

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**FALHAS CRÍTICAS EM SOLDAS POR AUSÊNCIA DE
INSPEÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE – UM ESTUDO
BIBLIOGRÁFICO**

**DJALMA CORRÊA FRANÇA
JONAS GALHARDO CUSTÓDIO**

**Pindamonhangaba - SP
2025**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**FALHAS CRÍTICAS EM SOLDAS POR AUSÊNCIA DE
INSPEÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE – UM ESTUDO
BIBLIOGRÁFICO**

**DJALMA CORRÊA FRANÇA
JONAS GALHARDO CUSTÓDIO**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Orientador: Prof. Me Amir Rivaroli Junior

**Pindamonhangaba - SP
2025**

F815f França, Djalma Corrêa.
Falhas críticas em soldas por ausência de inspeção e controle de
qualidade – um estudo bibliográfico / Djalma Corrêa França; Jonas
Galhardo Custódio / FATEC Pindamonhangaba, 2025.
56f.; il.

Orientador: Professor Me. Amir Rivaroli Junior
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de
Pindamonhangaba. 2025

1. Falhas em soldas. 2. Inspeção. 3. Defeitos. 4. Controle de
qualidade. 5. Danos ambientais. I. França, Djalma Corrêa. II. Custódio,
Jonas Galhardo Custódio. III. Rivaroli Junior, Amir. IV. Título.

CDD 620.16

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**FALHAS CRÍTICAS EM SOLDAS POR AUSÊNCIA DE
INSPEÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE – UM ESTUDO
BIBLIOGRÁFICO**

**Djalma Correa França
Jonas Galhardo Custódio**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Comissão Examinadora


Orientador – Prof. Me. Amir Rivaroli Junior


Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho


Membro – Eng. Rodrigo André de Souza Ribeiro

Pindamonhangaba, 12 de dezembro de 2025.

DEDICATÓRIA

Djalma Corrêa França

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou em mim e me incentivou a seguir em frente mesmo diante das dificuldades. Em especial, à minha esposa Paloma de Sousa, pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante ao longo de toda a minha trajetória.

Jonas Galhardo Custódio

Dedico este trabalho, primeiramente, aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio incondicional, valores sólidos e incentivos em cada etapa da minha trajetória.

E, de forma muito especial, à minha esposa, Viviane Meireles Aragão, que foi e continua sendo meu maior alicerce. Sua presença constante, compreensão, incentivo e amor inabalável foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Sem o seu apoio diário, este momento não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Djalma Corrêa França

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir chegar até aqui com saúde e coragem. Agradeço também à minha família, pelo apoio constante e por compreenderem minhas ausências nos momentos de dedicação aos estudos principalmente minha esposa Paloma de Sousa. Aos professores que compartilharam conhecimento e inspiraram meu crescimento, minha sincera gratidão.

Jonas Galhardo Custódio

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família e à família da minha esposa, pelo incentivo contínuo, pelas palavras de motivação e pelo apoio irrestrito durante toda essa jornada acadêmica.

Aos docentes, por todo conhecimento transmitido, pela dedicação e pelo compromisso em formar profissionais preparados e críticos. Cada ensinamento contribuiu de forma essencial para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas, pela parceria constante, pelas trocas de experiências e pelo apoio mútuo. Estivemos lado a lado, compartilhando desafios, aprendizados e conquistas, e cada contribuição foi valiosa para a construção deste trabalho.

EPÍGRAFE

“A qualidade nunca é um acidente; é sempre o resultado de esforço inteligente.”

– John Ruskin

FRANÇA, D. C.; CUSTÓDIO, J. G. Falhas Críticas em Soldas por Ausência de Inspeção e Controle de Qualidade: Um Estudo Bibliográfico. 2025.56p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

RESUMO

Este trabalho apresentou um estudo bibliográfico, qualitativo e descritivo sobre falhas críticas em soldas decorrentes da ausência de inspeção e de deficiências nos sistemas de controle de qualidade. Foram analisados sete casos reais amplamente documentados, abrangendo setores diversos como transporte de combustíveis, indústria automotiva, plataformas offshore, construção naval, aviação geral, setor nuclear e siderurgia. Para cada caso, foram identificados os tipos de defeitos envolvidos, a lacunas de inspeção que permitiram sua evolução, as consequências estruturais e operacionais e as práticas preventivas que poderiam ter evitado o evento. Os resultados evidenciaram que defeitos como falta de fusão, trincas por fadiga e corrosão assistida por tensões evoluíram até a ruptura devido à ausência de inspeções adequadas, especialmente métodos de análise como ultrassom, e radiografia digital. Em todos os casos analisados, a insuficiência de controle de qualidade resultou em impactos significativos, incluindo perdas humanas, danos ambientais, interrupções operacionais e elevado custo de reparos. A discussão demonstrou que a implementação de programas robustos de integridade estrutural, combinados com normas técnicas como ISO 3834, ISO 5817, ASME IX e AWS D1.1, bem como a qualificação adequada de profissionais conforme ISO 9712, poderia ter prevenido os acidentes relatados. Após análise dos estudos de caso pode concluir que a inspeção sistemática e criteriosa é essencial para assegurar a confiabilidade de juntas soldadas e evitar falhas catastróficas.

Palavras-chave: falhas em soldas. inspeção. defeitos. controle de qualidade. danos ambientais.

FRANÇA, D. C.; CUSTÓDIO, J. G. Critical Failures in Welds Due to Lack of Inspection and Quality Control: A Bibliographic Study 2025. 56p. Graduation Work (Technology Course in Metallurgical Processes). Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

ABSTRACT

This study presented a bibliographic, qualitative, and descriptive analysis of critical welding failures resulting from the absence of inspection and deficiencies in quality control systems. Seven well-documented real cases were examined, covering diverse industrial sectors such as fuel transportation, automotive manufacturing, offshore platforms, naval construction, general aviation, nuclear facilities, and steelmaking. For each case, the types of defects, inspection gaps, structural and operational consequences, and preventive practices that could have avoided the events were identified. The results showed that defects such as lack of fusion, fatigue cracking, and stress corrosion evolved to rupture due to the absence of adequate inspections, especially those based on ultrasonic and digital radiographic methods. In all analyzed cases, insufficient quality control led to significant impacts, including human losses, environmental damage, operational interruptions, and high repair costs. The discussion revealed that implementing robust structural integrity programs—combined with technical standards such as ISO 3834, ISO 5817, ASME IX, and AWS D1.1, as well as proper professional qualification according to ISO 9712—could have prevented the reported accidents. It was concluded that systematic and rigorous inspection is essential to ensure the reliability of welded joints and prevent catastrophic failures.

Keywords: welding failures; inspection; defects; quality control; environmental damage.

LISTA DE ABREVIATURAS DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASME – American Society of Mechanical Engineers

ASTM – American Society for Testing and Materials

AWS – American Welding Society

CGHAZ – Coarse-Grained Heat-Affected Zone (Zona Termicamente Afetada de Grão Grosso)

EN – Normas Europeias

EV – Inspeção Visual

FAA – Federal Aviation Administration

FBTS – Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem

FGHAZ – Fine-Grained Heat-Affected Zone (Zona Termicamente Afetada de Grão Fino)

HAZ – Heat-Affected Zone (Zona Termicamente Afetada)

ICHAZ – Intercritical Heat-Affected Zone (Zona Termicamente Afetada Intercrítica)

ISO – International Organization for Standardization

MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute

NCR – Nonconformity Report (Relatório de Não Conformidade)

NDT – Nondestructive Testing (Ensaio Não Destrutivo)

NRC – Nuclear Regulatory Commission (EUA)

NTSB – National Transportation Safety Board

PAUT – Phased Array Ultrasonic Testing

PQR – Procedure Qualification Record (Registro de Qualificação de Procedimento)

PWPS – Preliminary Welding Procedure Specification (Especificação Preliminar de Procedimento de Soldagem)

QA – Quality Assurance (Garantia da Qualidade)

QC – Quality Control (Controle da Qualidade)

SCHAZ – Subcritical Heat-Affected Zone (Zona Termicamente Afetada Subcrítica)

SNQC-FBTS – Sistema Nacional de Qualificação e Certificação da FBTS

TOFD – Time of Flight Diffraction

UT – Ultrasonic Testing (Ultrassom)

WPS – Welding Procedure Specification (Especificação de Procedimento de Soldagem)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama CCT e microestruturas típicas formadas em aços durante o resfriamento contínuo.....	19
Figura 2 – Defeitos típicos em junta soldada: falta de fusão, porosidade e inclusão de escória.....	20
Figura 3 – Radiografias de soldas apresentando diferentes tipos de descontinuidades.....	21
Figura 4 – Ensaio de líquido penetrante indicando trincas transversais ao longo do cordão de solda.....	24
Figura 5 – Ensaio de partículas magnéticas indicando trincas transversais ao longo do cordão de solda.....	24
Figura 6 – Diagrama do custo da qualidade	31
Figura 7 – Restos de uma parte do gasoduto após a explosão.....	36
Figura 8 – Destruição após incêndio e explosão em San Bruno	36
Figura 9 – Área contaminada após o rompimento do oleoduto.....	37
Figura 10 – Coluna de fumaça após a explosão.....	38
Figura 11 – Destacamento de pontos de solda em carroceria automotiva.....	39
Figura 12 – Deformação e instabilidade térmica em solda por pontos defeituosa	40
Figura 13 – Falha por trinca em solda que levou ao colapso da plataforma Alexander Keiland.....	41
Figura 14 – Detalhe da plataforma Alexander Kielland que apresentou colapso	42
Figura 15 – Porta-aviões USS George H. W. Bush submetido a esforços estruturais em manobra de alta velocidade.....	43
Figura 16 – Submarino classe Virginia durante operação de soldagem	44
Figura 17 – Trincas em soldas de componentes tubulares aeronáuticos.....	46
Figura 18 - Trincas em soldas de componentes tubulares aeronáuticos.....	46
Figura 19 – Trincas em soldas de componentes tubulares aeronáuticos.....	46
Figura 20 – Trincas em soldas de componentes tubulares aeronáuticos.....	46
Figura 21 - Diagrama do bocal da tampa e materiais envolvidos	48
Figura 22 – Evidência fotográfica da degradação do bocal da tampa do vaso de pressão	48
Figura 23 – Vista aérea do gasômetro após a explosão.....	49
Figura 24 – Detalhe lateral do gasômetro danificado.....	50

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Sub-regiões da Zona Termicamente Afetada (ZTA)	18
Quadro 2 – Principais métodos de Ensaio Não Destrutivo, aplicações e normas aplicáveis.....	23
Quadro 3 – Principais normas de soldagem, seus escopos e aplicações.....	26
Quadro 4 – Resumo dos principais elementos da garantia da qualidade em soldagem.....	28
Quadro 5 – Resumo dos principais elementos da garantia da qualidade em soldagem (custos/impactos).....	30
Quadro 6 – Boas práticas em inspeção de soldas	32

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Problema.....	15
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos.....	15
1.3	Justificativa.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	17
2.1	Fundamentos da soldagem e soldabilidade.....	17
2.2	Principais defeitos em soldagem.....	19
2.3	Ensaio não destrutivo aplicado à inspeção.....	21
2.4	Normas e certificações de qualidade em soldagem.....	24
2.5	Processos de garantia da qualidade na indústria.....	27
2.6	Custos e impactos da ausência de inspeção.....	28
2.7	Boas práticas em inspeção de soldas.....	31
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Levantamento das fontes.....	33
3.2	Seleção dos casos críticos.....	33
3.3	Caracterização das falhas.....	34
3.4	Análise comparativa.....	34
3.5	Delimitação.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	35
4.1	Caracterização do corpus de análise.....	35
4.2	Síntese descritiva dos casos críticos.....	35
4.2.1	Caso 1 – Explosão do Gasoduto em San Bruno (EUA, 2010).....	35
4.2.2	Caso 2 Falha em soldas do Oleoduto Olympic Pipeline (Bellingham, EUA – 1999).....	36
4.2.3	Caso 3 – Recalls automotivos por falhas de solda.....	38
4.2.4	Caso 4 – Plataformas offshore e estruturas navais.....	40
4.2.5	Caso 5 – Falhas em soldas dos montantes de motor na aviação geral (Cessna e Piper).....	44
4.2.6	Caso 6 – Usina Nuclear Davis-Besse (EUA, 2002).....	46
4.2.7	Caso 7 – Explosão do Gasômetro da Usiminas (Ipatinga–MG, 2018).....	48
4.3	Discussão dos resultados.....	50
5	CONCLUSÃO.....	52
	REFERÊNCIAS.....	53

1- INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos mais importantes da indústria moderna, sendo aplicada em setores estratégicos como o automotivo, petroquímico, naval e aeroespacial. Apesar da sua versatilidade, a confiabilidade das juntas soldadas depende diretamente da realização de inspeções e do controle de qualidade durante e após o processo. A ausência dessas práticas tem sido responsável por falhas críticas que comprometem a integridade estrutural e geram consequências econômicas, sociais e ambientais de grande impacto (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Defeitos como trincas, porosidade, falta de fusão e inclusões são recorrentes em soldagens e podem reduzir drasticamente a resistência e a durabilidade das juntas. De acordo com a ASME, aproximadamente 40% das falhas estão relacionadas a condições desfavoráveis no processo e 32% a erros do operador, enquanto o restante decorre de consumíveis inadequados ou preparação deficiente da peça de base (SILVA; PEREIRA, 2019). A inspeção rigorosa por meio de ensaios não destrutivos (ENDs), como ultrassom e radiografia, é a principal ferramenta para evitar que tais defeitos se transformem em falhas críticas (SOUZA; PIMENTA; COSTA, 2020).

