

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ALISON RISSI

SOLDAGEM DE AÇO PATINÁVEL USI SAC 350: COMPARATIVO DOS ARAMES
TUBULARES E71T-1C(M) E E81T1-W2C.

Xanxerê

2025

ALISON RISSI

SOLDAGEM DE AÇO PATINÁVEL USI SAC 350: COMPARATIVO DOS ARAMES
TUBULARES E71T1-C(M) E E81T1-W2C.

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

Orientador: Prof. Dr.
Vinicius Gonçalves Deon

Xanxerê
2025

R596s Rissi, Alison.
Soldagem de aço patinável USI SAC 350: comparativo dos arames tubulares E71T-1C(M) E E81T1-W2C / Alison Rissi. — Xanxerê, 2025.
84 p. : il., color.

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

Orientação: Vinicius Gonçalves Deon.

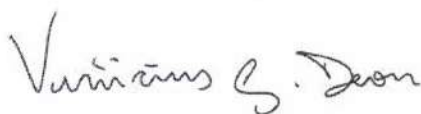
Inclui referência.

1. FCAW. 2. Aço patinável. 3. Arames tubulares. 4. Propriedades mecânicas. 5. Metalografia. I. Deon, Vinicius Gonçalves. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. Título.

ALISON RISSI

SOLDAGEM DE AÇO PATINÁVEL USI SAC 350: COMPARATIVO DOS ARAMES
TUBULARES E71T1-C(M) E E81T1-W2C.

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



Prof. Vinicius Gonçalves Deon, Dr.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Rogerio Rezende Ferreira, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Vanessa Milhomem, Me.
Instituto Federal de Santa Catarina

Xanxerê, 02 de Dezembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças para chegar até aqui e concluir esta etapa. Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Vinicius Gonçalves Deon, pela orientação técnica, pela disponibilidade e pelas contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Estendo também meus agradecimentos à Prof.^a Me. Vanessa Milhomem, pelo apoio e orientações prestadas em algumas etapas deste trabalho.

Agradeço também à minha família, em especial à minha esposa, pelo apoio constante, pela paciência e pelo incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Registro meu sincero agradecimento à empresa em que trabalho, UCM Industrial, pelo apoio e em disponibilizar os equipamentos, materiais e infraestrutura necessários para a realização dos corpos de prova e ensaios, fundamentais para a execução deste estudo. Ao Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC pelos recursos disponibilizados para a conclusão dos ensaios.

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir. Não se pode deixar de ficar maravilhado ao contemplar os mistérios da eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura da realidade. Basta tentar compreender um pouco desse mistério a cada dia. ‘Conselho do velho para a juventude: ‘Nunca perca uma Santa Curiosidade’.”

(Albert Einstein ,1955)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar comparativamente o desempenho dos arames tubulares E71T-1C(M) e E81T1-W2C aplicados na soldagem de aço patinável USI SAC 350 utilizado em condutos forçados em usinas hidrelétricas, verificando a influência desses consumíveis nas propriedades mecânicas e microestruturais das juntas soldadas. Para isso, foram executados procedimentos de soldagem conforme a especificação definida para o processo FCAW, seguidos da preparação e ensaio de corpos de prova submetidos à tração, dureza, análise metalográfica e inspeções não destrutivas pelos métodos de Líquido Penetrante e Ultrassom. As inspeções evidenciaram ausência de descontinuidades relevantes, indicando boa integridade dos cordões de solda para ambos os consumíveis. Os ensaios de tração demonstraram que os valores de limite de escoamento, tensão máxima e alongamento permaneceram dentro dos requisitos normativos e compatíveis com as propriedades esperadas do aço SAC 350, sem divergências significativas entre os arames avaliados. A análise de dureza revelou variações moderadas entre metal de solda e metal base, todas dentro de faixas aceitáveis, corroborando a uniformidade dos resultados mecânicos. Na metalografia, observou-se crescimento de grão mais evidente no passe de raiz, porém sem impacto negativo sobre o desempenho mecânico, já que não foram identificadas fragilidades ou comportamentos discrepantes nos ensaios subsequentes. De forma geral, ambos os arames apresentaram desempenho satisfatório, sendo adequados para aplicações em estruturas sujeitas a esforços elevados, como condutos forçados, destacando-se que o E81T1-W2C, por possuir maior classificação de resistência, tende a favorecer aplicações que demandem propriedades mecânicas superiores. O estudo contribui para a seleção adequada de consumíveis em soldagem de aços patináveis, demonstrando a importância da correlação entre parâmetros de soldagem, microestrutura formada e desempenho final da junta.

Palavras-chave: FCAW. aço patinável. arames tubulares. propriedades mecânicas. metalografia

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of the tubular wires E71T-1C(M) and E81T1-W2C applied to the welding of weathering steel USI SAC 350, commonly used in hydropower penstocks. The objective was to evaluate the mechanical performance and metallurgical behavior of welded joints produced with both consumables, as well as to verify their conformity with the requirements typically established for hydromechanical equipment. The methodology included the execution of welding following qualified procedures, followed by tensile tests, hardness measurements, metallographic analysis, liquid penetrant testing, ultrasonic inspection, and atmospheric exposure of samples. Tensile and hardness results remained within the expected range for the base material, with no significant variations between the consumables and no indication of loss of mechanical integrity. Metallography revealed grain growth near the root pass; however, no critical effects were observed, since the mechanical tests did not exhibit divergences or reductions in performance. Non-destructive testing confirmed the absence of relevant discontinuities, demonstrating good weld quality and satisfactory fusion and penetration conditions. Overall, the study concludes that both consumables provide adequate mechanical properties and sound metallurgical behavior for the welding of USI SAC 350 in structures subjected to high stress, such as penstocks. Hardness analysis revealed moderate variations between the weld metal and the base metal, all within acceptable ranges, supporting the uniformity of the mechanical results. In metallography, more noticeable grain growth was observed in the root pass, but without a negative impact on mechanical performance, as no brittleness or anomalous behaviors were identified in subsequent tests, with the E81T1-W2C standing out due to its higher strength rating, which tends to favor applications requiring superior mechanical properties. The study contributes to the proper selection of consumables in welding of weathering steels, highlighting the importance of the correlation between welding parameters, the formed microstructure, and the final joint performance.

Keywords: FCAW. abrasion-resistant steel. tubular wires. mechanical properties. metallography

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Trecho reto do Conduto Forçado	18
Figura 2 - Trecho reto do conduto forçado com pintura	21
Figura 3 - Trechos reto fabricados em aço patinável	23
Figura 4 - Trecho reto fabricado em aço patinável	24
Figura 5 - Regiões de uma solda por fusão (esquemática)	26
Figura 6 - Macrografia de uma solda de vários passes realizada em um aço de baixo carbono	27
Figura 7 - Processo FCAW (esquemático)	29
Figura 8 - Perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas	30
Figura 9 - Classificação dos arames tubulares	31
Figura 10 - Características do Consumível OK Dual shield 7100 LH	33
Figura 11 - Características do Consumível OK Tubgrid 81W	34
Figura 12 - Curva Tensão-Deformação típicas para materiais dúcteis e frágeis	36
Figura 13 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro	39
Figura 14 -Corpo de prova padrão para ensaio de tração	40
Figura 15 - Técnicas de ensaio de dureza rockwell	42
Figura 16 - Ensaio de dobramento para uma junta soldada	42
Figura 17 - Campo de audibilidade das vibrações mecânicas	44
Figura 18 - Aplicação do LP do tipo fluorescente tipo 1 e visíveis tipo 2	45
Figura 19 - Fluxograma	46

Figura 20 - Tipos de chanfro e junta	49
Figura 21 - Características dimensionais de chanfros usados em soldagem	50
Figura 22 - Ensaios de líquido penetrante	51
Figura 23 - Ensaio de ultrassom - duplo cristal	52
Figura 24 - Ensaio de ultrassom - transdutores angulares	52
Figura 25 - Corpos de prova preparados a 30°	54
Figura 26 - Dimensões do corpo de prova	55
Figura 27 - a) Amostras retiradas dos CPs b) Fresamento	56
Figura 28 - Amostras lixadas e embutidas	56
Figura 29 - Dimensões do corpo de prova	57
Figura 30 - Preparação dos corpos de prova	58
Figura 31 - Dimensões do corpo de prova para dobramento	59
Figura 32 - a) Corte dos CPs; b) Chanfro preparado para soldagem; c) CPs prontos para a soldagem	60
Figura 33 - a) Parâmetros de soldagem. b) Consumível E71T-1C(M); c) Consumível E81T1-W2C; d) CPs finalizados	61
Figura 34 - Corpos de prova durante o ensaio de exposição atmosférica	63
Figura 35 - Amostras do corpo de prova 01 E71T-1 C(M) submetido à exposição atmosférica	65

Figura 36 - Amostras do corpo de prova 02 E81T1-W2C submetido à exposição atmosférica	65
Figura 37 - Amostras do corpo de prova 03 E81T1-W2C sem exposição atmosférica	66
Figura 38 - Amostras do corpo de prova 04 E71T-1 C(M) sem exposição atmosférica	66
Figura 39 - Aumento de 100x da microestrutura na região Metal de solda da raiz e Metal de solda da face	67
Figura 40 - Aumento de 400x da microestrutura na região do metal de solda com o aspecto diferente a) Metal de solda (R) ; b) Metal de solda (F)	68
Figura 41 -Microestrutura de ferrita acicular em forma de “agulhas”	68
Figura 42 - Corpos de prova após o ensaio de tração	69
Figura 43 - Corpos de prova após o ensaio de dureza	73
Figura 44 - Figura ilustrativa dos pontos de medição	75
Figura 45 - Corpos de prova após o ensaio de dobramento	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDI - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção

Ar - Argônio

ASCE - American Society of Civil Engineers

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWS - American Welding Society

CECT - Comitê Europeu de Caldeiraria e de Tolerâncias

CO₂ - Dióxido de carbono

CPs - Corpos de Prova

CR - Cromo

CU - Cobre

END - ensaios não destrutivos

EPS - Especificação de Procedimento de Soldagem

FCAW - Flux Cored Arc Welding

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina

LP - Líquido Penetrante

MB - Metal de Base

MIG - Metal Inert Gas

MAG - Metal Active Gas

NI - Níquel

P - Fósforo

Si - Silício

TC - Temperatura Crítica

TF - Temperatura de Fusão

TP - Temperatura de Pico

US - Ultrassom

ZAC - Zona Afetada pelo Calor

ZF - Zona Fundida

ZTA - Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 Conduitos Forçados de Usinas Hidrelétricas.....	17
2.2 Tipos de Aços Aplicados em Conduitos Forçados.....	19
2.2.1 Aços Estruturais e de Alta Resistência em Aplicações Hidromecânicas.....	19
2.2.2 Aços Patináveis.....	21
2.3 Soldagem de aços - Fundamentos metalúrgicos.....	25
2.3.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA).....	25
2.4 Processo de soldagem FCAW.....	28
2.4.1 Características do processo FCAW.....	29
2.5.1 Metal de adição E71T-1C(M).....	33
2.5.2 Arame tubular E81T1-W2C.....	34
2.6 Fundamentos da ciência dos Materiais.....	35
2.6.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais.....	35
2.6.2 Influência dos Elementos de Liga nos Aços.....	36
2.6.3 Corrosão e Proteção de Aços.....	38
2.6.4 Diagrama de Fases Ferro-Carbono e Microestrutura dos Aços.....	38
2.6 Ensaios Mecânicos Aplicados.....	39
2.6.1 Ensaio de tração.....	39
2.6.2 Dureza.....	40
2.6.3 Dobramento.....	42
2.6.4 Ensaio macrográfico.....	42
2.6.5 Ensaio não destrutivo (US) - Ultrassom.....	43
2.6.6 Ensaio não destrutivo (LP) - Líquido penetrante.....	44
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	47
3.1.1 Metal de base : USI SAC 350.....	47
3.1.2 Consumíveis de soldagem.....	47
3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS (CPs).....	48
3.3 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.....	48
3.4 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	50
3.4.1 Ensaio por Líquido penetrante (LP).....	50
3.4.2 Ensaio por Ultrassom (US).....	51
3.5 ANÁLISE DE CORROSÃO.....	53
3.5.1 Exposição natural ao meio ambiente.....	53
3.6 METALOGRAFIA.....	54
3.6.1 Macrografia.....	54

3.7 ENSAIOS MECÂNICOS.....	57
3.7.1 Tração.....	57
3.7.2 Dureza.....	58
3.7.3 Dobramento.....	59
3.8 PREPARAÇÃO DAS CHAPAS E CORPOS DE PROVA.....	59
3.9 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.....	60
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	62
4.1 Exposição dos corpos de prova às condições ambientais.....	62
4.2 Metalografia.....	64
4.2.1 Corpo de Prova 01 - E71T-1 C(M).....	65
4.2.2 Corpo de Prova 02 - E81T1-W2C:.....	65
4.2.3 Corpo de Prova 03 - E81T1-W2C:.....	66
4.2.4 Corpo de Prova 04 - E71T-1 C(M):.....	66
4.3 Ensaio de tração.....	69
4.4 Dureza.....	73
4.5 Dobramento.....	75
5 CONCLUSÃO.....	77
8 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Esse método de união, considerado em conjunto com a brasagem, tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas, ou milhares, de toneladas de peso. A soldagem é utilizada na fabricação de estruturas simples, como grades e portões, assim como em componentes encontrados em aplicações com elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias química, petrolífera e nuclear, e também na criação de peças de artesanato, joias e outros objetos de arte (Villani; Modenesi; Bracarense, 2011, p. 1).

Nesse contexto, os condutos forçados de usinas hidrelétricas se enquadram como componentes de elevado grau de responsabilidade, pois conduzem grandes volumes de água sob pressão, exigindo soldas de alta integridade e resistência mecânica, e a aplicação adequada dos processos de soldagem nessas estruturas é fundamental para garantir a segurança operacional e a longevidade do sistema. Por isso, a escolha adequada dos materiais de adição e dos processos de soldagem é fundamental para garantir a integridade estrutural e a durabilidade dessas instalações. Dentre os materiais empregados na fabricação de condutos forçados, destaca-se o aço patinável da Usiminas, Siderúrgica de Aços Resistentes à Corrosão (USI SAC) 350, que possui elevada resistência mecânica e boa resistência à corrosão atmosférica, sendo especialmente indicado para estruturas expostas ao ambiente (Gonçalves *et al.*, 2020). Contudo, a soldagem desse tipo de aço exige cuidados específicos, principalmente na seleção dos consumíveis de soldagem, uma vez que variações na composição química e nas características do consumível de soldagem podem influenciar significativamente o desempenho mecânico da junta soldada.

Os arames tubulares E71T-1C(M) e E81T1-W2C, ambos utilizados no processo *Flux Cored Arc Welding* (FCAW), têm ampla aplicação na indústria pesada por combinarem boa produtividade e qualidade do cordão de solda. O E71T-1C(M) é amplamente utilizado em estruturas de média resistência, enquanto o E81T1-W2C é recomendado para aplicações que exigem maior tenacidade e resistência, especialmente em baixas temperaturas (ESAB, 2025). O aço patinável USI SAC 350, utilizado na fabricação de condutos forçados em usinas hidrelétricas, requer

consumíveis que ofereçam resistência mecânica, ductilidade e compatibilidade metalúrgicas para garantir a integridade deste equipamento. A aplicação deste tipo de material vem crescendo, principalmente em obras com equipamentos hidromecânicos, porém são escassos os estudos que avaliam o comportamento mecânico dos consumíveis E71T-1C(M) e E81T1-W2C na soldagem deste material específico. Os dados encontrados em fichas técnicas de materiais como as do USI SAC 350, destacam a necessidade de consumíveis com propriedades mecânicas equivalentes ou superiores ao metal de base utilizado. Devido à ausência de dados sobre o desempenho e resistência destes arames em juntas soldadas em aço patinável como o SAC 350 a comparação torna-se necessária.

Dessa forma, este trabalho tem como tema a análise comparativa dos arames tubulares E71T-1C(M) e E81T1-W2C na soldagem de conduto forçado em aço patinável USI SAC 350, com ênfase na influência desses consumíveis sobre os resultados dos ensaios mecânicos. O problema de pesquisa que se apresenta é: qual dos arames tubulares, E71T-1C(M) ou E81T1-W2C, apresenta melhor desempenho mecânico na soldagem de condutos forçados fabricados com aço patinável USI SAC 350?

A hipótese deste estudo é que o arame tubular E81T1-W2C apresenta melhores resultados mecânicos na soldagem do aço USI SAC 350 em comparação ao E71T-1C(M), especialmente em aplicações que exigem maior tenacidade e resistência em baixas temperaturas (ESAB, 2025). A relevância do presente trabalho justifica-se tanto pela escassez de estudos específicos nesta aplicação quanto pela sua importância prática na otimização de processos de soldagem em estruturas críticas de sistemas de geração de energia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é comparar o desempenho dos arames tubulares E71T-1C(M) e E81T1-W2C na soldagem do aço patinável USI SAC 350, identificando de que maneira as diferenças entre esses consumíveis influenciam os resultados dos ensaios mecânicos das juntas soldadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Submeter os corpos de prova a ensaios mecânicos para avaliação do desempenho das juntas soldadas;
- Caracterizar as propriedades mecânicas das juntas soldadas utilizando os arames E71T-1C(M) e E81T1-W2C;
- Analisar a presença de quaisquer defeitos ou descontinuidades de soldagem com ensaios não destrutivos ultrassom e líquido penetrante;
- Avaliar as propriedades de cada junta pelos ensaios destrutivos (tração, dureza, dobramento);
- Analisar a microestrutura das juntas soldadas para identificar possíveis variações metalúrgicas entre os consumíveis utilizados;
- Avaliar o comportamento à corrosão natural de juntas soldadas com arames tubulares E71T-1C(M) e E81T1-W2C aplicados em aço patinável USI SAC 350, submetidos à exposição atmosférica direta;

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, apresentam-se os principais conceitos que fundamentam este trabalho. São abordadas as características e funções dos condutos forçados em usinas hidrelétricas, os tipos de aços utilizados em sua fabricação, com ênfase nas propriedades do aço patinável USI SAC 350. Em seguida, discute-se a soldagem desses aços, com destaque para o processo de soldagem FCAW e as particularidades dos arames tubulares E71T-1C(M) e E81T1-W2C. Também são explorados os fundamentos da ciência dos materiais aplicados ao contexto da soldagem. Por fim, descrevem-se os ensaios mecânicos utilizados para a avaliação das juntas soldadas, analisando a influência dos consumíveis nos resultados obtidos.

2.1 Condutos Forçados de Usinas Hidrelétricas

Condutos forçados são componentes de usinas hidrelétricas, responsáveis por transportar água sob pressão desde a superfície livre até a turbina. Segundo a *American Society of Civil Engineers* (ASCE), "um conduto forçado é definido como um conduto fechado de água, localizado entre a primeira superfície livre e uma central hidrelétrica" (ASCE, 2012, p. 13).

O projeto desses sistemas exige atenção rigorosa a fatores técnicos, ambientais e econômicos. O próprio manual destaca que "o projeto de um sistema de conduto forçado seguro e econômico requer a consideração de fatores técnicos, ambientais, econômicos e de construtibilidade" (ASCE, 2012, p. 1). Dado que esses componentes operam sob pressão e são estruturas críticas, qualquer falha pode resultar em perdas operacionais severas ou danos catastróficos à infraestrutura.

Segundo o Comitê Europeu de Caldeiraria e de Tolerâncias (C.E.C.T. 1979), o projeto de condutos forçados deve considerar não apenas os aspectos hidráulicos e topográficos da instalação, mas também as condições de fabricação, transporte, montagem e, principalmente, as propriedades dos materiais a serem utilizados. A entidade destaca que "o cálculo, o projeto e a construção de condutos forçados requerem conhecimentos e experiências muito específicas, sendo decisivos fatores como o método de fabricação e as propriedades dos materiais empregados" (C.E.C.T., 1979, p. 5).

A seleção dos aços e dos materiais de adição para soldagem deve ser

baseada nas solicitações estruturais e nas condições operacionais da instalação, considerando esforços permanentes, intermitentes e acidentais. Como ressalta o manual europeu, "a escolha dos aços e dos materiais de adição para soldagem é determinada pelas características da estrutura, das solicitações e pelas condições de fabricação" (C.E.C.T., 1979, p. 7).

