

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**FALHAS METALÚRGICAS EM ESTRUTURAS CRÍTICAS:  
UM ESTUDO TEÓRICO DE CASOS REAIS**

**ALMIR ROGERIO DA SILVA  
LUIZ FERNANDO MOREIRA DA SILVA**

**Pindamonhangaba - SP  
2025**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**FALHAS METALÚRGICAS EM ESTRUTURAS CRÍTICAS:  
UM ESTUDO TEÓRICO DE CASOS REAIS**

**ALMIR ROGERIO DA SILVA  
LUIZ FERNANDO MOREIRA DA SILVA**

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**

S586f Silva, Almir Rogerio da.  
Falhas metalúrgicas em estruturas críticas: um estudo teórico de casos reais / Almir Rogerio da Silva; Luiz Fernando Moreira da Silva / FATEC Pindamonhangaba, 2025.  
46f.; il.

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

1. Falhas metalúrgicas. 2. Fadiga. 3. Corrosão sob tensão.  
4. Fragilização por hidrogênio. I. Silva, Almir Rogerio da. II. Silva, Luiz Fernando Moreira da. III. Rivaroli Junior, Amir. IV. Título.

CDD 620.16


Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“FALHAS METALÚRGICAS EM ESTRUTURAS  
CRÍTICAS: UM ESTUDO TEÓRICO DE CASOS  
REAIS”.**

**Almir Rogerio da Silva Timoteo  
Luiz Fernando Moreira da Silva**

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**

### **Almir Rogério da Silva**

Dedico este trabalho a Deus, pela força, sabedoria e saúde concedidas ao longo de toda esta caminhada acadêmica. Em especial a minha esposa e filha, por acreditarem no meu potencial e por me oferecerem amor, paciência e incentivo em todos os momentos. Aos amigos e colegas do curso de Processos Metalúrgicos da FATEC de Pindamonhangaba, pelo companheirismo, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio mútuo durante esta jornada. E de modo especial, dedico este TCC a todos que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação pessoal e profissional, sendo parte essencial desta conquista.

### **Luiz Fernando Moreira da Silva**

Dedico este trabalho a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta jornada, oferecendo apoio, incentivo e inspiração nos momentos desafiadores.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Almir Rogério da Silva**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, determinação e sabedoria para enfrentar os desafios desta caminhada acadêmica. Aos meus familiares, pelo apoio constante, pelas palavras de encorajamento e pela compreensão nos momentos de ausência. Aos professores da FATEC de Pindamonhangaba, pelo comprometimento, dedicação e por compartilharem seus conhecimentos com excelência, contribuindo para o meu crescimento profissional. Em especial, agradeço ao Professor Amir Rivaroli Junior, meu orientador, pela paciência, orientação técnica e valiosas contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Aos colegas do curso de Processos Metalúrgicos, pelo companheirismo, pelas discussões enriquecedoras e pelo incentivo ao longo desta jornada.

### **Luiz Fernando Moreira da Silva**

Sou profundamente grato aos meus familiares e amigos pelo apoio e compreensão em todos os momentos desta caminhada. À minha família, que sempre esteve ao meu lado com palavras de incentivo e carinho, e aos docentes e colegas de curso, que compartilharam conhecimento e experiências, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional.

## EPÍGRAFE

*“A ciência se constrói mais com os erros  
corrigidos do que com os acertos celebrados.”  
— Karl Popper.”*