Casos reais reforçam a relevância do tema. O acidente ocorrido em 2010, em San Bruno (Califórnia), envolvendo o rompimento de um gasoduto da Pacific Gas and Electric Company (PG&E), foi resultado direto de falhas em soldas não inspecionadas adequadamente. A explosão gerou oito mortes, dezenas de feridos e destruiu 38 casas, tornando-se um marco para a discussão sobre inspeção e qualidade em soldagem (NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2011). No Brasil, estudos realizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) também classificam falhas em soldas de dutos como causas recorrentes de acidentes ambientais e perdas operacionais (ANP, 2016).

Além dos impactos ambientais e de segurança, a ausência de controle de qualidade implica em custos elevados. Pesquisas indicam que retrabalhos oriundos de falhas em soldas podem representar até 25% do custo total de um projeto em setores como a construção naval (OLIVEIRA; SOARES, 2018). Isso demonstra que a qualidade em soldagem deve ser vista não apenas como requisito técnico, mas também como fator estratégico de competitividade e sustentabilidade industrial.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo bibliográfico sobre falhas críticas em soldas decorrentes da ausência de inspeção e controle de qualidade, com enfoque em materiais ferrosos e não ferrosos. Busca-se, assim, identificar causas, consequências e as práticas de inspeção que poderiam ter evitado tais falhas, contribuindo para uma maior conscientização sobre a importância da qualidade no processo de soldagem.

1.1 Problema

A soldagem é essencial na fabricação e manutenção de estruturas metálicas, mas sua confiabilidade depende diretamente da aplicação de procedimentos adequados de inspeção e controle de qualidade. A ausência desses mecanismos tem ocasionado falhas críticas em componentes ferrosos e não ferrosos, resultando em acidentes industriais, recalls e prejuízos financeiros expressivos. Diante disso, surge a questão: quais são os principais casos críticos de falhas em soldas atribuídas à falta de inspeção e qualidade, e quais lições podem ser extraídas para prevenir recorrências?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar, por meio de levantamento bibliográfico, casos críticos de falhas em soldas decorrentes da ausência de inspeção e controle de qualidade, discutindo suas causas, consequências e medidas preventivas aplicáveis em diferentes setores industriais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar na literatura técnica casos documentados de falhas em soldas atribuídas à ausência de inspeção.
- Identificar os principais defeitos metalúrgicos e operacionais envolvidos nesses casos (ex.: trincas, falta de fusão, porosidade).
- Analisar as consequências técnicas, econômicas e sociais desses eventos.
- Relacionar as falhas com a soldabilidade de materiais ferrosos e não ferrosos.
- Discutir as boas práticas de inspeção e controle da qualidade que poderiam ter evitado tais falhas.

1.3 Justificativa

O tema se mostra relevante porque a soldagem está presente em setores de alto impacto econômico e social, como a indústria automotiva, petroquímica, naval e aeroespacial. Falhas decorrentes da ausência de inspeção e controle de qualidade têm gerado acidentes graves, perdas de vidas humanas, danos ambientais e custos milionários. Nesse contexto, um estudo bibliográfico que reúna casos críticos contribui para destacar a importância da inspeção de soldas e do cumprimento rigoroso de normas técnicas (AWS, ASME, ABNT, ISO). Além disso, a pesquisa reforça a necessidade de formação profissional qualificada e de uma cultura organizacional voltada para a qualidade, servindo como instrumento de conscientização para estudantes, engenheiros e gestores da área metalúrgica.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Fundamentos da soldagem e soldabilidade

A soldagem é um processo de união permanente que sustenta setores estratégicos como energia, óleo e gás, estruturas metálicas e mobilidade. Seus fundamentos, amplamente consolidados em manuais e códigos técnicos, envolvem transferência de calor, metalurgia da solidificação, tensões residuais e seleção adequada de processos e consumíveis (AWS, 2019; ASM INTERNATIONAL, 2011).

No campo da ciência dos materiais, o conceito de soldabilidade refere-se à capacidade de um material ser soldado preservando integridade metalúrgica e desempenho mecânico, fatores diretamente influenciados pela composição química, microestrutura, ciclo térmico e geometria da junta. A terceira edição de *Welding Metallurgy* oferece o arcabouço mais atualizado para compreensão desses fenômenos, com destaque para as interações entre Zona Fundida (ZF) e Zona Termicamente Afetada (ZTA) (KOU, 2021).

O ciclo térmico controla a evolução microestrutural e o desempenho das juntas. Em aços carbono e baixa liga, o intervalo $t_8/5$ determina a formação de perlita, bainita ou martensita e, portanto, afeta dureza, tenacidade e suscetibilidade a trincas. As relações entre aporte térmico, taxa de resfriamento e propriedades resultantes são amplamente descritas em literatura recente e constituem base para projeto de WPS e para decisões de pré-aquecimento e temperatura entre passes (KOU, 2021; AWS, 2019). Do ponto de vista analítico, a solução clássica de Rosenthal permanece referência para perfis térmicos, embora comparações com métodos numéricos e com a fonte duplo-elipsoidal de Goldak evidenciem a necessidade de calibração com dados reais.

A ZTA apresenta sub-regiões com comportamentos específicos (CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ, SCHAZ), nas quais a combinação entre aporte térmico e taxas de resfriamento define crescimento de grão, formação de ferrita acicular, endurecimento localizado e risco de martensita excessiva. Na Zona Fundida, o modo de solidificação, a segregação e a interação entre elementos de liga influenciam a tendência a trincas de solidificação e à perda de ductilidade. A literatura clássica descreve ainda a importância do controle do hidrogênio difusível como fator crítico para evitar fissuração retardada, especialmente em aços estruturais e de dutos, reforçando a necessidade de disciplina de processo e rigor no controle térmico

(KOU, 2021; AWS, 2019).

Normas internacionais consolidam os requisitos de qualificação e controle necessários para garantir soldabilidade prática e reprodutibilidade industrial. A ISO 13916 define critérios para medição de pré-aquecimento e interpasses, reduzindo variabilidade térmica; a ISO 15614-1 estabelece como procedimentos (PWPS/WPS) devem ser qualificados; e a família ISO 3834 estrutura os requisitos de qualidade aplicáveis à soldagem, integrando projeto, execução, consumíveis, pessoal e inspeção. Assim, fundamentos metalúrgicos e normas convergem no planejamento integrado da junta, onde a escolha de processo, o envelope de aporte térmico, o controle de hidrogênio e a gestão da qualidade determinam a confiabilidade final da solda. O Quadro 1, descreve as subregiões da zona termicamente afetada (ZTA).

Quadro 1 – Sub-regiões da Zona Termicamente Afetada (ZTA).

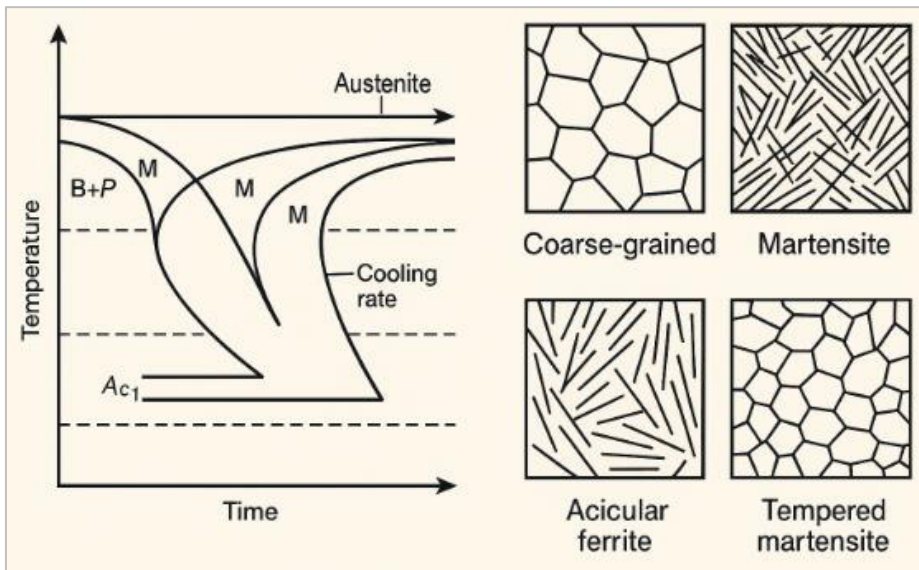
Sub-região	Descrição
CGHAZ – Coarse-Grained HAZ	Região mais próxima da Zona Fundida (ZF), submetida aos maiores picos de temperatura. Apresenta crescimento acentuado de grão austenítico, reduzindo tenacidade.
FGHAZ – Fine-Grained HAZ	Formada pelo reaquecimento abaixo da faixa de crescimento de grão, resultando em microestrutura refinada e melhores propriedades mecânicas.
ICHAZ – Intercritical HAZ	Zona submetida a temperaturas entre Ac1 e Ac3, onde coexistem ferrita e austenita. Pode formar ilhas martensita–austenita (M/A), críticas para fissuração por hidrogênio.
SCHAZ – Subcritical HAZ	Região abaixo de Ac1, sofrendo apenas revenido das fases presentes, podendo perder resistência ou dureza dependendo do aço.

Fonte: Criado pelos autores, adaptado de KOU (2021), ASM INTERNATIONAL (2011) e AWS (2019).

A Figura 1 evidencia a influência da taxa de resfriamento na formação de fases como perlita, bainita e martensita, bem como a relação entre o ciclo térmico e a microestrutura resultante na ZTA. Os esquemas à direita ilustram grão grosso, martensita, ferrita acicular e martensita revenida, representando regiões típicas da

CGHAZ, ICHAZ, FGHAZ e SCHAZ.

Figura 1 – Diagrama CCT e microestruturas típicas formadas em aços durante o resfriamento contínuo.



Fonte: Os autores, adaptado de KOU (2021), ASM INTERNATIONAL (2011) e AWS (2019).

2.2 Principais defeitos em soldagem

A qualidade de uma junta soldada depende diretamente da ausência de descontinuidades que possam comprometer seu desempenho estrutural e funcional. A American Welding Society estabelece que defeitos são imperfeições que excedem limites de aceitabilidade determinados por normas e códigos aplicáveis (AWS, 2019). Entre os defeitos mais comuns encontram-se porosidade, inclusões, falta de fusão, falta de penetração, mordedura e trincas, todos associados a preparo inadequado, parâmetros incorretos ou controle insuficiente do processo.

A porosidade e as inclusões de escória são descontinuidades frequentemente observadas em soldagem por fusão. A porosidade origina-se da retenção de gases durante a solidificação do metal, geralmente causada por umidade, oxidação ou instabilidade do arco, o que reduz significativamente a resistência à fadiga (LI et al., 2021). As inclusões de escória, formadas por limpeza insuficiente entre passes ou por deposição inadequada, reduzem a tenacidade do cordão e aumentam o risco de falhas, especialmente em baixas temperaturas (MIČIAN et al., 2020).

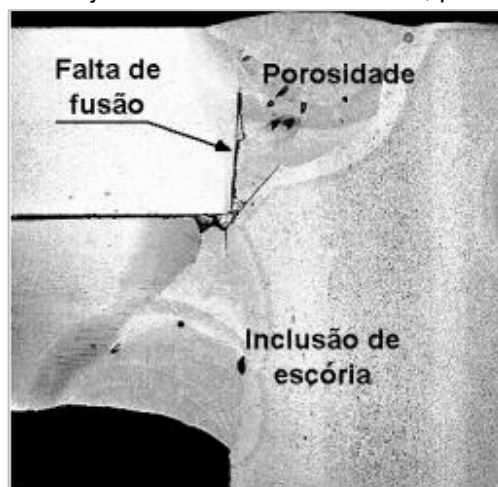
Defeitos como falta de fusão, falta de penetração e mordedura estão diretamente ligados ao aporte térmico e à técnica de soldagem. A falta de fusão ocorre quando não há união adequada entre passes ou entre o metal de base e o metal de adição, reduzindo a seção resistente da junta (QI et al., 2024). A falta de

penetração, particularmente crítica em soldas de raiz, cria regiões de alta concentração de tensões propícias à iniciação de trincas (KOU, 2021). A mordedura consiste na formação de um entalhe no metal de base devido a parâmetros excessivos e prejudica o comportamento em fadiga (RADAJ; SONSINO; FRICKE, 2006).