A Figura 1 apresenta um exemplo de trecho reto do conduto forçado, estrutura onde as exigências de resistência mecânica, integridade metalúrgica e durabilidade, são determinantes para a seleção adequada dos materiais.

Figura 1 - Trecho reto do Conduto Forçado



Fonte: Autor (2025)

Condutos forçados em usinas hidrelétricas podem operar sob elevadas pressões internas que são diretamente influenciadas pela altura da queda do fluido, e requerem confiabilidade estrutural durante toda sua vida útil. Devido à natureza crítica dessas estruturas, diversas normas técnicas são aplicáveis ao seu

dimensionamento, fabricação e inspeção. Em especial, quando um conduto forçado apresenta características que se assemelham a vasos de pressão, recomenda-se a aplicação de códigos específicos como o ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* – Section VIII (ASME BPVC Séc. VIII). A sigla ASME refere-se à *American Society of Mechanical Engineers*, uma das principais entidades normativas internacionais na área de engenharia mecânica, reconhecida por estabelecer padrões rigorosos de projeto, fabricação e inspeção de equipamentos sob pressão.

A ASME BPVC Section VIII é composta por três divisões, cada uma com suas respectivas aplicações, porém, para a fabricação destes equipamentos a ASME BPVC Section VIII - Divisão 1 é mais utilizada na parte de projeto, fabricação, inspeção e testes de equipamentos que são submetidos a pressão, como em condutos forçados. O código estabelece critérios rigorosos para espessura mínima, seleção de materiais, tipos de juntas soldadas e métodos de ensaio, incluindo testes hidrostáticos e ensaios não destrutivos (END). A aplicação dessas diretrizes proporciona maior segurança operacional e vida útil ao equipamento, sendo uma referência consolidada em projetos industriais de grande porte.

A ASME Section VIII fornece equações e fatores de segurança específicos para calcular a espessura mínima da parede do tubo em função da pressão interna, do diâmetro, do limite de escoamento do material e da eficiência da junta soldada. Essa abordagem permite o dimensionamento seguro da espessura da chapa do conduto forçado, levando em consideração variáveis como o tipo do consumível e a realização ou não de ensaios não destrutivos.

2.2 Tipos de Aços Aplicados em Condutos Forçados

2.2.1 Aços Estruturais e de Alta Resistência em Aplicações Hidromecânicas

O aço é a liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008 até 2,11%. O carbono aumenta a resistência do aço, porém o torna mais frágil. Os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência à tração, porém são mais dúcteis do que os aços com alto teor de carbono (Pfeil, 2021, p.1).

Os aços-carbono comuns contêm basicamente ferro e carbono, com pequenas quantidades de outros elementos, como o manganês, que aparecem naturalmente no processo de fabricação. Já os aços-liga são diferentes porque recebem outros elementos, como níquel, cromo ou cobre, adicionados de forma

controlada. Esses elementos são adicionados para melhorar características do aço, como a resistência, a dureza ou a proteção contra a ferrugem.

Muitos materiais, quando em serviço, são submetidos a forças ou cargas. Em tais situações, é necessário conhecer as características do material e projetar o componente de maneira que qualquer deformação resultante não seja excessiva e não cause fratura. O comportamento mecânico de um material reflete sua resposta ou deformação em relação à aplicação de uma carga ou força. Propriedades mecânicas importantes para um projeto são rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade (Callister, 2020 p.126).

Historicamente, aços estruturais como o ASTM A572 Gr.50 têm sido amplamente utilizados na fabricação de condutos forçados, devido à sua elevada resistência mecânica e boa soldabilidade. No entanto, por não apresentarem resistência à corrosão atmosférica, esses materiais requerem sistemas de pintura industrial para proteção, o que acarreta maiores custos de fabricação e manutenção ao longo do tempo.

De acordo com a norma ASTM A572 (2018), o grau 50 apresenta composição química com teor máximo de carbono (C) de 0,23%, manganês (Mn) entre 0,50 e 1,35%, fósforo (P) até 0,040% e enxofre (S) até 0,050%. A Quadro 1 apresenta as propriedades mecânicas do material, que incluem um limite de escoamento mínimo de 345 MPa, resistência à tração mínima de 450 MPa e alongamento de 16% para corpos de prova com comprimento de 200 mm (Usiminas, 2024).

Quadro 1 - Composição química do aço ASTM A572 Gr.50

Norma	Grau	Faixa de Espessura (mm)	Composição Química(% em massa)					Propriedades Mecânicas			
			C	Si	Mn	P	S	LE (Mpa)	LR (Mpa)	BM (mm)	% Alongamento
ASTM-A572 (2018)	42	6,00 ≤ E ≤ 9,52	0,23 máx.	0,40 máx.	0,50 a 1,35	0,040 máx.	0,050 máx.	345 mín.	450 mín.	200	16
	50	9,53 ≤ E ≤ 38,10	0,23 máx.	0,40 máx.	0,80 a 1,35	0,040 máx.	0,050 máx.	345 mín.	450 mín.	200	16
	60	38,11 ≤ E ≤ 101,60	0,23 máx.	0,15 a 0,40	0,80 a 1,65	0,040 máx.	0,050 máx.	345 mín.	450 mín.	200	16

Fonte: Adaptado de Catálogo USIMINAS (2025)

A aplicação de pintura industrial em condutos forçados é essencial quando se utilizam aços como o ASTM A572 Grau 50, que não possuem resistência natural à corrosão atmosférica. Como ilustrado na Figura 2, esses sistemas de pintura geralmente envolvem várias camadas (demãos), podendo atingir até 1000 micras na

parte externa e cerca de 500 micras na parte interna. Apesar de eficaz, esse processo aumenta o custo inicial da fabricação e exige manutenção periódica para garantir a durabilidade, especialmente em ambientes agressivos, como áreas externas ou regiões com alta umidade.

Figura 2 - Trecho reto do conduto forçado com pintura



Fonte: Autor (2025)

Como alternativa, destaca-se o uso do aço patinável USI SAC 350, desenvolvido pela Usiminas, que possui propriedades semelhantes ao ASTM A572 em termos de resistência, porém com a vantagem da formação de uma pátina protetora em sua superfície, eliminando a necessidade de pintura em diversas aplicações. Esse tipo de aço é especialmente indicado para estruturas expostas, como pontes, viadutos e condutos forçados, sendo capaz de resistir ao intemperismo sem comprometer sua integridade estrutural (Usiminas, 2024).

2.2.2 Aços Patináveis

Os aços patináveis, também conhecidos como aços Cor-ten, foram introduzidos nos Estados Unidos na década de 1930, com aplicação inicial em vagões de carga. Esses materiais são notáveis por sua alta resistência mecânica e à corrosão atmosférica, superando em até oito vezes a resistência dos aços-carbono. Além de sua estética, eles se destacam pela capacidade de formar uma camada de óxidos, a “pátina”, que os protege da corrosão sem a necessidade de revestimentos adicionais (Dutra *et al.*, 2013).

A formação de uma camada protetora de óxidos estáveis, conhecida como pátina, é o principal mecanismo de proteção contra a corrosão atmosférica dos aços patináveis como o USI SAC 350. Essa pátina atua como uma barreira física e química que reduz a taxa de penetração de agentes corrosivos, aumentando a durabilidade do material mesmo em ambientes externos.

A eficácia dessa proteção está diretamente relacionada à composição química do aço, que é formulada para favorecer a formação de óxidos aderentes e compactos. Os elementos de liga mais relevantes na formação da pátina em aços patináveis são o cobre (Cu) e o fósforo (P), seguidos por cromo (Cr), níquel (Ni) e silício (Si). Esses elementos alteram a morfologia, o tipo e a aderência dos produtos de corrosão, resultando na formação de uma camada protetora estável (Costa e Silva, Mei, 2020).

A pátina é formada devido a três fatores. O primeiro está ligado à composição química do próprio aço. Os principais elementos que contribuem para aumentar sua resistência frente à corrosão atmosférica, favorecendo a própria formação da pátina, são o cobre (Cu) e o fósforo (P). O Cr, Ni e o Si também exercem efeitos secundários. No caso do fósforo, ele deve ser mantido em baixos teores (menores que 0,1%), sob pena de prejudicar certas propriedades mecânicas do aço e sua soldabilidade (Dutra *et al.*, 2013).

O segundo é o fator ambiental, como a presença de SO₂ e de NaCl na atmosfera, a temperatura, a força (direção, velocidade e frequência) dos ventos, umidade etc. O dióxido de enxofre favorece o desenvolvimento da pátina, enquanto o cloreto de sódio em suspensão na atmosfera marítima prejudica suas propriedades protetoras. Não é recomendada a utilização de aços patináveis sem proteção em ambientes nos quais a concentração de dióxido de enxofre atmosférico esteja acima de 250 mg/m³ e em atmosfera marítima com taxas de deposição de cloretos superiores a 300 mg/m²/dia (Dutra *et al.*, 2013).

O último fator está ligado à geometria da peça, na qual diferentes estruturas do mesmo material dispostas lado a lado podem ser atacadas de maneira distinta. Esse fenômeno é atribuído à influência de seções abertas/fechadas, drenagem correta das águas de chuva e outros fatores que atuam diretamente sobre os ciclos de umedecimento e secagem (Dutra *et al.*, 2013).

A forma da peça afeta diretamente no comportamento e na formação da pátina. Superfícies planas ou com pouca inclinação podem reter água aumentando o

risco de acúmulo de umidade em pontos específicos da peça. Esse acúmulo pode impedir a formação uniforme da pátina, favorecendo a corrosão localizada. Por outro lado, peças com formas inclinadas permitem o escoamento da água prevenindo a retenção de umidade e favorecendo uma camada protetora mais uniforme.

A Figura 3 mostra trechos retos de um conduto forçado fabricado em aço patinável USI SAC 350, já exposto ao ambiente externo, onde é possível observar a formação da pátina uma camada de óxidos que confere ao material sua coloração característica alaranjada que atua como barreira protetora contra a corrosão atmosférica.

Figura 3 - Trechos retos fabricados em aço patinável



Fonte: Autor (2025)

Essa camada se forma naturalmente quando o aço é submetido a ciclos de umedecimento e secagem, como ocorre em ambientes abertos, sendo um dos principais diferenciais que dispensam a necessidade de pintura protetiva convencional. Contudo, antes da exposição ao tempo, o material mantém sua aparência metálica original, sem a formação da pátina, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - Trecho reto fabricado em aço patinável



Fonte: Autor (2025)

As Figuras 3 e 4, ilustram dois momentos distintos de um mesmo componente do conduto forçado fabricado em aço patinável USI SAC 350. Na Figura 3, observa-se a peça após certo tempo de exposição ao ambiente externo, com coloração alaranjada resultante da formação da pátina superficial camada de óxidos estáveis que atua como barreira protetora contra a corrosão atmosférica. Já na Figura 4, registrada logo após a fabricação e antes da exposição ao tempo, a superfície ainda apresenta o aspecto metálico original, evidenciando o início do processo de oxidação em pontos isolados. Essa comparação reforça o comportamento característico dos aços patináveis e a efetividade da proteção natural adquirida com a exposição ao ambiente.

2.2.3 Aço USI SAC 350

O aço USI SAC 350 é um aço especial de baixa liga, com alta resistência à corrosão atmosférica, fabricado pela Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (Usiminas). Classificado como aço estrutural, é amplamente empregado em aplicações que exigem elevada resistência mecânica aliada a boa soldabilidade. Entre suas principais utilizações destacam-se projetos de construção civil, como pontes, estruturas na área de mineração, fabricação de máquinas pesadas e equipamentos que exigem alta durabilidade. Além disso, o USI SAC 350 é

recomendado para a fabricação de condutos forçados em usinas hidrelétricas, devido à sua capacidade de resistir a ambientes agressivos e ao desgaste na superfície externa.

De acordo com a Quadro 2, que apresenta os dados fornecidos pela Usiminas (2024), o aço USI SAC 350 apresenta composição química com teor máximo de carbono de 0,25%, silício entre 0,50 e 1,50%, manganês até 1,50%, fósforo até 0,060%, enxofre até 0,020%, cobre até 0,40%, e cromo com 0,60%. As propriedades mecânicas mínimas incluem limite de escoamento de 350 MPa e resistência à tração entre 500 e 650 MPa, com alongamento de 20% para corpos de prova transversais. O aço também atende aos requisitos de dobramento com raio mínimo de 1,5 vezes a espessura da chapa, demonstrando boa confiabilidade.

Quadro 2 - Composição química do aço USI SAC 350

NORMA	GRAU	ESPESSURA(mm)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							PROPIEDADES MECÂNICAS		
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	LE(Mpa)	LR(Mpa)	DEFORMAÇÃO(%)
USI SAC	350	6,00 A 101,60	0,25	0,50 a 1,50	1,5	0,06	0,02	0,04	0,6	350 Min	500 a 600	20

Fonte: Adaptado de catálogo da USIMINAS (2025)

2.3 Soldagem de aços - Fundamentos metalúrgicos

A soldagem de aços é um processo de união que envolve a fusão localizada dos metais, com ou sem adição de material. Durante a soldagem, ocorrem transformações metalúrgicas significativas que afetam a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas da junta soldada. A maioria destas alterações depende do ciclo e das reações ocorridas durante a solidificação e resfriamento do cordão de solda e de sua microestrutura final. Assim, a compreensão destes fenômenos metalúrgicos é importante em muitas aplicações da soldagem (Marques; Modenesi; Bracarense, 2016, p. 61).

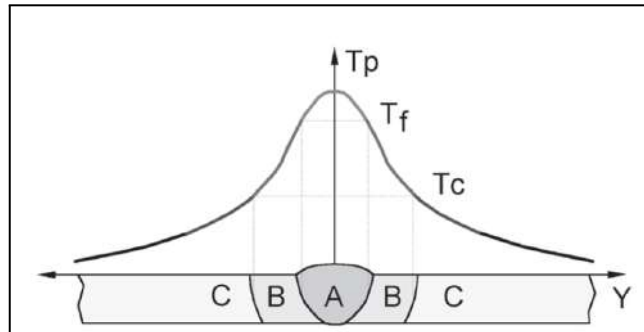
A adição balanceada de elementos de liga permite a obtenção de uma variedade de tipos de aços com diferentes propriedades mecânicas, químicas, magnéticas, elétricas e térmicas. Estruturalmente, pode-se considerar que os elementos de liga atuam em dois aspectos fundamentais: termodinâmico e cinético (Marques; Modenesi; Bracarense, 2016, p. 68).

2.3.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

A curva de repartição térmica permite definir, para uma solda por fusão, três regiões básicas, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Regiões de uma solda por fusão (esquemática).

A – Zona Fundida (ZF); B – Zona Termicamente Afetada (ZTA); e C – Metal de Base (MB)



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2016)

Zona Fundida (ZF): região onde o material fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores à temperatura de fusão (T_f) do metal de base.

Temperatura de Fusão (T_f): temperatura na qual o metal funde e passa do estado sólido para o líquido.

Zona Termicamente Afetada (ZTA) ou Zona Afetada pelo Calor (ZAC): região não fundida do metal de base que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico nesta região foram superiores à temperatura crítica do material em questão e inferiores à sua temperatura de fusão.

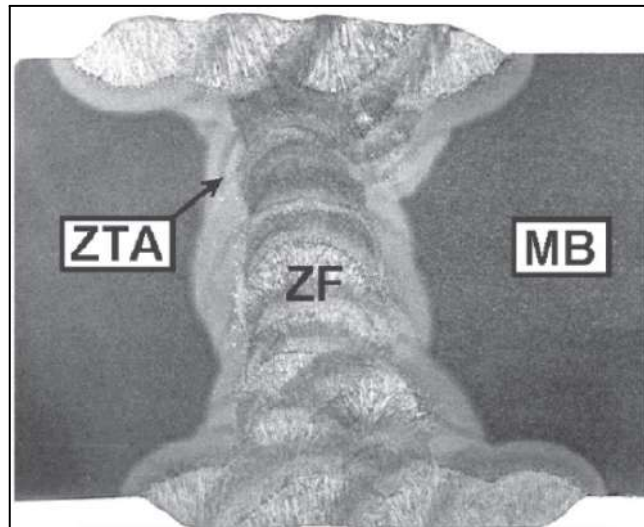
Temperatura de Pico (T_p): maior temperatura atingida em um ponto do material durante a soldagem.

Temperatura Crítica (T_c): temperatura em que ocorrem transformações de fase no aço, sem fusão do material.

Metal de Base (MB): região mais afastada do cordão de solda e que não foi afetada pelo processo de soldagem. As suas temperaturas de pico são inferiores à temperatura crítica do material.

A Figura 6 ilustra este efeito em uma solda de vários passes de um aço-carbono.

Figura 6- Macrografia de uma solda de vários passes realizada em um aço de baixo carbono.



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2016)

A ZTA é a região do metal base que não chega a fundir, mas sofre alterações microestruturais devido ao ciclo térmico da soldagem. Suas características variam conforme o tipo de metal, o processo e o procedimento de soldagem empregados, especialmente devido à energia térmica envolvida. Em metais não transformáveis, como alumínio ou cobre, a principal modificação é o crescimento de grão; já em materiais encruados, ocorre também a recristalização.

No caso de aços carbono e baixa-liga (metais transformáveis), a ZTA se subdivide em regiões distintas. A mais crítica é a região de crescimento de grão, que atinge temperaturas elevadas (até 1.200 °C ou mais), levando à formação de austenita com grão grosseiro, cuja transformação durante o resfriamento pode originar estruturas como ferrita em placas, bainita ou até martensita, dependendo da velocidade de resfriamento e da composição química do aço. Essa região é propensa a baixa tenacidade e pode ser um ponto de iniciação de trincas, exigindo controle rigoroso da energia de soldagem e do pré aquecimento da junta para evitar falhas indesejadas (Marques; Modenesi; Bracarense, 2016).

A região de refino de grão da ZTA é submetida a temperaturas entre 900 °C e 1.200 °C, similares às da normalização dos aços. Como resultado, forma-se uma microestrutura predominantemente composta por ferrita e perlita refinadas, o que, geralmente, não compromete as propriedades da junta soldada. Já a região intercrítica, atingida por temperaturas entre 727 °C e a linha A3, sofre austenitização

parcial, o que leva à coexistência de estruturas antigas e novas. Em soldagens multipasse, essa região pode desenvolver fases duras e frágeis, com baixa tenacidade. Por fim, em zonas ainda mais afastadas da linha de fusão, onde as temperaturas máximas não ultrapassam os 727 °C, as alterações microestruturais são mínimas ou imperceptíveis, tendo pouca ou nenhuma influência sobre o desempenho da junta soldada (Marques; Modenesi; Bracarense, 2016).

A caracterização da ZTA é especialmente relevante na soldagem de aços patináveis, como o USI SAC 350, amplamente utilizados em estruturas expostas à intempérie, como condutos forçados em usinas hidrelétricas. Esses aços apresentam maior sensibilidade à variação microestrutural devido à presença de elementos de liga como cobre, cromo e níquel, que conferem resistência à corrosão atmosférica, mas também influenciam a temperabilidade e o comportamento metalúrgico durante a soldagem.

Quando se utiliza o processo FCAW, caracterizado por sua alta taxa de deposição, é comum que se trabalhe com altas energias de soldagem, o que impacta diretamente a extensão e as transformações da ZTA. No caso de aços patináveis, a região de crescimento de grão pode apresentar uma microestrutura grosseira, com tendência à formação de martensita, principalmente em condições de resfriamento rápido ou uso de arames com níveis elevados de elementos de liga. Isso pode comprometer a tenacidade da junta e aumentar a suscetibilidade à formação de trincas na ZTA.

2.4 Processo de soldagem FCAW

De acordo com Villani *et al.* (2016), a soldagem a arco com arame tubular FCAW é um processo bastante semelhante ao MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) no que se refere aos equipamentos utilizados e aos princípios de funcionamento, promovendo a coalescência dos metais pelo aquecimento gerado por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo e consumível, e a peça de trabalho.

Os arames tubulares podem ser utilizados tanto com proteção gasosa FCAW-G quanto na forma autoprottegida FCAW-S.

