and LD converters. Through a technical and practical analysis, the study focuses on the FCAW (Flux-Cored Arc Welding) process, which offers advantages in terms of productivity and weld quality when compared to other methods. The welding procedure qualification follows the strict standards set by ASME Section VIII Division 1 and ASME Section IX. The first defines the requirements for pressure vessel construction, while the second specifies the criteria for welding process qualification. Among the main challenges faced are controlling heat input, the need for preheating, and performing post-weld heat treatments (PWHT) to prevent residual stresses and material embrittlement. The work is structured into a literature review that addresses the characteristics of ASTM A387 Gr.22 steel, the challenges in welding it, and the application of ASME standards. Next, the practical qualification of the procedure is described, detailing the welding parameters used, the heat treatment conditions, and the destructive and non-destructive tests performed. The results confirm the feasibility of the FCAW process for welding this type of steel, meeting the established quality criteria. In conclusion, the study provides a comprehensive understanding of welding qualification for chrome-molybdenum steel, identifying the main challenges and proposing solutions to optimize the safety and efficiency of the process.

Keywords: Chrome-molybdenum steel. FCAW welding. ASME Section VIII. ASME Section IX. Welding Procedure Qualification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Temperatura x Custo relativo do material	12
Figura 2 - Processo FCAW (esquemático)	19
Figura 3 - Transferência metálica com "ponte" de fluxo na soldagem com arame tubular	20
Figura 4 - Esquema de uma instalação para soldagem FCAW	20
Figura 5 - Designadores de eletrodos	23
Figura 6 - Formas dos arames tubulares (IIW)	25
Figura 7 - Seção transversal de um arame tubular com fluxo interno	25
Figura 8 - Seções do código ASME	26
Figura 9 - Tipo de chanfro definido.....	38
Figura 10 - Tabela QW-451.1 - Testes requeridos para qualificação do procedimento	38
Figura 11 - Comprimento da chapa de teste	39
Figura 12 – Posição de retirada dos corpos de prova	44
Figura 13 - Preparação corpo de prova de tração transversal reduzida	45
Figura 14 - Preparação corpo de prova de tração transversal reduzida	46
Figura 15 - Dimensões das amostras.....	47
Figura 16 – Remoção das amostras na ZTA.....	48
Figura 17 - Localização da remoção das amostras na ZTA.....	48
Figura 18 - Linhas de testes de dureza	49
Figura 19 - Croqui de sequência de passes	51
Figura 20 - Linhas de medições de dureza	53
Figura 21 - Macrografia	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química ASME SA387 GRAU 22 CL.2.....	13
Tabela 2 - Equivalentes Internacionais ASME SA387 Gr.22 CL.2.....	14
Tabela 3 - Principais processos de soldagem por fusão e suas características	17
Tabela 4- Especificações de arames tubulares - AWS.....	21
Tabela 5 - Norma AWS/ASME de Arames Tubulares	22
Tabela 6 - Integração	22
Tabela 7 - Organização ASME VIII, Div I	28
Tabela 8 - Tipo de variável de processo de soldagem conforme ASME IX	34
Tabela 9 - QW-422 – Lista de materiais e P-Number	35
Tabela 10 - Teor de Cromo e Molibdênio de acordo com o grau.....	35
Tabela 11 - Composição Química ASMT A387 Gr.22 Class.2	36
Tabela 12 - Propriedades Mecânicas ASMT A387 Gr.22 Class.2.....	36
Tabela 13 - Composição Química Arame	36
Tabela 14 - Propriedades Mecânicas Arame	37
Tabela 15 - Recomendações de pré-aquecimento para aços Cr -Mo – N-133.....	40
Tabela 16 - resultados dos cálculos de pré-aquecimento.....	41
Tabela 17 - Requisitos de Tratamento Térmico Pós-Soldagem para Aços Carbono e Baixa Liga — P-No: 5A, 5B, e 5C.....	42
Tabela 18 - Tratamento térmico de alívio de tensão - UCS-56.....	43
Tabela 19 -Acompanhamento de soldagem da chapa de teste.....	50
Tabela 20 - Ensaio de tração da peça de teste	52
Tabela 21 - Dobramento lateral.....	52
Tabela 22 - Teste de Impacto	53
Tabela 23 - Ensaio de dureza vickers (Hv 10).....	54
Tabela 24 - Resumo das variáveis que devem constar no RQPS	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Aço Cromo-Molibdênio ASTM A387 Gr.22.....	11
2.1.1	Composição química e Propriedades mecânicas	12
2.1.2	Desafios na soldagem e aplicações	13
2.2	Soldagem	15
2.2.1	Visão Geral dos Processos de Soldagem	16
2.2.2	Processo de Soldagem FCAW (Flux-Cored Arc Welding).....	18
	Designadores obrigatórios na classificação de eletrodos	23
2.3	ASME VIII E ASME IX.....	26
2.3.1	ASME SEÇÃO VIII DIV 1 - Regras para Construção de Vasos de Pressão	26
2.3.2	ASME Seção IX: Qualificação de Soldagem, Brasagem e Fusão	31
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Requisitos Gerais do projeto	33
3.2	Estratégia de Qualificação do Procedimento de Soldagem	33
3.3	Seleção de Materiais	34
3.3.1	Consumíveis de Soldagem	36
3.4	Preparação da Junta de Soldagem	37
3.5	Definição de Pré-aquecimento.....	39
3.6	Tratamento Térmico Pós-Soldagem (PWHT).....	41
3.7	Posição de Soldagem	42
3.8	Parâmetros de soldagem	43
3.9	Ensaio e Testes Requeridos	43
3.9.1	Teste de Tração da junta soldada	44
3.9.2	Teste de Dobramento	45
3.9.3	Teste de Impacto Charpy V-Notch (CVN)	46
3.9.4	Teste de Dureza	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Ensaio Destrutivo	51
4.2	Dados da RQPS.....	55
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é amplamente reconhecida como um dos métodos de união de metais mais utilizados na indústria, sendo aplicada em uma vasta gama de setores. Trata-se de um processo de fabricação altamente complexo, no qual é impossível para engenheiros e soldadores preverem com precisão absoluta o resultado final, uma vez que, mesmo com o uso de tecnologias avançadas, é comum a ocorrência de descontinuidades e defeitos durante a união de materiais.

A utilização de procedimentos inadequados de soldagem pode resultar em defeitos nos cordões, como trincas, falta de fusão e inclusões, comprometendo a integridade estrutural dos equipamentos industriais, reduzindo sua vida útil, provocando falhas operacionais e aumentando o risco de acidentes com consequências graves, incluindo danos ao meio ambiente e, em casos extremos, fatalidades. Além disso, problemas na soldagem podem gerar interrupções inesperadas nas operações produtivas.

Diante desses riscos, é essencial que os procedimentos de soldagem sejam qualificados de acordo com normas técnicas e códigos regulamentadores, assegurando que o processo siga diretrizes específicas desde a preparação da junta até a execução da solda e os testes necessários para validar a integridade da união. O detalhamento adequado de cada etapa do processo de soldagem é fundamental para garantir a repetitividade das propriedades mecânicas da solda, principalmente quando executado por profissionais devidamente treinados.

Neste contexto, a norma ASME IX estabelece os documentos necessários para o registro dos procedimentos de soldagem, enquanto este estudo prático se concentra na aplicação dos códigos ASME VIII e ASME Seção IX, direcionando a qualificação dos procedimentos voltados à fabricação de equipamentos em diversos setores industriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço Cromo-Molibdênio ASTM A387 Gr.22

Os aços são ligas compostas principalmente de ferro e carbono, podendo conter proporções variadas de outros elementos de liga. Existem inúmeras variações de ligas com diferentes composições químicas e tratamentos térmicos. De acordo com a quantidade de carbono, os aços podem ser classificados em três categorias principais: baixo, médio e alto teor de carbono. Dentro dessas categorias, há subdivisões baseadas na adição intencional de outros elementos de liga. Nos aços-carbono comuns, a presença de outros elementos é apenas residual, além de pequenas quantidades de manganês. Já nos aços-liga, elementos adicionais são incorporados em quantidades controladas para aprimorar propriedades específicas. (CALLISTER, 2012).

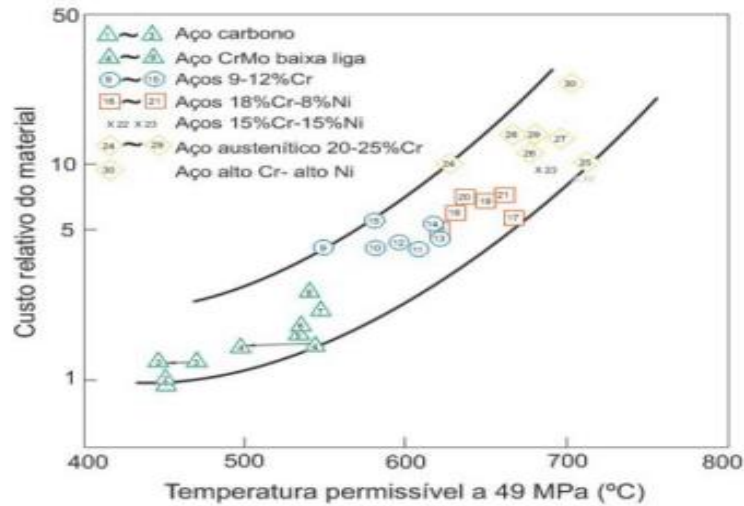
Os aços cromo-molibdênio são ligas metálicas com concentrações de até 1% de molibdênio e até 9% de cromo, desenvolvidas para aplicações em ambientes de alta temperatura. Estes aços apresentam estrutura ferrítica, com o cromo oferecendo significativa resistência à corrosão, enquanto o molibdênio reforça a resistência mecânica em condições de calor elevado e previne a corrosão localizada, como a por pites (HERCULANO, 2011).

Com o desenvolvimento contínuo na produção e manufatura dos aços Cr-Mo e o amplo conhecimento sobre suas propriedades mecânicas, esses aços frequentemente são a escolha inicial em cálculos de projeto. A preferência recai sobre materiais que possuam um coeficiente de expansão térmica reduzido e elevada condutividade térmica, características comuns nos aços ferríticos, o que os torna especialmente adequados para aplicações que envolvem temperaturas elevadas (SILVA; GUEDES, 2014).

Um fator relevante que favorece o uso dos aços Cr-Mo em ambientes de alta temperatura: seu custo significativamente menor em comparação com os aços austeníticos, conforme pode ser observado na Figura 1. Atualmente, esses aços são amplamente empregados em sua condição normalizada e revenida, principalmente por razões econômicas. O processo de revenimento não apenas alivia as tensões geradas pela transformação martensítica, mas também desempenha um papel

importante na estabilidade microestrutural e na cinética de precipitação, sendo a temperatura e o tempo de tratamento fatores cruciais nesse contexto (SILVA; GUEDES, 2014).

Figura 1 - Temperatura x Custo relativo do material



Fonte: SILVA; GUEDES, 2014.

Os aços Cr-Mo são reconhecidos por sua capacidade de manter as propriedades sob condições de fluência, sendo essa característica fortemente influenciada pela microestrutura inicial. Ao longo dos anos, diversos estudos buscaram aprimorar os tratamentos térmicos e a composição química desses aços, o que resultou não apenas em melhorias de desempenho, mas também na redução de custos, tornando-os mais competitivos em comparação a outros aços com propriedades similares.

O aço ASTM A387 Grau 22 Classe 2, conforme a norma ASME II (2023), é um aço de baixa liga destinado principalmente a equipamentos que operam sob altas temperaturas, como caldeiras e vasos de pressão. Sua resistência resulta da combinação de ferro, cromo, molibdênio e outros elementos de liga, como manganês e silício, que conferem ao material características essenciais para suportar condições severas de operação.

2.1.1 Composição química e Propriedades mecânicas

A composição química desse aço inclui cromo (Cr) e molibdênio (Mo) em teores que variam entre 2,0% a 2,5% e 0,90% a 1,1%, respectivamente. O cromo aumenta a resistência à corrosão e oxidação, o molibdênio melhora a resistência à fluência e ao

desgaste em altas temperaturas. Outros elementos, como manganês, silício e fósforo, ajustam a tenacidade e a soldabilidade do aço. Essas características tornam o ASTM A387 Gr.22 uma escolha adequada para suportar condições de operação severas em longos períodos (Smallman e Ngan, 2013).