As trincas constituem um dos defeitos mais críticos em soldagem, pois comprometem drasticamente a confiabilidade estrutural. Podem ocorrer a quente, a frio, por solidificação ou durante o serviço. As trincas a frio, também chamadas trincas assistidas por hidrogênio, são particularmente perigosas, pois surgem horas ou dias após a soldagem e estão associadas à presença de hidrogênio difusível, tensões residuais e microestruturas endurecidas (WU et al., 2024). Normas como a ISO 5817 definem níveis de qualidade e limites de aceitabilidade conforme a aplicação.

A literatura técnica recente também destaca a importância dos Ensaios Não Destrutivos (END) para a detecção precoce de defeitos, incluindo técnicas como ultrassom phased array, radiografia digital e inspeção assistida por inteligência artificial, que apresentam alta sensibilidade para identificar porosidade, trincas e falta de fusão (SHEN et al., 2023). Assim, a prevenção de defeitos, aliando conhecimento metalúrgico, atendimento às normas e técnicas de inspeção adequadas, é essencial para garantir a confiabilidade estrutural e reduzir custos de retrabalho (AWS, 2019; KOU, 2021). A Figura 2 ilustra grande quantidade de descontinuidades estruturais observadas na microestrutura de uma seção transversal de uma solda a arco elétrico em aço.

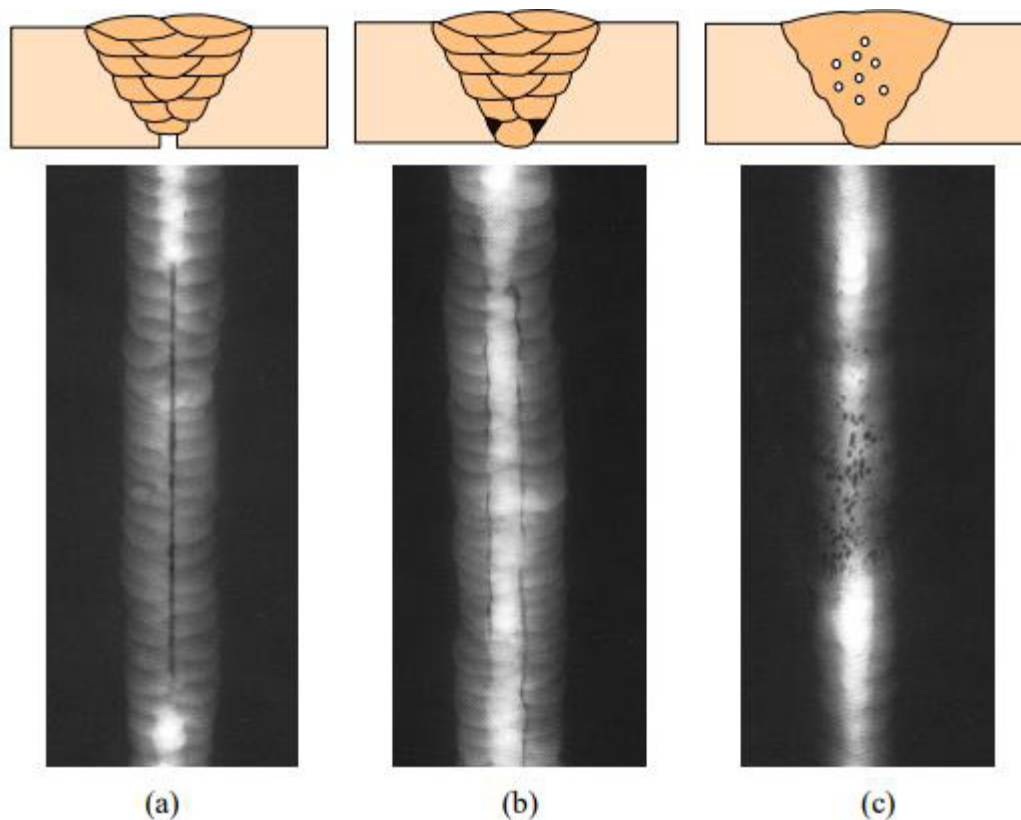
Figura 2 – Defeitos típicos em junta soldada: falta de fusão, porosidade e inclusão de escória.



Fonte: MODENESI (2001).

A Figura 3 apresenta três radiografias de cordões de solda, cada uma ilustrando um tipo específico de descontinuidade interna. Em (a), observa-se falta de penetração, identificada pela presença de uma região escura e contínua no centro do cordão, indicando que a solda não atravessou toda a espessura da junta. Em (b), a imagem evidencia uma inclusão de escória, caracterizada por uma descontinuidade alongada e de tonalidade distinta, resultante de resíduos de fluxo aprisionados entre os passes. Já em (c), nota-se porosidade agrupada, manifestada pela presença de múltiplos pontos escuros distribuídos ao longo da solda, representando cavidades ocasionadas por gases retidos durante a solidificação.

Figura 3 – Radiografias de soldas apresentando diferentes tipos de descontinuidades.



Fonte: MODENESI (2001).

2.3 Ensaios não destrutivos aplicados à inspeção

Os ensaios não destrutivos (END) constituem uma etapa essencial na avaliação da integridade de juntas soldadas, permitindo detectar descontinuidades sem comprometer o uso da peça. Segundo Hellier (2012), os END desempenham papel fundamental na prevenção de falhas em estruturas críticas, especialmente nos setores petróleo e gás, naval, aeronáutico e nuclear. A inspeção visual (EV) representa o ponto de partida desse processo, identificando imperfeições superficiais

como mordeduras, respingos e desalinhamentos, conforme requisitos normativos estabelecidos na ISO 17637.

Entre os métodos de superfície, destacam-se os líquidos penetrantes (LP) e as partículas magnéticas (PM). O LP é amplamente utilizado na detecção de trincas superficiais em materiais não porosos, mantendo relevância devido à sua simplicidade e baixo custo (SHANKAR; PRAKASH, 2019). Já o PM se aplica exclusivamente a materiais ferromagnéticos, permitindo identificar descontinuidades superficiais e subsuperficiais por meio da concentração de partículas magnéticas próximas ao defeito. A ISO 9934 define as condições de aplicação e padronização dos resultados.

No âmbito dos métodos volumétricos, a radiografia industrial (RX) e o ultrassom (UT) desempenham papel central na detecção de imperfeições internas. A radiografia, cada vez mais substituída por sistemas digitais, oferece excelente visualização de porosidade, inclusões e falta de fusão (MARTINS et al., 2020). O ultrassom convencional e suas variantes avançadas, como Phased Array (PAUT) e Time of Flight Diffraction (TOFD), destacam-se pela capacidade de dimensionar defeitos com elevada precisão, podendo substituir a radiografia em diversas aplicações industriais sensíveis (RAI et al., 2022).

Os avanços tecnológicos recentes têm ampliado significativamente o alcance dos END. A adoção de técnicas digitais e o uso de inteligência artificial têm permitido a classificação automatizada de imagens radiográficas e sinais ultrassônicos, aumentando a confiabilidade da detecção de falhas (SHEN et al., 2023). Além disso, sistemas de monitoramento em tempo real, baseados em sensores ópticos e acústicos, vêm sendo aplicados diretamente durante o processo de soldagem, permitindo intervenções imediatas e elevando o controle de qualidade (CHEN et al., 2021).

Do ponto de vista normativo e operacional, a ABNT NBR ISO 9712 estabelece critérios para certificação de inspetores, assegurando competência técnica e credibilidade do processo de inspeção. Embora os END representem custos adicionais, estudos clássicos e contemporâneos mostram que a prevenção de falhas é muito mais econômica do que correções posteriores (JURAN, 1999; SILVA; SCOTTI, 2014). Dessa forma, a literatura converge para a utilização combinada de diferentes técnicas, ajustadas ao tipo de junta, material e criticidade da aplicação, como prática essencial para a segurança estrutural (AWS, 2019; KOU, 2021). O

Quadro 2 demonstra os principais métodos de ensaios não destrutivos (END), suas aplicações típicas e as normas abrangentes mais utilizadas no Brasil e internacionalmente.

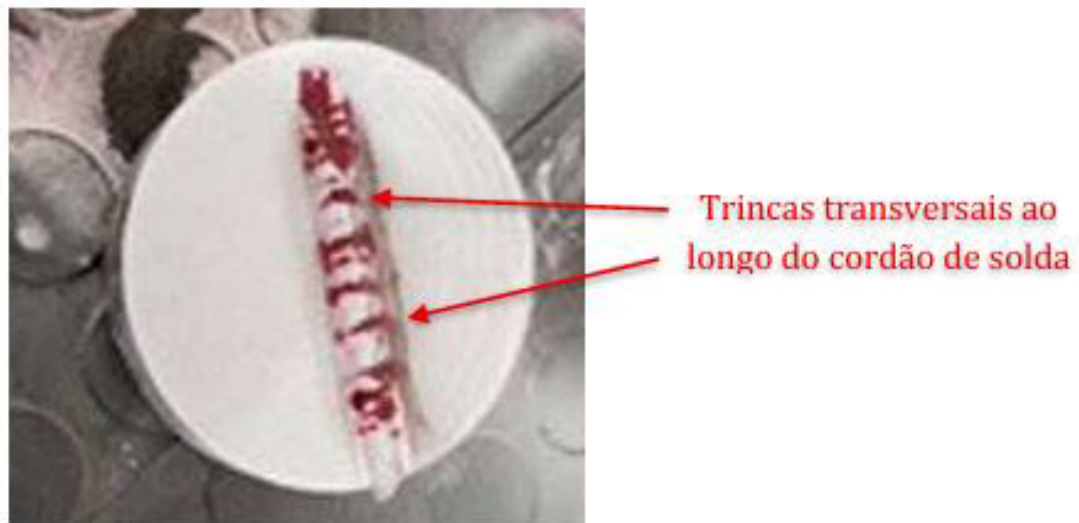
Quadro 2 – Principais métodos de Ensaios Não Destrutivos, aplicações e normas aplicáveis

Método END	Aplicações Típicas	Normas Abrangentes
Inspeção Visual (EV)	Identificação de mordedura, respingos, trincas superficiais abertas, desalinhamentos, geometria incorreta do cordão.	ISO 17637; AWS D1.1
Líquidos Penetrantes (LP)	Detecção de trincas superficiais em aços inoxidáveis, alumínio, titânio e ligas não ferrosas.	ISO 3452-1; ASTM E1417
Partículas Magnéticas (PM)	Trincas superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos.	ISO 9934-1; ASTM E709
Radiografia Industrial (RX/Gama)	Porosidade, inclusões de escória, falta de fusão e falta de penetração.	ISO 17636-1/2; ASTM E1742
Ultrassom Convencional (UT)	Detecção e dimensionamento de descontinuidades internas; avaliação de espessura.	ISO 16810; ISO 16811; ASTM E114
Ultrassom Phased Array (PAUT)	Mapeamento volumétrico de soldas; alta precisão; substitui RX em várias aplicações.	ISO 13588; ASME V Art. 4
TOFD (Time of Flight Diffraction)	Ultrassom para detecção de trincas e defeitos de ponta com elevada precisão.	ISO 10863; ASME V Art. 4
Correntes Parasitas (EC)	Trincas superficiais em peças não ferromagnéticas; inspeção aeronáutica.	ISO 15548; ASTM E309; ASTM E376
Termografia Infravermelha	Detecção de descontinuidades próximas à superfície; compósitos; inspeção em larga escala.	ASTM E2582; ISO 18434-1
Emissão Acústica (EA)	Monitoramento em tempo real; detecção de propagação de trincas.	ISO 12716; ASTM E1419
Inspeção Visual Remota (Videoscópio)	Inspeção interna em tubulações e componentes de difícil acesso.	AWS D1.1; ISO 17637 (aplicada)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