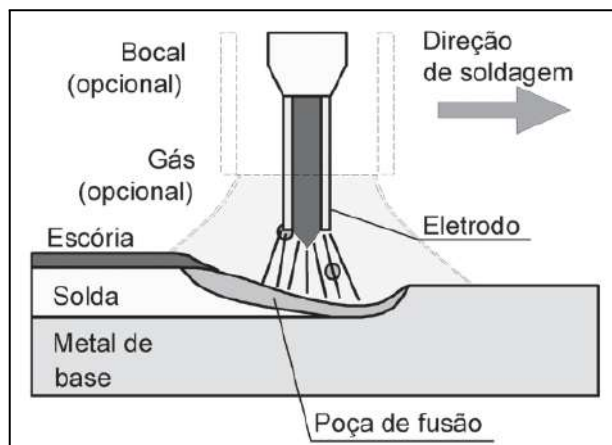
No processo FCAW-G a proteção do arco e do cordão de solda é garantida pelo fluxo contido no interior do eletrodo, que pode ser suplementada por gás

fornecido externamente. Entretanto, a quantidade limitada de fluxo presente no arame nem sempre é suficiente para gerar o volume de gases necessário à proteção completa do banho de fusão, sendo, portanto, necessária a utilização de uma proteção adicional, que pode ser inerte, ativa ou uma mistura de ambas (REIS, 2022).

No arame tubular autoprottegido FCAW-S, há maior quantidade de fluxo no seu interior, permitindo que a queima produza gases e fumos suficientes para garantir tanto a proteção da poça de fusão quanto às características metalúrgicas do cordão de solda durante a execução do processo. Esse tipo de consumível é indicado especialmente para soldagem em ambientes externos ou sujeitos a vento, onde o uso de gás externo seria inviável (REIS, 2022).

Além da proteção, os fluxos podem exercer outras funções, semelhantes às dos revestimentos de eletrodos, como desoxidar e refinar o metal de solda, adicionar elementos de liga, estabilizar o arco, entre outras (Marques; Modenesi; Bracarense, 2016, p. 246). A Figura 7 ilustra o princípio de funcionamento do processo FCAW.

Figura 7 - Processo FCAW (esquemático).



Fonte : Marques; Modenesi; Bracarense, (2016)

2.4.1 Características do processo FCAW

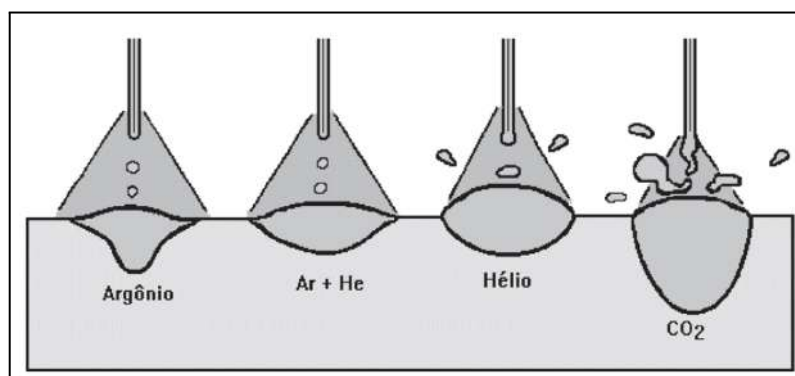
A soldagem com arames tubulares é normalmente um processo semiautomático. Por outro lado, o processo também tem suas semelhanças com a soldagem com eletrodos revestidos, do ponto de vista metalúrgico. Assim, a soldagem com arames tubulares é um processo que acumula as principais

vantagens da soldagem MIG/MAG, como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e alto rendimento, que resultam em grande produtividade, e as vantagens da soldagem com eletrodos revestidos, como a alta versatilidade, possibilidade de ajustes de composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo (Marques; Modenesi; Bracarense, 2016 p. 247).

Os consumíveis utilizados para soldagem com arame tubular incluem os arames, os gases de proteção (ativos) quando aplicáveis, e produtos anti respingos. Os gases de proteção ativos, como o dióxido de carbono (CO_2) e as misturas de CO_2 com argônio ($\text{Ar}+\text{CO}_2$), são amplamente utilizados por influenciarem diretamente a estabilidade do arco, a taxa de deposição a penetração da solda e também na formação de respingos, misturas de gases são usadas na maioria das vezes em chapas com menores espessuras, pois o aquecimento do metal de base é menor, utilizando um gás inerte como o argônio. O gás CO_2 puro, por exemplo, proporciona boa penetração porém causa maior aquecimento no metal de base, é utilizado também para espessuras de chapas maiores de que quando utiliza-se misturas de gases é o mais econômico, porém tende a gerar mais respingos. Já as misturas com argônio oferecem um arco mais estável, menor quantidade de respingos e melhor acabamento do cordão, sendo preferidas em aplicações que exigem maior qualidade estética e técnica.

A Figura 8 mostra a seção transversal típica de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas.

Figura 8: Perfil típico de cordões de solda executados com diferentes gases e misturas.



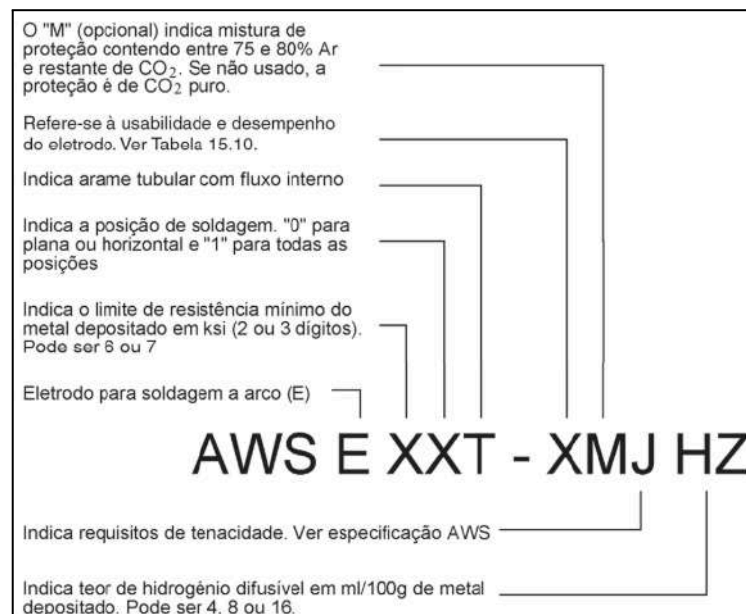
Fonte: Villani (2016)

Os arames tubulares seguem um sistema de classificação padronizado conforme as normas da American Welding Society (AWS) sendo a AWS A5.20 e

AWS A5.29, o qual organiza suas propriedades e aplicações de forma clara e sistemática. A AWS A5.20 é aplicada a arames para aços carbono e de baixa liga comum, sendo amplamente utilizada em aplicações gerais de construção e fabricação. Já a AWS A5.29 abrange arames tubulares para aços de baixa liga com requisitos mecânicos mais exigentes, como maior tenacidade ou resistência em baixas temperaturas, sendo mais indicada para aplicações estruturais críticas, como condutos forçados em usinas hidrelétricas.

Essa classificação, apresentada na Figura 9 a seguir, permite identificar facilmente as principais características do consumível, como resistência mecânica, posição de soldagem e tipo de proteção gasosa.

Figura 9 - Classificação dos arames tubulares



Fonte : Marques; Modenesi; Bracarense, (2016)

O arame tubular E71T-1C/M, conforme a classificação da norma AWS A5.20 possui a seguinte descrição detalhada:

- E - indica que se trata de um eletrodo;
- 71 - refere-se à resistência mínima à tração de 70 ksi, equivalente a aproximadamente 483 MPa;
- T-1 - indica arame tubular e o tipo de fluxo interno, sendo este rutílico, o que proporciona boa soldabilidade e facilidade na remoção de escória;
- C/M - informa o tipo de gás de proteção recomendado, sendo C para dióxido de carbono (CO₂) e M para misturas de argônio com CO₂.

Este tipo de arame é amplamente indicado para aplicações estruturais em aços carbono e de baixa liga, devido à sua excelente soldabilidade, fácil remoção de escória e estabilidade do arco durante o processo de soldagem.

Para o arame tubular E81T1-W2C, conforme a norma AWS A5.29, sua classificação é detalhada da seguinte forma:

- E - indica que se trata de um eletrodo;
- 81 - refere-se à resistência mínima à tração de 80 ksi, equivalente a aproximadamente 552 MPa;
- T-1 - indica arame tubular e o interno, sendo este rutílico, o que proporciona boa soldabilidade e facilidade na remoção de escória;
- W2 - indica que o arame é destinado à soldagem de aços de baixa liga com requisitos específicos de tenacidade e resistência, geralmente contendo níquel e outros elementos de liga;
- C - informar o tipo de gás de proteção recomendado, neste caso dióxido de carbono (CO₂) puro.

Diante das características apresentadas, observa-se que, embora o arame tubular E71T-1C(M) seja amplamente utilizado na soldagem de condutos forçados devido à sua boa soldabilidade, resistência mecânica, facilidade de uso e compatibilidade com gases de proteção comuns, ele não foi projetado especificamente para aplicações em aços de alta resistência ou com requisitos rigorosos de tenacidade e resistência a corrosão, como é o caso do aço patinável USI SAC 350. Por outro lado, o arame E81T1-W2C, classificado pela AWS A5.29, apresenta propriedades mecânicas superiores, sendo especialmente formulado para a soldagem de aços de baixa liga de alta resistência, com maior teor de elementos de liga, como o níquel, o que favorece a tenacidade em baixas temperaturas. Considerando que, até o momento, a soldagem dos condutos forçados tem sido realizada com o arame E71T-1C(M), e mesmo não sendo o mais indicado para essa aplicação específica, torna-se pertinente uma análise comparativa entre esses dois consumíveis, visando avaliar sua influência nos resultados mecânicos e na confiabilidade estrutural das juntas soldadas.

2.5 Consumíveis De Soldagem E71T-1C(M) e E81T1-W2C

2.5.1 Metal de adição E71T-1C(M)

O arame tubular rutilico E71T-1C(M) é empregado para soldagem em passe único e multipasses em todas as posições. Proporciona baixíssimo índice de respingo, fácil remoção de escória e ajuste simples dos parâmetros de soldagem, independentemente da posição. Além disso, apresenta baixo teor de hidrogênio difusível, o que reduz significativamente os riscos de trincas a frio em juntas soldadas. Pode ser utilizado tanto com 100% CO₂ quanto com mistura Ar + 20–25% CO₂ como gás de proteção, oferecendo flexibilidade no processo. A Figura 10 ilustra as principais características do consumível OK Dual Shield 7100 LH, representativo da classe E71T-1C(M), destacando suas vantagens operacionais e desempenho mecânico.

Figura 10 - Características do Consumível OK Dual shield 7100 LH

Dual Shield 7100 LH ASME SFA-5.20 E71T-1C(M) E491T-1C(M) E71T-9C(M) E491T-9C(M)	100% CO₂ C 0,04 Si 0,48 Mn 1,10	Arame tubular rutilico, para soldagem em passe único e multipasse em todas as posições. Produzido a partir de um novo conceito de formulação, esse arame proporciona baixíssimo índice de respingos, excepcional remoção de escória e fácil ajuste de parâmetros em qualquer posição de soldagem, mesmo quando comparado com outros arames que possuem a mesma classificação. Apresenta baixo teor de hidrogênio difusível. Flexível, pode ser soldado empregando tanto CO ₂ quanto misturas Ar + 20-25%CO ₂ como gás de proteção. Destina-se a soldagem de aços de baixo e médio teor de carbono na fabricação de estruturas e construção pesada em geral. Homologações: 100% CO₂ e 75%Ar+25%CO₂ ABS 3YSA H10 BV SA3M, SA3YM HH DNV III YMS (H10) LRS DxVudO BF 3S,3YS H15 NA GL 3YH10S	100% CO₂ LR 590 MPa LE 540MPa A 28% Ch V (-30C) 86J		1,20 150A, 28V 210A, 29V 250A, 30V 290A, 33V 330A, 34V	87 87 88 88 90	1,90 2,85 3,85 4,85 5,75	100%CO ₂ CC+ ou Ar + 20-25% CO ₂ CC+
	Ar+ 20-25% CO₂ C 0,05 Si 0,55 Mn 1,20		Ar+20-25% CO₂ LR 610MPa LE 565MPa A 26% Ch V (-30C) 84J	1,60 190A, 27V 300A, 30V 365A, 33V 410A, 33V 450A, 33V 500 A, 39 V	87 87 88 89 90 90	2,75 4,60 5,60 6,35 7,30 9,11		

Fonte: ESAB - Catálogo de Consumíveis (2008)

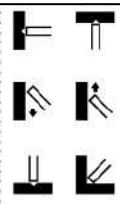
O arame tubular Dual Shield 7100 LH, de classificação AWS A5.20

E71T-1C/M, é amplamente empregado na soldagem de aços de baixa e média resistência mecânica, em aplicações estruturais e industriais. Sua formulação rutilica proporciona baixos índices de respingo, excelente remoção de escória e baixos níveis de hidrogênio difusível, o que reduz o risco de trincas a frio. A composição química do metal depositado varia conforme o gás de proteção utilizado: com 100% CO₂, apresenta 0,04% de carbono, 0,48% de silício e 1,10% de manganês; já com misturas de Ar + 20-25% CO₂, os teores se elevam levemente para 0,05% de carbono, 0,50% de silício e 1,20% de manganês. Essa combinação de elementos assegura boa soldabilidade, elevada resistência mecânica e ótima tenacidade, mesmo em baixas temperaturas, além de favorecer a estabilidade do arco e a formação de cordões de solda de alta qualidade em todas as posições.

2.5.2 Arame tubular E81T1-W2C

O arame tubular tipo rutilico E81T1-W2C é empregado para soldagem em passe único ou multipasse em todas as posições. Foi desenvolvido especialmente para a soldagem de aços patináveis resistentes à corrosão atmosférica, como Cor-Ten, SAC 41, SAC 50, SAC 300 e SAC 350, amplamente utilizados na construção de pontes, viadutos, tanques e vagões, entre outras aplicações estruturais. O consumível apresenta excelentes características operacionais em todas as posições, com alta taxa de deposição, boa penetração, escória de fácil remoção e baixa emissão de respingos, o que favorece a produtividade e qualidade da solda (ESAB, 2008). A Figura 11 ilustra as principais características do consumível OK Tubrod 81W, um exemplo da classe E81T1-W2C.

Figura 11 - Características do Consumível OK Tubrod 81W

TUBROD 81 W ASME SFA-5.29 E81T1-W2C E551T1-W2C	C	0,06	Arame tubular tipo rutilico para soldagem em passe único ou multipasse em todas as posições. Desenvolvido especialmente para a soldagem de aços patináveis resistentes à corrosão tipo Cor-Ten, SAC 41, SAC 50, SAC 300, SAC 350, etc, empregados na construção de pontes, viadutos, tanques, vagões entre outras aplicações. Apresenta excelente características operacionais.	L.R. 630 MPa L.E. 590 MPa A 25% ChV (-30°C) 40J		1,20	150A, 28V	87	1,90	100% CO ₂ CC+
	Si	0,50					210A, 29V	87	2,85	
	Mn	1,00					250A, 30V	88	3,85	
	Cr	0,60					290A, 33V	88	4,85	
	Ni	0,75					330A, 34V	90	5,75	
	Cu	0,60				1,60	190A, 27V	87	2,75	
							300A, 30V	87	4,60	
							365A, 33V	88	5,60	
							410A, 33V	89	6,35	
							450A, 33V	90	7,30	

Sua composição química controlada contribui diretamente para a resistência à corrosão e ao impacto, apresentando baixos teores de carbono (máx. 0,06%) e percentuais significativos de elementos de liga como manganês (1,00%), cromo (0,60%), níquel (0,75%) e cobre (0,60%). Esses elementos garantem maior resistência mecânica, tenacidade e proteção contra oxidação. O metal de solda obtido com este consumível atinge propriedades mecânicas elevadas, com limite de escoamento de 590 MPa, limite de resistência à tração de 630 MPa, alongamento de 25% e tenacidade de 40J a -30 °C, o que reforça sua adequação para aplicações em ambientes agressivos e de baixa temperatura.

2.6 Fundamentos da ciência dos Materiais

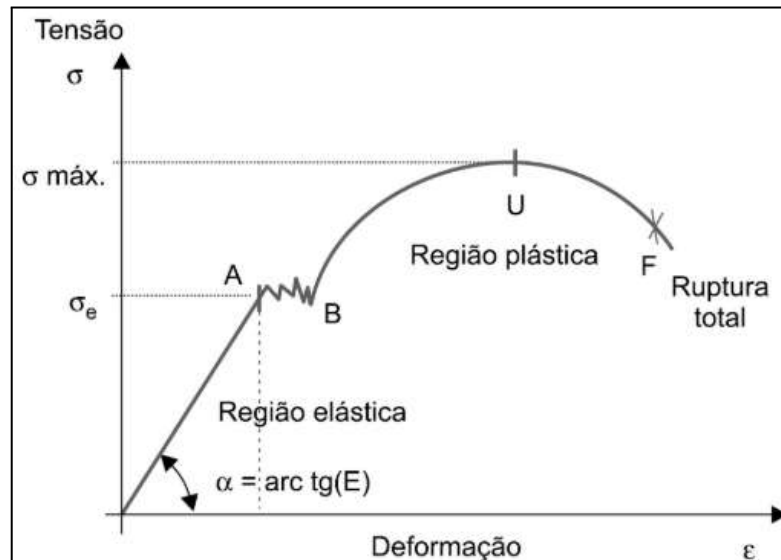
2.6.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais

As propriedades mecânicas dos materiais são fundamentais para a seleção adequada de metais em estruturas críticas, como os condutos forçados (Callister. 2020) destaca que resistência à tração, limite de escoamento, alongamento e tenacidade são propriedades a serem consideradas no projeto e na avaliação de juntas soldadas. O limite de escoamento representa a tensão máxima que o material suporta antes de sofrer deformação plástica, enquanto a tenacidade expressa a capacidade de absorver energia até a fratura, sendo especialmente relevante em ambientes sujeitos a temperaturas baixas, impacto ou esforços cíclicos. No caso da soldagem de aços patináveis, é necessário que o metal de adição forneça propriedades similares ou superiores às do metal base, a fim de garantir continuidade estrutural e resistência adequada nas regiões soldadas. Os ensaios mecânicos como tração e impacto são utilizados para validar essas características e verificar a influência dos consumíveis empregados.

A Figura 12 mostra o comportamento de materiais dúcteis e frágeis em um ensaio de tração. O material dúctil apresenta limite de escoamento, resistência à tração e grande deformação antes da fratura, indicando boa capacidade de absorver energia (tenacidade), já o material frágil rompe-se com pouca deformação, sem escoamento visível. Essas propriedades são essenciais na escolha de materiais para estruturas críticas, como condutos forçados. Na soldagem desses componentes, o metal de adição deve possuir propriedades mecânicas iguais ou

superiores às do metal base, sendo os ensaios de tração e impacto fundamentais para verificar a qualidade das juntas soldadas.

Figura 12 - Curva Tensão-Deformação típicas para materiais dúcteis e frágeis



Fonte: Santos (2020)

2.6.2 Influência dos Elementos de Liga nos Aços

A composição química dos aços influencia diretamente suas propriedades mecânicas, soldabilidade e resistência à corrosão. Elementos como cobre (Cu), cromo (Cr), manganês (Mn), níquel (Ni), fósforo (P) e silício (Si) são frequentemente adicionados para conferir características específicas.

O cobre contribui fortemente para aumentar a resistência à corrosão dos aços carbono pelo retardamento da formação de carepa à temperatura ambiente, porém altos teores de cobre podem causar problemas durante a soldagem como trincas na zona afetada pelo calor, porosidade e segregação do elemento nas bordas dos grãos (Fortes; Araújo, 2005).

O cromo, quando combinado com o carbono, atua como um poderoso elemento de liga, promovendo o aumento da dureza dos aços. Além de suas propriedades de endurecimento, o cromo também é responsável por elevar a resistência dos materiais à corrosão e às altas temperaturas. Sua presença é fundamental na composição dos aços inoxidáveis, sendo considerado o principal elemento de liga desse grupo de materiais (Fortes; Araújo, 2005).

O manganês é adicionado aos aços, normalmente em teores de até 1,0%,

atuando como agente desoxidante e dessulfurante. Esse elemento neutraliza os efeitos prejudiciais do oxigênio e do enxofre, além de aumentar a resistência à tração e melhorar a temperabilidade dos aços, favorecendo a obtenção de juntas soldadas mais resistentes (Fortes; Araújo, 2005).