A tabela 1 a seguir apresenta a composição química detalhada do aço ASTM A387 Gr.22 Classe 2 conforme a especificação da ASME:

Tabela 1- Composição química ASME SA387 GRAU 22 CL.2

Grade	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
SA 387 Gr.22	0.05-0.15	0.30-0.60	0.035	0.035	0.50 max	2.00-2.50	0.90-1.10

FONTES: ASME II, 2023.

O cromo no aço de baixa liga proporciona a formação de uma barreira protetora de óxido, essencial para a resistência à corrosão em ambientes severos. O molibdênio complementa essa proteção ao inibir a corrosão localizada, como a formação de pites (ASM INTERNACIONAL, 2011).

2.1.2 Desafios na soldagem e aplicações

A soldagem do ASTM A387 Gr.22 exige controle rigoroso de parâmetros, como pré-aquecimento e tratamentos térmicos pós-soldagem, para evitar fragilizações e garantir a integridade das juntas. O procedimento deve ser seguido com precisão, com atenção especial não apenas às temperaturas de pré-aquecimento e pós-aquecimento, mas também ao controle dos interpasses e ao tratamento térmico adequado, além da inspeção final. A falta de controle adequado pode resultar em falhas estruturais e redução da vida útil do material. De acordo com Staudinger et al. (2013), esse grau 22 é muito difícil de soldar, e tratamento térmico pós-soldagem (PWHT) tem que ser aplicado, o que torna difícil a execução em caso de reparo de solda.

Para evitar defeitos em juntas soldadas de aços de baixa liga, é imprescindível seguir procedimentos específicos de pré-aquecimento e tratamento térmico pós-soldagem (ASM INTERNACIONAL, 2011). Esses desafios tornam indispensável a adesão às

normas específicas, como a ASME Seção IX, durante a execução dos procedimentos de soldagem, assegurando a qualidade e integridade das juntas.

O aço ASTM A387 Gr.22 é amplamente utilizado em caldeiras, vasos de pressão, usinas termelétricas e refinarias, que operam sob altas temperaturas e meios corrosivos. A durabilidade e resistência desse material o tornam essencial para aplicações industriais críticas.

2.1.3 Normas e Regulamentações

A aplicação do ASTM A387 Gr.22 CL2 requer conformidade com normas internacionais, como ASME Seções VIII e IX, que regulam tanto a fabricação quanto a soldagem. Além disso, o aço possui equivalentes internacionais, facilitando sua aplicação em projetos globais, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Equivalentes Internacionais ASME SA387 Gr.22 CL.2

PAÍS	EUA	EUROPEU	ALEMANHA	INGLATERRA	FRANÇA	RÚSSIA
NORMA	ASME	EN 10028	DIN	BS	AFNOR36206	GOST
CLASSE	SA387	10/11CrMo9-10	10CrMo9-10	622-515B	12CD9-10	10KH2M

Fonte: Autoria própria

Conhecer os equivalentes do aço é de fundamental importância para a aplicação segura das normas. Lima (2023) destaca que o cumprimento rigoroso das normas técnicas é fundamental para garantir a integridade e segurança em operações que envolvem altas pressões e temperaturas.

2.2 Soldagem

A soldagem é amplamente reconhecida como o principal método de união de metais na indústria moderna, devido à sua capacidade de adaptação e aplicação em uma vasta gama de setores. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), sua utilização vai desde processos extremamente especializados, como na microeletrônica, até grandes construções industriais, como navios e estruturas de suporte que podem pesar centenas de toneladas.

A soldagem tem um papel essencial na criação de componentes que precisam operar em condições extremas, como na indústria química, petrolífera e nuclear, onde a confiabilidade das uniões soldadas é crítica para a segurança e eficiência operacional. A diversidade de aplicações, que inclui desde estruturas básicas até elementos complexos, evidencia a versatilidade do processo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Ainda segundo esses autores, a soldagem não se limita apenas à fabricação de novos produtos, mas também se destaca na reparação e recuperação de peças e estruturas desgastadas. Um exemplo disso é o uso da soldagem para depositar material em superfícies desgastadas ou criar revestimentos com propriedades específicas, como maior resistência ao desgaste ou à corrosão. Isso faz da soldagem uma ferramenta fundamental em indústrias que precisam prolongar a vida útil de seus equipamentos e componentes críticos.

Tradicionalmente, a soldagem é definida como a "união de metais por fusão", mas essa definição tem sido expandida para incluir processos de união sem fusão e não está restrita apenas a metais. A AWS (American Welding Society) reforça essa perspectiva ao definir a soldagem como a união de materiais por meio de calor, com ou sem a aplicação de pressão ou material de adição (AWS, 2022).

Para Silva (2014), uma das grandes vantagens da soldagem é a relação custo-benefício, permitindo a conexão de materiais com espessuras variáveis, desde frações de milímetros até dezenas de centímetros. Isso faz da soldagem um processo muito procurado em setores que requerem tanto a fabricação de peças de alta precisão quanto de grandes estruturas. Além de ser um processo de junção eficiente,

as juntas produzidas pela soldagem são permanentes e frequentemente mais resistentes que os materiais de base, garantindo continuidade no metal e facilitando a inspeção por técnicas não destrutivas, como radiografia e ultrassom, que asseguram a qualidade das uniões sem danificar os componentes.

A soldagem por fusão, embora seja amplamente utilizada e segura, envolve fenômenos metalúrgicos complexos que ocorrem em curtos períodos de tempo, demandando um controle rigoroso de variáveis como temperatura, tempo de soldagem e tipo de material. A soldagem pode ser realizada por dois métodos principais: o primeiro é a fusão, na qual a energia é fornecida por fontes elétricas ou pela combustão de gases, permitindo que tanto o material de base quanto o de adição sejam fundidos, gerando a união. O segundo método utiliza energia mecânica, que pode ou não ser acompanhada de calor, para promover a união por caldeamento. Nesse caso, processos como o atrito ou impacto são usados para atingir a união desejada (SILVA, 2014). Ambos os métodos têm suas vantagens e são escolhidos conforme as exigências específicas de cada projeto, considerando fatores como o tipo de material, as condições de operação e o custo-benefício.

2.2.1 Visão Geral dos Processos de Soldagem

Processos de soldagem por pressão (ou por deformação)

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), este primeiro grupo abrange os processos de soldagem por ultrassom, fricção, difusão, forjamento, explosão, entre outros.

Processos de soldagem por fusão

Há uma variedade de processos de soldagem por fusão, que podem ser classificados em subgrupos, conforme pode ser observado na Tabela 3. Entre esses, os processos de soldagem a arco, que utilizam o arco elétrico como fontes de energia são os mais relevantes na indústria atualmente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Tabela 3 - Principais processos de soldagem por fusão e suas características

Processo	Fonte de calor	Tipo de corrente e polaridade	Agente protetor	Outras características	Aplicações
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco elétrico.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem a arco submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada	Eletrodo + Escória	Automática, mecanizada ou semi-automática. O arco é coberto por uma camada de fluxo granular.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com eletrodo revestido	Arco elétrico	Contínua ou alternada	Eletrodo + Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, revestidos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com arame tubular	Arco elétrico	Contínua	Eletrodo + Escória e gases gerados	Automático ou semi-automático. O fluxo é fornecido dentro do arame tubular de pequeno diâmetro.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas, tubos, etc.
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua	Eletrodo + Argônio, Hélio, O ₂ , CO ₂	Automática, mecanizada ou semi-automática. O arame é maciço.	Soldagem de aços carbono, baixa liga, não ferrosos. Espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição.
Soldagem a plasma	Arco elétrico	Contínua	Eletrodo + Argônio, Hélio, Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas. Espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inoxidáveis. Passe de raiz.
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada	Eletrodo + Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas. Espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inoxidáveis. Passe de raiz de soldas e tubulações.

Processo	Fonte de calor	Tipo de corrente e polaridade	Agente protetor	Outras características	Aplicações
Soldagem por feixe de elétrons	Feixe de elétrons	Alta tensão	Vácuo ($\sim 10^{-4}$ mmHg)	Soldagem automática. Não usa, em geral, metal de adição. Feixe de elétrons permite uma elevada concentração de energia.	Soldagem de todos os metais, exceto casos de evolução de gases ou vaporização excessiva. Usado em indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a laser	Feixe de luz	Contínua	Argônio ou Hélio	Soldagem automática. Não usa, em geral, metal de adição. Feixe laser permite uma elevada concentração de energia.	Soldagem de todos os metais, exceto casos de evolução de gases ou vaporização excessiva. Usado em indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a gás	Chama oxiacetilênica	Contínua	Gases (CO, H ₂ , O ₂ , H ₂ O)	Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldagem manual de aços carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronzes. Soldagem de chapas finas e peças de pequeno diâmetro.

Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009.

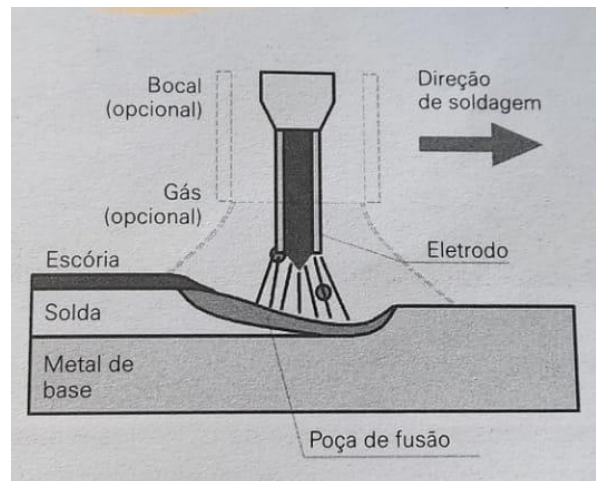
Nos processos de soldagem por resistência, alguns se caracterizam como processos de deformação, enquanto outros se enquadram melhor como processos de fusão. A Associação Americana de Soldagem (AWS) propõe uma classificação amplamente utilizada em diferentes países, com siglas padronizadas para identificar cada processo. Embora esse sistema seja também utilizado no Brasil, é mais comum o uso de denominações europeias para os processos de soldagem. Tentativas de introduzir abreviações em português, como o SAER (Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos), tiveram pouca aceitação (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

2.2.2 Processo de Soldagem FCAW (Flux-Cored Arc Welding)

A soldagem com arame tubular (Flux-Cored Arc Welding - FCAW) é caracterizada pela fusão dos metais através do calor gerado por um arco elétrico, que é formado entre um eletrodo tubular contínuo, consumível, e o material base. A proteção do arco elétrico e do cordão de solda ocorre por meio de um fluxo contido dentro do eletrodo, sendo possível também o uso de um gás de proteção externo para complementar o processo. Além da função de proteção, o fluxo pode desempenhar outras atividades,

como desoxidar e purificar o metal de solda, introduzir elementos de liga e estabilizar o arco, de maneira similar ao revestimento de eletrodos tradicionais. A Figura 2 apresenta uma ilustração do processo. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

Figura 2 - Processo FCAW (esquemático)



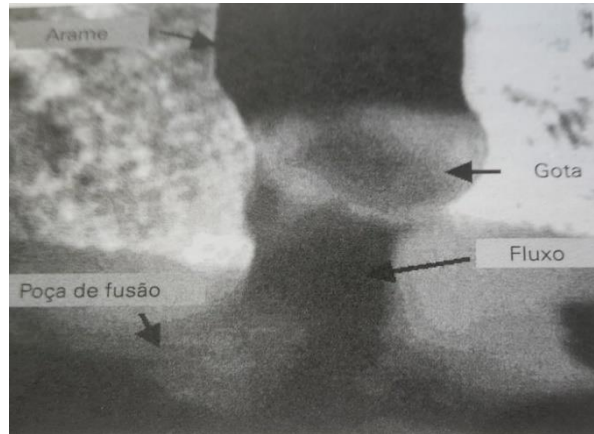
Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009

O processo de soldagem com arame tubular pode ser dividido em duas categorias principais: uma, na qual a proteção é totalmente fornecida pelo fluxo contido no eletrodo, conhecido como arame auto protegido, e outra, onde a proteção adicional é garantida por uma camada de gás, geralmente CO_2 . Este método é comumente utilizado de forma semiautomática e compartilha características similares com o processo MIG/MAG em termos de equipamentos e funcionamento. No aspecto metalúrgico, apresenta também semelhanças com a soldagem por eletrodos revestidos. Portanto, a soldagem com arame tubular combina as vantagens do MIG/MAG, como alta taxa de deposição e elevado rendimento, proporcionando uma alta produtividade. Ao mesmo tempo, mantém as qualidades da soldagem com eletrodos revestidos, incluindo versatilidade, capacidade de ajuste da composição química do metal de solda e facilidade de uso em campo (SILVA, 2014).