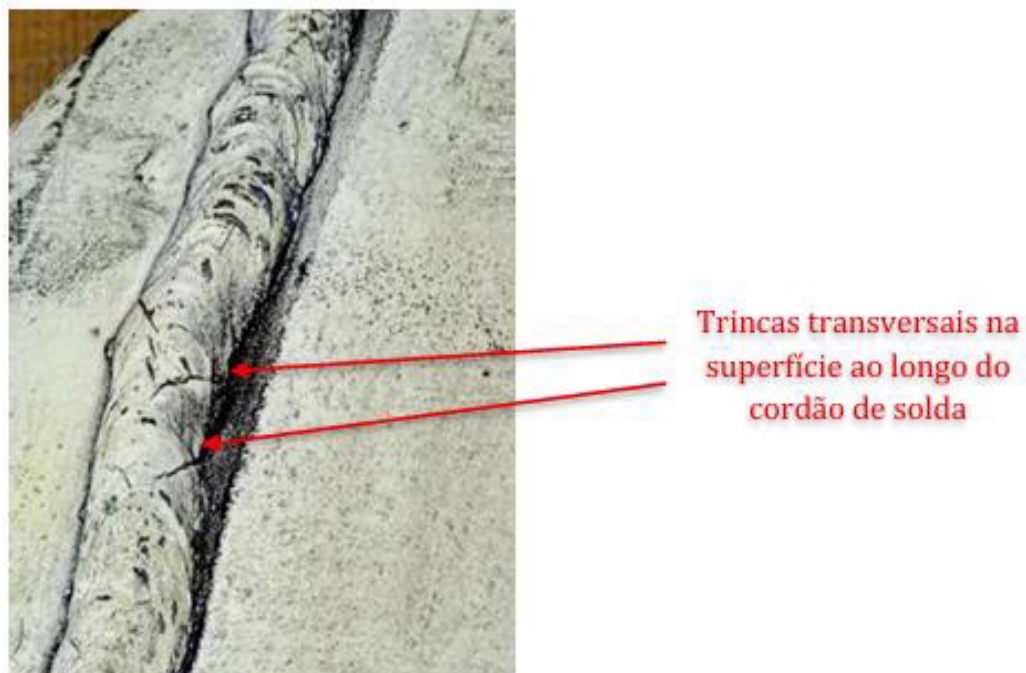
As Figuras 4 e 5 mostram uma bolacha de aço soldada (corpo de prova) com realização de teste de líquido penetrante e partículas magnéticas.

Figura 4 – Ensaio de líquido penetrante, indicando trincas transversais longo do cordão de solda.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 5 – Ensaio de partículas magnéticas, indicando trincas transversais longo do cordão de solda.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

2.4 Normas e certificações de qualidade em soldagem

A padronização em soldagem desempenha papel fundamental na garantia da segurança, da confiabilidade e da rastreabilidade dos processos, estabelecendo critérios mínimos de projeto, execução e aceitação de juntas soldadas. Segundo Scotti e Ponomarev (2014), o cumprimento rigoroso de normas técnicas reduz significativamente o risco de falhas críticas e assegura uniformidade entre fabricantes e inspetores. No âmbito internacional, destaca-se a ISO 3834, publicada

no Brasil como ABNT NBR ISO 3834, que define requisitos de qualidade para soldagem por fusão, variando de requisitos elementares a requisitos completos, conforme a complexidade do produto.

A série ISO 15614 reúne normas dedicadas à qualificação de procedimentos de soldagem (WPS e PQR), detalhando critérios de ensaios mecânicos, controle de variáveis essenciais e limites de aporte térmico. Esses documentos constituem referência obrigatória para validação de procedimentos antes da aplicação em escala industrial (ISO, 2017). Complementando esse conjunto, a ABNT NBR 14842:2019 alinha práticas nacionais às diretrizes internacionais, facilitando a inserção de empresas brasileiras em cadeias globais de fornecimento (LIMA et al., 2020).

Nos Estados Unidos, a AWS D1.1 – Structural Welding Code – Steel permanece como referência para soldagem estrutural em aço, amplamente utilizada em projetos de pontes, edifícios e estruturas críticas. Já na Europa, a série EN ISO 9606 define requisitos de qualificação de soldadores, padronizando ensaios de desempenho e limites de aceitação. Arsić et al. (2022) destacam que a qualificação adequada desses profissionais influencia diretamente a integridade final da junta soldada.

A certificação de pessoal também desempenha papel central na confiabilidade das inspeções. No Brasil, o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Pessoal da FBTS (SNQC-FBTS) segue diretrizes compatíveis com a ISO 9712, garantindo que inspetores, soldadores e engenheiros possuam competência comprovada. Em paralelo, normas de aceitação como a ISO 5817:2014 estabelecem níveis de qualidade para imperfeições em juntas soldadas, permitindo ajustar os critérios de aceitação conforme a criticidade da aplicação (MARTINS et al., 2020).

Por fim, observa-se que a evolução das normas acompanha os avanços tecnológicos associados à Indústria 4.0. A crescente adoção de robôs, sensores digitais e monitoramento em tempo real tem exigido revisões normativas que contemplem rastreabilidade digital e novos requisitos de controle. Shen et al. (2023) destacam que normas atualizadas são essenciais para assegurar que a qualidade da soldagem permaneça alinhada às práticas modernas e às exigências de segurança dos setores industriais.

A aplicação correta das normas técnicas em soldagem é fundamental para assegurar a qualidade, a segurança e a rastreabilidade dos processos industriais.

Cada norma orienta aspectos específicos da fabricação, desde a qualificação de procedimentos e profissionais até critérios de inspeção e aceitação de juntas soldadas. O Quadro 3 apresenta um resumo com as principais normas utilizadas nacional e internacionalmente, destacando seus escopos e as aplicações mais relevantes no contexto da soldagem industrial.

Quadro 3 – Principais normas de soldagem, seus escopos e aplicações

Norma	Escopo / Finalidade	Principais Aplicações
ISO 3834	Requisitos de qualidade para processos de soldagem por fusão.	Certificação de fabricantes, auditorias de qualidade, gestão da soldagem.
ISO 15614-1	Qualificação de Procedimentos de Soldagem (WPS/PQR).	Indústrias metal-mecânicas, caldeiraria, estruturas e tubulações.
ISO 9606-1	Qualificação de soldadores por ensaio de desempenho.	Certificação de soldadores em aços estruturais e tubulações.
ISO 5817	Níveis de qualidade e limites de aceitação para imperfeições.	Critérios de aceitação de soldas em projetos estruturais e equipamentos críticos.
ISO 17637	Inspeção visual de soldas (EV).	Avaliação preliminar, identificação de defeitos superficiais e verificação geométrica.
ISO 3452-1	Líquidos penetrantes – requisitos gerais.	Trincas superficiais em inox, alumínio, titânio e ligas não ferrosas.
ISO 9934-1	Partículas magnéticas – requisitos gerais.	Trincas superficiais e subsuperficiais em ferromagnéticos.
ISO 17636-1/2	Radiografia industrial (RX/Gama).	Inspeção volumétrica de soldas em vasos de pressão e tubulações.
ISO 16810 / 16811	Ultrassom convencional (UT).	Detecção de defeitos internos em soldas.
ISO 13588	Ultrassom Phased Array (PAUT).	Mapeamento volumétrico avançado; substitui radiografia.
ABNT NBR 14842	Qualificação de procedimentos de soldagem e soldadores.	Fabricação e manutenção industrial no Brasil.
ABNT NBR ISO 9712	Certificação de pessoal de END.	Certificação de inspetores e técnicos de END.
AWS D1.1/D1.1M	Código estrutural de soldagem em aço.	Construção metálica, pontes e estruturas de grande porte.
ASME Section IX	Qualificação de soldadores e procedimentos.	Energia, petroquímica, óleo e gás, vasos de pressão.
ASME Section V	Requisitos para END em equipamentos críticos.	Aplicação de RX, UT, PM e LP em caldeiras e sistemas pressurizados.

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de ISO (2014–2021), AWS (2020), ASME (2021) e ABNT (2018–2019).

2.5 Processos de garantia da qualidade na indústria

A garantia da qualidade em soldagem compreende um conjunto de práticas voltadas para assegurar que juntas soldadas atendam aos requisitos normativos, contratuais e de desempenho. Conforme discutido por Scotti e Ponomarev (2014), a qualidade não deve ser vista como etapa final do processo, mas como um elemento integrado ao planejamento, à execução e à verificação das operações de soldagem. Nesse contexto, normas técnicas e metodologias de controle desempenham papel fundamental na prevenção de falhas.

A elaboração e qualificação do Procedimento de Soldagem (EPS/WPS) constituem etapas centrais da garantia da qualidade. A ISO 15614-1 estabelece que o procedimento deve ser validado por meio de ensaios mecânicos e metalúrgicos, assegurando que o desempenho observado em testes seja compatível com a aplicação industrial. Da mesma forma, a qualificação de soldadores, conforme a ISO 9606-1 ou a ABNT NBR 14842, garante que profissionais executem soldas de acordo com critérios técnicos estabelecidos, reduzindo a variabilidade operacional (LIMA et al., 2020).

A rastreabilidade de materiais e consumíveis, assim como o controle de condições ambientais, também integram o sistema de qualidade. De acordo com Kou (2021), consumíveis fora de especificação ou contaminados podem comprometer a integridade da junta, independentemente da habilidade do soldador. Estudos como o de Li et al. (2021) reforçam que fatores ambientais, como umidade e variações térmicas, aumentam a incidência de defeitos como porosidade e trincas a frio, justificando a adoção de controles rigorosos.

A verificação da conformidade por meio de Ensaios Não Destrutivos (END) é outra etapa indispensável. Técnicas como inspeção visual, ultrassom, radiografia e partículas magnéticas permitem a identificação de imperfeições internas e superficiais, oferecendo uma avaliação abrangente da integridade da junta (HELLIER, 2012). Para assegurar confiabilidade nos resultados, a ABNT NBR ISO 9712 regulamenta a qualificação e certificação de inspetores, garantindo que profissionais envolvidos possuam competência comprovada.

Por fim, a digitalização dos processos de soldagem e o uso de sistemas integrados de gestão têm impulsionado a evolução da garantia da qualidade. A combinação entre monitoramento automático de parâmetros, registro contínuo de dados e integração com plataformas de Indústria 4.0 possibilita rastreabilidade

ampliada e análises preditivas (PEREIRA et al., 2020). Shen et al. (2023) destacam que o futuro da qualidade em soldagem tende à adoção crescente de inteligência artificial e inspeções automatizadas, fortalecendo a confiabilidade estrutural em setores de alta responsabilidade. O Quadro 4 mostra um resumo dos principais elementos da garantia da qualidade em soldagem.

Quadro 4 – Resumo dos principais elementos da garantia da qualidade em soldagem

Elemento da Qualidade	Finalidade / Escopo	Normas Associadas
Procedimento de Soldagem (EPS/WPS)	Define variáveis essenciais do processo; garante repetibilidade e desempenho da junta soldada.	ISO 15614-1; ABNT NBR 14842
Qualificação de Soldadores	Avalia a habilidade do profissional em executar soldas conforme critérios técnicos.	ISO 9606-1; ABNT NBR 14842
Rastreabilidade de Materiais e Consumíveis	Garante conformidade química e mecânica; evita uso de consumíveis inadequados.	ISO 3834; Certificados de lote
Controle Ambiental	Minimiza efeitos de umidade, temperatura, contaminação e variações climáticas.	ISO 3834
Ensaio Não Destrutivo (END)	Verificam integridade da junta sem comprometer o componente; detectam defeitos internos e superficiais.	ABNT NBR ISO 9712; ISO 17637; ISO 17636; ISO 16810
Monitoramento Digital e Indústria 4.0	Registra parâmetros em tempo real e permite análises preditivas e rastreabilidade digital.	ISO 3834 (suporte)
Sistema de Gestão da Qualidade	Integra soldagem ao sistema geral de qualidade da empresa.	ISO 9001; ISO 3834
Cultura Organizacional e Treinamento	Reduz retrabalho e melhora habilidades operacionais; evita falhas repetitivas.	Diretrizes internas; Scotti & Ponomarev (2014)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ISO (2017–2021), ABNT (2018–2019), Scotti e Ponomarev (2014).

2.6 Custos e impactos da ausência de inspeção

A ausência de inspeção em processos de soldagem representa um dos fatores de maior impacto na confiabilidade estrutural e nos custos industriais. Como afirma

Juran (1999), falhas não detectadas nas etapas iniciais tendem a gerar custos exponenciais quando identificadas tardiamente, especialmente em soldagem, onde o reparo posterior envolve retrabalho, parada de equipamentos e risco operacional. Em setores de alta criticidade, como óleo e gás, a falta de inspeção pode resultar em prejuízos milionários devido à interrupção de operações.