O níquel é um elemento de liga que melhora significativamente a ductilidade e a tenacidade ao entalhe do aço, sendo altamente eficaz para aumentar a resistência ao impacto a baixas temperaturas. Além disso, sua combinação com o cromo origina os aços inoxidáveis austeníticos, conhecidos por sua resistência à corrosão e boa formabilidade. Consumíveis com alto teor de níquel também são utilizados para soldar ferro fundido, proporcionando melhores resultados de fusão e resistência na solda (Fortes; Araújo, 2005).

O fósforo é considerado um elemento residual nocivo nos aços porque reduz fortemente sua ductilidade e tenacidade. Normalmente todo esforço é feito para reduzir o teor de fósforo para os menores níveis possíveis. Entretanto, em alguns aços o fósforo é adicionado em quantidades muito pequenas para aumentar sua resistência (Fortes; Araújo, 2005).

O silício nos aços atua como agente desoxidante. Normalmente aumenta a resistência dos aços, mas quantidades excessivas podem reduzir a ductilidade. Em consumíveis de soldagem é algumas vezes adicionado para aumentar a fluidez do metal de solda (Fortes; Araújo, 2005).

Portanto, os elementos de liga como cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), fósforo (P) e silício (Si) são fundamentais nos aços patináveis, pois favorecem a formação de uma pátina protetora aderente e estável, responsável por sua elevada resistência à corrosão atmosférica. Estudos demonstram que a adição de apenas 0,2 a 0,3% de cobre já duplica essa resistência à corrosão, e que a combinação com cerca de 0,5% de cromo pode potencializar ainda mais esse efeito. O níquel, por sua vez, além de melhorar a tenacidade, é especialmente eficaz em ambientes marinhos, dificultando a penetração de cloretos na camada de óxidos e prolongando a durabilidade do aço. Esses efeitos, quando combinados, tornam os aços patináveis materiais altamente eficientes e sustentáveis para estruturas expostas ao ambiente natural (Pannoni, 2001).

Esses elementos, presentes em aços como o USI SAC 350, contribuem para que ele apresente uma combinação equilibrada entre resistência mecânica, soldabilidade e resistência à corrosão atmosférica.

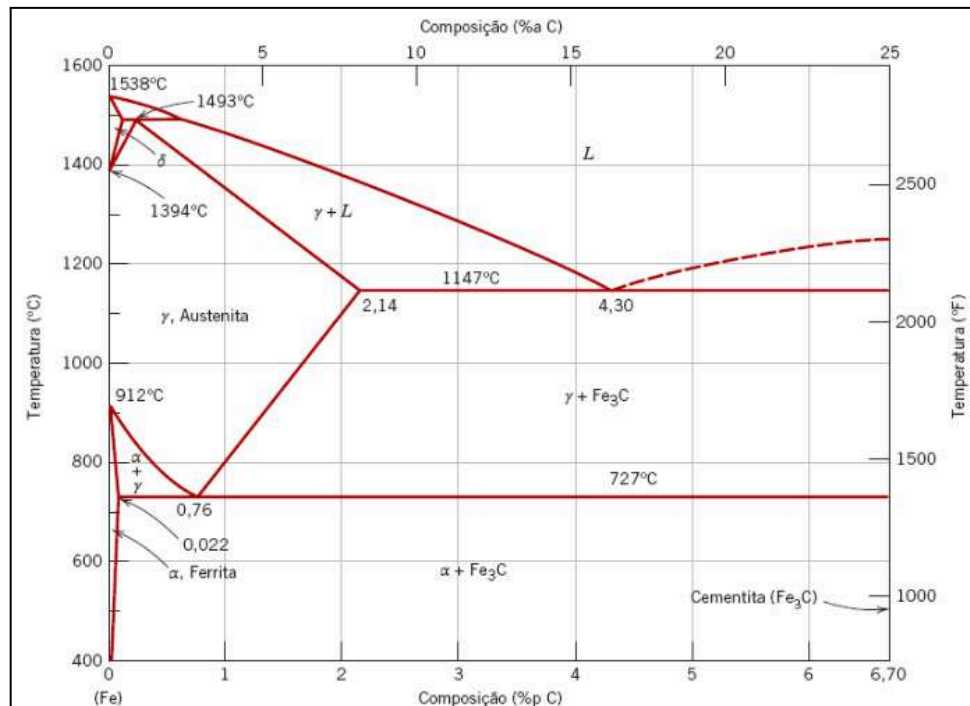
2.6.3 Corrosão e Proteção de Aços

A degradação dos materiais metálicos por corrosão é uma das principais causas de falhas estruturais em ambientes agressivos, como os encontrados em usinas hidrelétricas. Segundo Callister (2020), a corrosão é um processo eletroquímico espontâneo em que ocorre a oxidação do metal em presença de um eletrólito, resultando na deterioração gradual do material. Entre os mecanismos de proteção mais eficazes está a passivação, fenômeno em que certos metais, como o aço patinável, formam uma película de óxidos estável e aderente que impede o avanço da corrosão. Essa propriedade é reforçada com a adição de elementos como cobre, cromo e níquel, que estão presentes na composição química do aço USI SAC 350 e nos consumíveis do tipo E81T1-W2C. Dessa forma, a escolha correta do consumível de soldagem contribui diretamente para a resistência à corrosão da junta, fator determinante na durabilidade do equipamento.

2.6.4 Diagrama de Fases Ferro-Carbono e Microestrutura dos Aços

Conforme Figura 13 o comportamento mecânico e térmico dos aços pode ser explicado com base no diagrama de fases ferro-carbono, que é amplamente utilizado para prever transformações microestruturais durante o aquecimento e resfriamento de ligas ferrosas. Segundo Callister (2020) a microestrutura do aço pode conter diferentes fases, como perlita, ferrita, cementita e martensita, dependendo da taxa de resfriamento e da composição do material. Durante o processo de soldagem, o intenso gradiente térmico gera regiões com diferentes microestruturas ao longo da junta, como a zona fundida, a ZTA e o metal base. A ZTA, em particular, pode apresentar endurecimento localizado devido à formação de martensita, afetando diretamente a tenacidade e a resistência à trinca onde a escolha do consumível e o controle dos parâmetros de soldagem são decisivos para minimizar esses efeitos indesejáveis e garantir uma transição gradual de propriedades entre as regiões da solda.

Figura 13 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro



Fonte: Callister (2020)

2.6 Ensaios Mecânicos Aplicados

Para a avaliação da qualidade e do desempenho das juntas soldadas, especialmente em estruturas críticas como condutos forçados de usinas hidrelétricas, é fundamental a realização de ensaios mecânicos e metalúrgicos. Esses ensaios permitem identificar a conformidade das propriedades da solda em relação aos requisitos normativos e de projeto. A seguir, são descritos os principais métodos de ensaios mecânicos empregados neste estudo.

2.6.1 Ensaio de tração

Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns é conduzido sob tração. Como será visto, o ensaio de tração pode ser empregado para caracterizar várias propriedades mecânicas dos materiais que são importantes para projetos. (Callister 2020 p.127).

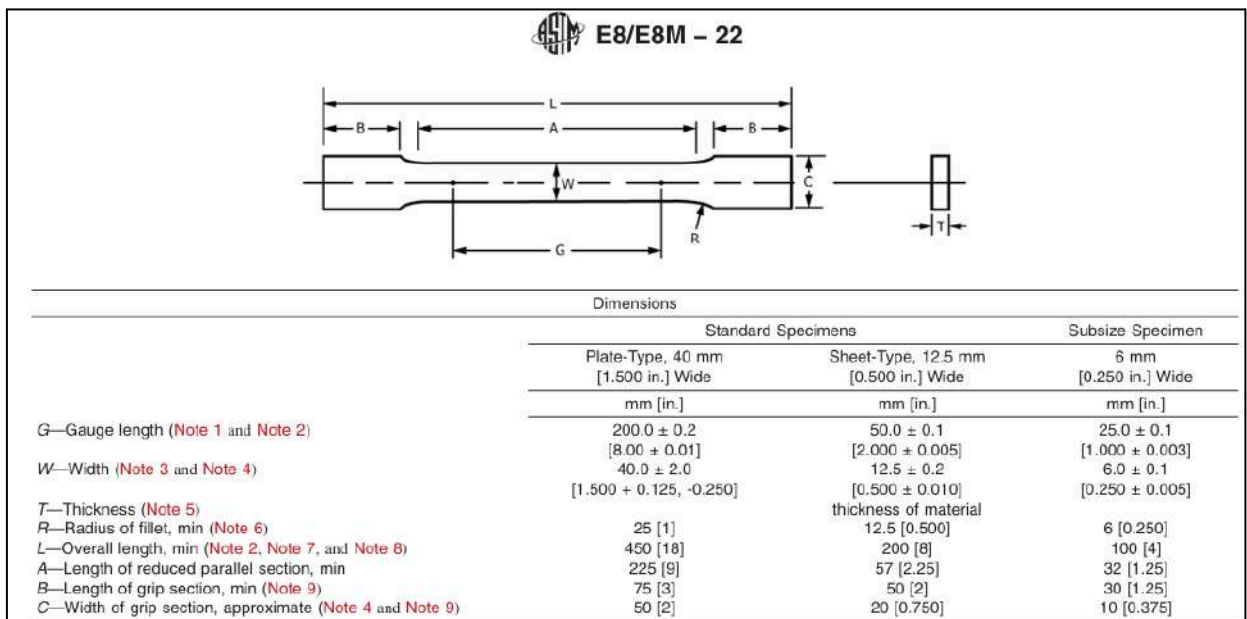
O ensaio de tração é um dos métodos mais tradicionais para a caracterização mecânica de materiais onde consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente até a fratura da amostra, permitindo a determinação de propriedades como o limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento total. No caso de juntas

soldadas, este ensaio avalia a capacidade do metal de solda e das zonas adjacentes em resistir a esforços mecânicos.

O ensaio de tração utilizado em corpos de provas usinados ou retirados a partir de uma amostra de um determinado lote ou peça, descreve propriedades como ductilidade, limite de escoamento, alongamento, resistência mecânica, quando submetidas a uma força uniaxial (ASTM E8, 2022).

O carregamento deve ocorrer de forma axial ao corpo de prova assegurando a ancoragem por meios de garras de fixação do dispositivo, alinhadas ao centro do corpo de prova durante a separação entre as cabeças pela região estreitada na ruptura, (ASTM 370). A Figura 14 demonstra o padrão de usinagem do corpo de prova para teste de tração conforme a norma ASTM E8-22.

Figura 14 - Corpo de prova padrão para ensaio de tração



Fonte : ASTM E8 (2022)

O resultado do ensaio permite ainda observar o modo de ruptura da amostra, que pode indicar, por exemplo, se a falha ocorreu no metal base, na zona fundida ou na zona termicamente afetada, o que é relevante para a validação da qualidade da solda.

2.6.2 Dureza

A dureza de um material é definida como sua resistência à deformação

plástica localizada, geralmente avaliada por meio da impressão permanente. O equipamento utilizado para esse tipo de ensaio é o durômetro, que aplica uma carga controlada sobre a superfície do material por meio de um penetrador padronizado. A profundidade ou o tamanho da impressão resultante é então relacionado a um número de dureza: quanto mais dúctil for o material, maior e mais profunda será a impressão, e menor será o índice de dureza (Santos, 2020).

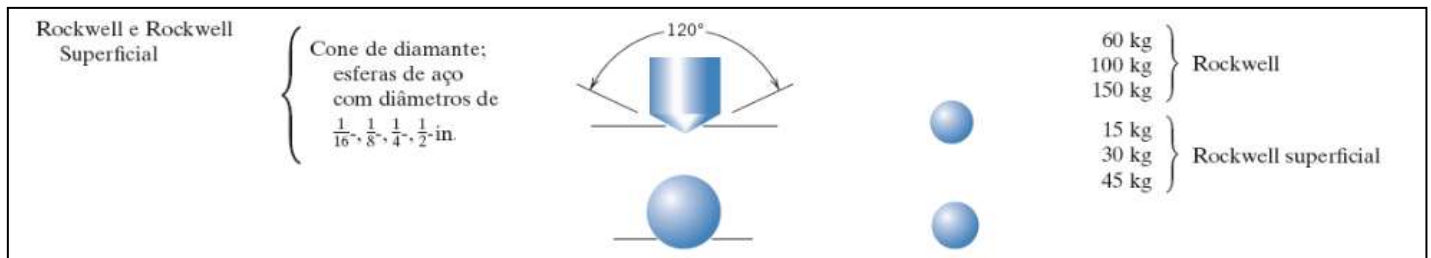
A profundidade ou o tamanho da impressão (indentação) resultante é medida e então relacionada a um número de dureza, quanto mais macio é o material, maior e mais profunda é a impressão, e menor é o número-índice de dureza. As durezas medidas são apenas relativas (em vez de absolutas), e deve-se tomar cuidado ao comparar valores determinados por técnicas diferentes (Callister, 2020 p.146).

O método Rockwell é amplamente utilizado para medição de dureza devido à sua simplicidade, rapidez e por não exigir habilidades técnicas especializadas. Dentre suas escalas, as mais empregadas na caracterização de materiais metálicos são a Rockwell C (HRC), utilizada para materiais de alta dureza, e a Rockwell B (HRB), aplicada em materiais de baixa a média dureza. Ele se baseia na aplicação de diferentes cargas e tipos de penetradores, o que permite sua utilização em uma ampla variedade de materiais, especialmente ligas metálicas e alguns polímeros. Os penetradores variam entre esferas de aço endurecido, com diâmetros de 1,58 mm a 12,70 mm, e o penetrador cônico de diamante (Brale), este último destinado aos materiais mais duros (Callister, 2020 p.146).

O método Rockwell B (HRB) é um dos procedimentos mais utilizados para determinação da dureza em metais de baixa a média resistência, como aços recozidos, ligas de cobre e alumínio. Nesse método, utiliza-se um penetrador esférico de aço temperado com diâmetro de 1,58 mm e uma carga total de 100 kgf.

A Figura 15 compara os principais ensaios de dureza Rockwell destacando os tipos de penetradores, geometrias de impressão e cargas aplicadas. Cada método é indicado para diferentes aplicações e faixas de materiais, sendo amplamente utilizado para avaliar a resistência à deformação localizada.

Figura 15 - Técnicas de ensaio de dureza rockwell

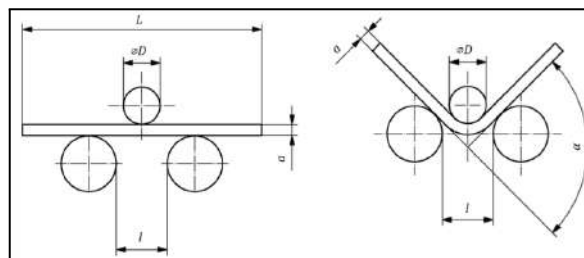


Fonte : Adaptado de Callister (2020)

2.6.3 Dobramento

O ensaio de dobramento consiste em submeter um corpo de prova de seção transversal redonda, quadrada, retangular ou poligonal a uma deformação plástica por dobramento, sem alterar a direção da força de carregamento até que um ângulo especificado de dobramento seja atingido, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Ensaio de dobramento para uma junta soldada



Fonte : NBR ISO 7438 (2022)

A soldagem é realizada de forma transversal ao eixo longitudinal do corpo de prova, sendo o ensaio de dobramento conduzido sobre a junta soldada para avaliar a ductilidade e a presença de descontinuidades. Esse tipo de ensaio permite verificar a resistência da solda à formação de trincas durante a deformação, sendo aplicado a produtos ferrosos e não ferrosos (ASTM E190, 2021).

O carregamento é conduzido através de um cutelo guiado por duas guias laterais por um material endurecido flexionada sobre uma matriz em formato de “U” até atingir 180°, de modo que as superfícies permaneçam paralelas, conforme estabelece a ASTM E190 (2021).

2.6.4 Ensaio macrográfico

A macrografia permite a observação das características estruturais dos metais a olho nu ou com auxílio de baixa ampliação, sendo útil na identificação de defeitos como trincas, segregações, porosidades, linhas de solda e estrutura de solidificação em peças fundidas e laminadas (Colpaert, 2008).

Os ataques macroscópicos são realizados com reagentes que destacam diferenças de composição química ou estrutura, permitindo visualizar zonas segregadas, orientação da estrutura e descontinuidades internas (Colpaert, 2008).

Segundo Colpaert (2008) o procedimento macroscópico envolve várias etapas sistemáticas. Primeiramente, realiza-se o corte da amostra, utilizando serra apropriada para evitar alterações térmicas ou deformações, em seguida, a superfície cortada passa por lixamento, com lixas de granulações progressivas e, se necessário, um polimento preliminar, visando obter uma superfície plana e limpa. Após o preparo mecânico, a amostra é submetida a um ataque químico, onde se aplica um reagente específico (como ácido nítrico diluído em álcool ou outros ácidos apropriados), com o objetivo de revelar a estrutura interna. O reagente atua de forma diferenciada sobre as fases ou regiões da peça, tornando visíveis as características estruturais da junta.

2.6.5 Ensaio não destrutivo (US) - Ultrassom

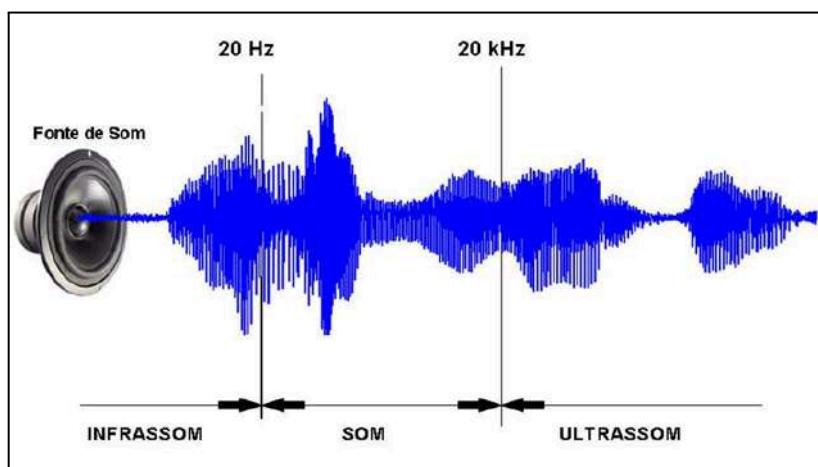
Segundo a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção ABENDI (2024), essa técnica se baseia na emissão de ondas sonoras de alta frequência, que se propagam no interior do material e são refletidas ao encontrarem interfaces como trincas, inclusões ou variações de densidade. O sinal refletido é captado por um transdutor, permitindo avaliar a posição e a extensão do defeito.

As ondas ultrassônicas podem se propagar em diferentes modos, como ondas longitudinais, transversais, superficiais e de placa, sendo a escolha determinada pelo tipo de peça e a natureza da inspeção. Ainda de acordo com a ABENDI, os transdutores variam conforme a aplicação: retos (0°) para ondas longitudinais, angulares (45° , 60° , 70°) para inspeção de soldas com ondas transversais, e duplo cristal para inspeções de alta sensibilidade como medição de espessuras e varreduras em metal de base de juntas soldadas.

As ondas acústicas ou som propriamente ditos, são classificados de acordo com a sua frequência e medidos em ciclos por segundo, ou seja, o número que passa por segundo e pelo nossos ouvidos.

As frequências sonoras superiores a 20.000 Hz são inaudíveis ao ouvido humano e são denominadas frequências ultrassônicas (ABENDI, 2024). Esse conceito pode ser melhor visualizado na Figura 17, que apresenta a faixa de frequências do espectro sonoro e destaca a região ultrassônica.

Figura 17 - Campo de audibilidade das vibrações mecânicas



Fonte: ABENDI (2024)

A técnica se destaca pela sua elevada capacidade de detecção, rapidez nos resultados e por não comprometer a integridade do componente inspecionado, sendo assim um ensaio não destrutivo.

2.6.6 Ensaio não destrutivo (LP) - Líquido penetrante

O ensaio por líquido penetrante (LP) é um método de ensaio não destrutivo amplamente utilizado para a detecção de descontinuidades abertas à superfície em materiais metálicos e não metálicos não porosos, como trincas, poros, vazamentos e fissuras. O líquido penetrante é aplicado com pincel, por pulverização através de pistola ou com a embalagem aerossol ou mesmo por imersão da peça no tanque contendo o produto e, então, aguarda-se um certo tempo para que ocorra a infiltração nas descontinuidades por isso este método está baseado no fenômeno da capilaridade, que é o poder de um líquido de fluir em áreas extremamente pequenas devido à sua baixa tensão superficial (Metal chek, 2024).