Em termos de flexibilidade e produtividade, o arame tubular muitas vezes supera as técnicas de soldagem por eletrodos revestidos e MIG/MAG. A transferência de metal nesse processo é semelhante à observada no MIG/MAG, embora algumas particularidades como a formação de uma “ponte” de fluxo entre o arame e a poça de

fusão, possam ser observadas, como mostrado na Figura 3. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 3 - Transferência metálica com "ponte" de fluxo na soldagem com arame tubular

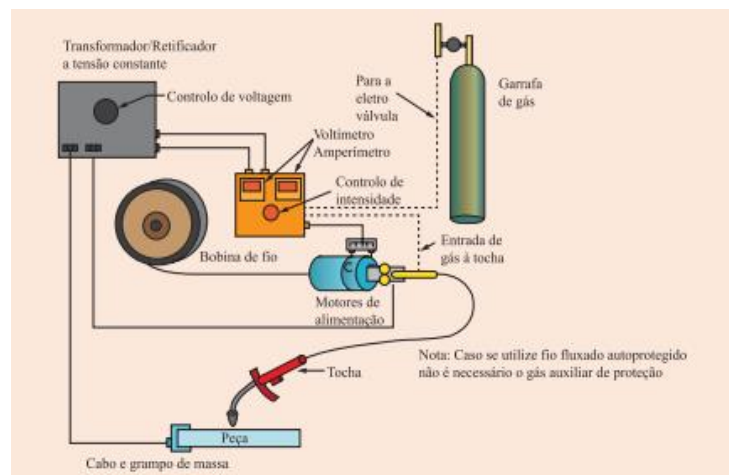


Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009

2.2.2.1 Equipamentos

Silva (2014) explica que de maneira geral, o equipamento utilizado para a soldagem com arame tubular é semelhante ao empregado nos processos MIG-MAG, com a principal diferença sendo a substituição do fio maciço pelo fio fluxado. Em casos onde o fio não é autoprotégido, é necessário utilizar um fluxo gasoso adicional para garantir a proteção adequada durante o processo de soldagem. (Figura 4)

Figura 4 - Esquema de uma instalação para soldagem FCAW



Fonte: SILVA, 2014

Nos locais onde o arame sólido é comumente utilizado, a transição para o arame tubular pode ser relativamente simples e exigir apenas a substituição de alguns acessórios, como roldanas e componentes de desgaste rápido da tocha. No entanto, para otimizar o desempenho e a eficiência do processo, é recomendável utilizar sistemas de resfriamento a água para a tocha. Isso se deve ao fato de que o arame tubular, ao gerar mais calor, demanda um sistema de resfriamento mais eficaz do que o arrefecimento natural a ar, que nem sempre oferece a dissipação térmica necessária (SILVA, 2014).

2.2.2.2 Consumíveis

Na soldagem por arame tubular (FCAW), três tipos principais de consumíveis são utilizados: arames tubulares, gases de proteção (quando aplicáveis) e produtos anti respingos.

Os arames tubulares para soldagem são classificados de acordo com as normas da AWS, conforme especificado Tabela 4. Esta classificação leva em consideração diversos fatores críticos, como a presença de enchimento de pó metálico ou fluxo convencional, o uso de gás de proteção, o tipo de corrente elétrica empregada, e as posições de soldagem recomendadas. Além disso, a composição química e as propriedades mecânicas do cordão de solda resultante também são fundamentais para a escolha do arame adequado para uma aplicação específica.

Tabela 4- Especificações de arames tubulares - AWS

Especificação	Consumível
AWS A5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A5.21	Arames para revestimento
AWS A5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A5.29	Arames de aços de baixa liga com fluxo interno

Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009

As normas da AWS para consumíveis de soldagem de aço carbono e aço de baixa liga, que eram tratadas de forma separada, passaram por uma recente revisão. Novas

iniciativas visam unificar essas especificações para diferentes tipos de consumíveis, com discussões e ações já sendo implementadas (KOBELCO, s.d.), como mostrado nas Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Norma AWS/ASME de Arames Tubulares

ASME / AWS SFA	Liga Metálica
ASME / AWS SFA - 5.20	Aço Carbono
ASME / AWS SFA - 5.29	Aço Baixa Liga
ASME / AWS SFA - 5.22	Aço Inoxidável
ASME / AWS SFA - 5.15	Ferro Fundido
ASME / AWS SFA - 5.34	Ligas de Níquel
ASME / AWS SFA - 5.21	Ligas de Metal Duro/Revestimento
ASME / AWS SFA - 5.36	Metal Cored e Flux Cored de Aço Carbono e/ou Baixa Liga
ASME / AWS SFA - 5.32	Gás de Proteção

Fonte: Adaptado KOBELCO (s.d)

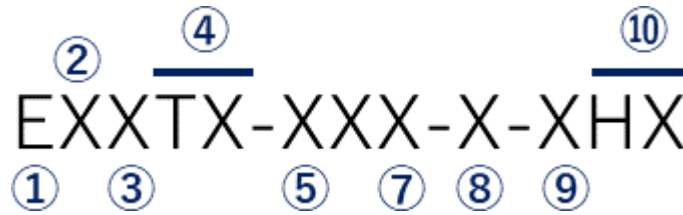
Tabela 6 - Integração

Tipos de consumíveis de soldagem	Especificações convencionais		Novas especificações para ser integradas
	Aço carbono	Aço de baixa liga	
Elétrodo revestido	A5.1	A5.5	Planejamento
Fio sólido	A5.18	A5.28	Em preparação
Fio fluxado	A5.20	A5.29	A5.36

Fonte: KOBELCO (s.d.)

Para alcançar uma maior padronização nas especificações, foi decidido estabelecer um sistema de classificação flexível, no qual os consumíveis de soldagem são classificados de acordo com características opcionais, como resistência à tração, temperatura para teste de tenacidade ao impacto e composição química. No sistema tradicional, um dos problemas enfrentados era que novos produtos com resistência superior e composição química semelhante aos já existentes, mas sem uma categoria correspondente, acabavam sendo classificados como grau "G", devido à natureza fixa das classificações que limitavam essas propriedades (KOBELCO, s.d.).

Figura 5 - Designadores de eletrodos



FONTE: KOBELCO (s.d)

Designadores obrigatórios na classificação de eletrodos













1. Eletrodo para soldagem a arco elétrico.
2. Resistência à Tração: O número que aparece aqui indica a resistência mínima à tração do metal de solda depositado, expressa em unidades de 10.000 psi (ou 10 MPa no sistema métrico, conforme a norma A5.36M).
3. Posição de Soldagem: Indica as posições em que o eletrodo pode ser utilizado. O número "0" designa que é adequado apenas para posições planas e horizontais, enquanto "1" significa que o eletrodo pode ser usado em todas as posições.
4. Usabilidade do Eletrodo: O designador "T" seguido de um número de 1 a 17 identifica o eletrodo como fluxado. A letra "G" indica que as características de usabilidade não são especificadas.
5. Gás de Proteção: Define o tipo de gás a ser utilizado, se necessário. A letra "G" significa que a composição do gás de proteção será definida em acordo entre o fornecedor e o comprador, enquanto a ausência de um designador indica que o eletrodo é auto protegido.
6. Tratamento Térmico: "A" representa que os testes foram realizados na condição "como soldada", enquanto "P" significa que o eletrodo passou por tratamento térmico pós-soldagem (PWHT). Se houver um "G", o procedimento é acordado entre as partes envolvidas.
7. Temperatura de Impacto: Indica a temperatura mínima em que a resistência ao impacto é atendida em 27J (em graus Celsius ou Fahrenheit). A letra "Z" significa que não há requisitos de impacto, enquanto "G" indica que esses requisitos não são especificados, mas podem ser acordados entre o comprador e o fabricante.

8. Composição Química do Metal Depositado: Um ou mais caracteres são usados para descrever a composição química do metal depositado. "G" significa que a composição não está especificada, mas pode ser acordada entre o comprador e o fabricante.
9. Hidrogênio Difusível (opcional): Especifica a quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda.
10. Designador suplementar opcional: A letra "D" ou "Q" nesta posição sugere que o metal de solda atende a requisitos de propriedades mecânicas suplementares com base em procedimentos de soldagem usando baixo heat input, ou resfriamento acelerado usando alto heat input.

Na soldagem com arames tubulares, uma categoria relevante são os arames com enchimento de pó metálico, também conhecidos como "metal cored" ou arames com núcleo metálico. Estes arames contêm um enchimento predominantemente composto por pó metálico e/ou ferro-ligas, ao invés de fluxos minerais. Arames tubulares destinados à soldagem de aço carbono e aços de baixa liga proporcionam uma transferência de metal bastante suave através de um arco elétrico. Eles podem ser utilizados tanto com gás de proteção em atmosferas comuns quanto em condições de proteção elevada, ou mesmo em processos de soldagem pulsada com misturas de argônio e dióxido de carbono. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

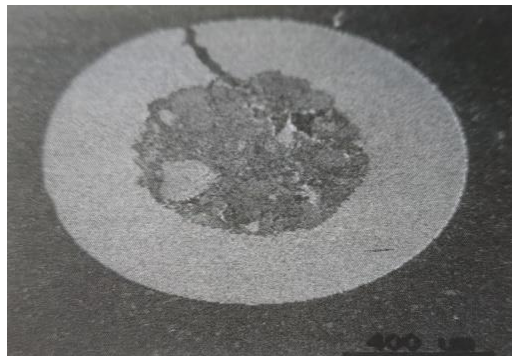
Os arames tubulares podem variar em seções transversais, conforme ilustrado na figura 6, com base em classificações do International Institute of Welding (IIW). Arames com seções transversais mais complexas são mais difíceis e caros de fabricar, mas oferecem vantagens operacionais superiores, especialmente aqueles de maior diâmetro. Isso se deve à sua maior homogeneidade de aquecimento e melhor distribuição do arco elétrico ao longo da seção, resultando em uma transferência de metal mais regular e eficiente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 6 - Formas dos arames tubulares (IIW)

Tipo Nº.	Seção	Símbolo	Descrição
1			Sem costura
2			De topo
3			Sobreposto
4			Dobra simples
5			Dobra múltipla
6			Dobra dupla

Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2009).

Em termos de composição, o enchimento dos arames tubulares varia entre 15% e 30% do peso total do arame, podendo chegar a até 50% em arames especializados com uma seção metálica reduzida. A figura 7 ilustra a seção transversal de um arame tubular simples com fluxo, destacando a distribuição do material interno e suas características operacionais.

Figura 7 - Seção transversal de um arame tubular com fluxo interno

FONTE: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009

2.3 ASME VIII E ASME IX

O código ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS) é amplamente aplicado no Brasil e estabelece os requisitos essenciais para a especificação dos materiais, execução do projeto, fabricação, inspeção, montagem e testes da maioria dos vasos de pressão, trocadores de calor e caldeiras utilizadas em diversas indústrias (LIMA, 2023). Abaixo a Figura 8 traz as Seções do código ASME.