Do ponto de vista econômico, reparos de soldas defeituosas envolvem mão de obra adicional, consumo de materiais, tempo de máquina e atrasos na entrega. Silva e Scotti (2014) reforçam que prevenir falhas por meio de inspeções adequadas é significativamente mais econômico do que as corrigir. Além disso, defeitos não identificados comprometem o desempenho em fadiga de juntas soldadas, reduzindo sua vida útil e elevando os custos de manutenção ao longo do ciclo de vida (LI et al., 2021).

A ausência de inspeção também aumenta riscos de falhas catastróficas. Segundo Radaj, Sonsino e Fricke (2006), defeitos não detectados em soldas estão associados a colapsos estruturais em pontes, equipamentos de transporte e componentes críticos. Em ambientes industriais, falhas em dutos, vasos de pressão ou estruturas elevadas representam ameaças diretas à segurança dos trabalhadores, especialmente em condições de altas pressões e baixas temperaturas (QI et al., 2024).

Do ponto de vista normativo, deixar de inspecionar constitui não conformidade com documentos amplamente utilizados, como ISO 3834 e AWS D1.1, que exigem etapas obrigatórias de verificação para garantir a integridade dos componentes. Essa falta de conformidade pode levar a penalidades contratuais, perda de certificações e restrições em licitações internacionais. Além disso, a ausência de dados confiáveis de inspeção compromete estratégias de manutenção preventiva e preditiva, dificultando o planejamento de paradas e reduzindo a confiabilidade operacional (PEREIRA et al., 2020).

Por fim, a literatura converge que negligenciar inspeções sistemáticas eleva custos diretos e indiretos, compromete a segurança, reduz a vida útil de equipamentos e mina a credibilidade organizacional. Shen et al. (2023) destacam que a inspeção adequada contribui não apenas para evitar falhas, mas também para práticas sustentáveis e alinhadas à Indústria 4.0. Assim, inspeções criteriosas devem ser entendidas como investimento essencial em segurança, qualidade e competitividade de longo prazo, e não como custo adicional. O Quadro 5 mostra um

resumo dos principais elementos da garantia da qualidade em soldagem.

Quadro 5 – Resumo dos principais elementos da garantia da qualidade em soldagem

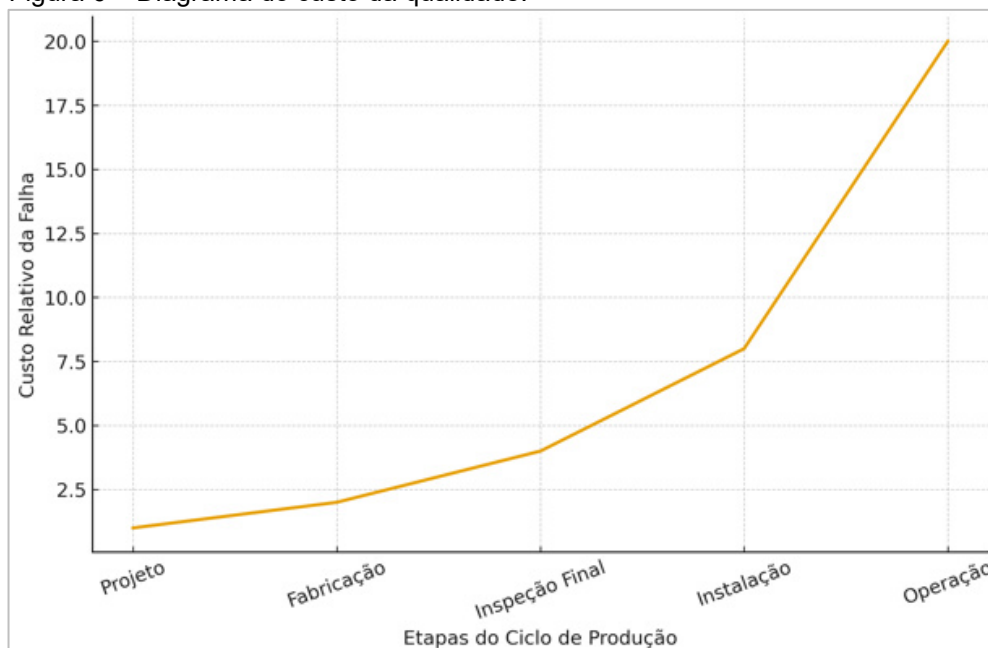
Elemento da Qualidade	Finalidade / Escopo	Normas Associadas
Procedimento de Soldagem (EPS/WPS)	Define variáveis essenciais do processo; garante repetibilidade e desempenho da junta soldada.	ISO 15614-1; ABNT NBR 14842
Qualificação de Soldadores	Avalia a habilidade do profissional em executar soldas conforme critérios técnicos.	ISO 9606-1; ABNT NBR 14842
Rastreabilidade de Materiais e Consumíveis	Garante conformidade química e mecânica; evita uso de consumíveis inadequados.	ISO 3834; Certificados de lote
Controle Ambiental	Minimiza efeitos de umidade, temperatura, contaminação e variações climáticas.	ISO 3834
Ensaio Não Destrutivo (END)	Verificam integridade da junta sem comprometer o componente; detectam defeitos internos e superficiais.	ABNT NBR ISO 9712; ISO 17637; ISO 17636; ISO 16810
Monitoramento Digital e Indústria 4.0	Registra parâmetros em tempo real e permite análises preditivas e rastreabilidade digital.	ISO 3834 (suporte)
Sistema de Gestão da Qualidade	Integra soldagem ao sistema geral de qualidade da empresa.	ISO 9001; ISO 3834
Cultura Organizacional e Treinamento	Reduz retrabalho e melhora habilidades operacionais; evita falhas repetitivas.	Diretrizes internas; Scotti & Ponomarev (2014)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ISO (2017–2021), ABNT (2018–2019), Scotti e Ponomarev (2014), Hellier (2012).

A relação entre o estágio de detecção de uma falha e o custo associado à sua correção é um dos princípios fundamentais da gestão da qualidade. De acordo com Juran (1999), quanto mais tarde um defeito é identificado no ciclo de produção, maior é o impacto financeiro, operacional e estrutural causado por sua correção. Em processos de soldagem, essa relação torna-se ainda mais crítica devido ao custo elevado de retrabalhos, possibilidade de falhas em serviço e riscos à segurança. A

Figura 6 mostra o diagrama ilustrando a evolução exponencial do custo da falha conforme ela avança pelas etapas do processo produtivo, reforçando a importância de inspeções precoces e sistemáticas.

Figura 6 – Diagrama do custo da qualidade.



Fonte: Juran (1999).

2.7 Boas práticas em inspeção de soldas

As boas práticas em inspeção de soldas são fundamentais para garantir a confiabilidade estrutural e o atendimento às normas técnicas. Segundo a American Welding Society (AWS, 2019), a inspeção é um processo contínuo que deve ser considerado desde o planejamento até a entrega da estrutura soldada. A inspeção visual preliminar desempenha papel central nesse contexto, avaliando preparação da junta, limpeza, geometria e condições de operação, conforme estabelecido na ISO 17637, o que previne falhas que dificilmente seriam corrigidas posteriormente.

A escolha adequada dos ensaios não destrutivos (END) é outro ponto crítico das boas práticas. Hellier (2012) ressalta que a combinação de métodos, como radiografia digital e ultrassom phased array, aumenta a probabilidade de detecção de descontinuidades, especialmente em aplicações de alta responsabilidade. Em paralelo, a definição de critérios de aceitação baseados na ISO 5817 assegura uniformidade entre fabricantes e inspetores, reduzindo conflitos técnicos e melhorando a consistência dos resultados (MARTINS et al., 2020).

A qualificação dos inspetores também constitui pilar essencial. A ABNT NBR

ISO 9712 define requisitos de formação, experiência e certificação para profissionais que atuam em END, garantindo que a interpretação dos resultados seja confiável e tecnicamente fundamentada. Além disso, a digitalização dos registros de inspeção e o uso de sistemas de gestão da qualidade aumentam a rastreabilidade e facilitam auditorias, conforme destacado por Pereira et al. (2020).

Por fim, as boas práticas incluem auditorias internas, treinamentos contínuos e adoção de tecnologias emergentes. Deming (1986) enfatiza que a melhoria contínua depende da avaliação sistemática dos processos, enquanto Silva e Scotti (2014) destacam a importância da capacitação recorrente para a redução de falhas. Recursos avançados, como visão computacional e inteligência artificial, vêm sendo incorporados à inspeção, ampliando precisão e reduzindo subjetividade (SHEN et al., 2023). O Quadro 6 mostra as boas práticas em inspeção de soldas.

Quadro 6 – Boas práticas em inspeção de soldas

Boas práticas	Descrição / Finalidade	Documentos associados
Inspeção Visual Preliminar (IVP)	Verifica preparação da junta, limpeza, alinhamento e geometria antes da soldagem.	ISO 17637
Seleção Adequada de END	Escolha de métodos conforme material, tipo de junta e criticidade; uso combinado aumenta a detecção.	ISO 17636; ISO 16810; ISO 13588
Critérios Normativos de Aceitação	Aplicação de níveis de qualidade padronizados para imperfeições.	ISO 5817
Qualificação de Inspetores	Garante competência técnica e confiabilidade dos resultados de inspeção.	ABNT NBR ISO 9712
Documentação e Rastreabilidade	Registros completos de condições, resultados e não conformidades; suporte a auditorias.	ISO 3834
Auditorias Internas	Verificação periódica da conformidade dos processos de inspeção.	ISO 9001; Princípios de Deming
Treinamento Contínuo	Atualização técnica de inspetores e soldadores; reduz erros e falhas.	Silva & Scotti (2014)
Uso de Tecnologias Avançadas	Aplicação de visão computacional, radiografia digital e IA para maior precisão.	Shen et al. (2023)
Integração com Manutenção Preditiva	Uso de dados de inspeção para estimativa de vida útil e confiabilidade.	Rai et al. (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ISO (2014–2021), ABNT (2018), AWS (2019), Hellier (2012), Deming (1986) e Shen et al. (2023).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo é de natureza bibliográfica, qualitativa e descritiva, voltada à análise de falhas críticas em soldas decorrentes da ausência de inspeção e de deficiências em sistemas de controle de qualidade. O procedimento metodológico foi estruturado em quatro etapas principais: levantamento, seleção, caracterização e análise comparativa dos casos documentados.

3.1 Levantamento das fontes

O levantamento bibliográfico foi realizado em bases científicas (Scopus, ScienceDirect, Web of Science e Google Scholar), repositórios técnicos, normas (ABNT NBR, ASME IX, AWS D1.1, ISO 3834, ISO 17637, ISO 5817, ISO 9712) e relatórios oficiais de órgãos reguladores como o National Transportation Safety Board (NTSB), U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Federal Aviation Administration (FAA) e Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

As principais palavras-chave utilizadas incluíram: *welding failures*, *inspection*, *NDT*, *structural integrity*, *pipeline failure*, *weld quality* e *case study in welding*.

3.2 Seleção dos casos críticos

Com base no levantamento, foram selecionados sete casos reais de falhas críticas envolvendo soldagem, todos documentados em relatórios oficiais ou literatura técnica confiável. Os casos incluídos nesta pesquisa foram:

- Caso 1 – Explosão do Gasoduto de San Bruno (EUA, 2010)
- Caso 2 – Falha no Oleoduto Olympic Pipeline (EUA, 1999)
- Caso 3 – Recalls Automotivos ocasionados por falhas de solda estrutural
- Caso 4 – Falhas em Plataformas Offshore e Estruturas Navais (Alexander Kielland e estaleiro Newport News)
- Caso 5 – Falhas em Soldas dos Montantes de Motor na Aviação Geral (Cessna/Piper)
- Caso 6 – Falha no Reator da Usina Nuclear Davis-Besse (EUA, 2002)
- Caso 7 – Explosão do Gasômetro da Usiminas (Brasil, 2018)

Os casos foram incluídos devido à sua relevância, documentação técnica e representatividade de diferentes contextos industriais.

3.3 Caracterização das falhas

Para cada caso selecionado foram descritos:

- mecanismo de falha (trinca, falta de fusão, corrosão, fadiga, subpenetração etc.)
- método de inspeção inexistente, mal executado ou inadequado
- consequências do evento (técnicas, econômicas, humanas e ambientais)
- práticas de inspeção que poderiam ter prevenido a falha

3.4 Análise comparativa

Os casos foram analisados de maneira interpretativa, buscando identificar padrões comuns entre falhas, causas e lacunas de inspeção. Foram produzidos quadros comparativos contendo:

- material soldado
- tipo de defeito encontrado
- método de END ausente ou falho
- consequência direta do evento
- boas práticas aplicáveis

Essa abordagem permitiu identificar tendências recorrentes e elementos críticos transversais a todos os setores.