Segundo a norma ASME V (2023), o ensaio deve ser conduzido dentro de faixas de temperatura ambiente entre 10°C e 52°C, sendo obrigatória a verificação da sensibilidade do sistema utilizando um painel padrão. A ASME também estabelece os valores mínimos de iluminação: 1000 lux para ensaios com penetrante visível e 1000 μ W/cm² para penetrantes fluorescentes sob luz UVA. O processo completo deve contemplar todas as etapas: limpeza prévia, aplicação do penetrante, tempo de penetração, remoção do excesso, aplicação do revelador e inspeção visual dentro do tempo especificado.

Segundo a ASME Seção V (2023), os líquidos penetrantes são divididos em dois tipos principais: fluorescentes (visíveis sob luz UV, mais sensíveis do tipo 1) e visíveis (coloração vermelha, para luz branca do tipo 2). Cada tipo pode usar diferentes métodos de remoção do excesso: com água, solvente ou emulsificantes. A escolha do sistema depende da aplicação e da sensibilidade requerida. A Figura 18 ilustra a aplicação dos líquidos penetrantes dos tipos fluorescente e visível, destacando as diferenças na visualização das indicações.

Figura 18 - Aplicação do LP do tipo fluorescente tipo 1 e visíveis tipo 2



Fonte: Metal-chek (2024)

Os ensaios não destrutivos são fundamentais para detectar defeitos sem danificar os materiais, garantindo segurança e confiabilidade. Aplicados conforme normas, como a ASME Seção V, ajudam a prevenir falhas e prolongar a vida útil dos equipamentos.

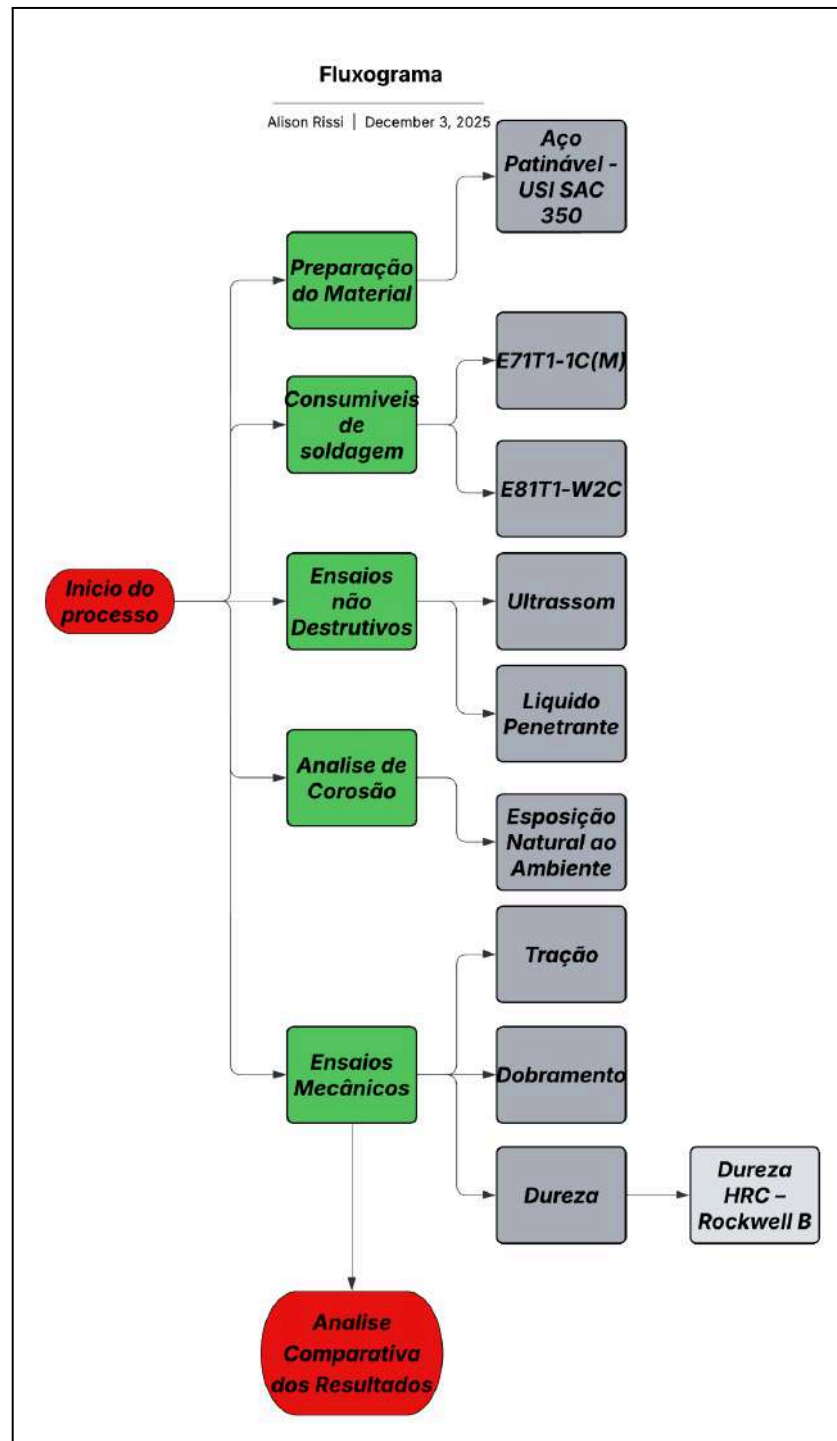
3 METODOLOGIA

Este estudo tratou-se de uma pesquisa experimental e comparativa, com abordagem quantitativa onde o objetivo principal foi avaliar o desempenho mecânico e a resistência à corrosão de juntas soldadas em aço patinável USI SAC 350

utilizando dois tipos de consumíveis de soldagem: E71T1-1C(M) e E81T1-W2C, ambos aplicados pelo processo de soldagem com arame tubular.

A Figura 19, apresenta um fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados no estudo comparativo de consumíveis FCAW em aço patinável USI SAC 350.

Figura 19 - Fluxograma



Fonte: Autor (2025)

As técnicas utilizadas, para alcançar os objetivos propostos, incluíram pesquisa bibliográfica e ensaios experimentais, conforme descrito a seguir.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Metal de base : USI SAC 350

Conforme o Quadro 3, o material de base empregado neste trabalho é o aço patinável USI SAC 350, fabricado pela Usiminas (Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais). Foi empregado na confecção dos corpos de prova soldados, com o objetivo de avaliar o desempenho comparativo, diferentes consumíveis de arame tubular.

Quadro 3 - Composição química do aço USI SAC 350

NORMA	GRAU	ESPESSURA(mm)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							PROPIEDADES MECÂNICAS		
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	LE(Mpa)	LR(Mpa)	DEFORMAÇÃO(%)
USI SAC	350	6,00 A 101,60	0,25	0,50 a 1,50	1,5	0,06	0,02	0,04	0,6	350 Min	500 a 600	20

Fonte: Adaptado de catálogo da USIMINAS (2025)

3.1.2 Consumíveis de soldagem

Para a soldagem dos corpos de prova, foi utilizado dois consumíveis do tipo arame tubular com proteção gasosa ativa, sendo o gás empregado 100% de dióxido de carbono (CO₂), conforme recomendação dos fabricantes. Ambos os arames possuem diâmetro de 1,2 mm, medida amplamente utilizada no processo FCAW em fábrica.

O primeiro consumível é o E71T-1C(M), classificado na norma AWS A5.20, se trata de um arame tubular com diâmetro de 1,2 mm de uso geral, indicado para soldagem de aços carbono e de baixa liga. A designação “C(M)” refere-se à sua compatibilidade tanto com CO₂ puro (C) quanto com misturas gasosas contendo argônio (M), embora, neste estudo, foi adotado exclusivamente o CO₂ como gás de proteção.

O segundo consumível utilizado foi o E81T1-W2C, classificado na norma AWS A5.29 também com diâmetro de 1,2 mm, desenvolvido especificamente para soldagem de aços patináveis. O sufixo “W2” indica sua adequação a ligas resistentes a corrosão atmosféricas, como USI SAC 350, assegurando a sua compatibilidade com o metal de base.

A utilização desses dois arames tubulares permitiu a análise comparativa do desempenho, quanto aos aspectos metalúrgicos e mecânicos das juntas soldadas sob as mesmas condições de processo, como parâmetros de soldagem.

3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS (CPs)

Para a realização dos ensaios mecânicos neste trabalho, os corpos de prova (CPs), foram soldados a partir de chapas de aço patinável USI SAC 350, com espessura nominal de 6,35 mm. As chapas foram usinadas em dimensões adequadas para a execução dos cordões de solda e posterior a retirada dos CPs, conforme os requisitos das normas específicas de cada ensaio.

O corte e o dimensionamento inicial das chapas seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM E8/E8M-22, garantindo a conformidade dos corpos de prova com os parâmetros exigidos para os ensaios de tração. Essa norma define métodos padronizados para obtenção de propriedades como limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e redução de área, sendo amplamente aplicada em testes de materiais metálicos à temperatura ambiente.

A extração dos corpos de prova se deu por meio de serra fita, utilizando líquido refrigerante para assegurar cortes limpos, com baixa geração de calor e sem introdução de tensões residuais ou defeitos superficiais. Após o corte, as peças passaram por um processo de limpeza superficial utilizando esmerilhadeira, para preparar adequadamente as extremidades. Logo após, foi realizada a soldagem das juntas, seguindo o mesmo procedimento para todos os quatro corpos de prova, de modo a assegurar padronização e repetibilidade na execução.

3.3 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

A execução dos cordões de solda foi realizada na chapa de aço patinável USI SAC 350, com espessura de 6,35mm, preparadas em junta de topo e com chanfro em X, e por fim sendo executada a soldagem na posição plana.

Os parâmetros de soldagem foram padronizados para ambos os consumíveis, a fim de garantir a comparabilidade dos resultados. A corrente de soldagem utilizada foi de 200 A e a tensão de arco 28,0 V. O gás de proteção utilizado foi o CO₂ puro, com vazão de 10 L/min. Esses mesmos parâmetros foram aplicados tanto para o

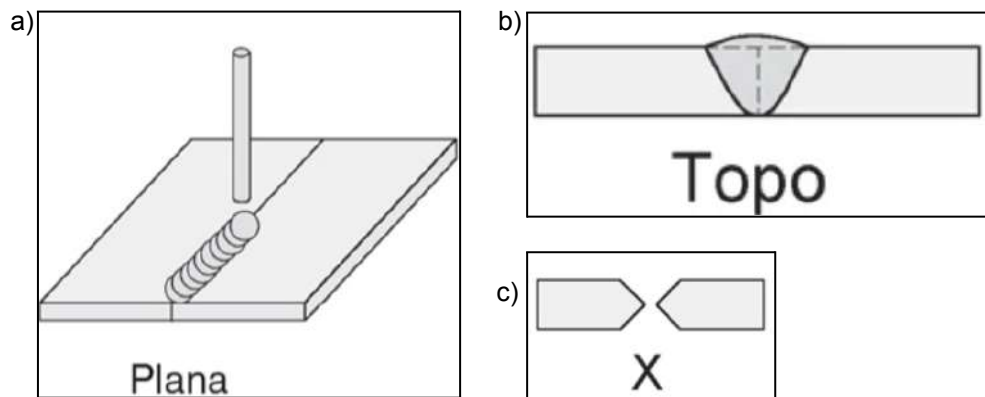
arame E71T-1C(M) quanto para o E81T1-W2C, assegurando condições equivalentes de deposição e permitindo uma análise comparativa consistente entre os dois consumíveis.

Em casos possíveis de execução de soldagem dos dois lados da junta, chanfros em X, K, duplo U ou duplo J podem ser considerados.

Abaixo podemos observar a Figura 20 indicando o tipo de chanfro, posição de soldagem e o tipo de junta executada neste trabalho.

Figura 20: Tipos de chanfro e junta

a) Posição de soldagem plana. b) Junta de topo. c) Chanfro em X.

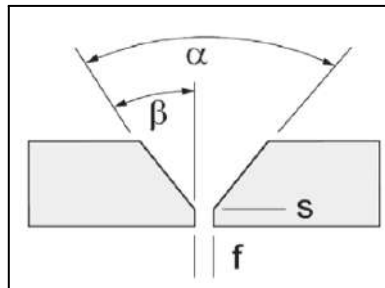


Fonte: Adaptado de Vilani (2016)

Para a preparação das faces, foi adotado o chanfro com ângulo de bisel de 60° e abertura de raiz de 2 mm, conforme a Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS). O bisel foi preparado por meio do processo de fresamento, método que foi escolhido para garantir boa precisão dimensional e evitar o aquecimento localizado da peça, o que contribuiu para a preservação das propriedades mecânicas do material.

Um chanfro é definido por seus elementos ou características dimensionais, como ilustrado na Figura 21. Os principais elementos de um chanfro são: face da raiz ou nariz (s), abertura da raiz ou fresta (f), ângulo de bisel (b) e ângulo de chanfro (a), sendo este último a soma dos ângulos de bisel dos componentes da junta (Villani, 2016, p. 14).

Figura 21: Características dimensionais de chanfros usados em soldagem
Face da raiz ou nariz(s), Abertura da raiz ou fresta(f), Ângulo de bisel(b) e Ângulo de chanfro(a).



Fonte: Vilani (2016)

3.4 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Com o objetivo de garantir a qualidade das juntas soldadas e verificar a presença de descontinuidades ou defeitos que comprometam a integridade estrutural do componente, foram realizados ensaios não destrutivos (END) do tipo líquido penetrante (LP) e ultrassom (US). A escolha desses métodos foi baseada nas normas técnicas aplicáveis, principalmente a ASME Section V, que trata dos requisitos para ensaios não destrutivos.

3.4.1 Ensaio por Líquido penetrante (LP)

O ensaio por líquido penetrante foi utilizado para a detecção de descontinuidades superficiais, tais como trincas e porosidades, sendo executado conforme as diretrizes estabelecidas pela norma ASME Section V, Artigo 6, que apresenta os requisitos gerais para aplicação do método, incluindo os tipos de penetrante, revelador e os tempos de atuação de cada etapa em materiais metálicos, com foco na detecção de descontinuidades abertas à superfície, como trincas e porosidade (ASME V, 2023)

Utilizou-se o penetrante do Tipo 1, VP 30, lavável com água, que permite a remoção do excesso da superfície por simples lavagem, facilitando a limpeza sem comprometer a sensibilidade do ensaio, foi aplicado o revelador D70, do tipo não aquoso, adequado para uso com este penetrante.

O ensaio foi realizado sobre o acabamento das soldas dos dois corpos de prova. A Figura 22 apresentou o momento da execução dos ensaios de líquido

penetrante, realizados com o objetivo de detectar possíveis descontinuidades superficiais nas juntas soldadas.

Figura 22 : Ensaio de líquido penetrante



Fonte: Autor (2025)

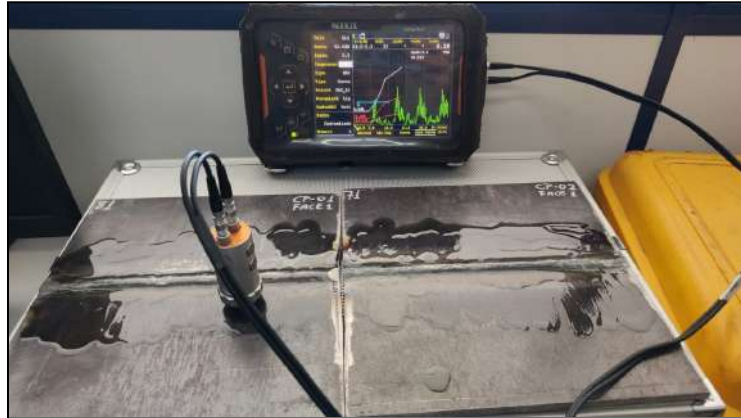
3.4.2 Ensaio por Ultrassom (US)

O ensaio por ultrassom teve como objetivo detectar descontinuidades internas não identificadas por métodos superficiais, como falta de fusão, inclusões de escória, porosidades e trincas internas. Sendo adotado o método de pulso-eco, utilizando o transdutor de duplo cristal e de feixes sônicos angulares de 60° e 70° , com frequência de 4 MHz. O acoplante utilizado foi o carboximetilcelulose, o qual serve para facilitar a transmissão das ondas ultrassônicas entre o transdutor e a peça a ser inspecionada, eliminando o ar que poderia interferir na propagação do sinal. Esse conjunto de parâmetros permitiu uma inspeção eficiente das regiões soldadas e da zona termicamente afetada, possibilitando a identificação precisa de descontinuidades ao longo da junta.

A inspeção foi conduzida conforme os requisitos estabelecidos no ASME Section V, Artigo 4, que especifica os critérios para ensaios de ultrassom, abrangendo desde os procedimentos de calibração até as técnicas de varredura, avaliação dos sinais e aceitação dos resultados.

Como primeira etapa da inspeção, foi utilizado um transdutor duplo cristal, aplicado para avaliação do metal de base e da ZTA. A Figura 23 ilustra o momento da inspeção por ultrassom nos corpos de prova.

Figura 23 : Ensaio de ultrassom - duplo cristal



Fonte: Autor (2025)

A Figura 24, mostra a segunda etapa do ensaio, que foi realizada utilizando transdutores angulares de 60° e 70°, com o objetivo de avaliar a integridade interna da junta soldada. Essa abordagem permitiu detectar possíveis descontinuidades ao longo da junta nos dois CPs, o que garantiu uma análise completa do metal depositado.

Figura 24 : Ensaio de ultrassom - transdutores angulares



Fonte: Autor (2025)

A aplicação dos ensaios de líquido penetrante e ultrassom nos corpos de prova, permitiu verificar que as juntas soldadas estão isentas de descontinuidades críticas, assegurando a qualidade superficial e interna da solda. Garantiu-se assim, que os corpos de prova estão em conformidade com os requisitos para a etapa

subsequente de ensaios mecânicos, sem a presença de defeitos que possam interferir ou comprometer os resultados desses testes.

3.5 ANÁLISE DE CORROSÃO

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos materiais soldados frente à ação de agentes atmosféricos, foi realizada uma análise de corrosão por meio de exposição natural ao meio ambiente. Esse tipo de ensaio é adequado para materiais como o aço patinável USI SAC 350, cujo mecanismo de proteção se baseou na formação gradual de uma pátina estável e aderente, que reduziu a taxa de corrosão ao longo do tempo. Ensaio artificial em laboratórios, como a névoa salina, não reproduzem fielmente esse processo, podendo superestimar a corrosividade e comprometer a análise do desempenho real do material.

3.5.1 Exposição natural ao meio ambiente

Os corpos de prova soldados foram instalados em ambiente externo, sem qualquer controle climático, seguindo os requisitos da norma ASTM G50-10, que estabelece as práticas para condução de ensaios de corrosão atmosférica em metais expostos ao tempo. Essa norma define as condições gerais de exposição, incluindo a seleção do local, posicionamento dos painéis, construção das estruturas de suporte e exigências para assegurar uniformidade e confiabilidade nos resultados ao longo do período de ensaio.

De acordo com a ASTM G50, as amostras devem ser instaladas em áreas abertas, bem drenadas e livres de sombras de árvores, edificações ou qualquer elemento que possa alterar a incidência natural de chuva, vento, radiação solar e poluentes atmosféricos. A norma recomenda que os corpos de prova sejam montados em racks ou suportes inclinados a 30° em relação à horizontal, proporcionando condições adequadas para a formação da pátina protetora típica do aço patinável USI SAC 350.

Embora a ASTM G50 recomende períodos de exposição mais longos, preferencialmente iguais ou superiores a 1 ano, os corpos de prova ficaram expostos por um período de 3 meses. Esse intervalo reduzido, foi adotado devido às limitações de tempo previstas para a execução do trabalho. Ainda assim, o período escolhido permitiu observar o início do comportamento corrosivo e a formação inicial

da pátina no aço patinável USI SAC 350, fornecendo informações relevantes para comparação entre os consumíveis de soldagem estudados.

Conforme ilustrado na Figura 25, os corpos de prova foram posicionados a um ângulo de 30°, em ambiente externo, permanecendo expostos diretamente às condições naturais de chuva e exposição solar durante o período de ensaio. Essa inclinação foi adotada para favorecer o escoamento da água e a incidência uniforme da luz solar sobre a superfície, simulando de forma mais realista as condições de exposição em campo.