Silva, A. R.; Silva, L. F. M., **Falhas Metalúrgicas em Estruturas Críticas: Um Estudo Teórico de Casos Reais**. 2025.46p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise teórica e comparativa dos principais mecanismos metalúrgicos de falha em componentes e estruturas críticas de diferentes setores industriais, com destaque para fadiga, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio, fluência e defeitos de fabricação. A introdução aborda a relevância do tema para a confiabilidade estrutural e a prevenção de acidentes, contextualizando falhas históricas emblemáticas, como as dos navios Liberty, dos aviões Comet e da ponte Silver Bridge. A metodologia adotada consistiu em revisão bibliográfica e análise crítica de casos clássicos e contemporâneos, comparando diferentes setores industriais quanto a condições operacionais, fatores ambientais e características microestruturais. Os resultados demonstram padrões recorrentes de falhas e divergências entre autores sobre causas predominantes e estratégias de mitigação. Verificou-se também que, apesar dos avanços em inspeção e monitoramento, falhas graves continuam ocorrendo devido a fatores humanos e organizacionais, como imprudência operacional, uso inadequado de materiais e manutenção deficiente. Conclui-se que a integração entre conhecimento metalúrgico, aplicação rígida de normas técnicas e tecnologias modernas de inspeção é essencial para aumentar a confiabilidade estrutural e prevenir acidentes, exigindo, além do domínio técnico, uma cultura organizacional sólida voltada à segurança.

**Palavras-chave:** Falhas metalúrgicas; Fadiga; Corrosão sob tensão; Fragilização por hidrogênio.

Silva, A. R.; Silva, L. F. M. Metallurgical Failures in Critical Structures: A Theoretical Study of Real Cases. 2025. 46p. Graduation Work (Technology Course in Metallurgical Processes). Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

## **ABSTRACT**

The present work presents a theoretical and comparative analysis of the main metallurgical failure mechanisms in critical components and structures from different industrial sectors, with emphasis on fatigue, stress corrosion cracking, hydrogen embrittlement, creep, and manufacturing defects. The introduction highlights the relevance of the topic for structural reliability and accident prevention, contextualizing emblematic historical failures such as those of the Liberty ships, the Comet aircraft, and the Silver Bridge. The adopted methodology consisted of a literature review and critical analysis of both classical and contemporary case studies, comparing different industrial sectors in terms of operating conditions, environmental factors, and microstructural characteristics. The results reveal recurring failure patterns and divergences among authors regarding predominant causes and mitigation strategies. It was also observed that, despite significant advances in inspection and monitoring, severe failures continue to occur due to human and organizational factors, such as operational negligence, improper material use, and poor maintenance practices. It is concluded that the integration of metallurgical knowledge, strict application of technical standards, and modern inspection technologies is essential to increase structural reliability and prevent accidents. This requires not only technical expertise but also a strong organizational culture focused on safety.

**Keywords:** Metallurgical failures; Fatigue; Stress corrosion cracking; Hydrogen embrittlement.

## **LISTA DE ABREVIATURAS DE SIGLAS**

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials  
(Associação Americana de Autoridades Estaduais de Rodovias e Transportes)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – American Bureau of Shipping (agência americana de navegação)

API - American Petroleum Institute

ASM – American Society for Metals

ASME - American Society of Mechanical Engineers.

ASTM – American Standard Test and Method

AWS – American Welding Society

DNV-GL – Det Norske Veritas (sociedade classificadora norueguesa – Germanischer Lloyd (sociedade classificadora alemã).

EDS – Espectrografia de Energia Dispersiva

END – Ensaios Não Destrutivos

EUROCODE – European Committee for Standardization (Comitê Europeu de Normalização

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

JAL – Japan Airlines

PWR – Pressurized Water Reactor (Água do Reator Pressurizada)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de roteiro para análise de falhas.....	17
Figura 2 – Fadiga na cauda do JAL 123, levando à queda do avião.....	18
Figura 3 – Fratura por fadiga causada por flexão repetida unidirecional .....	19
Figura 4 – Mecanismo esquemático da corrosão sob tensão .....	19
Figura 5 – Classificação das falhas após análise em 242 casos .....	20
Figura 6 – Avião Comet e a ocorrência da fratura ao longo da estrutura .....	24
Figura 7 – Fadiga na fuselagem do avião da Aloha .....	25
Figura 8 – Plataforma Alexander Kirk virada após rompimento de uma coluna ....	26
Figura 9 – Falha em tubulação devido a corrosão erosão .....	27
Figura 10 – Ruptura catastrófica do casco do trocador de calor .....	28
Figura 11 – Ponte Silver Bridge, colapsada após falhas estruturais .....	30
Figura 12 – Fratura ao meio no navio SS Schenectady .....	31
Figura 13 – Eixos quebrados por fadiga, mostrando as regiões de início, propagação e fratura rápida .....	38
Figura 14 – Micrografias de material com corrosão sob tensão evidenciando trincas com oxidação .....	38
Figura 15 – Material com trinca por fluência devido à alta temperatura .....	39