Figura 8 - Seções do código ASME

Seção II Materiais Parte A - Ferrosos Parte B - Não Ferrosos Parte C - Consumíveis de soldagem Parte D - Propriedades	Seção I Caldeiras (Rules for construction of Power Boilers)	Seção XII Recomendações para fabricação e extensão de uso de tanques transportáveis
Seção III Instalações Nucleares	Código ASME 12 seções	Seção XI Recomendação para Inspeção de Instalações Nucleares
Seção IV Caldeiras para aquecimento		Seção X Vasos de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
Seção V Ensaios Não destrutivos		Seção IX Qualificação de soldagem
Seção VI Instalação e recomendações de operação de caldeiras para aquecimento		Seção VIII Divisão 1 Divisão 2 - Regras Alternativas Divisão 3 - Regras Alternativas para Alta pressão
		Seção VII Instalação e operação de caldeiras

Fonte: LIMA,2023

2.3.1 ASME SEÇÃO VIII DIV 1 - Regras para Construção de Vasos de Pressão

De acordo com a ASME (2023), o escopo da Seção U-1 aborda a aplicação do Código ASME para vasos de pressão. Em termos gerais:

1. O prefácio fornece a base para as regras estabelecidas nesta Divisão, que rege o projeto e construção de vasos de pressão.
2. Para os propósitos desta Divisão, vasos de pressão são definidos como recipientes destinados a conter pressão, seja ela interna ou externa. Essa pressão pode ser gerada por uma fonte externa ou por aplicação de calor, seja diretamente ou indiretamente, ou ainda por uma combinação desses métodos.

3. A Divisão apresenta requisitos obrigatórios, proibições específicas, e orientações não obrigatórias sobre materiais, projeto, fabricação, inspeção, testes, certificação e alívio de pressão dos vasos. Embora não cubra todos os aspectos dessas atividades, as áreas não abordadas explicitamente não devem ser consideradas proibidas. O julgamento de engenharia deve ser utilizado, sempre em concordância com a filosofia desta Divisão, e nunca deve sobrepor-se a requisitos obrigatórios ou proibições específicas.

A Divisão é organizada em três Subseções, Apêndices Obrigatórios e Apêndices Não Obrigatórios:

- **Subseção A:** Contém a Parte UG, com os requisitos gerais aplicáveis a todos os vasos de pressão.
- **Subseção B:** Trata dos requisitos específicos para os diferentes métodos de fabricação de vasos, abrangendo a soldagem (Parte UW), a forja (Parte UF), e a brasagem (Parte UB).
- **Subseção C:** Detalha os requisitos específicos para várias classes de materiais usados na construção de vasos de pressão. Inclui as partes UCS, UNF, UHA, UCI, UCL, UCD, UHT, ULW, ULT e UIG, que abrangem desde aços carbono e ligas de baixa liga, até materiais como grafite impregnado e metais não ferrosos, com propriedades específicas para diversas aplicações.

Todas as partes obrigatórias das subseções são identificadas por um código alfabético de até três letras, que começam com a letra "U", referente a "equipamento não submetido à chama" (unfired equipment). A Tabela 7 mostra a organização das subseções.

Tabela 7 - Organização ASME VIII, Div I

Parte	Subseção A – Requisitos gerais (aplicáveis a todos os vasos)
UG	Requisitos gerais aplicáveis a todos os métodos de fabricação;
Escopo	materiais; projeto; reforço em aberturas; superfícies estaiadas; ligamentos; fabricação; inspeção; testes; relatórios; e dispositivos de alívio.
Parte	Subseção B – Requisitos específicos aplicáveis ao método de fabricação
UW	Requisitos para vasos fabricados por soldagem (<i>Welding</i>)
UF	Requisitos para vasos fabricados por forjamento (<i>Forging</i>)
UB	Requisitos para vasos fabricados por Brasagem (<i>Brazing</i>)
Parte	Subseção C – Requisitos específicos aplicáveis em função do tipo dos materiais de base selecionados para o projeto
UCS	Aço Carbono e baixa liga (<i>Carbon steel and Low Alloy steel</i>)
UNF	Não Ferrosos (<i>Non Ferrous</i>)
UHA	Aços de alta liga (por exemplo, inox) (<i>High Alloy Steel</i>)
UCI	Ferro Fundido (<i>Cast Iron</i>)
UCL	Vasos revestidos metalicamente como: cladeados ou com <i>Liner</i> ou com sobreposição de solda (<i>weld overlay</i>)
UCD	Ferro Fundido Dúctil (<i>Cast Ductile Iron</i>)
UHT	Aços Ferríticos com propriedades mecânicas alcançadas via tratamento térmico
ULW	Multicamada (<i>layered construction</i>)
ULT	Altas tensões admissíveis em baixa temperatura
UHX	Regras para dimensionamento de trocadores casco-tubos (espelho)

Fonte: LIMA, 2023.

Assim, por exemplo, se quisermos construir um vaso de pressão soldado com o ASTM A387 Gr.22 Classe 2, segundo a seção VIII, divisão 1, iremos consultar as seguintes partes:

- UG;
- UW;
- UCS;
- Apêndices mandatórios aplicáveis

2.3.1.1 ASME VIII, Divisão I – Soldagem

A soldagem é essencial para unir as partes do vaso, garantindo resistência e durabilidade nas junções. Após a soldagem, são realizados testes, ensaios e exames, que verificam a integridade do vaso por meio de testes de pressão, ensaios não destrutivos e inspeções, assegurando a conformidade com os padrões de segurança. (LIMA, 2023).

Na etapa de certificação de soldagem, três aspectos principais são essenciais:

1. Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS)
2. Registro da Qualificação da Soldagem (RQPS)
3. Qualificação do Soldador ou Operador:

Na elaboração e certificação da EPS, devem ser considerados os seguintes parâmetros:

- Processo de Soldagem: Tipo de soldagem utilizado (por exemplo, MIG, TIG, arco elétrico).
- Metal de Base: O material base sobre o qual a soldagem será realizada.
- Consumível: Material adicional usado na soldagem, como eletrodos ou arames.
- Parâmetros de Entrada de Calor: Inclui corrente elétrica, tensão e velocidade de soldagem.
- Posição da Soldagem: Orientação e posição em que a soldagem será feita (por exemplo, plana, vertical).
- Preparação: Preparação da superfície a ser soldada.
- Proteção: Métodos de proteção utilizados durante a soldagem, como gases inertes para evitar contaminação.
- Mata-junta: Características do espaço entre as peças a serem unidas.
- Pré-aquecimento: Aquecimento prévio das peças antes da soldagem, se necessário.
- Técnica de Soldagem: Método e técnica específicos empregados durante o processo de soldagem.

A ASME adota os conceitos de "P-number" e "F-number" para organizar materiais de base e de adição (como eletrodos e varetas) em grupos que compartilham

características semelhantes de soldabilidade e propriedades específicas. Esses números ajudam a simplificar a seleção de materiais para garantir uma boa qualidade de soldagem.

P-number: Refere-se ao material de base, ou seja, o metal principal que será soldado. Os materiais agrupados sob o mesmo P-number têm:

- Soldabilidade semelhante
- Propriedades mecânicas similares
- Composição química compatível

F-number: Relaciona-se aos materiais de adição, como eletrodos e varetas usados no processo de soldagem. Os F-numbers agrupam materiais de adição com base em:

- Composição química: Similaridade entre os materiais de adição.
- Resistência à tração
- Teor de elementos de liga: A quantidade de elementos químicos que influenciam as propriedades do material.
- Endurecimento: O nível de dureza do material de adição após a soldagem.
- Susceptibilidade a trinca a quente: A tendência de o material de adição desenvolver trincas durante o processo de soldagem.
- Resistência à corrosão: A capacidade do material de adição resistir à corrosão em diferentes ambientes.

Esses grupos facilitam a padronização e a escolha adequada de materiais, garantindo que o processo de soldagem atenda às exigências de qualidade e segurança.

2.3.2 ASME Seção IX: Qualificação de Soldagem, Brasagem e Fusão

A ASME Seção IX aborda a qualificação de soldadores, operadores de soldagem e procedimentos de soldagem. Os principais documentos utilizados para a qualificação do procedimento de soldagem são o RQPS e a EPS. Esses documentos estão de acordo com normas técnicas que visam compilar as informações essenciais para a execução do processo de soldagem em tubulações e equipamentos industriais, garantindo sempre a conformidade com os códigos de projeto, fabricação e inspeção (ASME, 2023).

A Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) é definida como um procedimento escrito e qualificado, elaborado para orientar a execução de soldas de produção de acordo com os requisitos de um código específico. Esse documento, ou outros relacionados, podem ser utilizados para fornecer instruções ao soldador ou operador de soldagem, garantindo a conformidade com as exigências do código (ASME, 2023).

O conteúdo da EPS deve incluir todas as variáveis essenciais, não essenciais e, quando necessário, variáveis essenciais suplementares para cada processo de soldagem envolvido. Essas variáveis estão descritas na QW-250 e são definidas no Artigo IV (Dados de Soldagem). Além disso, a EPS deve fazer referência aos Registros de Qualificação de Procedimento (RQP) que a apoiam, conforme indicado na QW-200.2. Informações adicionais que possam ser úteis na execução da solda também podem ser incluídas (ASME, 2023).

Mudanças em variáveis não essenciais podem ser feitas na EPS sem a necessidade de nova qualificação, desde que essas alterações sejam devidamente documentadas. No entanto, qualquer alteração nas variáveis essenciais ou suplementares, quando aplicável, exige a requalificação da EPS, ou seja, a criação de novos ou adicionais RQPs que suportem essas mudanças (ASME, 2023).

O formato da EPS pode ser adaptado para atender às necessidades de cada organização, seja em formato escrito ou tabela, desde que todas as variáveis essenciais e suplementares listadas na QW-250 estejam incluídas ou referenciadas. O formulário QW-482, fornecido como um guia na seção B do apêndice contém os dados necessários para processos como SMAW, SAW, GMAW e GTAW. Ele é

apenas um modelo e pode não abranger todos os dados necessários para outros processos, podendo incluir variáveis que não se aplicam a determinados processos, como o uso de gás de proteção para SAW (ASME, 2023).

O Registro de Qualificação de Procedimento (RQP), por sua vez, é um registro detalhado das variáveis utilizadas durante a soldagem dos corpos de prova e também dos resultados dos testes realizados nesses corpos de prova. As variáveis registradas geralmente variam em um intervalo pequeno das variáveis que serão usadas na soldagem de produção (ASME, 2023).

O RQP deve documentar todas as variáveis essenciais e, quando necessário, as variáveis essenciais suplementares descritas na QW-250 para cada processo de soldagem utilizado. Variáveis não essenciais podem ser registradas a critério da organização, mas caso não sejam monitoradas durante o processo de soldagem, não devem ser registradas. A organização é responsável por certificar a precisão do RQP, garantindo que ele contenha um registro verdadeiro das variáveis usadas na soldagem dos corpos de prova e que os resultados dos testes de tração, dobramento impacto e macro, conforme exigido, estejam em conformidade com a Seção IX (ASME, 2023).

Não são permitidas alterações no RQP, exceto para correções editoriais, como a atribuição incorreta de um P-Number, F-Number ou A-Number a um determinado metal de base ou metal de adição, ou para adendos resultantes de mudanças no código, como a atribuição de um novo F-Number a um metal de adição que permita o uso de outros metais sob a mesma classificação (ASME, 2023).

3 METODOLOGIA

A coleta dos dados necessários para a confecção dos corpos de prova e a elaboração dos documentos de qualificação, como o Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS) e a Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS), foi realizada conforme as diretrizes dos códigos ASME Seção VIII, Divisão 1, e ASME Seção IX. Neste estudo de caso, o processo de soldagem FCAW foi selecionado para a soldagem do aço ASTM A387 Gr.22 Classe 2, com aplicação específica em chapas para fabricação de um conversor LD.

3.1 Requisitos Gerais do projeto

- Norma de fabricação: ASME VIII DIV.1;
- Norma de qualificação de procedimento de soldagem: ASME IX;
- Material: ASTM A387 Gr.22 Classe 2 (Normalizado, temperado e revenido);
- Temperatura de operação: 300°C;
- Espessura das chapas a se soldar: 60 a 100 mm;
- Requisitos de charpy: 27J a 20°C;
- Garantia do equipamento: 20 anos;
- Posição de soldagem: Vertical

3.2 Estratégia de Qualificação do Procedimento de Soldagem

Para a qualificação do procedimento de soldagem, foi realizada uma consulta ao código ASME VIII, Divisão 1, especificamente nas seções UG (Requisitos Gerais), UW (Fabricação Soldada) e UCS (Materiais). O processo de qualificação deve iniciar com uma análise detalhada do equipamento a ser fabricado ou reparado, compreendendo suas funções, condições operacionais e os materiais a serem utilizados. Esse conhecimento é essencial para a correta definição dos parâmetros e do processo de soldagem a ser adotado.