Figura 25 : Corpos de prova preparados a 30°



Fonte: Autor (2025)

3.6 METALOGRAFIA

Com o objetivo de avaliar a qualidade estrutural da junta soldada, realizou-se uma análise metalográfica dos corpos de prova soldados. A primeira etapa deste processo foi a análise macroscópica, descrita a seguir.

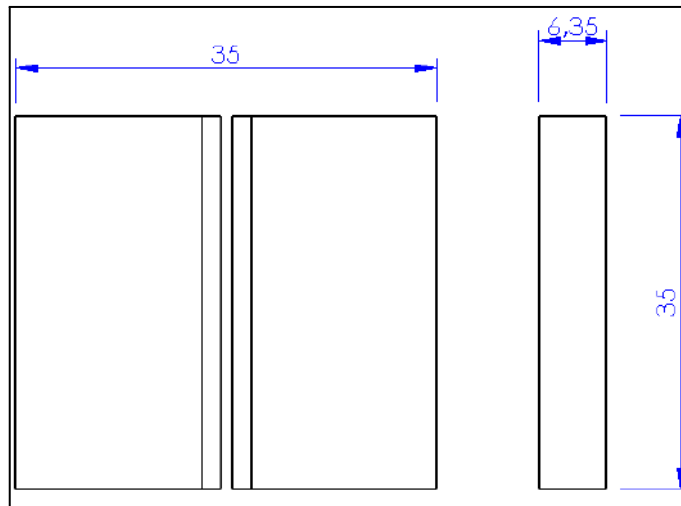
3.6.1 Macrografia

Para a realização deste procedimento, os corpos de prova foram primeiramente cortados em seções transversais, seguidos do embutimento em resina baquelite para facilitar o manuseio. Em seguida, realizou-se o lixamento sequencial com lixas de granulometria progressivas, garantindo o nivelamento e a

eliminação de riscos superficiais. Após o lixamento, as amostras foram lavadas e secas, procedendo-se então ao polimento e ao ataque químico com Nital 3%.

As dimensões dos corpos de prova apresentadas na Figura 26 correspondem ao primeiro corte das amostras, realizado antes do processo de embutimento para posterior lixamento.

Figura 26: Dimensões do corpo de prova



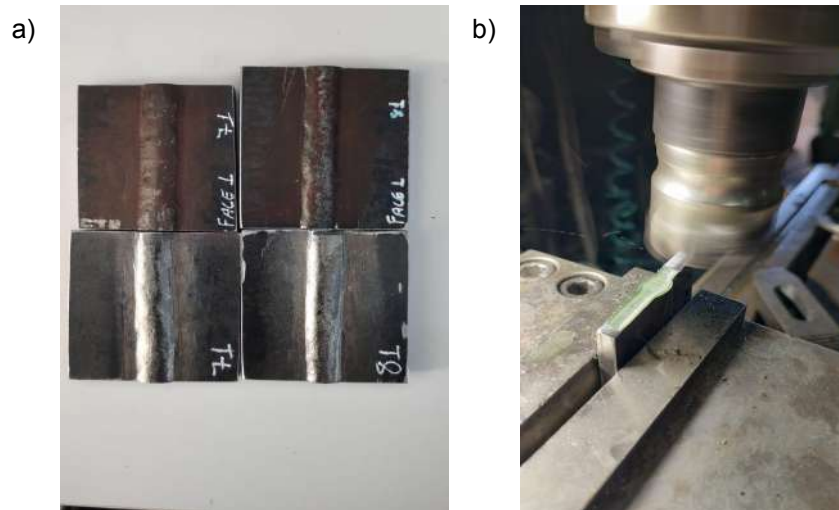
Fonte: Autor (2025)

As imagens obtidas após o ataque químico foram registradas e analisadas conforme os critérios estabelecidos por normas como a ASTM E340, que trata da preparação e avaliação da macrografia das soldas.

A coleta foi realizada em dois corpos de prova que foram expostos ao ambiente, já apresentando a formação natural da pátina, e em outros dois corpos de prova recentemente fabricados, que não foram expostos às condições atmosféricas.

A Figura 27 apresenta as amostras retiradas dos quatro corpos de prova, destinadas à preparação metalográfica, abrangendo tanto os corpos de prova expostos ao ambiente quanto os não expostos. Também é possível observar a realização do fresamento das amostras, executado com o objetivo de obter superfícies planas e uniformes, adequadas para as etapas subsequentes de lixamento e polimento.

Figura 27 – a) Amostras retiradas dos CPs, b) Fresamento



Fonte: Autor (2025)

Após o fresamento, as amostras foram cortadas em dimensões de 20 x 20 mm e, em seguida, submetidas ao processo de embutimento, conforme apresentado na Figura 28. O lixamento foi realizado com lixas de granulometrias 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, a fim de garantir uma superfície adequada para o polimento final. O polimento foi executado com pasta abrasiva de alumina, até a obtenção de uma superfície lisa, livre de riscos e pronta para o ataque químico.

Figura 28 – Amostras lixadas e embutidas



Fonte : Autor (2025)

3.7 ENSAIOS MECÂNICOS

Com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas do material utilizado, realizou-se ensaios de tração, dureza e dobramento dos corpos de prova soldados. Portanto, para que fosse possível observar o comportamento do material em condições de trabalho, foi necessário obter os parâmetros de comportamento, determinados por meio de ensaios mecânicos destrutivos (Santos, 2020, p. 33).

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina universal de ensaios, equipada com célula de carga calibrada.

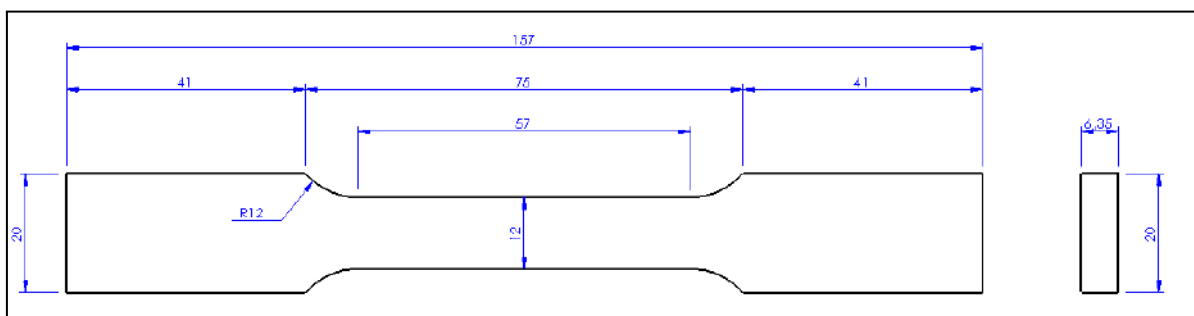
3.7.1 Tração

O ensaio de tração foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM E8/E8M-22, que padroniza os métodos para determinação das propriedades mecânicas de materiais metálicos submetidos à tração uniaxial à temperatura ambiente.

O corpo de prova utilizado para o ensaio de tração teve espessura de 6,35mm ($\frac{1}{4}$ "), enquanto as demais dimensões, como largura, comprimento total e comprimento da seção paralela reduzida, foram definidos conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM E8/E8M-22.

A Figura 29 indica as dimensões onde, para materiais metálicos em formato de chapa com espessura inferior a 12,5mm, a norma recomenda o uso de corpos de prova do tipo chapa estreita (subsize), com largura de 12 mm e comprimento mínimo da seção paralela reduzida de 57 mm, sendo o comprimento total mínimo de 200 mm e o comprimento de medição da seção útil (gauge length) de $50 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

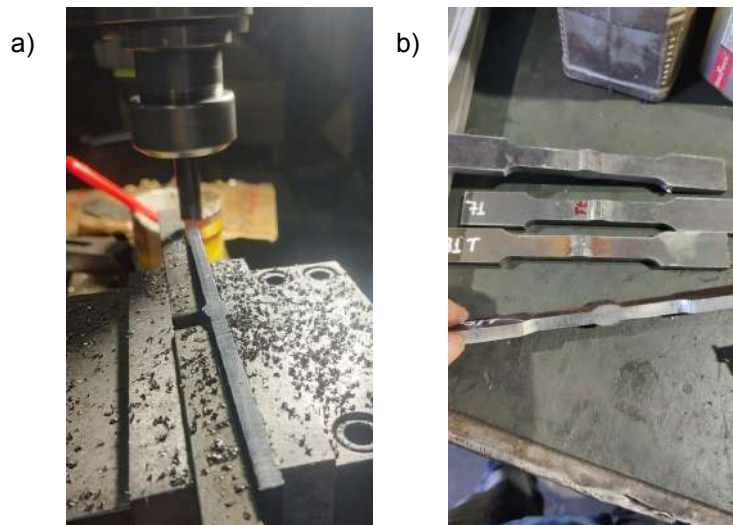
Figura 29: Dimensões do corpo de prova



Fonte: Autor (2025)

A Figura 30 mostra os corpos de prova sendo usinados e finalizados nas dimensões padronizadas pela norma, assegurando condições adequadas para a realização dos ensaios e a representatividade dos resultados obtidos.

Figura 30: Preparação dos corpos de prova;
a) Etapa do fresamento; b) Corpos de prova finalizados.



Fonte: Autor (2025)

3.7.2 Dureza

Com o intuito de avaliar a resistência superficial da junta soldada, foi realizado o ensaio de dureza Rockwell B (HRB) em pontos distintos do corpo de prova, abrangendo o metal de base, a zona termicamente afetada e o metal de solda. O procedimento baseou-se na norma ASTM E18-20, que estabelece os requisitos para a execução do ensaio de dureza utilizando o método Rockwell, incluindo tipo de penetrador, carga aplicada e critérios de medição para materiais metálicos.

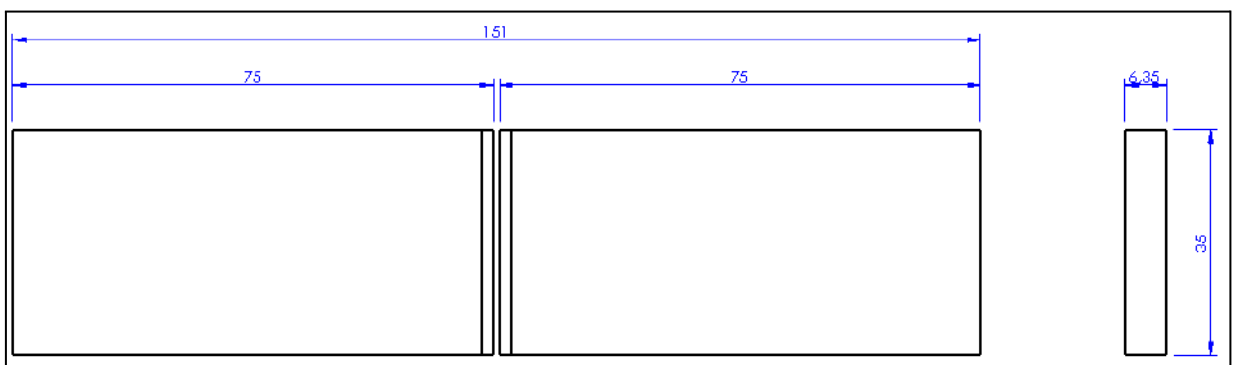
3.7.3 Dobramento

Com o objetivo de avaliar a qualidade da junta soldada e a ductilidade do metal depositado, realizou-se o ensaio de dobramento guiado, conforme os requisitos estabelecidos na norma ASME Section IX.

Com base na espessura da chapa de 6,35mm (1/4") e nos requisitos da

norma ASME Seção IX, calculou-se os parâmetros para a execução do ensaio de dobramento em corpos de prova do aço USI SAC 350 (P-Number 1), que exige alongamento mínimo de 20%. Seguindo as especificações da Tabela QW-466.1 da ASME Seção IX (2023, p. 243), os corpos de prova foram confeccionados com largura de 38 mm e comprimento de 150 mm, conforme ilustrado na Figura 31. Os corpos de prova foram submetidos a dobramento de 180° em torno de um mandril com raio de 12 mm.

Figura 31: Dimensões do corpo de prova para dobramento



Fonte: Autor (2025)

3.8 PREPARAÇÃO DAS CHAPAS E CORPOS DE PROVA

Na etapa de preparação, as chapas de aço patinável USI SAC 350 foram cortadas em dimensões de 270 x 135 mm, conforme ilustrado no Apêndice C, utilizando-se uma serra fita. Durante o corte, foram descartados 20 mm das extremidades de cada chapa, a fim de eliminar defeitos do processo de fabricação, em seguida foi adotado o padrão de chanfro em X de penetração total. O chanfro, bem como, a limpeza da superfície a ser soldada foi realizada com o uso de esmerilhadeira, conforme apresentados na Figura 32.

Figura 32: a) Corte dos CPs; b) Chanfro preparado para soldagem;
c) CPs prontos para a soldagem.

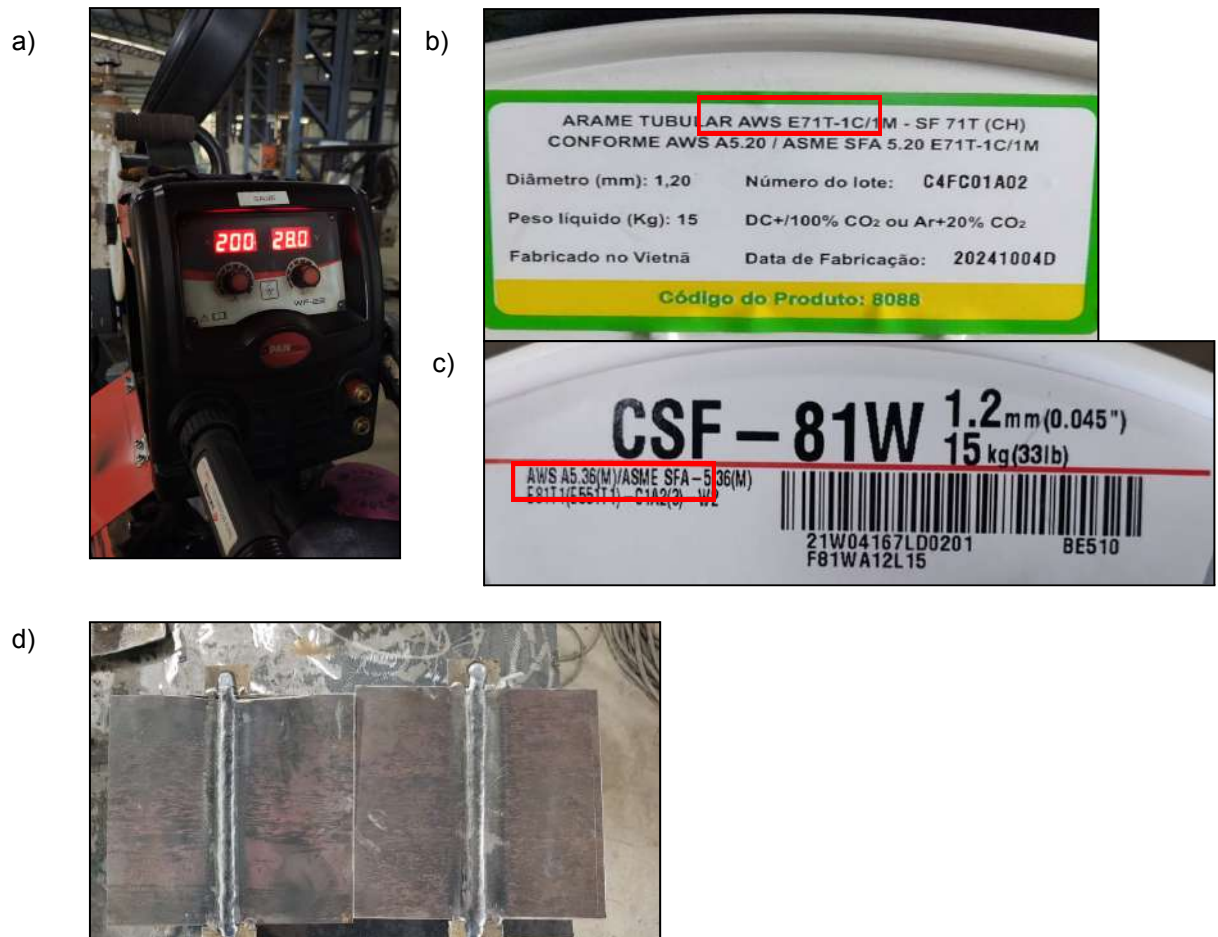


Fonte: Autor (2025)

3.9 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM

A soldagem foi realizada pelo processo FCAW, utilizando os arames tubulares E71T-1C(M) e E81T1-W2C. O procedimento foi executado de forma a manter as mesmas condições de soldagem para ambos os arames, assegurando a comparabilidade entre os resultados. Os parâmetros de soldagem empregados foram 200 A de corrente e 28.0 V de tensão de arco e a soldagem foi conduzida em posição plana. A Figura 33 apresenta o momento da execução da soldagem dos corpos de prova e também as duas especificações dos arames utilizados.

Figura 33: a) Parâmetros de soldagem. b) Consumível E71T-1C(M);
c) Consumível E81T1-W2C; d) CPs finalizados



Fonte: Autor (2025)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante a execução, foi possível observar boa estabilidade do arco elétrico e formação uniforme do cordão de solda nos dois arames. O nível de respingos foi baixo e o acabamento superficial satisfatório, sem ocorrência de defeitos visuais aparentes e com o objetivo de avaliar a integridade das juntas soldadas e observar o comportamento do material após a soldagem, foram realizados ensaios não destrutivos de Líquido penetrante e Ultrassom, além da exposição dos corpos de prova ao ambiente. Essas etapas permitiram verificar a qualidade dos cordões de solda e o desempenho superficial do aço patinável USI SAC 350 em condições naturais para a formação da pátina protetora.

No ensaio de ultrassom, a presença de defeitos internos como falta de fusão, falta de penetração ou até mesmo trincas poderia prejudicar diretamente o desenvolvimento dos ensaios mecânicos especialmente o ensaio de tração pois tais descontinuidades atuariam como concentradores de tensão, reduzindo a resistência e favorecendo rupturas prematuras.

Da mesma forma, no ensaio de líquido penetrante, a detecção de trincas ou porosidades superficiais indicaria fragilidades na superfície da junta, que também afetariam o desempenho mecânico e poderiam invalidar a representatividade dos resultados.

Os apêndices A e B, indicam os relatórios de Ultrassom e Líquido penetrante, indicando 100% de aprovação nos CPs ensaiados.

4.1 Exposição dos corpos de prova às condições ambientais

O objetivo dessa etapa foi avaliar o comportamento do aço patinável USI SAC 350 e das regiões soldadas quanto à formação da camada de óxidos protetora.

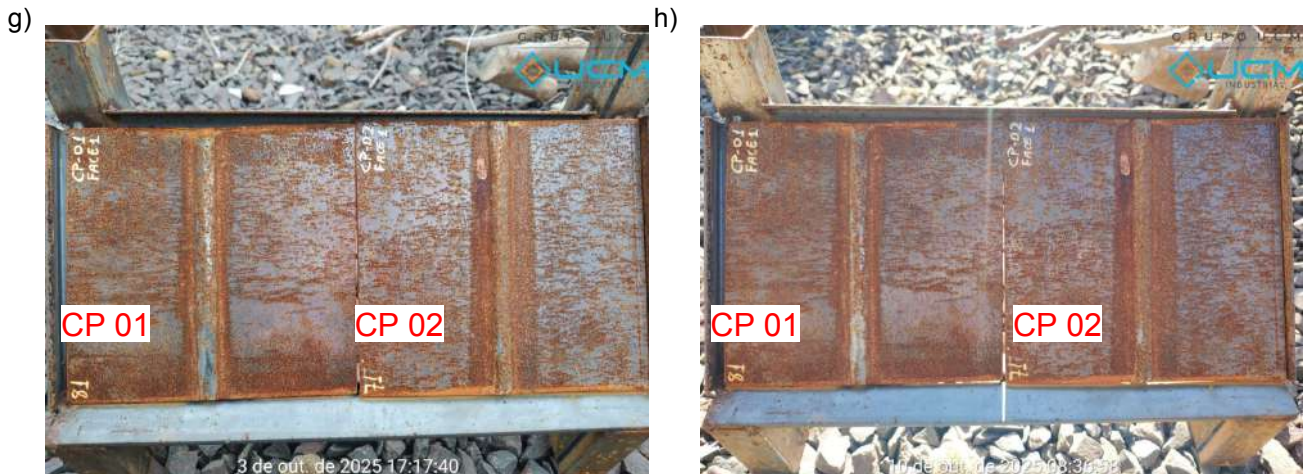
Os corpos de prova permaneceram expostos por um período inferior ao estabelecido pela norma, porém, conforme pode ser observado na Figura 34, já é possível identificar alterações de coloração e a formação evidente da pátina protetora em ambas as amostras, nos primeiros dias de exposição.