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Métodos de análise de falhas: Ensaios Não Destrutivos (END) .....	21
Quadro 2 – Métodos de análise de falhas: Ensaios Destrutivos e Laboratoriais....	22
Quadro 3 – Estruturas críticas, condições de operação e falhas associadas .....	23
Quadro 4 – Tendências recentes e lições aprendidas em análise de falhas metalúrgicas .....	33
Quadro 5 – Principais mecanismos recorrentes de falhas em componentes metálicos.....	37
Quadro 6 – Principais Divergências entre Autores sobre Causas Predominantes de Falhas .....	40
Quadro 7 – Divergências Setoriais e Metodológicas na Interpretação de Mecanismos de Falha.....	41
Quadro 8 – Linha do tempo de acidentes clássicos e aprendizados técnicos .....	42

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 PROBLEMA.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.2 OBJETIVOS.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.2.1 Objetivo Geral.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.2.2 Objetivos Específicos.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.3 JUSTIFICATIVA.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	17
2.1 Fundamentos da análise de falhas metalúrgicas.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.1.1 Principais tipos de falhas metalúrgicas.....	18
2.1.2 Métodos de análise de falhas.....	20
2.2 Estruturas críticas e suas particularidades.....	22
2.2.1 Setor aeronáutico.....	23
2.2.2 Setor naval.....	25
2.2.3 Setor nuclear.....	26
2.2.4 Setor petroquímico.....	28
2.2.5 Setor de infraestrutura civil.....	29
2.3 Estudos clássicos e recentes de falhas documentadas.....	29
2.3.1 Exemplos clássicos de falhas metalúrgicas.....	31
2.3.2 Tendências recentes e lições aprendidas.....	32
3 METODOLOGIA.....	34
3.1 Natureza do estudo.....	34
3.2 Critérios de seleção de casos analisados.....	34
3.3 Procedimentos de análise crítica da literatura.....	34
3.4 Limitações da pesquisa.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	36
4.1 Análise comparativa dos mecanismos de falha.....	36
4.2 Relação entre tipo de mecanismo de falha e morfologia da fratura / microestrutura.....	38
4.3 Impacto dos mecanismos de falha na integridade estrutural e vida em serviço.....	39
4.4 Discussão crítica dos casos e divergências entre autores.....	40
4.5 Aplicações práticas dos resultados.....	41
4.6 Considerações finais dos resultados e síntese.....	43
5 CONCLUSÃO.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 4
REFERÊNCIAS.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 5

## 1- INTRODUÇÃO

A ocorrência de falhas metalúrgicas em estruturas críticas representa um dos maiores desafios para a engenharia moderna, especialmente em setores onde a segurança operacional e a confiabilidade estrutural são imperativas, como o aeronáutico, naval, petroquímico e de infraestrutura civil. Estruturas críticas, por definição, são aquelas cuja falha pode levar a consequências catastróficas, incluindo perdas humanas, danos ambientais e prejuízos econômicos expressivos. Tais falhas frequentemente estão associadas a mecanismos metalúrgicos complexos, como fadiga, corrosão sob tensão, fragilização, trincas por hidrogênio ou defeitos de fabricação, que exigem análises detalhadas para compreensão de suas causas e prevenção (CALLISTER; RETHWISCH, 2020; ASM INTERNATIONAL, 2017).