Outro aspecto fundamental é o atendimento às especificações técnicas, que orientam sobre as propriedades mecânicas esperadas, requisitos de desempenho e tolerâncias permitidas para o equipamento. Essas especificações direcionam a escolha dos processos de soldagem, consumíveis, e técnicas de inspeção, garantindo a conformidade do produto final com os padrões de qualidade.

As normas de fabricação, como ASME VIII Div.1 e ASME IX, desempenham um papel fundamental ao fornecer as diretrizes necessárias para o desenvolvimento do procedimento de soldagem, incluindo os critérios de aceitação e métodos de ensaio. A aderência a essas normas garante que o procedimento seja validado de acordo com práticas internacionalmente reconhecidas.

Por fim, a escala produtiva em fábrica também deve ser considerada ao desenvolver a estratégia de qualificação. Em produções em larga escala, a eficiência e repetitividade do processo são vitais, o que pode exigir automação de etapas, formação técnica específica dos operadores e implementação de controles rigorosos de qualidade, garantindo consistência e uniformidade no produto final.

3.3 Seleção de Materiais

O código ASME VIII DIV. 1, em sua parte UW-28 especifica que todo procedimento de soldagem aplicado na soldagem de vasos de pressão deve ser qualificado de acordo com as regras da seção IX, que especifica as variáveis de soldagem. A Tabela 8 mostra a definição das variáveis.

Tabela 8 - Tipo de variável de processo de soldagem conforme ASME IX

Tipo de Variável	Características
Essenciais	Impacta direto nas propriedades mecânicas da junta soldada. Alguns exemplos dessas variáveis incluem: a espessura do material, o processo de fabricação utilizado, o diâmetro e a composição química do eletrodo, a composição química do metal de base, a resistência.
Suplementares	Tornam-se essenciais quando o projeto ou equipamento exige requisitos de tenacidade, passando a ser obrigatórios para a qualificação do procedimento.
Não essenciais	A alteração não exige uma nova qualificação, pois não afeta a forma crítica das propriedades da solda.

Fonte: Adaptado ASME IX, 2023.

Todas as variáveis essenciais precisam ser registradas e controladas durante a qualificação do procedimento, por meio de um formulário de acompanhamento de soldagem durante a soldagem da chapa de teste.

O código ASME IX na tabela QW-422, classifica o ASMT A387 Gr.22 Class. 2 como P-number 5A grupo 1, como visto na Tabela 9. Na sequência as tabelas 10,11 e 12, apresentam respectivamente sua composição química e propriedades mecânicas especificadas pelo código de fabricação ASTM A387.

Tabela 9 - QW-422 – Lista de materiais e P-Number

Agrupamento de metais para qualificação - QW/QB-422								
Especificação o nº	UNS No.	Tipo ou Grau	Resistência mínima à tração específica (MPa)	P. Nº	Grupo Nº	ISO 15608	Tipo de Metal Base	
							Composição o nominal	Forma de produt o
	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
A OU SA-387	K21590	22, CL.2	515	5A	1		2,25Cr -1 Mo	CHAPA
A OU SA-387	K21590	22, CL. 1	415	5A	1	5.2	2,25Cr -1 Mo	CHAPA
A OU SA-387	K31545	21, CL. 1	415	5A	1	5.2	3Cr - 1Mo	CHAPA
A OU SA-387	K31545	21, CL. 2	515	5A	1	5.2	3Cr - 1Mo	CHAPA

Fonte: ASME SEÇÃO IX, 2023.

Tabela 10 - Teor de Cromo e Molibdênio de acordo com o grau

ESPECIFICAÇÃO	GRAU	% Cr	%Mo
	2	0,5	0,5
	12	1	0,5
	11	1,25	0,5
ASTM A 387	22, 22L	2,25	1
	21,22L	3	1
	5	5	0,5
	9	9	1
	91	9	1

Fonte: Adaptado ASME SEÇÃO II, PARTE A, 2023.

Tabela 11 - Composição Química ASMT A387 Gr.22 Class.2

Elemento	Análise de corrida (%)
Carbono	0,05–0,15
Manganês	0,30–0,60
Fósforo (máx.)	0,025
Enxofre (máx.)	0,025
Silício	0,50 máx.
Cromo	2,00–2,50
Molibdênio	0,90–1,10

Fonte: Adaptado ASME SEÇÃO II, PARTE A, 2023.

Tabela 12 - Propriedades Mecânicas ASMT A387 Gr.22 Class.2

Propriedade	Classe 2
Tensão de Ruptura (MPa)	515 a 690
Tensão de Escoamento (MPa)	310
Alongamento em 2 pol. (50 mm), %	22
Redução de Área, %	45%

Fonte: Adaptado ASME SEÇÃO II, PARTE A, 2023.

3.3.1 Consumíveis de Soldagem

Na soldagem do aço ASTM A387 Grau 22 Classe 2, um aço cromo-molibdênio amplamente utilizado em aplicações de alta temperatura, foi escolhido o processo FCAW (soldagem com arame tubular). O arame utilizado possui a classificação E91T1-C1PZ-B3-H8, cujas características químicas estão apresentadas na Tabela 13, enquanto as propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 14. Esse consumível atende às especificações SFA A5.29 e também é classificado pela norma SFA A5.36.

Tabela 13 - Composição Química Arame

Especificação	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr	%Mo
B3	00,5 - 0,12	1,25	0,8	0,03	0,03	2,0 - 2,5	0,9 - 1,20

Fonte: Adaptado ASME SEÇÃO II, PARTE A (2023)

Tabela 14 - Propriedades Mecânicas Arame

Especificação	LR (Mpa)	LE (Mpa)	AL (%)
E91T1-CIPZ-B3	620 - 760	540	17

Fonte: Adaptado ASME SEÇÃO II, PARTE A, 2023.

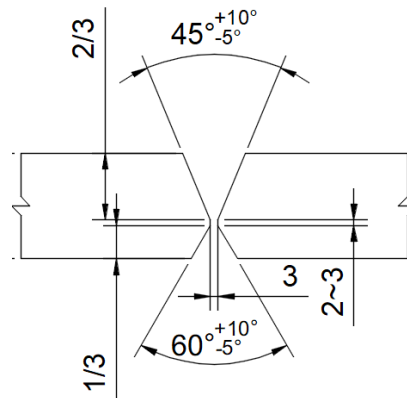
Proteção Gasosa

A seleção do gás de proteção para o processo de soldagem FCAW (Flux-Cored Arc Welding) é de suma importância para garantir a qualidade e a eficiência do procedimento. A escolha adequada influencia diretamente a estabilidade do arco, a penetração, a proteção contra contaminações atmosféricas e as propriedades mecânicas do material soldado. O CO₂ foi selecionado como gás de proteção no processo FCAW por sua excelente capacidade de proporcionar uma penetração profunda e um arco estável, características ideais para soldagem. Além disso, o CO₂ é amplamente utilizado por seu custo mais acessível em comparação a misturas gasosas, tornando-se uma opção econômica sem comprometer a qualidade do cordão de solda. Sua eficácia em processos com arames tubulares também garante boa proteção contra contaminação atmosférica.

3.4 Preparação da Junta de Soldagem

A preparação da junta deve considerar a espessura das chapas a serem soldadas, que variam entre 60 e 100 mm. Nessa espessura, o controle da deformação e das tensões residuais é fundamental para garantir a integridade estrutural do componente. Para esse tipo de aplicação, será utilizado um chanfro em X, uma vez que ele facilita a realização de múltiplos passes de solda, essenciais para assegurar a penetração completa do material (FIGURA 9). O uso de chanfros adequados e técnicas apropriadas de soldagem, como o controle da sequência de passes e interpasses, contribuirá para minimizar distorções e garantir a qualidade da solda final, especialmente em espessuras mais elevadas.

Figura 9 - Tipo de chanfro definido



Fonte: Próprio Autor

A espessura da chapa de teste é especificada pelo ASME IX QW-451-1 Figura 10. Visando atender a uma maior faixa de espessura, a chapa de teste foi soldada com espessura de 38 mm.

Figura 10 - Tabela QW-451.1 - Testes requeridos para qualificação do procedimento

Thickness <i>T</i> of Test Coupon, Welded, in. (mm)	Range of Thickness <i>T</i> of Base Metal, Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]		Maximum Thickness <i>t</i> of Deposited Weld Metal, Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]	Type and Number of Tests Required (Tension and Guided-Bend Tests) [Note (2)]			
	Min.	Max.		Tension, QW-150	Side Bend, QW-160	Face Bend, QW-160	Root Bend, QW-160
Less than 1/16 (1.5)	<i>T</i>	2 <i>T</i>	2 <i>t</i>	2	..	2	2
1/16 to 3/8 (1.5 to 10), incl.	1/16 (1.5)	2 <i>T</i>	2 <i>t</i>	2	[Note (5)]	2	2
Over 3/8 (10), but less than 3/4 (19)	3/16 (5)	2 <i>T</i>	2 <i>t</i>	2	[Note (5)]	2	2
3/4 (19) to less than 1 1/2 (38)	3/16 (5)	2 <i>T</i>	2 <i>t</i> when <i>t</i> < 3/4 (19)	2 [Note (4)]	4	..	..
3/4 (19) to less than 1 1/2 (38)	3/16 (5)	2 <i>T</i>	2 <i>t</i> when <i>t</i> ≥ 3/4 (19)	2 [Note (4)]	4	..	..
1 1/2 (38) to 6 (150), incl.	3/16 (5)	8 (200) [Note (3)]	2 <i>t</i> when <i>t</i> < 3/4 (19)	2 [Note (4)]	4	..	..
1 1/2 (38) to 6 (150), incl.	3/16 (5)	8 (200) [Note (3)]	8 (200) [Note (3)] when <i>t</i> ≥ 3/4 (19)	2 [Note (4)]	4	..	..
Over 6 (150) [Note (6)]	3/16 (5)	1.33 <i>T</i>	2 <i>t</i> when <i>t</i> < 3/4 (19)	2 [Note (4)]	4	..	..
Over 6 (150) [Note (6)]	3/16 (5)	1.33 <i>T</i>	1.33 <i>T</i> when <i>t</i> ≥ 3/4 (19)	2 [Note (4)]	4	..	..

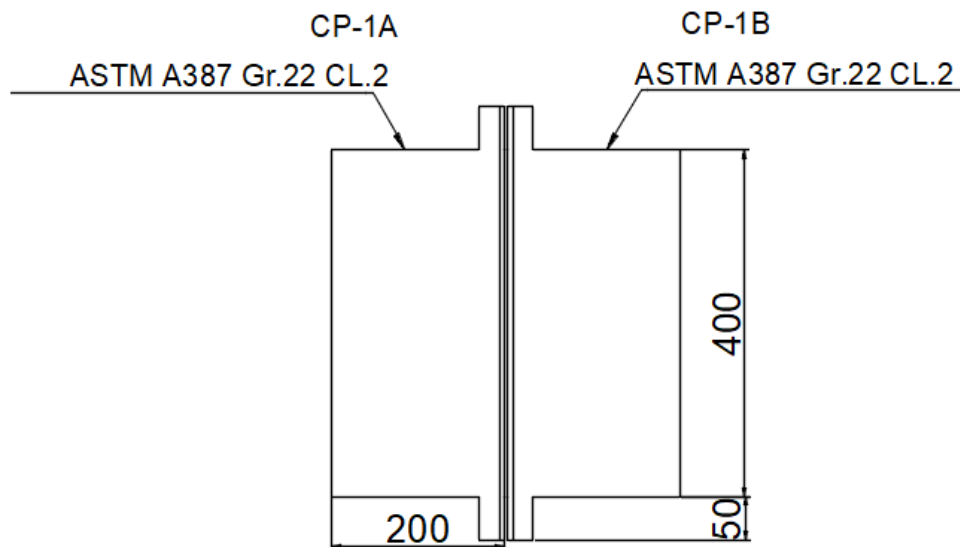
NOTES:
 (1) The following variables further restrict the limits shown in this table when they are referenced in QW-250 for the process under consideration: QW-403.9, QW-403.10, and QW-404.32. Also, QW-202.2, QW-202.3, and QW-202.4 provide exemptions that supersede the limits of this table.
 (2) For combination of welding procedures, see QW-200.4.
 (3) For the SMAW, SAW, GMAW, PAW, LLBW, and GTAW welding processes only; otherwise per Note (1) or 2*T*, or 2*t*, whichever is applicable.
 (4) see QW-151.1, QW-151.2, and QW-151.3 for details on multiple specimens when coupon thicknesses are over 1 in. (25 mm).
 (5) Four side-bend tests may be substituted for the required face- and root-bend tests, when thickness *T* is 3/8 in. (10 mm) and over.
 (6) For test coupons over 6 in. (150 mm) thick, the full thickness of the test coupon shall be welded.