As imagens mostradas na Figura 34 foram registradas semanalmente, em intervalos de 7 dias, dando início ao ensaio no dia 22 de agosto de 2025 até 10 de outubro de 2025, com o objetivo de acompanhar visualmente a evolução da

coloração superficial e o desenvolvimento da pátina protetora nos corpos de prova ao longo do período de exposição.

Figura 34 - Corpos de prova durante o ensaio de exposição atmosférica e as datas que foram registradas as imagens : a) 22 de Agosto; b) 29 de Agosto; c) 05 de Setembro; d) 12 de Setembro; e) 19 de Setembro; f) 26 de Setembro; g) 03 de outubro; h) 10 de Outubro.





Fonte: Autor (2025)

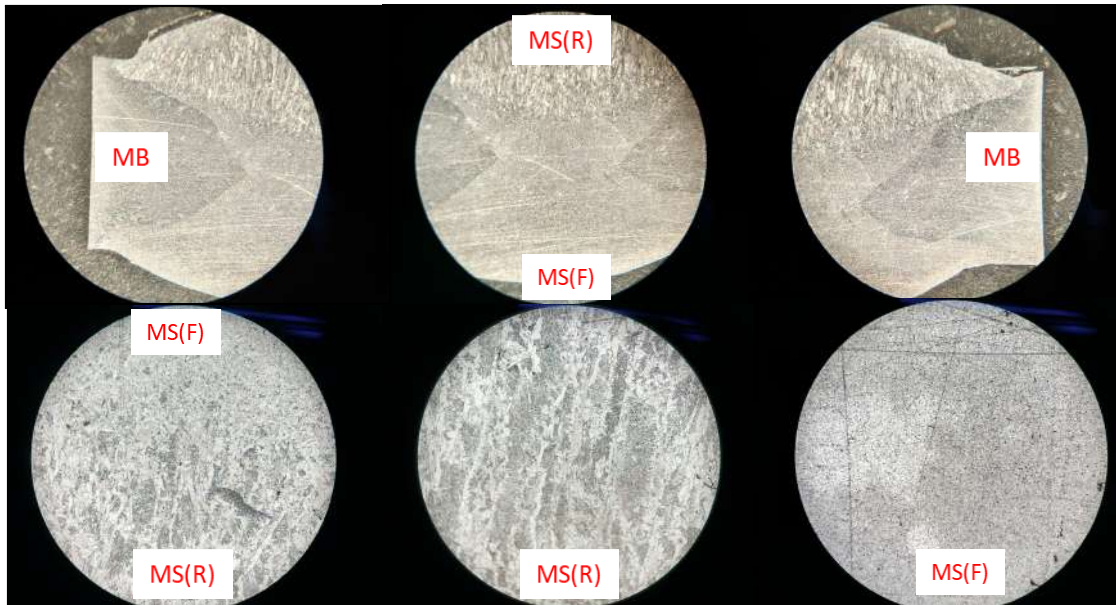
Nota-se que o corpo de prova 02, localizado à direita da imagem, onde foi utilizado o consumível E71T-1C(M), apresentou um início mais rápido no processo de formação da pátina, especialmente nas regiões da junta soldada e da ZTA. Já o corpo de prova 01, a esquerda da imagem, correspondente à soldagem realizada com o consumível E81T1-W2C, apresentou um desenvolvimento mais gradual da camada protetora, embora também demonstre o comportamento característico do aço patinável USI SAC 350 diante da exposição atmosférica.

4.2 Metalografia

Após a preparação e análise das amostras, a seguir são apresentadas as Figuras 35, 36, 37 e 38, que mostram as imagens metalográficas obtidas para cada corpo de prova analisado.

4.2.1 Corpo de Prova 01 - E71T-1 C(M)

Figura 35 – Amostras do corpo de prova 01 E71T-1 C(M) submetido à exposição atmosférica

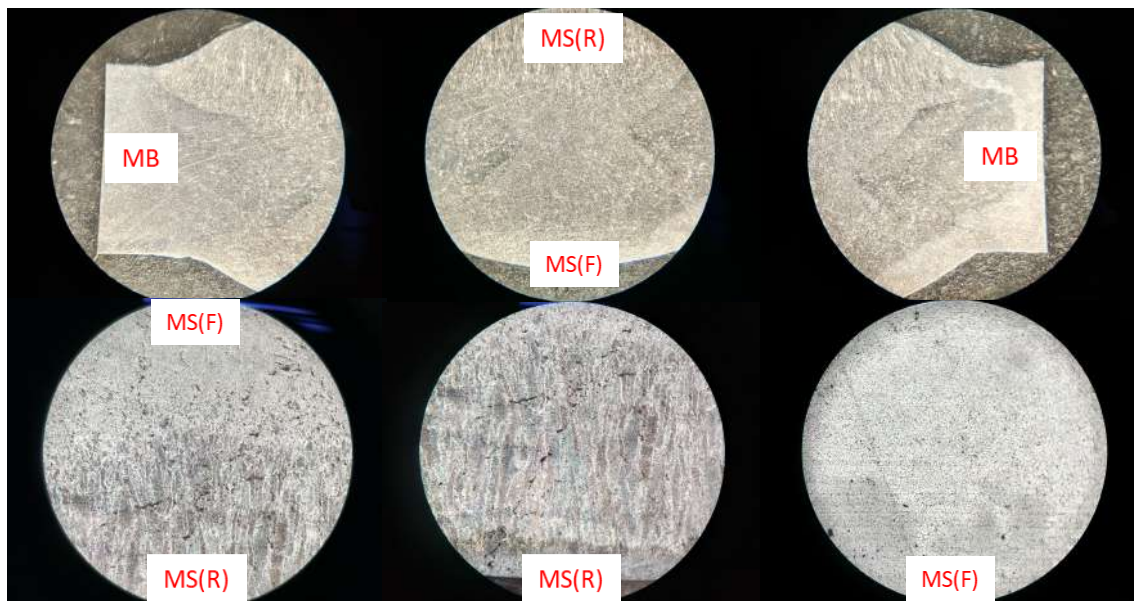


Fonte: Autor (2025)

4.2.2 Corpo de Prova 02 - E81T1-W2C:

Figura 36 – Amostras do corpo de prova 02 E81T1-W2C submetido à exposição atmosférica

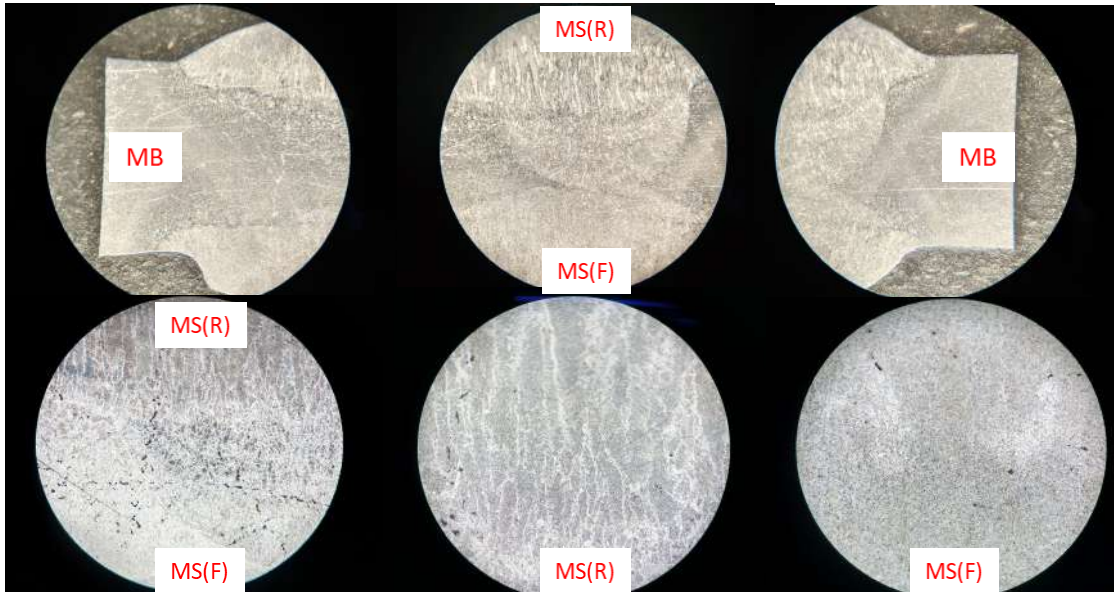
MB: Metal de base, MS(F): Metal de solda(face), MS(R): Metal de solda(raiz).



Fonte: Autor (2025)

4.2.3 Corpo de Prova 03 - E81T1-W2C:

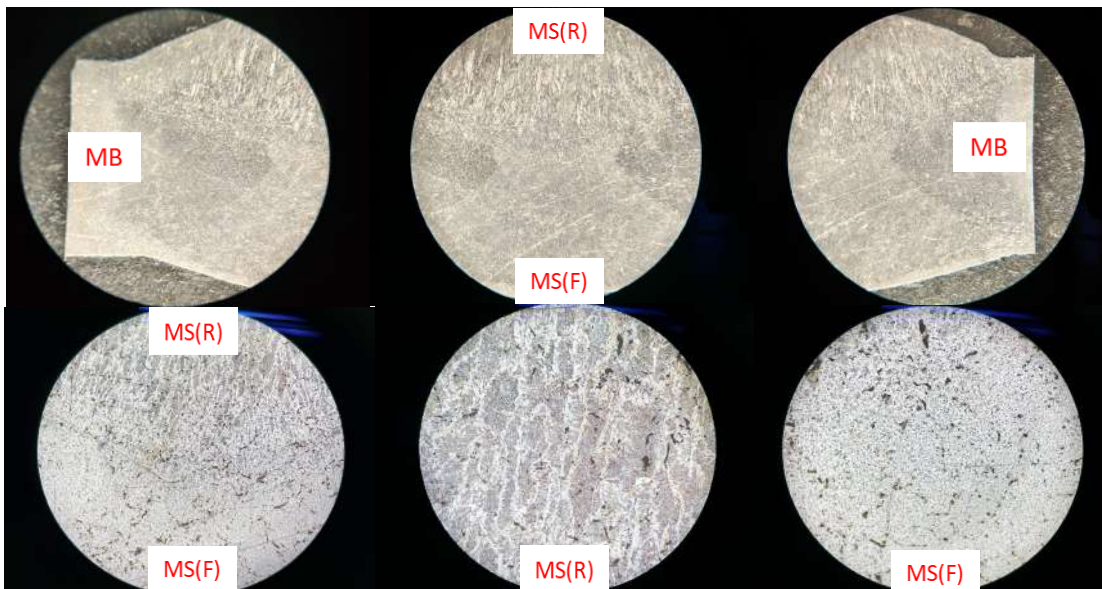
Figura 37 – Amostras do corpo de prova 03 E81T1-W2C sem exposição atmosférica
MB: Metal de base, MS(F): Metal de solda(face), MS(R): Metal de solda(raiz).



Fonte: Autor (2025)

4.2.4 Corpo de Prova 04 - E71T-1 C(M):

Figura 38 – Amostras do corpo de prova 04 E71T-1 C(M), sem exposição atmosférica
MB: Metal de base, MS(F): Metal de solda(face), MS(R): Metal de solda(raiz).



Fonte: Autor (2025)

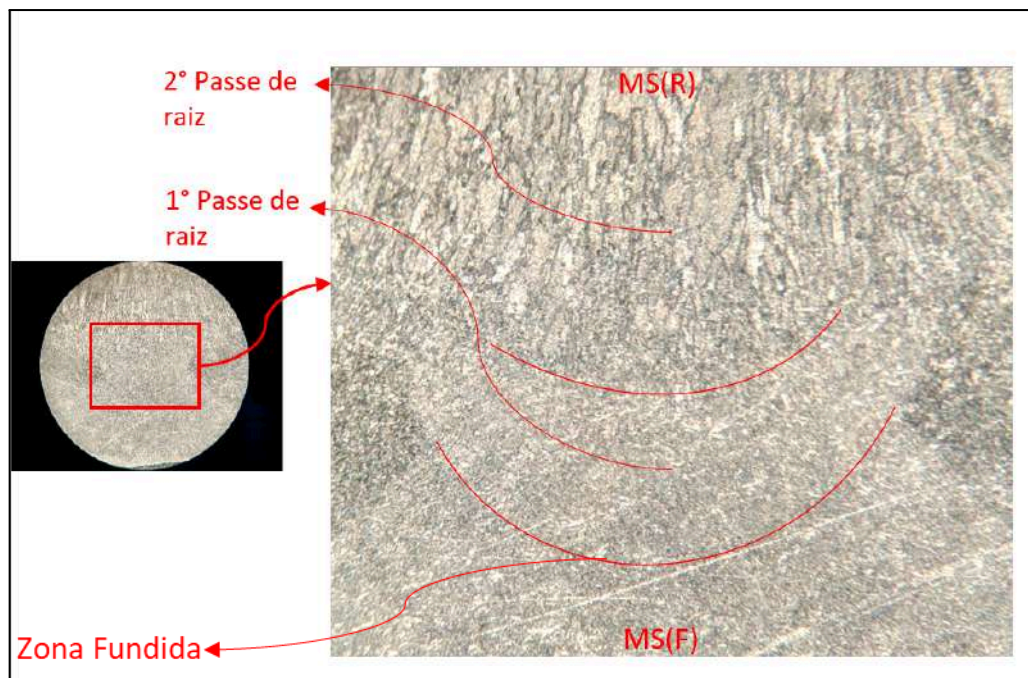
As imagens metalográficas dos corpos de prova evidenciam diferenças

microestruturais entre as regiões correspondentes à zona de ligação entre os passes de raiz e de acabamento. Observa-se uma variação nítida na transição entre o metal de base, metal de solda da face e metal de solda da raiz.

As Figuras 35, 36, 37 e 38 evidenciam uma diferença na granulometria no metal de adição na região do metal de solda referente ao segundo passe de raiz (MS(R)). Conforme Colpaert (2008), os depósitos de solda podem apresentar grande variação microestrutural ao longo do cordão, resultado das diferenças de resfriamento, da sequência de passes e da composição local do metal depositado.

Para uma avaliação mais detalhada, a Figura 39 apresenta ampliações da microestrutura da zona soldada. Embora a análise ampliada seja demonstrada a partir de uma única amostra, todas as demais apresentaram o mesmo padrão de morfologia de grão na região da raiz, confirmando a repetitividade do comportamento microestrutural ao longo dos corpos de prova e dos diferentes insumos de soldagem utilizados.

Figura 39 - Aumento de 100x da microestrutura na região Metal de solda da raiz e Metal de solda da face.

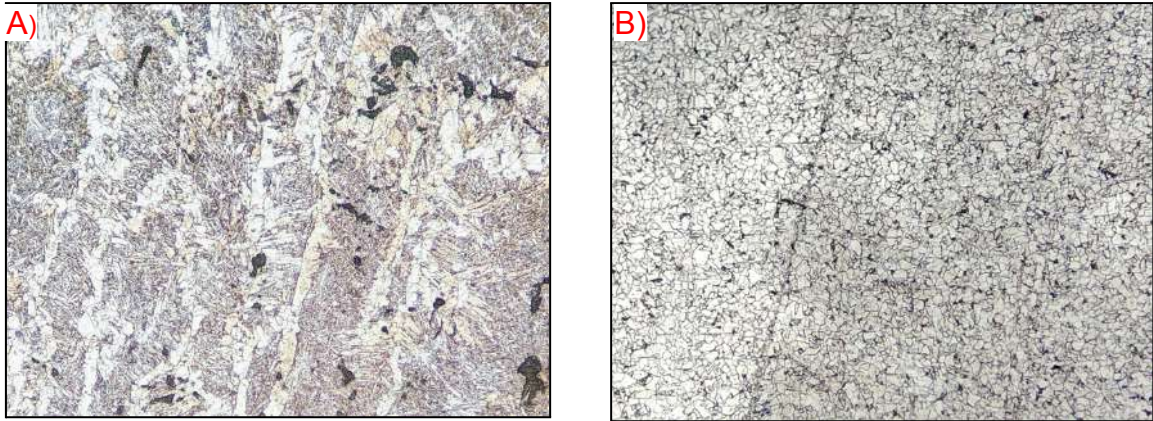


Fonte: Autor (2025)

Isso significa que, mesmo utilizando o mesmo consumível, podem surgir morfologias distintas de ferrita, como ferrita acicular e ferrita de contorno de grão, dependendo das condições térmicas em cada região. Conforme observado na

Figura 40, há variação das microestruturas nos dois cordões de solda.

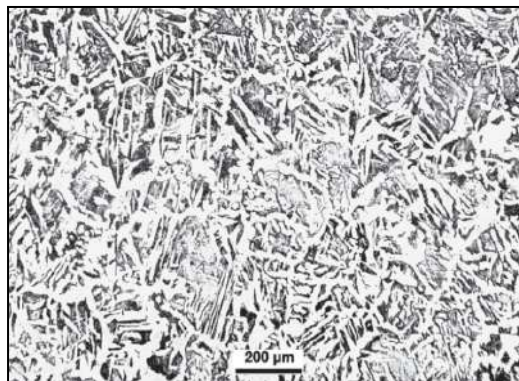
Figura 40 - Aumento de 400x da microestrutura na região do metal de solda com o aspecto diferente
a) Metal de solda (R) ; b) Metal de solda (F)



Fonte: Autor (2025)

A microestrutura (A) mostra um metal depositado com predominância de ferrita em diversas morfologias. É possível observar regiões claras correspondentes a ferrita mais grosseira, intercaladas com áreas de ferrita acicular, identificada pelo aspecto alongado e em “agulhas” conforme observado na Figura 41. A orientação dessas agulhas confere uma aparência direcional ao conjunto, característica comum de zonas de resfriamento mais rápido ou início de cordão. Também são visíveis regiões com ferrita de contorno de grão, delimitando áreas maiores e mais claras. As manchas e pontos escuros distribuídos pela microestrutura correspondem a inclusões não metálicas do processo, como óxidos e pequenas partículas de escória.

Figura 41 - Microestrutura de ferrita acicular em forma de “agulhas”.



Fonte: Adaptado de Colpaert (2008)

A microestrutura (B) apresenta predominância de ferrita poligonal, observada como regiões claras. As áreas mais escuras correspondem a colônias de perlita distribuídas entre os grãos de ferrita. Além disso, pequenos pontos pretos podem ser observados, característicos de inclusões originadas do processo de soldagem, como óxidos e partículas de escória típicas de arames tubulares.

4.3 Ensaio de tração

Dando continuidade à etapa experimental, realizou-se o ensaio de tração com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas das juntas soldadas, especialmente a resistência à tração, o limite de escoamento e o alongamento total. A Figura 42 apresenta os corpos de prova após a ruptura, evidenciando o comportamento mecânico característico de cada condição de soldagem e permitindo a comparação direta entre os consumíveis avaliados.

Figura 42 – Corpos de prova após o ensaio de tração : a) CP 01 - 71T1-1CM - exposto ao tempo; b) CP 02 - 81T1-W2C - exposto ao tempo; c) CP 03 - 71T1-1CM - sem exposição; d) CP 04 - 81T1-W2C - sem exposição



Fonte: Autor (2025)

Os resultados mostraram diferenças no local de ruptura dos corpos de prova. Os dois primeiros, soldados respectivamente com os arames E71T-1C(M) e E81T1-W2C, permaneceram expostos ao tempo para formação da pátina e

apresentaram fratura ocorrendo um pouco afastada da ZTA. Já os dois últimos corpos de prova, o terceiro com E81T1-W2C e o quarto com E71T1-1C(M), tiveram o rompimento localizado diretamente na ZTA.

O Gráfico 01 apresenta o comportamento mecânico dos quatro corpos de prova avaliados, permitindo comparar os efeitos da exposição ao ambiente e as diferenças entre os consumíveis E71T1-1C(M) e E81T1-W2C.