A análise de falhas metalúrgicas combina fundamentos de ciência dos materiais com práticas de engenharia forense, empregando técnicas como microscopia óptica e eletrônica, metalografia, ensaios não destrutivos (END), fractografia e análise química. Essas ferramentas permitem identificar a origem e os mecanismos de propagação das falhas, subsidiando medidas corretivas e preventivas. Casos históricos, como a ruptura do navio Liberty durante a Segunda Guerra Mundial, o colapso da ponte Silver Bridge em 1967 ou acidentes em oleodutos e reatores nucleares, mostram como falhas aparentemente localizadas podem desencadear eventos de grande magnitude quando ocorrem em componentes críticos (BROEK, 2012; ANDERSON, 2017).

Apesar dos avanços em normas técnicas e tecnologias de inspeção, falhas metalúrgicas continuam a ocorrer, muitas vezes relacionadas a deficiências no controle de qualidade, envelhecimento de materiais ou inadequações no projeto e manutenção. No Brasil, eventos envolvendo colapsos de viadutos, falhas em dutos de transporte de hidrocarbonetos e problemas em estruturas metálicas industriais reforçam a importância de estudos aprofundados sobre as causas metalúrgicas dessas ocorrências (PETROBRAS, 2020; ABNT, 2018). A ausência de análises sistemáticas pode resultar em interpretações superficiais dos incidentes, dificultando a implementação de políticas eficazes de prevenção.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico de casos reais de falhas metalúrgicas em estruturas críticas, com base em revisão bibliográfica e análise crítica de publicações técnicas, normas e relatórios de

falhas. Busca-se identificar os principais mecanismos metalúrgicos envolvidos, os setores mais afetados, bem como discutir as lições extraídas de casos históricos e recentes. A relevância deste estudo está na contribuição para o entendimento integrado entre falhas metalúrgicas e engenharia estrutural, oferecendo subsídios para a formação técnica e para o aprimoramento das práticas de prevenção e análise de falhas.

## 1.1 Problema

Falhas metalúrgicas em estruturas críticas continuam a representar um risco significativo para a segurança operacional e a integridade de sistemas industriais, de transporte e de infraestrutura. Mesmo com avanços em normas técnicas, métodos de inspeção e desenvolvimento de materiais, eventos de ruptura, colapso e vazamentos ainda ocorrem, muitas vezes com consequências severas. Essas falhas estão frequentemente relacionadas a mecanismos como fragilização por hidrogênio, trincas por fadiga, corrosão sob tensão e defeitos de fabricação. Contudo, há escassez de estudos teóricos que analisem esses mecanismos de forma sistematizada a partir de casos reais, dificultando a identificação de padrões e o aprimoramento das práticas preventivas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo teórico sobre falhas metalúrgicas em estruturas críticas, com base na análise de casos reais documentados em literatura técnica, relatórios e normas, buscando identificar os principais mecanismos metalúrgicos envolvidos, os setores mais afetados e as lições aprendidas para a engenharia e a prevenção de falhas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar e revisar casos reais de falhas em setores críticos, como aeronáutico, naval, petroquímico, nuclear e de infraestrutura civil;
- Identificar e classificar os principais mecanismos metalúrgicos presentes nos casos analisados (fadiga, corrosão, trincas, fragilização, defeitos de fabricação etc.);

- Comparar abordagens analíticas e corretivas utilizadas nos diferentes setores;
- Discutir criticamente as falhas a partir de aspectos metalúrgicos, normativos e operacionais;
- Destacar lições e recomendações técnicas extraídas dos casos, visando contribuir para práticas preventivas e formação profissional na área metalúrgica.