Fonte: ASME IX, 2023.

Os ensaios exigidos para a qualificação do procedimento de soldagem incluem: duas amostras para o teste de tração, quatro amostras para o teste de dobramento lateral,

três conjuntos de três amostras cada para o teste de impacto Charpy, além de um teste de macrografia e um teste de dureza. Com base na especificação dos ensaios necessários, o comprimento da chapa de teste foi estabelecido de acordo com os requisitos normativos e as dimensões adequadas para a realização dos testes (FIGURA, 11).

Figura 11 - Comprimento da chapa de teste



Fonte: Próprio autor

3.5 Definição de Pré-aquecimento

Existem diversas fontes confiáveis para determinar a temperatura de pré-aquecimento adequada para aços cromo-molibdênio. Uma das principais referências é o código ASME VIII Div. 1, que, em seu anexo não obrigatório "R", sugere que a temperatura de pré-aquecimento para materiais classificados com P-number 5A seja superior a 200°C. Além disso, a Tabela 15 apresenta as recomendações de pré-aquecimento para aços Cr-Mo conforme especificado pela norma Petrobras N-133. Essa tabela detalha as temperaturas de pré-aquecimento e de interpasse, levando em consideração a composição química e a espessura do material.

Tabela 15 - Recomendações de pré-aquecimento para aços Cr -Mo – N-133

Temperaturas de preaquecimento e interpassagem mínima para a soldagem de aços Cr-Mo de diferentes espessuras			Temperatura máxima de interpassagens
Material – “P Número ” (PN)	Espessura (mm) ≤ 12	Espessura (mm) > 12	Todas as espessuras
C-0,5Mo - (PN 3)	Não requerido	150°C	250°C
0,5Cr-0,5Mo - (PN 3)			
1Cr-0,5Mo - (PN 4)	150°C	200°C	300°C
1,25Cr-0,5Mo - (PN 4)			
2Cr-0,5Mo - (PN 4)			
2,25Cr-1Mo - (PN 5A)	200°C	250°C	350°C
2,25-3Cr-Mo-V - (PN 5C)			
3Cr-1Mo - (PN 5A)			
5Cr-0,5Mo - (PN 5B)	200°C	250°C	350°C
9Cr-1Mo - (PN 5B)			
9Cr-1Mo-V-Nb - (PN 15E)	200 °C	250 °C	330 °C

Fonte: Petrobras N-133, 2017.

Utilizando a fórmula de pré-aquecimento estabelecida pelo IIW e EN 1011-2, juntamente com a análise da composição química fornecida no certificado do material ASTM A387 Gr.22 Classe 2, bem como a espessura máxima a ser soldada, o aporte térmico do processo de soldagem e o potencial de hidrogênio do consumível, é possível verificar se os parâmetros estão em conformidade com as recomendações das normas ASME Seção VIII Div. 1 e Petrobrás N-133.

A fórmula do IIW para o cálculo da temperatura de pré-aquecimento é:

$$T_0 = 700 \times CET + 160 \times \sqrt{d/35} + 62 \times HD^{0,35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 330$$

Onde:

T_0 : Temperatura de pré-aquecimento (mínima),

CET: Carbono equivalente aplicável $\geq 0,2$

d: espessura da chapa em (mm),

HD: Hidrogênio difusível potencial do consumível (ml/100g)

Q: aporte de calor aplicável de 0,5 - 4,0 kJ/mm.

Os resultados calculados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - resultados dos cálculos de pré-aquecimento

Elementos	ASTM 387 Gr.22 Class.2
% C	0,144
% Mn	0,5
% Cr	2,279
% Mo	0,995
% V	0,003
% Ni	0,171
% Cu	0,149
C. EQUIVALENTE	0,419175
ESPESSURA (mm)	100
HIDROGÊNIO DIF. (ml/100g)	8
Q: aport. Térm. (kJ/mm)	0,8
To (°C)	243

Fonte: Próprio autor

Devido à composição do aço e à espessura das chapas, o pré-aquecimento é fundamental para evitar a formação de trincas a frio. A temperatura mínima de pré-aquecimento e de interpasse foi definida em 250°C, enquanto a temperatura máxima de interpasse foi definida em 350°C. Além disso, foi realizado um pós-aquecimento a 300°C, com duração de 1 minuto por milímetro de espessura de solda, para facilitar a difusão do hidrogênio presente no metal de solda, conforme recomendações da norma Petrobrás N-133.

3.6 Tratamento Térmico Pós-Soldagem (PWHT)

Devido à fusão localizada e altas temperaturas impostas durante a soldagem, o material tende a se dilatar durante a fusão nas adjacências da solda e é comprimido pelo restante do componente que não permite tal dilatação, então estas regiões são submetidas à tensão de compressão.

Durante o resfriamento e solidificação do cordão de solda, essas regiões tendem a se aliviar das tensões de compressão ao se contraírem. No entanto, esse movimento é novamente restringido pelo restante da peça, o que resulta no surgimento de tensões residuais trativas, que podem atingir valores próximos ou equivalentes ao limite de escoamento do material.

Para aliviar estas tensões e não comprometer o equipamento de exercer sua função, a norma ASME VIII DIV.1, na parte UCS-56, Tabela UCS-56-4, especifica que para o aço ASTM A387 Gr.22 (P-number 5A), o tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem deve ser aplicado. De acordo com UW-40 f (2), a espessura governante a se considera para o tratamento térmico é profundidade do chanfro em juntas de topo excluindo o reforço, que neste caso é 100 mm. A Tabela 17 a seguir apresenta os parâmetros recomendados para o tratamento térmico, conforme estabelecido pela norma, de acordo com a espessura e o tipo de material utilizado.

Tabela 17 - Requisitos de Tratamento Térmico Pós-Soldagem para Aços Carbono e Baixa Liga — P-No: 5A, 5B, e 5C

Material	Temperatura Mínima de Manutenção, °F (°C)	Tempo Mínimo de Manutenção na Temperatura Normal para Espessura Nominal
P-Nos. 5A, 5B Gr. Nº 1, e 5C Gr. Nº 1	1.250 (675)	Até 5 pol. (125 mm): 1 h/pol. (25 mm), mínimo de 15 min
		Acima de 5 pol. (125 mm): 5 h mais 15 min para cada polegada adicional (25 mm) acima de 5 pol. (125 mm)

Fonte: Adaptação da Tabela UCS-56-4, ASME VIII DIV.1, 2023.

3.7 Posição de Soldagem

Embora a posição de soldagem não seja uma variável essencial de qualificação segundo o código ASME IX, quando requisito de impacto é aplicável, o ASME VIII Div. 1, na seção UG-84, I (-1), estabelece que, para os processos semiautomáticos, é necessário soldar uma chapa de teste em cada posição de soldagem que será aplicada na fabricação do vaso de pressão. Atendendo a essa exigência, a chapa de teste para este procedimento foi soldada na posição vertical ascendente, simulando as condições reais de produção.

3.8 Parâmetros de soldagem

Após a definição do processo de soldagem e da escolha dos consumíveis, juntamente com todas as variáveis envolvidas, são estabelecidos os parâmetros de soldagem. Com base nesses parâmetros, é elaborada uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) preliminar, que atua como um guia para a execução da soldagem da peça de teste. Esses parâmetros são determinados com base nas normas aplicáveis aos consumíveis, no conhecimento prático do processo e estão ilustrados na figura X. Durante a soldagem da chapa de teste, esses parâmetros previamente definidos podem ser ajustados conforme necessário para garantir a qualidade e eficiência da soldagem.

3.9 Ensaios e Testes Requeridos

Os testes requeridos para a qualificação do procedimento de soldagem levam em consideração o código de fabricação, a norma de qualificação do procedimento e também requisitos do projeto.

Nesta qualificação, adotou-se o código de fabricação ASME VIII Div.1. Após a soldagem da chapa de teste, foi realizado o tratamento térmico de alívio de tensões conforme as diretrizes do ASME VIII Div.1, seção UCS-56, considerando a espessura máxima de solda de 100 mm. Os parâmetros aplicados para o tratamento térmico, atendendo às especificações do material, estão apresentados na Tabela 18.

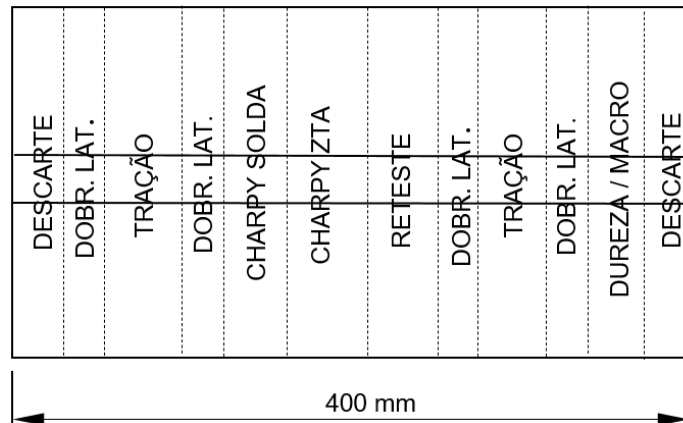
Tabela 18 - Tratamento térmico de alívio de tensão - UCS-56

Parâmetros de Tratamento Térmico	Especificados para espessura de 100 mm	Obtidos
Gradiente durante o aquecimento (°C/h máximo)	56°C máximo	55°C máx
Temperatura de Início de Controle	300°C	300°C
Temperatura de Patamar (°C)	660 a 680	680
Duração do Patamar (horas e minutos)	4 horas e 30 minutos	270
Gradiente de Resfriamento (°C/h máximo)	70	60 até 300
Temperatura de Término de Controle	300	300

Fonte: ASME VIII Div.1, 2023.

Após o tratamento térmico, as amostras dos testes foram retiradas conforme Figura 12.

Figura 12 – Posição de retirada dos corpos de prova



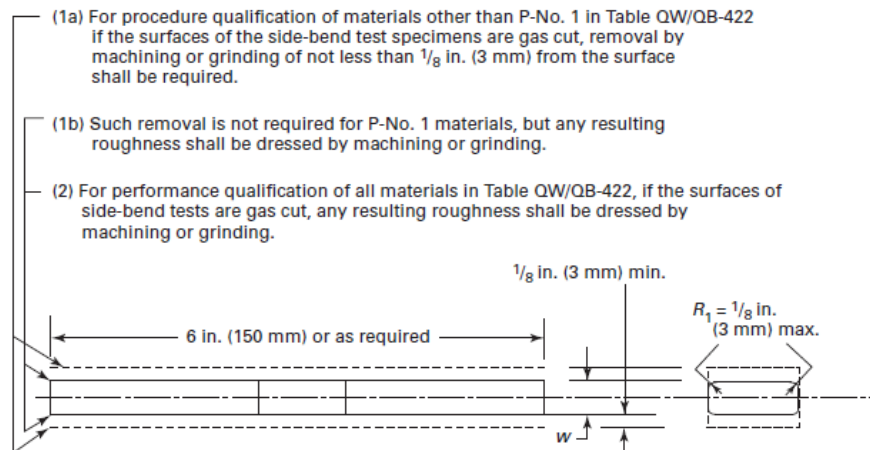
Fonte: Próprio Autor

3.9.1 Teste de Tração da junta soldada

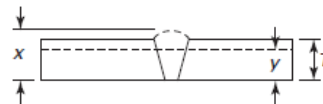
O teste de tração em junta soldada, conforme ASME Seção IX visa avaliar a resistência mecânica da solda e da zona afetada pelo calor, garantindo que o procedimento de soldagem atenda aos requisitos de integridade estrutural. Esse ensaio verifica se a junta suporta as tensões especificadas pelo material e projeto, assegurando a qualificação adequada do procedimento.