Gráfico 1 – Curvas de tensão x deformação - Linha laranja CP 01, 71T1-1CM - exposto ao tempo; Linha azul CP 02, 81T1-W2C - exposto ao tempo; Linha branca CP 03, 81T1-W2C - sem exposição; d) Linha vermelha CP 04, 71T1-1CM - sem exposição.



Fonte: Autor (2025)

Linha laranja (CP 01 - E71T1-1C(M), exposto): apresenta resistência intermediária e menor deformação até a ruptura quando comparada ao CP 04, indicando perda de ductilidade. A exposição ao ambiente iniciou a formação de óxidos na superfície, especialmente próximos à ZTA. A menor deformação observada no CP 01 está associada à sensibilidade da superfície oxidada, que tende a apresentar regiões frágeis e descontinuidades capazes de antecipar a ruptura, principalmente próximas à ZTA. Modenesi, Marques e Bracarense (2012) destacam que alterações superficiais decorrentes de exposição podem reduzir a ductilidade e

atuar como pontos de concentração de tensões, modificando o comportamento de deformação do corpo de prova.

Linha azul (CP 02 - E81T1-W2C, exposto): apresentou o menor limite de tensão entre todos, com escoamento mais suave, menor resistência e menor alongamento em comparação ao CP 03, soldado com o mesmo consumível porém não exposto. A curta exposição ao ambiente favoreceu a oxidação superficial especialmente na ZTA e no metal de solda, reduzindo a coesão metálica e antecipando a deformação plástica. O comportamento mecânico inferior do CP 02 é coerente com o efeito da oxidação inicial sobre metais soldados, especialmente quando o consumível possui elementos de liga mais reativos. Segundo Modenesi, Marques e Bracarense (2012), variações na composição química podem tornar o metal depositado mais suscetível a reações superficiais, diminuindo a coesão metálica e contribuindo para a perda de ductilidade em regiões degradadas, o que explica a ruptura fora da ZTA.

Linha branca (CP 03 - E81T1-W2C, não exposto): apresentou alta resistência mecânica, deformação elevada e curva de tensão próxima à do CP 04. Por não ter sofrido exposição ao ambiente, não houve formação de pátina nem oxidação superficial, mantendo a ZTA e o metal de solda íntegros. Assim, o corpo de prova expressou plenamente as propriedades do consumível E81T1-W2C, combinando resistência e ductilidade de forma equilibrada e rompendo próximo da ZTA, região naturalmente mais sensível devido ao gradiente térmico da soldagem.

Linha vermelha (CP 04 - E71T-1C(M), não exposto): apresentou o melhor desempenho mecânico, com o maior limite de resistência e a maior deformação total entre todos os corpos de prova. A ruptura ocorreu próximo à ZTA.

Para uma melhor visualização e comparação dos resultados obtidos nos ensaios, a Quadro 4 apresenta de forma organizada os principais parâmetros mecânicos como as tensões e deformações de cada corpo de prova registrados pela máquina universal de ensaios.

Quadro 4 - Resultados reais registrados no ensaio de tração

Tensões e deformações				
Corpo de prova	Consumível	Tensão de resistência (Rm)	Limite de escoamento (Rp)	Deformação total (Dtm)
CP - 01	E71T-1C(M) exposto	477,09 MPa	361,50 MPa	34,54%
CP - 02	E81T1-W2C exposto	449,62 MPa	357,76 MPa	21,97%
CP - 03	E81T1-W2C	536,42 MPa	392,20 MPa	20,72%
CP - 04	E71T-1C(M)	539,22 MPa	387,18 MPa	22,60%

Fonte: Autor (2025)

O Quadro 5 apresenta as médias e os desvios-padrão das tensões e deformações, permitindo comparar os corpos de prova de um mesmo consumível nas condições em que ficou exposto e o que não houve exposição ao meio ambiente exposto.

Quadro 5 - Médias e desvios padrões comparando os CPs expostos e não expostos

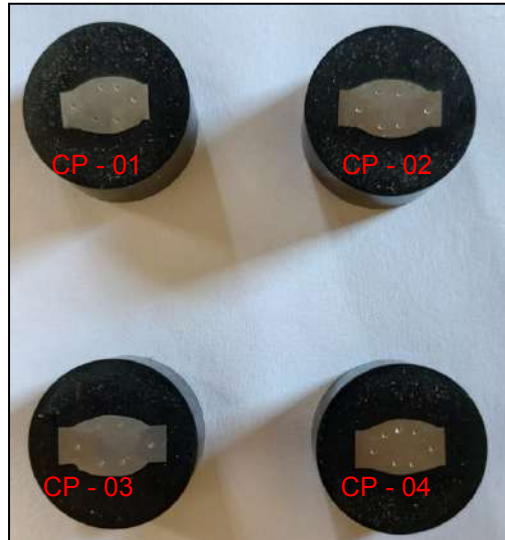
Médias e desvios padrões - comparação		
Propriedades	E71T-1C(M) (média ± DP)	E81T1-W2C (média ± DP)
Tensão de resistência (Rm)	508,16 ± 43,93 MPa	493,02 ± 61,29 MPa
Limite de escoamento (Rp)	374,34 ± 18,14 MPa	374,98 ± 24,36 MPa
Deformação total (Dtm)	28,57 ± 8,44 MPa	21,35 ± 0,88 MPa

Fonte: Autor (2025)

4.4 Dureza

A análise de dureza foi realizada em escala Rockwell B (HRB) nas mesmas amostras embutidas utilizadas nos ensaios de metalografia, conforme apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Corpos de prova após o ensaio de dureza



Fonte: Autor (2025)

Para cada corpo de prova, foram realizadas duas medições no metal de base, duas no metal de solda da face e duas no metal de solda da contra solda, assegurando uma avaliação representativa das diferentes regiões da junta soldada. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Médias das Dureza Rockwell B (HRB), MB = Metal de Base; MS (R) = Metal de Solda – Raiz ;MS (F) = Metal de Solda – Face.

Médias das durezas (HRB)				
Região	E71T-1C(M) CP-01(exposto)	E81T1-W2C CP-02(exposto)	E71T-1C(M) CP-03	E81T1-W2C CP-04
Metal de base (MB)	78	79,5	82,5	79,5
Metal de solda Raiz (MSR)	89,25	91,75	86,25	91,75

Médias das durezas (HRB)				
Metal de solda Face (MSF)	82,25	82,25	83	82,25

Fonte: Autor (2025)

Os valores de dureza medidos em HRB apresentaram comportamentos coerentes para os quatro corpos de prova. No metal de base, as variações são pequenas com o CP-03 um pouco mais elevado. No metal de solda, observa-se a tendência esperada: o consumível E81T1-W2C (CP-02 e CP-04) apresentam maior dureza, devido ao maior teor de elementos de liga, enquanto os consumíveis E71T-1C(M) exibem valores moderados. Na face do cordão, todos os CPs mostraram dureza muito semelhante.

O Quadro 7 apresenta os valores de desvio padrão correspondentes às medições executadas nos corpos de prova onde o desvio padrão representa a variação dos valores de dureza em torno da média.

Quadro 7 – Desvios padrões, MB = Metal de Base, MS (R) = Metal de Solda – Raiz
MS (F) = Metal de Solda – Face

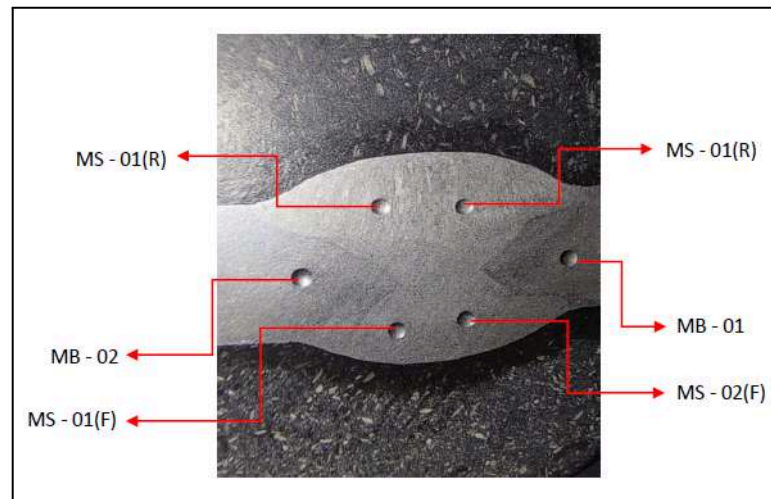
Desvios Padrões				
Região	E71T-1C(M) CP-01(exposto)	E81T1-W2C CP-02(exposto)	E71T-1C(M) CP-03	E81T1-W2C CP-04
Metal de base (MB)	0,00	2,12	2,12	2,12
Metal de solda Raiz (MSR)	0,354	1,76	0,354	1,76
Metal de solda Face (MSF)	0,345	0,345	0,00	0,345

Fonte: Autor (2025)

Para facilitar a visualização dos pontos analisados, a Figura 44 apresenta o esquema ilustrativo indicando a localização de cada medição realizada nas regiões do metal de base e do metal de solda.

Figura 44 – Figura ilustrativa dos pontos de medição

MB = Metal de Base, MS (R) = Metal de Solda – Raiz ,MS (F) = Metal de Solda – Face



Fonte: Autor (2025)

4.5 Dobramento

O ensaio de dobramento foi realizado conforme os requisitos da ASME Seção IX, utilizando os parâmetros definidos pela máquina de ensaio universal : distância entre roletes de 80 mm, roletes com diâmetro de 24 mm e comprimento útil de 99 mm. Na Figura 45, apresenta-se as imagens dos corpos de prova após o dobramento.

Figura 45 – Corpos de prova após o ensaio de dobramento



Fonte: Autor (2025)

Por fim, após a execução do ensaio, nenhuma modificação prejudicial foi

observada nos corpos de prova. Todos permaneceram livres de descontinuidades visuais, como trincas, rasgos ou qualquer deformação que acarretasse reprovação conforme os critérios da ASME IX.

5 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados tração, dureza, metalografia e ensaios não destrutivos LP e US demonstraram que ambas as juntas soldadas apresentaram desempenho adequado para aplicação em condutos forçados fabricados em aço patinável USI SAC 350.

Os ensaios não destrutivos demonstraram 100% de aprovação, evidenciando ausência de descontinuidade ou defeitos relevantes e garantindo que os resultados mecânicos obtidos são representativos da qualidade da solda.

Ao analisar os ensaios de tração, observa-se que ambos os consumíveis atenderam ao comportamento esperado para o aço USI SAC 350, cujas propriedades típicas incluem limite de escoamento em torno de 350 MPa e resistência à tração superior a 450 MPa, segundo informações fornecidas pela Usiminas.

A análise metalográfica revelou variações microestruturais na região da raiz e da zona fundida, decorrentes principalmente das diferenças na taxa de resfriamento e na sequência de passes. Como o último passe apresentou maior aporte térmico, formaram-se morfologias distintas, como ferrita acicular e ferrita de contorno de grão, além de inclusões típicas do processo arame tubular. Apesar das diferenças observadas entre as amostras, não houve indicação de formação de martensita nos resultados de dureza, uma vez que não se verificou aumento abrupto de dureza que caracterizaria esse microconstituente. Ressalta-se, contudo, que nas imagens metalográficas pode ter ocorrido a presença pontual de martensita, ainda que de forma discreta, não sendo possível confirmá-la pelos ensaios de dureza realizados, que não evidenciaram endurecimento significativo no metal de solda ou no metal de base. Assim, as variações observadas não comprometeram o desempenho mecânico, conforme demonstrado pela ausência de alterações significativas nos resultados de tração e dureza.

Dessa forma, conclui-se que, apesar das diferenças microestruturais observadas, as propriedades mecânicas se mantiveram compatíveis com as exigências do metal de base, e da aplicação, sendo que o E81T1-W2C demonstrou comportamento metalúrgico ligeiramente superior, conforme esperado para a classe de resistência mais elevada.

8 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se investigar de forma sistemática a variação de parâmetros de soldagem como energia de arco, velocidade de soldagem e temperatura de pré-aquecimento a fim de analisar sua influência direta na taxa de resfriamento, no aporte térmico e, conseqüentemente, nos fenômenos de refinamento ou crescimento de grãos na zona fundida. Além disso, propõe-se um estudo específico para identificar as causas que levaram os dois cordões avaliados neste trabalho a apresentarem microestruturas distintas.

REFERÊNCIAS

- ABENDI. Ensaio por ultrassom - US - jan. 2024. São Paulo: **Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção**, 2024.
- ASCE - AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Steel penstocks. 2. ed.** Reston, VA: ASCE, 2012.
- ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code – Section VIII: Division 1 – Pressure Vessels.** New York: ASME, 2023.
- ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code – Section V: Nondestructive Examination.** New York: 2023.
- ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Section IX – Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators.** New York: 2023. Tabela QW-466.1 – Dimensions for Guided-Bend Test Specimens.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 7438:** materiais metálicos – ensaio de dobramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E190-14(2021):** Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E8/E8M(2022):** métodos de teste padrão para testes de tração de materiais metálicos. New York: ASTM, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G7-97(2013)** – Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonferrous Metals. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E340(2023)** – Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. E-book. p. 126. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637325/>. Acesso em: 01 maio 2025.
- C.E.C.T. – COMITÉ EUROPÉEN DE LA CHAUDRONNERIE ET DE LA TOLERIE. **Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydroelectric installations.** Paris, jan. 1979.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed.** São Paulo: Editora Blucher, 2008. E-book. p. 38. ISBN 9788521215714. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521215714/>. Acesso em: 06 maio 2025.
- CSN - COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL . **Laminados a quente.** Disponível

em: <https://www.csn.com.br/homepage/acos-planos/laminados-a-quente/>. Acesso em: 6 abr. 2025.

DUTRA, A. S.; BOFF, U.; MARQUES, A. S. SCHAEFFER, L. Aços patináveis: características e aplicações. **Corte & Conformação de Metais**, jan. 2013.

ESAB. **Catálogo técnico de arames tubulares para FCAW**. Disponível em: <https://www.esab.com>. Acesso em: 8 abr. 2025.

FORTES, CLEBER; ARAÚJO, WELERSON. Apostila metalurgia da soldagem. **Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR**. Última revisão em 25 de janeiro de 2005.

METAL-CHEK. **LP e PM - Descrições**. Disponível em: [LP E PM: DESCRIÇÕES – METAL-CHEK](#). Acesso em: 2 junho. 2025.

PANNONI, F. D. **Aços patináveis: composição química, resistência à corrosão e aplicações**. São Paulo: Gerda, 2025.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. E-book. p. 1. ISBN 9788521637974. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637974/>. Acesso em: 01 maio 2025.

REIS, Sidcley. **Processo de soldagem por arame tubular**. Infosolda, 24 jan. 2022. Disponível em: https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/processo-de-soldagem-por-arames-tubular.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

SANTOS, Givanildo Alves dos. **Tecnologia dos Materiais Metálicos - Propriedades, Estruturas e Processos de Obtenção**. Rio de Janeiro: Érica, 2015. E-book. p.165. ISBN 9788536532523. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536532523/>. Acesso em: 20 mai. 2025.

SANTOS, Givanildo Alves dos. **Tecnologias mecânicas**. Rio de Janeiro: Érica, 2020. E-book. p.33. ISBN 9788536533636. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536533636/>. Acesso em: 24 mai. 2025.

SILVA, André Luiz V. da Costa E.; MEI, Paulo R. **Aços e ligas especiais**. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2021. E-book. p. 241. ISBN 9786555061611. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555061611/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

USIMINAS. **Catálogo de chapas grossas**. Disponível em: <https://usiminas.com/wp-content/uploads/2024/04/CatalagoChapasGrossas>. Acesso em: 6 abr. 2025.

USIMINAS. **Aço patinável USI-SAC 350**. Disponível em: <https://www.usiminas.com/produtos/aco-patinavel-usi-sac/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

VILLANI, Paulo. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2016. E-book. p. 1 - 61. ISBN 9788595156067. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595156067/>. Acesso em: 01 e 04 maio 2025.

VILLANI, Paulo. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2016. E-book. p. 14. ISBN 9788595156067. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595156067/>. Acesso em: 19 mai. 2025.

APÊNDICE A - RELATÓRIO DE ULTRASSOM



Relatório de Ensaio Não Destrutivo - ULTRASSOM

Cliente: ALISON RISSI				Obra: TRABALHO DE COCLUSÃO DE CURSO										
Código Relatório: --		Revisão: --		Disposição: ANALISE COMPARATIVA - ARAMES TUBULARES										
Local de Ensaio: FÁBRICA				Desenho Referência: --										
Norma de Referência: ASME VIII DIV 1 UW 53(a)		Critério de Aceitação: ASME VIII - Apêndice 12		Procedimento Número: 01-UCM-US-10100-001		Revisão: 1								
Material Base: USI SAC 350		Metal Adição: E71T1-1C(M) / E81T1-W2C		Diâmetro: --		Espessura: 6,35 mm								
Aparelho / Número de Série: SIUI SMATOR-M06320190111R			Bloco de Referência: ASME "T" 20mm			Acoplante: METIL CELULOSE								
Cabeçotes Utilizados														
Superfície	Normal	D.Cristal	45°					60°	70°					
A		X						X	X					
B		X		X	X									
Cabeçotes														
Fabricante	Modelo	Tipo	Dimensão	Frequência	Ângulo	GP	PT	GV	Observações					
SIUI	AFN4	ANGULAR	8x9 mm	4 MHz	60°	42	3,5	38,5	GV +6db					
SIUI	AFN4	ANGULAR	8x9 mm	4 MHz	70°	44,5	3,5	41	GV +6db					
SIUI	TR4	D. CRISTAL	Ø10 mm	4 MHz	0°	52	3,5	48,5	GV +6db					
Descontinuidade														
Junta	N°	Cabeçote	Amplitude	Local. (mm)	Comp. (mm)	Percurso Sônico	Dist. Ref.(mm)	Profund. (mm)	Tipo de Desc.	Sup.	Laudo Inicial	Laudo Final		
JT 01	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	A		
JT 02	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	A		
JT 03	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	A		
JT 04	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	A		
Legenda:	PO = Porosidade	FF = Falta de Fusão	TM - Trinca na Margem											
A = Aprovado	IE = Inclusão de Escória	TR - Trinca na Raiz	TM - Trinca Longitudinal											
R = Reprovado	FP = Falta de Penetração	TT - Trinca Transversal	RC - Rcc. de Exame Complementar											
Inspetor Nível II			Controle da Qualidade			Cliente								
<i>Alison Rissi</i> Inspetor de ultrassom NII US-ASNT-TCIA-N° JMS-086 GRUPO UCM						<i>Alison Rissi</i> Inspetor de ultrassom NII US-ASNT-TCIA-N° JMS-086 GRUPO UCM								
Data: 20/11/2024			Data: 20/11/2024			Data:								

APÊNDICE B - RELATÓRIO DE LÍQUIDO PENETRANTE



Relatório de Ensaio de Líquido Penetrante - LP

Cliente: ALISON RISSI		Obra: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO					
Código Relatório: --	Revisão: 0A	Norma de Referência: ASME VIII DIV 1.AP.8					
Local de Ensaio: FÁBRICA		Descrição: ANALISE COMPARATIVA - CONSUMIVEIS					
Produto de Limpeza: Thinner	Número Lote: A4DSVN	Validade: jan/27					
Penetrante: Metal-Check VP 30	Número Lote: LT-24-0021	Validade: jan/27					
Removedor: Água	Número Lote: --	Validade: --					
Revelador: Metal-Check D 70	Número Lote: LT-24-0028	Validade: jan/27					
Registro de Ensaio:							
Item	Junta	Materiais		Defeito / Incidentes			Laudo
	Topo	Metal de Base	Metal de Adição	Tipo	Pos.	Dimensão	
1	JT-01	USI SAC 350	A5.36 - E71T1-1C(M)	--	--	--	A
2	JT-02	USI SAC 350	A5.36 - E71T1-1C(M)	--	--	--	A
3	JT-03	USI SAC 350	A5.36 - E81T1-W2C	--	--	--	A
4	JT-04	USI SAC 350	A5.36 - E81T1-W2C	--	--	--	A
Legenda:		A - Aprovado		R - Reprovado			
Engenharia GRUPO UCM		Controle da Qualidade		Cliente		Fiscalização	
		Alison Rissi Inspetor de Líquido Penetrante NII US-ASNT-TCIA N°-PT-8859 GRUPO UCM					
Data: 20/11/2024	Data: 20/11/2024			Data:	Data:		

APÊNDICE C - CROQUI DO CORPO DE PROVA