3.5 Delimitação

Por se tratar de uma pesquisa bibliográfica, não foram realizadas inspeções práticas ou ensaios destrutivos/não destrutivos. A análise baseia-se estritamente em dados documentados. O objetivo é interpretar de forma crítica os casos e extrair lições aplicáveis à engenharia de soldagem e inspeção industrial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Caracterização do corpus de análise

O levantamento descrito na Seção 3.1 resultou em um corpus de sete casos críticos documentados em bases acadêmicas, normas técnicas e relatórios de órgãos reguladores. Os casos abrangem setores distintos (dutos terrestres, automotivo, naval/offshore, aeronáutico, nuclear e siderurgia), fornecendo variabilidade contextual suficiente para uma análise interpretativa (qualitativa) e comparativa, conforme a Seção 3.4. A unidade de análise adotada em cada caso é a junta soldada associada ao evento de falha, e as variáveis de interesse incluem: material, tipo de defeito, lacunas de inspeção/qualidade, consequências e boas práticas aplicáveis.

4.2 Síntese descritiva dos casos críticos

4.2.1 Caso 1 – Explosão do Gasoduto em San Bruno (EUA, 2010)

Em setembro de 2010, a cidade de San Bruno, na Califórnia, foi atingida por uma explosão em um gasoduto operado pela Pacific Gas and Electric Company (PG&E). O National Transportation Safety Board (NTSB) investigou o acidente e constatou que a tubulação apresentava falhas de fabricação não identificadas por inspeções subsequentes, revelando uma deficiência grave no sistema de controle de integridade da empresa (NTSB, 2011).

As análises periciais apontaram falta de fusão e descontinuidades internas nas soldas de costura. Essas falhas estavam presentes desde a fabricação do duto e poderiam ter sido detectadas por inspeções. O material envolvido era aço carbono de grande diâmetro, altamente suscetível a falhas quando submetido a pressões elevadas sem a devida verificação.

O NTSB destacou que não foram aplicados ensaios não destrutivos (ENDs) adequados, como radiografia industrial (RX) ou ultrassom (UT), técnicas capazes de revelar defeitos internos. A inspeção realizada se limitou a registros documentais e verificações visuais superficiais, sem eficácia para detectar falhas ocultas. Normas como a ISO 3834 e a ASME Seção IX já recomendavam a qualificação formal de juntas e procedimentos mais robustos, que não foram cumpridos.

A consequência foi a ruptura catastrófica do duto, com explosão que deixou

oito mortos, dezenas de feridos, destruição de 38 residências e prejuízos estimados em centenas de milhões de dólares. Além dos danos materiais, o acidente gerou um enorme impacto social e comprometeu a credibilidade da concessionária. O caso evidencia que a falta de inspeção adequada em juntas críticas transforma falhas latentes em tragédias. As Figuras 7 e 8 mostram os restos de parte do gasoduto após a explosão e a destruição causada após o incêndio e explosão em San Bruno.

Figura 7 - Restos de uma parte do gasoduto após a explosão.



Fonte: Wikipedia (2025).

Figura 8 - Destruição após incêndio e explosão em San Bruno



Fonte: Wikipedia (2025).

4.2.2 Caso 2 Falha em soldas do Oleoduto Olympic Pipeline (Bellingham, EUA – 1999)

Em 1999, o oleoduto da Olympic Pipeline, em Bellingham (EUA), sofreu uma ruptura catastrófica causada por uma falha localizada em uma junta soldada. A

investigação identificou que a região da solda apresentava defeitos preexistentes, associados a trincas por fadiga e falta de fusão adequada, que não foram detectados durante inspeções anteriores. Além disso, verificou-se que o oleoduto operava com histórico de danos mecânicos e corrosão, reforçando a necessidade de controles de integridade mais rigorosos.

A falha da solda resultou no vazamento de milhares de litros de gasolina em um córrego local, seguido por uma explosão que provocou incêndios de grande proporção. O evento causou três mortes, danos ambientais severos e destruição de infraestrutura nas proximidades do duto.

Os resultados desse caso evidenciam que a ausência de inspeções volumétricas adequadas, falhas no monitoramento contínuo da integridade do oleoduto e a falta de manutenção corretiva contribuíram diretamente para a evolução da trinca até a ruptura. O acidente tornou-se um marco regulatório, reforçando mundialmente a importância de ENDS avançados e de programas robustos de gestão de integridade em dutos de transporte de combustíveis.

A Figura 9 mostra a região atingida pelo vazamento de gasolina no Whatcom Creek, logo após o rompimento do oleoduto da Olympic Pipeline. Técnicos realizam os primeiros procedimentos de contenção e avaliação ambiental, evidenciando a extensão da contaminação no solo e na vegetação local.

Figura 9 – Área contaminada após o rompimento do oleoduto



Fonte: Washington State Department of Ecology (1999).

A Figura 10 revela a enorme coluna de fumaça provocada pela ignição do

combustível derramado ao longo do curso d'água. A escala do acidente é perceptível pelo contraste com as edificações ao fundo, ilustrando a magnitude do incêndio e o impacto imediato sobre a cidade de Bellingham.

Figura 10 – Coluna de fumaça após a explosão



Fonte: Pipeline Safety Trust / HistoryLink (1999).

4.2.3 Caso 3 – Recalls automotivos por falhas de solda

Diversas montadoras registraram ocorrências de falhas em soldas estruturais de carrocerias e componentes automotivos, envolvendo pontos de solda frios, falta de fusão e subpenetração. Esses defeitos estavam associados a inconsistências no processo de soldagem robotizado, especialmente em linhas de produção de alto volume.

A falta de inspeções criteriosas permitiu que essas falhas passassem despercebidas durante a fabricação. A inspeção amostral e predominantemente visual mostrou-se insuficiente para identificar defeitos microscópicos que comprometiam a integridade estrutural, evidenciando limitações no controle de qualidade aplicado ao processo.

As consequências foram relevantes do ponto de vista de segurança veicular, já que a resistência da carroceria em situações de colisão poderia estar reduzida. A identificação tardia das falhas resultou em campanhas de recall, gerando custos elevados com reparos e substituições de componentes.

Os resultados indicam que a implementação de técnicas automatizadas de ensaios não destrutivos, como ultrassom avançado ou radiografia digital, poderia ter evitado parte dos problemas observados. Além disso, práticas como auditorias de processo, monitoramento contínuo e rastreabilidade dos lotes de soldagem mostram-se fundamentais para garantir a confiabilidade estrutural na indústria automotiva. A Figura 11 apresenta uma região de carroceria automotiva onde são visíveis dois pontos de solda com falha de aderência. O primeiro ponto, indicado pela seta com o texto “Ponto de Solda Iniciando Destacamento”, mostra perda parcial da união, sugerindo que o núcleo fundido não ancorou adequadamente as chapas metálicas. Este estágio indica redução da área efetiva de ligação, provavelmente causada por subpenetração, corrente insuficiente, pressão inadequada dos eletrodos ou contaminação superficial.

Figura 11 – Destacamento de pontos de solda em carroceria automotiva



Fonte: Kuo, Jayasuriya e Wung (2003).

Visualmente, observa-se que ambos os pontos apresentam desgaste ou arrancamento, o que caracteriza uma condição crítica para a integridade estrutural, especialmente em regiões sujeitas a carregamentos dinâmicos. A falha mostra que o processo de soldagem não atingiu a qualidade necessária e indica possível inconsistência do processo robotizado, ausência de inspeção adequada ou parâmetros mal ajustados.

A Figura 12 apresenta a superfície de uma chapa metálica onde é visível a marca característica de um ponto de solda por resistência (RSW) defeituoso. A imagem revela uma deformação circular pronunciada, com uma borda irregular e

marcas concêntricas, indicando expulsão de material e instabilidade térmica durante o processo de soldagem.

Figura 12 – Deformação e instabilidade térmica resultantes de solda por pontos defeituosa



Fonte: Kuo, Jayasuriya e Wung (2003).

A parte central do ponto mostra ausência de uma zona fundida homogênea, sugerindo núcleo inconsistente ou incompleto. As ondulações e saliências ao redor evidenciam que houve pressão inadequada dos eletrodos, possivelmente combinada com corrente excessiva, o que provocou aquecimento localizado acima do ideal. Esse comportamento é típico de falhas conhecidas como expulsão ou sobre-aquecimento, que resultam em redução da resistência mecânica do ponto.

4.2.4 Caso 4 – Plataformas offshore e estruturas navais

Pesquisas realizadas em estruturas offshore e embarcações navais identificaram falhas críticas em soldas decorrentes da ausência de inspeções adequadas. Em materiais amplamente utilizados nesses ambientes, como o aço naval EH36, foram constatadas trincas por fadiga e inclusões que permaneceram não detectadas durante a fabricação e operação.

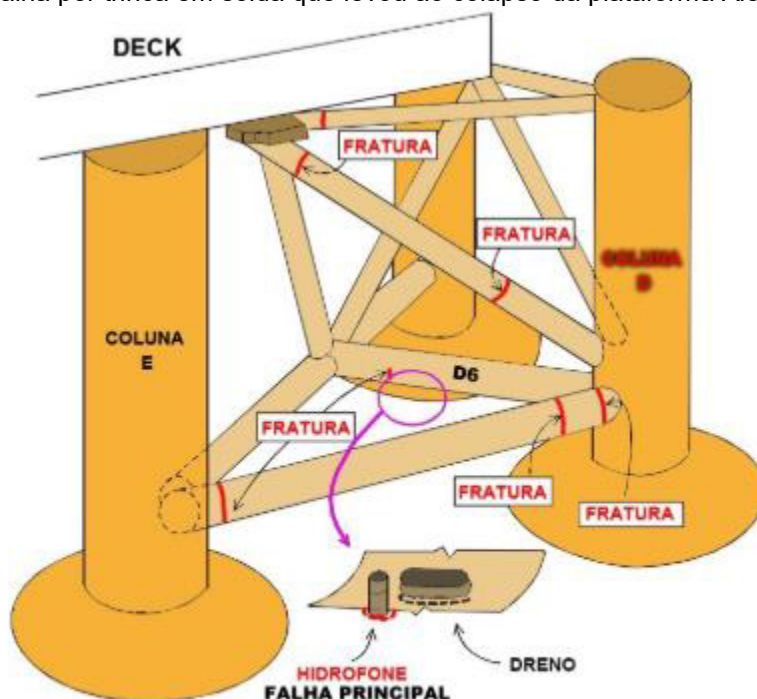
Em diversas situações, as inspeções aplicadas restringiram-se apenas aos métodos visual e por líquidos penetrantes, que não possuem capacidade para identificar defeitos internos. Técnicas mais sensíveis, como ultrassom ou radiografia, recomendadas para juntas críticas, não foram empregadas de forma consistente, deixando falhas internas sem detecção.

As consequências observadas incluíram aumento do risco de colapso estrutural em condições severas de operação, além de paralisações inesperadas e custos elevados com reparos emergenciais. A ausência de inspeções volumétricas sistemáticas comprometeu a confiabilidade e a vida útil das unidades avaliadas.

Os resultados evidenciam a necessidade de incorporar programas de inspeção mais completos, com utilização de métodos avançados capazes de detectar falhas internas de difícil acesso.

A Figura 13 mostra um acidente ocorrido em 27 de março de 1980, a plataforma semi-submersível Alexander L. Kielland, operando no campo petrolífero de Ekofisk, no Mar do Norte, sofreu um dos acidentes mais marcantes da indústria offshore. Durante uma forte tempestade, uma das cinco colunas de sustentação da estrutura rompeu-se subitamente, provocando o tombamento quase imediato da plataforma. O colapso foi consequência de uma trinca por fadiga que se iniciou em uma solda defeituosa presente em uma das hastes do sistema de ancoragem, especificamente em um suporte de estai.

Figura 13 – Falha por trinca em solda que levou ao colapso da plataforma Alexander Kielland.



**Locais de fraturas dos contraventamento tubulares.
A fratura a partir da solda da D6 sobrecarregou
toda a estrutura, fraturando em vários pontos.**

Fonte: Inspeção de equipamentos (2013).

A ruptura comprometeu a estabilidade hidrostática da unidade, levando ao escorregamento lateral e, em seguida, ao capotamento total da plataforma. O desastre resultou na morte de 123 trabalhadores, tornando-se um marco regulatório para segurança offshore. O caso evidenciou a importância de programas robustos de inspeção, controle de fadiga em estruturas flutuantes e revisão de procedimentos de projeto e soldagem. Após o acidente, normas e práticas internacionais foram significativamente reforçadas, especialmente no que diz respeito à detecção precoce de trincas e soldas críticas em estruturas marítimas. A Figura 14 mostra o detalhe da plataforma que apresentou colapso.

Figura 14 – Detalhe da plataforma Alexander Kielland que apresentou colapso.