As amostras de ensaio de tração foram retiradas da chapa de teste nas posições indicadas conforme Figura 12, e preparadas nas dimensões apresentadas na Figura 13.

Figura 14 - Preparação corpo de prova de tração transversal reduzida

Figure QW-462.2
Side Bend

T, in. (mm)	y, in. (mm)	w, in. (mm)	
		P-No. 23, F-No. 23, F-No. 26, or P-No. 35	All other metals
$\frac{3}{8}$ to $< 1\frac{1}{2}$ (10 to < 38)	T [Note (1)]	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)
$\geq 1\frac{1}{2}$ (≥ 38)	Notes (1) and (2)	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)



GENERAL NOTE: Weld reinforcement and backing strip or backing ring, if any, may be removed flush with the surface of the specimen. Thermal cutting, machining, or grinding may be employed. Cold straightening is permitted prior to removal of the reinforcement.

NOTES:

(1) When weld deposit t is less than coupon thickness T , side-bend specimen thickness may be t .

(2) When coupon thickness T equals or exceeds $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm), use one of the following:

(a) Cut specimen into multiple test specimens of thickness y of approximately equal dimensions $\frac{3}{4}$ in. to $1\frac{1}{2}$ in. (19 mm to 38 mm)

y = tested specimen thickness when multiple specimens are taken from one coupon.

(b) The specimen may be bent at full width. See requirements on jig width in QW-466.1.

Fonte: ASME IX, 2023.

3.9.3 Teste de Impacto Charpy V-Notch (CVN)

- ✓ As amostras foram retiradas e testadas no metal de solda e da zona termicamente afetada (ZTA), conforme ASME VIII, DIV. 1 – UG-84 (g)(1), (2), (3), (-a), (b).
- ✓ As amostras padrão foram retiradas com dimensões indicadas na figura UG-84 (Figura 15) e os testes foram conduzidos de acordo com a ASTM A-370.

- ✓ As amostras de impacto foram Charpy V-notch de tamanho real puderam ser obtidos do material a ser testado. As amostras foram orientadas de modo que o entalhe fique perpendicular à superfície do material.
- ✓ Cada conjunto de amostras do metal de solda foi testado usando amostras retiradas transversalmente ao eixo da solda com o entalhe no metal de solda. Uma face das amostras foi retirada dentro de 1,5 mm da superfície do material, que não é um requisito obrigatório quando as amostras são tratadas termicamente após a soldagem.
- ✓ Cada conjunto de amostras da zona afetada pelo calor foi testado usando amostras retiradas transversalmente ao eixo da solda. As amostras devem ter comprimento suficiente para localizar o entalhe, após o ataque químico, na linha de fusão.
- ✓ A linha central das amostras foi localizada entre 1/2 e 1/4 da espessura do material abaixo da superfície. (Figura 16).
- ✓ Devido a zona afetada pelo calor (ZTA) estar em um ângulo em relação à superfície do material, o meio da linha central do entalhe foi localizado a aproximadamente 2 mm da linha de fusão (Figura 17).

Figura 15 - Dimensões das amostras

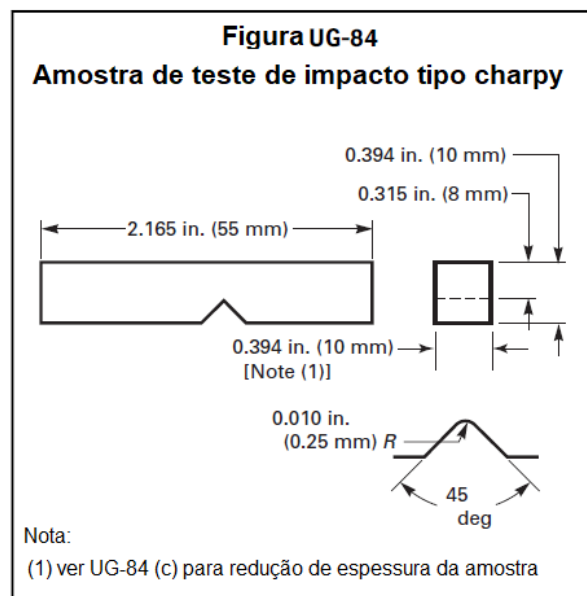
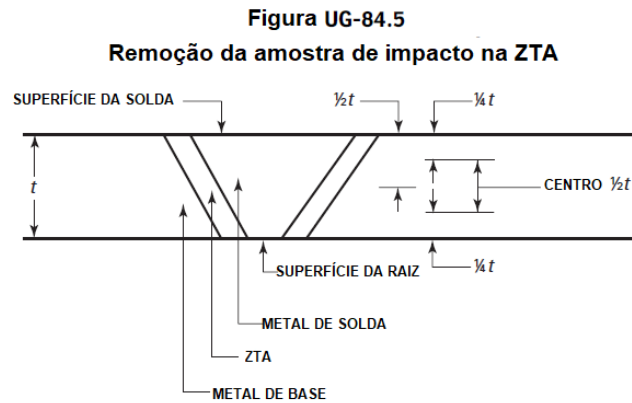
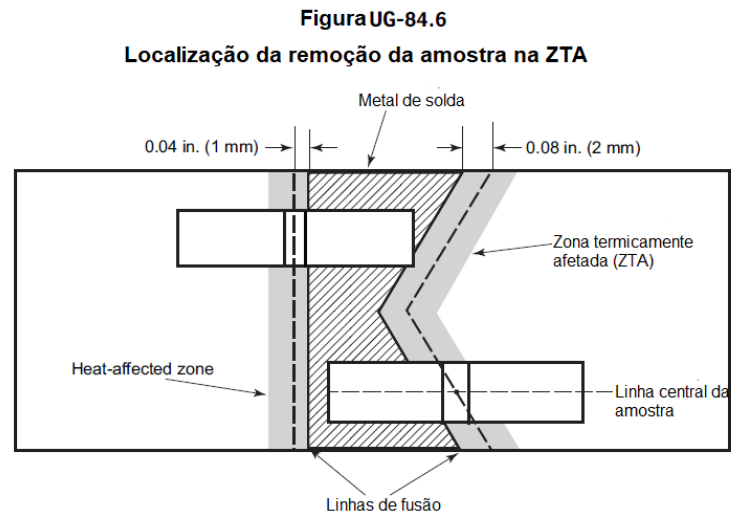


Figura 16 – Remoção das amostras na ZTA



Fonte: ASME VIII, DIV.1, 2023.

Figura 17 - Localização da remoção das amostras na ZTA

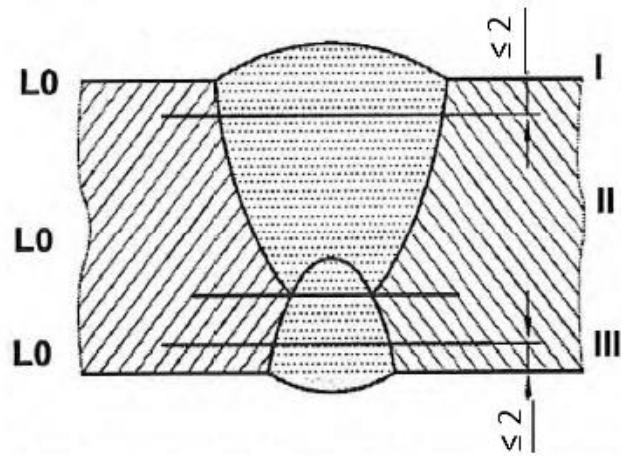


Fonte: ASME VIII, DIV.1, 2023.

3.9.4 Teste de Dureza

O teste de dureza foi realizado na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de solda conforme norma ISO 9015-1/2011 + EN ISO 15614-1 ED. 2017 item 7.5.2.3, e os valores obtidos devem ser ≤ 350 HV. As medições foram executadas no metal de base, metal de solda e zona termicamente afetada em três linhas conforme Figura 18.

Figura 18 - Linhas de testes de dureza



Fonte: Dados de Pesquisa

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos resultados apresentados a seguir, serão detalhados os dados obtidos dos testes realizados para a qualificação do procedimento de soldagem no aço ASTM A387 Grau 22 Classe 2. A **Tabela 19** apresenta os parâmetros obtidos durante a execução da soldagem da peça de teste. A Figura 19 traz o croqui com a sequência de passes.

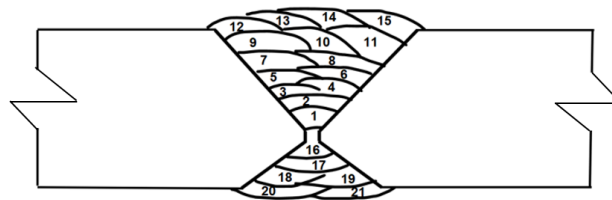
Tabela 19 - Acompanhamento de soldagem da chapa de teste

PASSE N°	CAMADA	PROCESSO	CONSUMÍVEL			PARÂMETROS DE SOLDAGEM									
			ESPECI F.	CLASSIFICAÇÃO OU MARCA COMERCIAL	Ø (mm)	CORRENTE E POLARIDADE	CORRENTE (A) T	TENSÃO (V)	LAGURA DO CORDÃO (mm)	COMP LIVRE DO ARAME (mm)	COMP CHAP A (mm)	TEMPO TIME		VELOC (cm/min)	HEAT INPUT (KJ/cm)
												min	seg.		
1	1	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	195	27	8	18	450	4	5	11,0	28,7
2	2	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	215	27	10	20	450	4	54	9,2	37,9
3	3	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	215	27	9	19	450	4	56	9,1	38,2
4	3	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	215	27	7	18	450	3	48	11,8	29,4
5	4	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	215	26	8	18	450	3	27	13,0	25,7
6	4	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	215	26	7	18	450	3	27	13,0	25,7
7	5	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	170	26	9	18	450	2	48	16,1	16,5
8	5	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	170	26	8	18	450	2	15	20,0	13,3
9	6	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	170	26	8	18	450	4	4	11,1	24,0
10	6	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	170	26	8	18	450	4	5	11,0	24,1
11	6	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	170	26	8	18	450	3	27	13,0	20,3
12	7	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	170	26	8	18	450	2	48	16,1	16,5
13	7	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	170	26	8	18	450	3	27	13,0	20,3
14	7	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	175	26	8	18	450	2	2,0	22,1	12,3
15	7	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	175	26	8	18	450	3	15,0	13,8	19,7

16	8	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	175	26	8	18	450	4	7	10,9	25,0
17	9	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	175	26	8	18	450	4	0	11,3	24,3
18	10	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	165	26	8	18	450	4	5	11,0	23,4
19	10	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	165	26	9	18	450	3	7	14,4	17,8
20	11	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	165	26	10	18	450	3	25	13,2	19,5
21	11	FCAW	SFA 5;36	BOHLER CM 2 Ti FD-B	1,2	CC +	165	26	10	18	450	3	6	14,5	17,7
													Heat input médio	22,9	

Fonte: Próprio Autor

Figura 19 - Croqui de seqüência de passes



Fonte: Próprio Autor

4.1 Ensaios Destrutivos

Os ensaios de tração foram executados nas amostras transversais retiradas da chapa de teste. Para cada amostra, foi conduzido um único ensaio. Na **Tabela 20**, são apresentados os valores obtidos para resistência mecânica, observe-se que, em ambos os corpos testados, uma fratura ocorreu no metal de base, conforme o esperado. Os resultados atenderam aos requisitos mínimos especificados pelas normas dos materiais

Tabela 20 - Ensaio de tração da peça de teste

N° cp	Dimensão (mm)	Área (mm ²)	Limite de resistência			Local de ruptura	Resultados
			Especif. (MPa)	Carga (Kgf)	Real (MPa)		
TP1	35,05 X 19,06	676,63	515	41982	609	MB	Aprovado
TP2	35,47 x 19,15	679,25		42339	611	MB	Aprovado

Fonte: Próprio Autor

Para a realização do ensaio de dobramento, foram confeccionados quatro corpos de prova. Os testes demonstraram a ausência de descontinuidades, evidenciando uma fusão adequada entre os materiais, sem a presença de trincas. Esses resultados confirmam a uniformidade das soldas e a sua resistência aos esforços de flexão. Na **Tabela 21**, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 21 - Dobramento lateral

N.º cp	Ângulo	Direção	Dimensão do cp (mm)	Ø do cutelo (mm)	Distância entre roletes (mm)	Resultados
DL1	180°	Lateral	10 x 38 x 310	45	68	Aprovado
DL2	180°	Lateral	11 x 38 x 310			Aprovado
DL3	180°	Lateral	12 x 38 x 310			Aprovado
DL4	180°	Lateral	13 x 38 x 310			Aprovado

Fonte: Próprio autor

Para o ensaio de impacto, foram avaliados três conjuntos de amostras, sendo que cada conjunto é composto por três amostras. Os ensaios foram conduzidos a uma temperatura de 20°C. O critério de aceitação estabeleceu que cada amostra deveria apresentar uma energia mínima absorvida de 19J, e a média das amostras deveria atingir, no mínimo, 27J. Conforme os resultados apresentados, todas as amostras demonstraram capacidade de absorção de energia dentro dos limites especificados, conforme detalhado na **Tabela 22**.