### 1.3 Justificativa

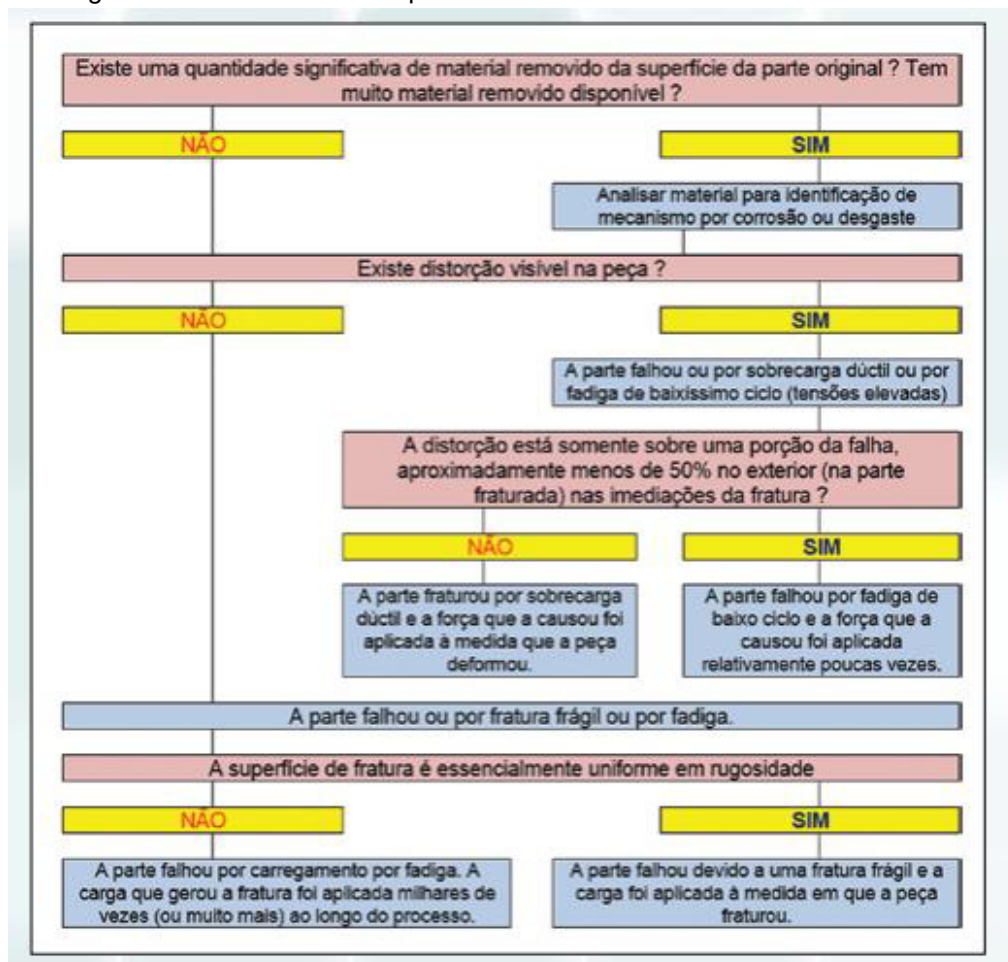
O estudo de falhas metalúrgicas em estruturas críticas é de grande importância devido aos riscos que essas ocorrências representam para a segurança, a operação industrial e a sociedade. No Brasil, fatores como envelhecimento de estruturas, práticas de manutenção irregulares e limitações na fiscalização reforçam a necessidade de aprofundar a compreensão teórica sobre o tema. Além disso, este trabalho contribui para a formação de profissionais com uma visão integrada entre ciência dos materiais, engenharia estrutural e prevenção de falhas. A abordagem teórica baseada em casos reais torna o estudo viável no âmbito acadêmico, ao mesmo tempo em que fortalece a cultura de segurança e confiabilidade estrutural.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fundamentos da análise de falhas metalúrgicas

A análise de falhas metalúrgicas é uma disciplina essencial da engenharia que busca identificar as causas primárias e secundárias de rupturas, trincas, corrosão ou outros modos de falha em componentes metálicos. Essa análise envolve a aplicação integrada de conhecimentos de ciência dos materiais, engenharia mecânica, processos de fabricação e métodos laboratoriais especializados. Entre os objetivos principais estão determinar o mecanismo de falha, estabelecer a sequência dos eventos que levaram à ocorrência e propor medidas preventivas para evitar reincidências. Para isso, empregam-se técnicas como exame visual, ensaios não destrutivos (END), metalografia, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise fractográfica e avaliação química, permitindo compreender de forma detalhada a origem e a evolução do defeito (ASM INTERNATIONAL, 2017; ANDERSON, 2017). A Figura 1 mostra um modelo de roteiro para sistemática de análise de falhas.