Fonte: Inspeção de equipamentos (2013).

Um outro fato interessante que chamou a atenção do mundo foi as análises realizadas sobre os programas de construção naval do estaleiro Newport News onde foi revelado um dos maiores casos recentes de inconsistência em inspeções de soldagem no setor militar. Mais de dez mil soldas aplicadas na fabricação de oito submarinos e um porta-aviões foram classificadas como suspeitas após a identificação de relatórios de inspeção falsificados ao longo do processo produtivo.

Essas soldas, utilizadas em estruturas altamente críticas, exigiam níveis rigorosos de qualidade devido às elevadas pressões hidrostáticas e condições severas de operação a que esses navios são submetidos.

A investigação mostrou que diversas juntas, consideradas inicialmente conformes, não passaram por métodos de ensaio apropriados ou tiveram seus resultados manipulados para indicar aprovação. Isso gerou uma lacuna significativa na confiabilidade estrutural das embarcações, já que falhas internas não detectadas podem evoluir para trincas, vazamentos ou perda de integridade em compartimentos pressurizados.

A necessidade de reavaliar milhares de soldas resultou em atrasos operacionais, inspeções adicionais, alto custo de retrabalho e impacto direto nos cronogramas de prontificação das embarcações. Além disso, a situação levantou preocupações sobre segurança, uma vez que submarinos e porta-aviões operam em ambientes onde falhas estruturais apresentam risco extremo para tripulações e operações militares. A Figura 15 mostra o porta aviões USS George H. W. Bush durante manobras em altas velocidades.

Figura 15 – Porta-aviões USS George H. W. Bush submetido a esforços estruturais em manobra de alta velocidade.



USS George H. W. Bush, Classe "Nimitz" inclinando-se fortemente para boreste ao guinar para bombordo, em provas de manobras em alta velocidade. Imaginem os esforços que as soldas não estão sendo sujeitas nesse momento.

Fonte: Inspeção de equipamentos (2009).

Em 2003, foi identificado que soldadores do Naval Air Depot, em North Island

(Califórnia), executaram serviços de soldagem sem a qualificação necessária em tubulações do sistema de catapultas de quatro porta-aviões: USS Abraham Lincoln, USS Constellation, USS Nimitz e USS John C. Stennis. As inspeções revelaram que diversas juntas apresentavam execução inadequada, gerando risco estrutural significativo. Embora inicialmente considerado pouco provável, o rompimento dessas soldas durante a operação das catapultas poderia resultar na perda de aeronaves durante o lançamento, devido às elevadas pressões e esforços dinâmicos envolvidos no processo. A Figura 16 mostra um submarino nuclear da classe SSN Virginia passando por soldagem.

Figura 16 – Submarino SSN da classe Virginia com solda sendo realizada.



Fonte: Inspeção de equipamentos (2009).

Aproximadamente 10% das soldas executadas não foram inspecionadas nos submarinos, sendo que partes delas envolviam regiões críticas como juntas do casco de pressão. Esses tipos de submarinos da classe “Virginia” possuem mais de 300.000 soldas e não execução da inspeção das soldas poderiam resultar uma diferença entre a vida e a morte. A solda nestes submarinos são extremamente críticas.

4.2.5 Caso 5 – Falhas em soldas dos montantes de motor na aviação geral (Cessna e Piper).

Inspeções estruturais realizadas em aeronaves da aviação geral identificaram

falhas recorrentes nas soldas dos montantes do motor, componentes fabricados em tubos de aço soldados que suportam o conjunto propulsor.

Em diversos modelos, incluindo aeronaves de pequeno porte utilizadas para treinamento e transporte regional, foram observadas trincas nos cordões de solda e nas regiões adjacentes aos “clusters” estruturais, áreas com elevada concentração de tensões.

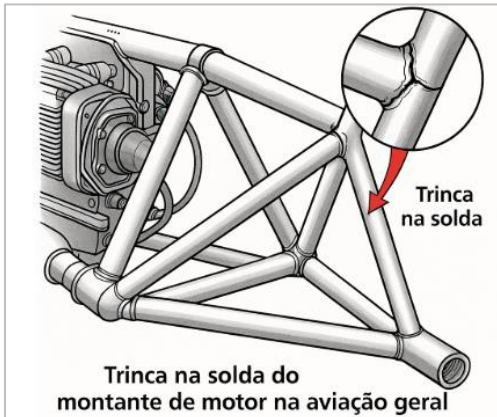
As análises mostraram que parte dessas falhas estava relacionada a processos de soldagem inadequados durante a fabricação ou reparos anteriores, somadas à ausência de inspeções periódicas capazes de identificar degradação por fadiga térmica e vibratória. Como esses componentes operam sob vibrações intensas, qualquer imperfeição não detectada tende a se propagar rapidamente, comprometendo a capacidade de suportar o motor em condições de voo.

Em razão desses achados, autoridades aeronáuticas determinaram inspeções obrigatórias em centenas de aeronaves, exigindo avaliação detalhada das soldas por métodos como líquidos penetrantes e, em alguns casos, inspeções volumétricas. Várias unidades precisaram ser retiradas temporariamente de serviço para reparos e substituição de montantes fissurados, gerando custos operacionais adicionais e impactos para operadores e centros de manutenção.

Os resultados ressaltam que, na aviação, mesmo componentes aparentemente simples, como suportes tubulares soldados, podem se tornar pontos críticos de falha se não forem submetidos a processos rigorosos de inspeção. A evolução dessas trincas evidencia a importância de controles de qualidade consistentes, rastreabilidade dos reparos e uso de ensaios não destrutivos adequados em estruturas sujeitas a vibração contínua.

As Figuras 17 e 18 ilustram falhas que ocorrem em regiões soldadas de componentes tubulares utilizados na aviação geral. A Figura 15, à esquerda apresenta, de forma esquemática, a formação de trincas em pontos de junção do montante de motor, onde a geometria dos tubos e a concentração de tensões tornam a região especialmente vulnerável à fadiga. A Figura 16, à direita mostra um caso real de abertura e trinca em uma solda de suporte estrutural, evidenciando o mesmo mecanismo de degradação observado no modelo teórico. Ambas reforçam que soldas executadas sem controle rigoroso ou sem inspeções periódicas adequadas representam pontos críticos para a integridade estrutural aeronáutica.

Figuras 17 e 18 – Trincas em soldas de componentes tubulares aeronáuticos: comparação entre representação esquemática e falha real



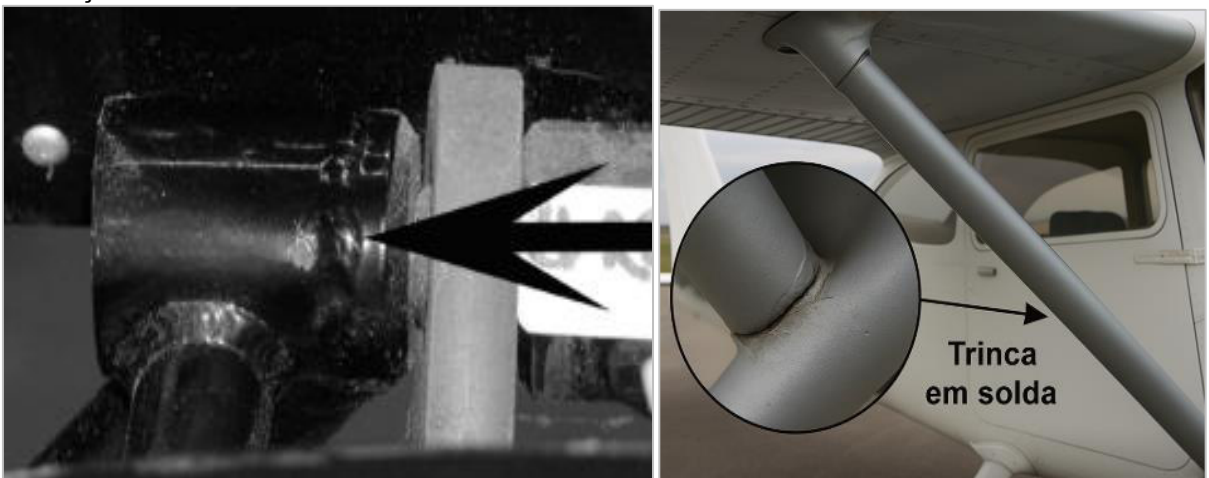
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)



Fonte: Weldaero (2023).

As imagens abaixo apresentam falhas típicas de estruturas tubulares aeronáuticas soldadas. Na Figura 19, observa-se a trinca circunferencial no “pé” do suporte de motor, região criticamente carregada e documentada em boletins de serviço para aeronaves Cessna. Já a Figura 20 mostra a trinca localizada em uma união soldada do suporte de asa (strut), também associada à fadiga em pontos de alta solicitação mecânica. Em ambos os casos, a falha inicia na interface soldada, evidenciando a sensibilidade dessas regiões à propagação de trincas quando não são submetidas a inspeções periódicas adequadas.

Figuras 19 e 20 – Trincas em soldas de componentes tubulares aeronáuticos em regiões de alta solicitação mecânica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em conceitos de integridade estrutural aplicados à aviação geral.

4.2.6 Caso 6 – Usina Nuclear Davis-Besse (EUA, 2002)

Em inspeções realizadas em 2002, foram identificadas falhas significativas nas

soldas da tampa do vaso de pressão do reator de uma unidade nuclear localizada em Ohio. A análise indicou que a integridade da solda havia sido comprometida pela progressão de corrosão severa, efeito direto da falta de inspeções adequadas em regiões consideradas críticas para a segurança da planta. Em ligas especiais utilizadas em reatores, mesmo descontinuidades mínimas podem evoluir rapidamente devido às condições extremas de operação, tornando essencial a detecção precoce de qualquer anomalia.

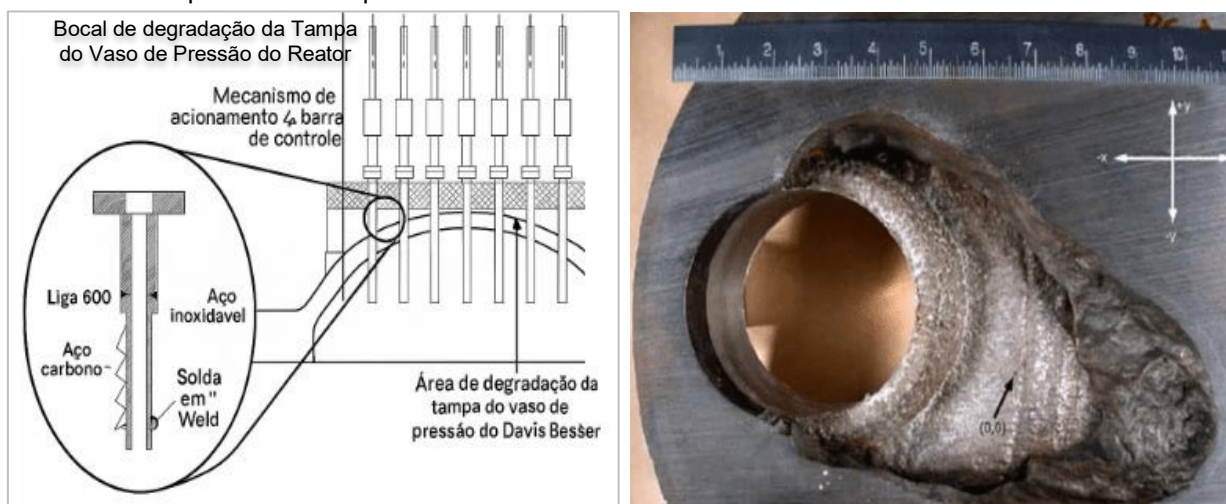
A falha observada estava associada à corrosão assistida por estresse atuando sobre a junta soldada, processo que evoluiu de forma silenciosa ao longo do tempo. O problema não foi identificado porque as inspeções aplicadas se limitaram a verificações visuais e análises documentais, sem a utilização de métodos volumétricos capazes de detectar defeitos internos. Em instalações nucleares, esse tipo de limitação compromete a capacidade de identificar mecanismos de degradação que se desenvolvem sob a superfície.

A ausência de técnicas avançadas de ensaio, como ultrassom especializado ou mapeamento por correntes parasitas, permitiu que o defeito se propagasse até atingir dimensões críticas. Quando finalmente identificado, o estado da solda já exigia intervenções emergenciais de grande complexidade e elevado custo, incluindo substituição de componentes e longas interrupções operacionais.