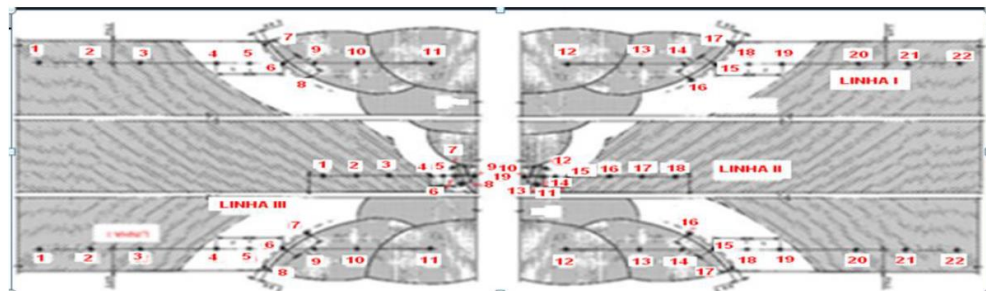
Tabela 22 - Teste de Impacto

Localização do entalhe	Tipo do entalhe	Dimensões (mm)	Temp. °C	Energia absorvida (J)				Resultados
				CP1	CP2	CP3	Média (J)	
Solda a 1,5 mm da superfície	1v" 45°	10,0 x 10,0 x 55 mm	+20°	35	40	51	42	Aprovado
Zta ¼ á ½	1v" 45°	10,0 x 10,0 x 55 mm		118	190	193	167	Aprovado
Zta ¼ á ½	1v" 45°	10,0 x 10,0 x 55 mm		151	173	159	154	Aprovado

Fonte: Próprio Autor

Para medição de dureza, foi preparada uma amostra e as medições foram realizadas em diferentes regiões: no metal de base, na ZTA (Zona Termicamente Afetada) no centro da solda em dois eixos, conforme ilustrado na Figura 20. O limite máximo de dureza permitido pelo código normativo é de 350HV, e todos os resultados obtidos foram satisfatórios, conforme **Tabela 23**. Isso comprova que a junta soldada apresenta a dureza adequada para a aplicação prevista, garantindo a confiabilidade do procedimento.

Figura 20 - Linhas de medições de dureza



Fonte: Dados de pesquisa

Tabela 23 - Ensaio de dureza vickers (Hv 10)

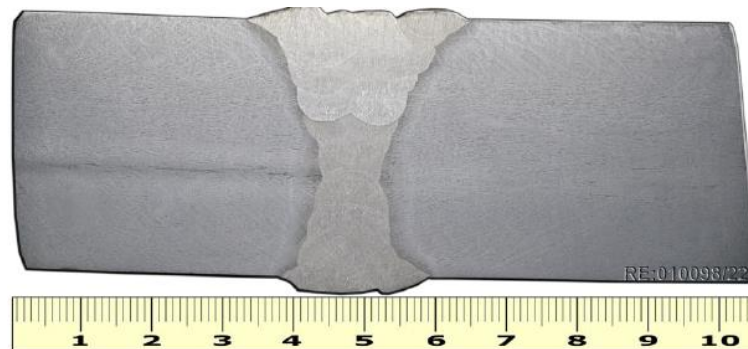
Plano de medição	Valores encontrados					Resultados
	Metal de base 1	ZTA 1	Metal de solda 1	ZTA 2	Metal base 2	
Lo-1	(1) 186 – (2) 185 – (3) 181	(1) 186 – (2) 185 – (3) 181	(9) 236 – (10) 224 – (11) 224 – (12) 226 – (13) 229 – (14) 228	(15) 215 – (16) 214 – (17) 212 – (18) 213 – (19) 194	(20) 192 – (21) 187 – (22) 182	Aprovado
Lo-2	(1) 189 – (2) 183 – (3) 185	(4) 206 – (5) 230 – (6) 231 – (7) 221 – (8) 206	(9) 207 – (10) 210 – (19) 205	(11) 226 – (12) 223 – (13) 226 – (14) 230 – (15) 199	(16) 177 – (17) 181 – (18) 183	
Lo-3	(1) 187 – (2) 185 – (3) 183	(4) 220 – (5) 223 – (6) 223 – (7) 226 – (8) 226	(9) 233 – (10) 222 – (11) 234 – (12) 227 – (13) 234 – (14) 236	(15) 227 – (16) 218 – (17) 222 – (18) 214 – (19) 206	(20) 184 – (21) 186 – (22) 182	

Fonte: Próprio Autor

Exame de Macrografia

A amostra submetida ao ensaio macrográfico foi demonstrada com ampliação de 10 vezes, utilizando o reagente químico Nital 10% para revelar as estruturas metalúrgicas conforme Figura 21 - Macrografia

Figura 21 - Macrografia



Fonte: Dados de pesquisa

Esse procedimento permitiu uma visualização clara da zona fundida, das zonas termicamente afetadas (ZTA) e da transição entre o metal de solda e o metal de base.

4.2 Dados da RQPS

O RQPS (Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem) é um documento fundamental que serve de base para a elaboração da EPS (Especificação do Procedimento de Soldagem). Deve incluir todas as variáveis essenciais e, quando aplicável, as variáveis suplementares, além das respectivas faixas de qualificação (TABELA 24).

Tabela 24 - Resumo das variáveis que devem constar no RQPS

(continua)

Parágrafo	Lista de variáveis	Tipo de variável	Condição de teste	Condição Qualificada	
QW-403 Metal de base	.5	φ Gr-Number	Essencial suplementar	1	1
	.6	φ Limite de Espessura	Essencial suplementar	38	16 - 175
	.8	φ Espessura qualificada	Essencial	38	5 - 200
	.9	φ Espessura do passe > 13 mm	Essencial	< 13 mm	< 13 mm
	.10	φ Limite de espessura (curto-circuito)	Essencial	N/A	N/A
	.11	φ P-Number	Essencial	5A	5A
Metal de Enchimento QW-404	.4	φ F-Number	Essencial	6	6
	.5	φ A-Number	Essencial	4	4
	.12	φ Classificação	Essencial suplementar	E91T1-C1PZ-B3-H8 BOLHER CM 2Ti FD-B	E91T1-C1PZ-B3-H8 BOLHER CM 2Ti FD-B
	.23	φ Formato de consumível	Essencial	TUBULAR FLUXADO	TUBULAR FLUXADO
	.24	± Consumível suplementar	Essencial	SEM	SEM
	.27	φ Elementos de liga	Essencial	B3	B3
	.30	φ Espessura do metal depositado	Essencial	38 mm	≤ 200 mm

(conclusão)

Parágrafo	Lista de variáveis	Tipo de variável	Condição de teste	Condição Qualificada	Parágrafo
QW-406 Pré aquecimento	.1	Decréscimo > 55°C	Essencial	250° C	195°C - 305°C
	.3	Acréscimo > 55°C	Essencial suplementar		
QW-407 Tratamento térmico pós soldagem	.1	inclusão ou exclusão do PWHT	Essencial	Com	Com
	.2	φ Faixa de tempo e temperatura	Essencial suplementar	4.5 h	4,5 - 5,4 h
QW-408 GÁS	.2	φ Gás simples ou percentual de mistura	Essencial	CO2 100%	CO2 100%
	.9	- Gás de proteção da raiz	Essencial	Sem	Com ou Sem
	.10	- Gás de proteção adicional da solda	Essencial	Sem	Com ou Sem
QW-409 Características elétricas	.1	> Aporte térmico	Essencial suplementar	22,9 kJ/cm	22,9 kJ/cm
	.2	φ Modo de transferência	Essencial	Globular	Globular, Spray ou Pulsado
	.4	φ Corrente ou polaridade	Essencial suplementar	CC +	CC +
QW-410 Técnica de soldagem	.9	φ Passe único ou múltiplos	Essencial suplementar	Múltiplos	Múltiplos
	.10	φ Eletrodo único ou múltiplos	Essencial suplementar	Único	Único
	.64	Uso de processo térmico externo	Essencial	N/A p este P-Number	N/A p este P-Number

Fonte: Dados de pesquisa

5 CONCLUSÃO

Este trabalho ressaltou a importância da adequada qualificação de procedimentos de soldagem para garantir a integridade e o desempenho de componentes críticos em aplicações industriais. Através da revisão bibliográfica, foi possível identificar os principais desafios e requisitos associados à soldagem de aços cromo-molibdênio, conhecidos por suas propriedades mecânicas superiores e resistência a altas temperaturas.

A metodologia desenvolvida incluiu a realização de ensaios mecânicos rigorosos, que não apenas validaram a eficácia dos procedimentos propostos, mas também asseguraram a conformidade com as normas aplicáveis. Os resultados obtidos, que foram classificados como aprovados, possibilitaram a elaboração do Registro de Qualificação e Procedimento de Soldagem (RQPS) e da Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS). Esses documentos são fundamentais para orientar a soldagem em ambientes industriais, especialmente na fabricação e reparo de tubulações e equipamentos que operam sob condições severas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **II Materials**: part C: specifications for welding rods, electrodes, and filler metals. New York: ASME, 2023.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Section VII Div.1**: Rules for Construction of Pressure Vessels. Division I. New York: ASME, 2023
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Section IX**: welding, brazing and fusing qualifications: qualification standard for welding, brazing and fusing procedures, welders, brazers, and welding, brazing and fusing operators. New York: ASME, 2023
- ASM INTERNATIONAL. ALLOYING: UNDERSTANDING THE BASICS. OHIO: ASM INTERNATIONAL, 2011.
- AWS (American Welding Society). *Welding Handbook*. 9th ed. Miami: AWS, 2022.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HERCULANO, L. F. G. *Influência do teor de molibdênio na resistência à corrosão e formação de fases em ligas modelo Fe-Cr-Mo*. 2011. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência de Materiais)–Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- KOBELCO. *Especificações técnicas Vol.19: Recentes desenvolvimentos das Especificações da AWS*. Disponível em: < <https://www.kobelco-welding.jp/education-center/technical-highlight/vol19.html>>. Acesso em: 10 set. 2024.
- LIMA, Ivo Andrei de Oliveira Lino. *Projeto mecânico de vasos de pressão: princípios, fundamentos e filosofia do ASME*. 2. ed. São Paulo: Editora Dialética, 2023.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3. ed. atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363 p. (Didática).
- PETROBRAS. *Norma N133*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2017
- SILVA, Aline Raquel Vieira; GUEDES, Ana Emilia Diniz Silva. Mecanismos de deformação plástica por fluência aplicáveis à classe dos aços Cr-Mo. *In*: 69° Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo, 2014. p. 6201-6211. ISSN: 2594-5327, DOI: 10.5151/1516-392X-24337.
- SILVA, Francisco J. G. *Tecnologia da Soldadura: uma abordagem técnico-didática*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2014.

SMALLMAN, R. E.; NGAN, A. H. W. *Modern Physical Metallurgy*. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

STAUDINGER et al. *Danieli Converter Technology: New Full-Liner Competence in Converter Steelmaking*. Technical contribution to the 44nd Steelmaking Seminar, May 26-29, 2013, Araxá, MG, Brazil.