Figura 1 – Modelo de roteiro para análise de falhas.



A abordagem sistemática da análise de falhas segue etapas bem definidas: coleta e preservação das evidências, caracterização do componente, identificação do modo de falha e determinação da causa-raiz. Essas etapas são apoiadas por normas técnicas e metodologias padronizadas, que orientam desde a documentação inicial até a interpretação dos resultados laboratoriais. A correta condução desse processo é fundamental para diferenciar falhas originadas por defeitos de projeto, fabricação, operação ou degradação em serviço. Além de contribuir para a segurança e confiabilidade estrutural, a análise de falhas fornece subsídios valiosos para melhorias em projetos, processos produtivos e programas de manutenção preventiva (CALLISTER; RETHWISCH, 2020; BROEK, 2012).

### 2.1.1 Principais Tipos de Falhas Metalúrgicas

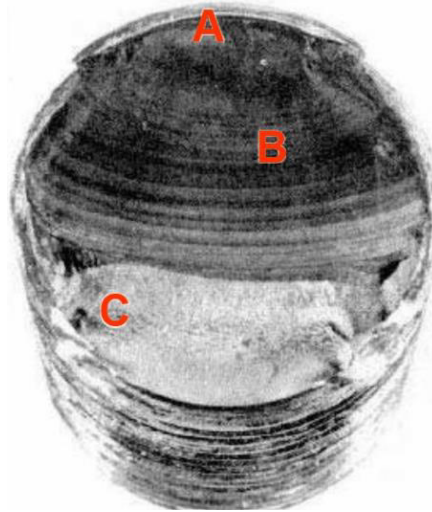
As falhas metalúrgicas podem se manifestar por diferentes mecanismos, dependendo das condições de serviço, das propriedades do material e do histórico de fabricação do componente. Entre os mecanismos mais comuns está a fadiga, responsável por grande parte das falhas em estruturas críticas submetidas a carregamentos cíclicos. A fadiga caracteriza-se pela iniciação e propagação de trincas devido a tensões repetitivas, geralmente inferiores ao limite de escoamento do material, levando à ruptura súbita após um número elevado de ciclos. A Figura 2 mostra um caso clássico de fadiga que aconteceu na indústria aeronáutica, o desastre por fadiga mecânica do voo da JAL (Japan Airlines) 123 em 1985 que levaram a morte de 520 pessoas. A Figura 3 mostra uma fratura por fadiga em um parafuso causada por flexão repetida.

Figura 2 – Fadiga na cauda do JAL 123, levando a queda do avião



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/search?q=fadiga>, 2025.

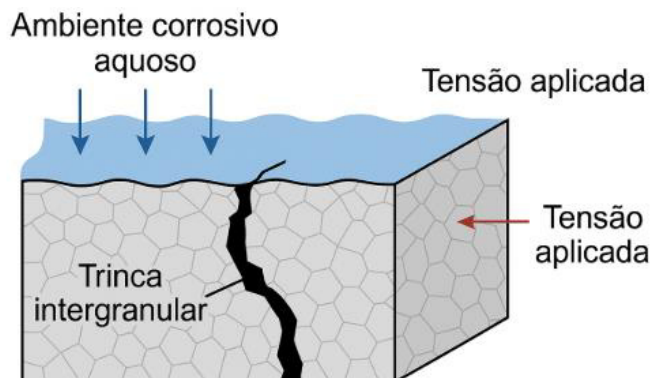
Figura 3 – Fratura por fadiga causada por flexão repetida unidirecional. O ponto A indica o início da trinca que se propagou, deixando “marcas de praia”, indicada pelo ponto B e finalmente o ponto C indicando a região final da fratura.