As figuras 21 e 22 representam, de forma complementar, o mesmo mecanismo de falha observado no caso de Davis-Besse: a degradação do bocal da tampa do vaso de pressão do reator. Na Figura 19, o diagrama técnico evidencia a geometria do bocal, a posição da solda do tipo *J-groove* e os materiais envolvidos (aço carbono, aço inoxidável e liga Alloy 600), destacando a região onde ocorreu a perda de material devido ao ataque combinado de corrosão e trinca por tensão. Já a Figura 20 apresenta a evidência física da falha, mostrando o bocal real com severo dano estrutural, incluindo perda significativa de espessura e abertura irregular resultante da progressão do processo corrosivo.

Em conjunto, as figuras permitem visualizar tanto a localização exata do defeito quanto o aspecto real do componente após a falha, reforçando a gravidade da ausência de inspeções volumétricas adequadas.

Figuras 21 e 22 – Comparação entre representação esquemática e evidência real da degradação do bocal da tampa do vaso de pressão no caso Davis-Besse



Fonte: NRC (2003).

Os resultados evidenciam que, em ambientes nucleares, a confiabilidade da soldagem depende diretamente de inspeções sistemáticas, abrangentes e redundantes. A falta de monitoramento adequado não apenas aumenta o risco de falhas estruturais graves, como também expõe a instalação a condições que podem evoluir para cenários de alto potencial de dano. Esse caso reforça a necessidade de protocolos rigorosos de inspeção e manutenção em juntas soldadas sujeitas a condições extremas.

4.2.7 Caso 7 – Explosão do Gasômetro da Usiminas (Ipatinga–MG, 2018)

Em 2018 ocorreu uma explosão de grandes proporções no gasômetro da Usiminas, em Ipatinga (MG), estrutura responsável por armazenar e equalizar a pressão dos gases provenientes dos altos-fornos. A análise técnica do evento indicou que a falha teve origem no sistema de contenção do gasômetro e nas tubulações de distribuição associadas, que apresentavam sinais de degradação por fadiga térmica, corrosão e possíveis descontinuidades em soldas críticas não identificadas em inspeções anteriores.

As tubulações e conexões que alimentavam o gasômetro operavam sob condições variáveis de pressão e temperatura, exigindo integridade estrutural rigorosa. Entretanto, evidências apontaram ausência de inspeções volumétricas mais avançadas, uso limitado de ensaios ultrassônicos e intervalos de manutenção superiores ao recomendado para sistemas sujeitos a atmosferas industriais agressivas. Essas lacunas facilitaram a progressão de trincas internas e perda

gradual de espessura, contribuindo para a falha súbita da estrutura.

A explosão resultou em danos significativos em instalações adjacentes, projeção de fragmentos, incêndio e múltiplos feridos, além de paralisações temporárias na produção siderúrgica. O impacto operacional e econômico foi amplo, envolvendo interrupção do fornecimento de gás de processo, necessidade de reparos emergenciais e mobilização de equipes de segurança, manutenção e investigação técnica.

A Figura 23, imagem aérea, mostra o gasômetro severamente deformado após a explosão, com grande parte de sua parede lateral destruída e projeção de chapas metálicas para fora da estrutura. O registro evidencia a magnitude do colapso e a extensão da área afetada dentro da planta industrial.

Figura 23 – Vista aérea do gasômetro após a explosão



Fonte: O Tempo (2018).

A Figura 24 apresenta um close lateral do gasômetro, destacando a ruptura extensa da chapa metálica e o colapso parcial da estrutura cilíndrica. É possível observar amassamentos, aberturas irregulares e escurecimento por fuligem, ilustrando claramente o impacto da falha e a perda de integridade da contenção.

Figura 24 – Detalhe lateral do gasômetro danificado



Fonte: G1 / TV Globo (2018).

Os resultados desse caso reforçam a importância da implantação de programas robustos de integridade estrutural, incluindo monitoramento contínuo de tubulações, inspeções programadas em gasômetros, auditorias técnicas independentes e aplicação sistemática de ensaios não destrutivos avançados. A ocorrência demonstrou que estruturas de armazenamento de gases industriais demandam vigilância permanente, visto que pequenas falhas não detectadas podem evoluir rapidamente para eventos de elevada gravidade.

4.3 Discussão dos resultados

Os casos analisados revelaram um padrão recorrente: falhas em soldas ocorrem predominantemente em situações em que inspeções são inexistentes, insuficientes ou mal executadas. Apesar de envolverem setores industriais distintos, todos os eventos apresentam pontos de convergência.

Primeiro, observa-se que a ausência de métodos volumétricos (UT, TOFD, radiografia digital) foi determinante em praticamente todos os acidentes. Tais técnicas poderiam ter identificado defeitos internos como falta de fusão, trincas por fadiga ou corrosão assistida por estresse antes que evoluíssem para ruptura. A dependência exclusiva de inspeção visual ou de líquidos penetrantes mostrou-se tecnicamente inadequada para juntas críticas.

Outro ponto relevante foi que os materiais envolvidos eram, em grande parte, ligas suscetíveis a fadiga, corrosão e variações térmicas, condições que exigem

programas robustos de integridade. A falta de rastreabilidade, auditorias internas deficientes e o uso de registros incompletos também contribuíram para atrasos na detecção das falhas.

Além disso, os resultados mostraram que as consequências da falha em soldas ultrapassam o campo técnico, afetando vidas humanas, meio ambiente, reputação institucional e a continuidade operacional. Em dutos, aeronaves, plataformas e usinas nucleares, uma única solda comprometida foi suficiente para desencadear acidentes de grande magnitude.

Por fim, as análises demonstraram que boas práticas de inspeção, controle de qualidade e monitoramento contínuo poderiam ter evitado todos os casos apresentados. A implementação sistemática de ensaios não destrutivos avançados, combinada com qualificação rigorosa de procedimentos e profissionais, constitui o caminho mais eficaz para a prevenção de falhas catastróficas em soldagem.

5 CONCLUSÃO

A análise dos sete casos demonstrou que as falhas críticas em soldas ocorreram predominantemente em situações em que a inspeção foi inexistente, insuficiente ou inadequadamente executada. Embora envolvessem setores distintos incluindo transporte de combustíveis, indústria automotiva, estruturas offshore e navais, aviação geral, setor nuclear e siderurgia, todos apresentaram a mesma tendência: a ausência de controle de qualidade e de ensaios não destrutivos específicos, que permitiram a evolução de defeitos de tal modo que chegassem até o ponto de ruptura.

Verificou-se que a dependência exclusiva de inspeções visuais e métodos superficiais se mostrou tecnicamente impropria para juntas classificadas como críticas. Também se constatou que falhas estruturais resultaram não apenas em danos técnicos, mas em consequências econômicas, ambientais e humanas de grande magnitude. Em todos os casos, métodos adequados de inspeção, qualificação rigorosa de procedimentos e profissionais, além de auditorias independentes, teriam evitado as falhas observadas.

Concluiu-se, portanto, que a inspeção e o controle de qualidade em soldagem não deveriam ser interpretados como custos adicionais, mas como investimentos essenciais para a segurança operacional e para a redução de perdas. A aplicação sistemática de boas práticas, normas internacionais e ENDS avançados ainda se mostra como o caminho mais eficaz para a prevenção de falhas catastróficas em soldas.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 14842: Qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT NBR ISO 3834: Requisitos da qualidade para a soldagem por fusão de materiais metálicos. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT NBR ISO 9712: Ensaio não destrutivo – Qualificação e certificação de pessoal. Rio de Janeiro, 2018.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook. 10. ed. Miami: AWS, 2019.

AWS. AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel. Miami: American Welding Society, 2019.

ARSIĆ, M. et al. Qualification of welders according to EN ISO 9606. Welding & Joining Journal, 2022.

CHEN, Z. et al. Real-time monitoring of welding processes using optical and acoustic sensors. Journal of Manufacturing Processes, v. 68, p. 345–359, 2021.

DEMING, W. E. Out of the Crisis. Cambridge: MIT Press, 1986.

GOLDAK, J.; AKHLAGHI, M. A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B, 1984.

GOU, J. et al. Hydrogen-induced cracking in welded X80 steel. Corrosion Science, 2023.

G1. Explosão em gasômetro da Usiminas deixa feridos em Ipatinga. Vales de Minas Gerais, 10 ago. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/vales-mg/noticia/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

HELLIER, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS. Caso 035 – E a plataforma virou: Mar do Norte (1980). 2013. Disponível em: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/2013/09/caso-035-e-plataforma-virou-mar-do.html>. Acesso em: 09 nov. 2025.

INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS. Caso 044 – Relatórios de inspeção de soldas falsificados. Blog Inspeção de Equipamentos, 23 out. 2013. Disponível em:

<https://inspecaoequipto.blogspot.com/2013/10/caso-044-relatorios-de-inspecao-de.html>. Acesso em: 09 nov. 2025.

ISO. ISO 13916: Welding — Measurement of preheating temperature, interpass temperature and preheat maintenance temperature. Geneva: ISO, 2025.

ISO. ISO 15614-1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Part 1. Geneva: ISO, 2017.

ISO. ISO 17637 – Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion-welded joints. Geneva: ISO, 2016.

ISO. ISO 3834 – Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Geneva: ISO, 2021.

ISO. ISO 5817 – Welding — Fusion-welded joints — Quality levels for imperfections. Geneva: ISO, 2014.

ISO. ISO/TR 15608: Welding — Guidelines for a metallic materials grouping system. Geneva: ISO, 2017.

JURAN, J. M. Juran's Quality Handbook. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KOU, S. Welding Metallurgy. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2021.

KUO, A.; JAYASURIYA, A.; WUNG, P. The effect of high mileage spot weld degradation on vehicle body joint stiffness. SAE Technical Papers, Detroit, p. 1–10, 2001.

LI, X. et al. Influence of porosity on fatigue properties of welded joints. Journal of Materials Processing Technology, v. 291, p. 117–129, 2021.

LIMA, F. et al. Aplicação de normas de qualificação em soldagem no contexto brasileiro. Revista Soldagem & Materiais, 2020.

LIMA, F. et al. Gestão da qualidade na soldagem. Revista Soldagem & Materiais, 2020.

MARTINS, T. et al. Digital radiography applied to weld inspection. NDT & E International, v. 115, 2020.

MIČIAN, M. et al. Effect of the t_{8/5} cooling time on the properties of S960MC steel in the HAZ of welded joints. Metals, v. 10, n. 2, p. 1–14, 2020.

MODENESI, P. J. Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas. Notas de Aula. UFMG, 2001.

NRC – UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Davis-Besse Reactor Vessel Head Cavity – Photographic Evidence. Washington, 2003. Disponível em: <https://www.nrc.gov/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

O TEMPO. Explosão de gásômetro assusta moradores e deixa feridos em Ipatinga. Belo Horizonte, 10 ago. 2018. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

PEREIRA, H. et al. Digital inspection and predictive maintenance. Journal of Manufacturing Systems, 2020.

PIPELINE SAFETY TRUST. Bellingham Olympic Pipeline Disaster – Photo Archive. 1999. Disponível em: <https://pstrust.org/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

PROMOPPATUM, P. et al. A comprehensive comparison of analytical and numerical prediction of thermal history in welding. Engineering, 2017.

QI, X. et al. Analysis of lack of fusion defects in steel welded joints. Materials Science and Engineering A, v. 891, p. 144–156, 2024.

QI, Y. et al. Weld failures in harsh environments. Engineering Failure Analysis, 2024.

RADAJ, D.; SONSINO, C.; FRICKE, W. Fatigue Assessment of Welded Joints. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.

RAI, S. et al. Advances in PAUT and TOFD for weld inspection. Ultrasonic Testing Journal, v. 54, p. 201–214, 2022.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

SHANKAR, V.; PRAKASH, S. Applications of liquid penetrant testing. Materials Today: Proceedings, 2019.

SHEN, C. et al. Advances in nondestructive testing for weld defect detection. NDT & E International, v. 140, 2023.

SHEN, C. et al. Artificial intelligence in welding quality control. NDT & E International, 2023.

SILVA, R.; SCOTTI, A. Custos da qualidade em soldagem. Soldagem & Materiais,

2014.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY. Olympic Pipe Line Explosion – Environmental Response and Site Assessment. Olympia, 1999. Disponível em: <https://ecology.wa.gov/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

WELDAERO. Cessna 182 – Engine Mount Crack. 2023. Disponível em: <https://www.weldaero.com/projects/cessna-182-engine-mount-crack>. Acesso em: 09 nov. 2025.

WIKIPEDIA. San Bruno pipeline explosion. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/San_Bruno_pipeline_explosion. Acesso em: 06 nov. 2025.

WU, B. et al. Hydrogen-induced cracking in high-strength steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, n. 12, p. 4522–4534, 2024.

WU, W. et al. Effect of heat input on microstructure and properties of deposited metal. *Materials*, v. 16, n. 8, 2023.