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/search?q=fadiga>, 2025.

Outro mecanismo relevante é a corrosão sob tensão, que ocorre pela interação simultânea de tensões mecânicas e ambientes corrosivos, favorecendo a nucleação e propagação de trincas, especialmente em ligas de aços inoxidáveis, alumínio e titânio. A fragilização por hidrogênio também é crítica em componentes sujeitos a atmosferas agressivas ou processos inadequados, pois o hidrogênio difunde-se no reticulado cristalino, reduz a ductilidade e pode provocar falhas prematuras (ANDERSON, 2017; ASM INTERNATIONAL, 2017). A Figura 4 representa o mecanismo esquemático da corrosão sob tensão.

Figura 4 – Mecanismo esquemático da corrosão sob tensão.

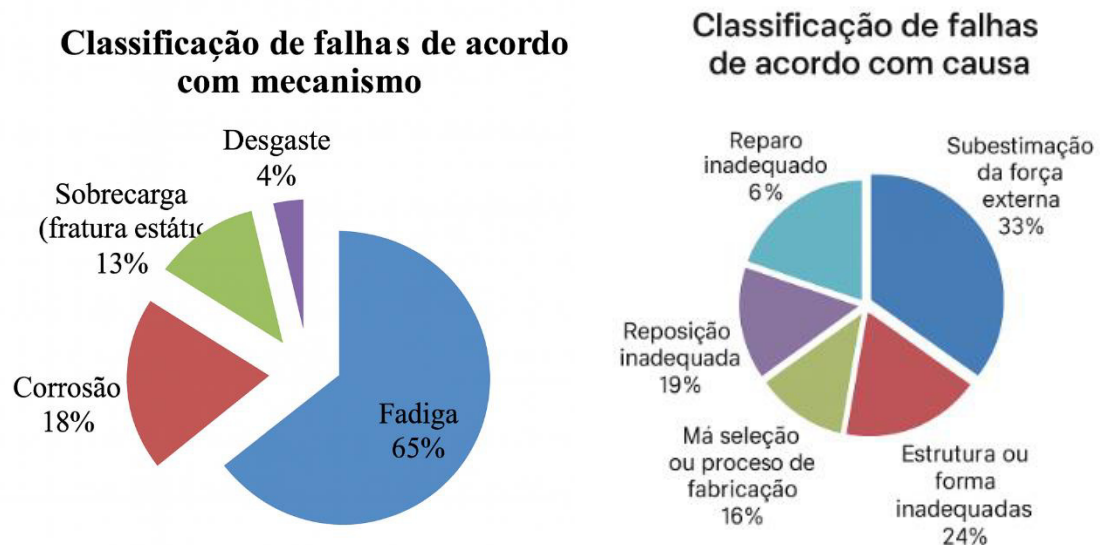


Fonte: Adaptado de ASM International, 2017.

Além desses mecanismos, destacam-se as falhas decorrentes de defeitos de fabricação e tratamentos térmicos inadequados, que podem gerar descontinuidades internas, tensões residuais elevadas ou microestruturas não desejadas. Inclusões

não metálicas, porosidades, trincas de solidificação e falta de fusão em soldas são exemplos de imperfeições que atuam como iniciadores de falhas em serviço. A corrosão localizada, como pites e trincas intergranulares, também pode comprometer a integridade de estruturas metálicas, especialmente em ambientes marinhos ou industriais agressivos. O entendimento desses mecanismos é fundamental para selecionar materiais adequados, definir tratamentos térmicos corretos, aplicar técnicas de inspeção apropriadas e adotar estratégias de manutenção eficazes, reduzindo a probabilidade de falhas catastróficas (BROEK, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2020). A Figura 5 representa a classificação das falhas após análise em 242 casos de componentes mecânicos.

Figura 5: Gráficos de pizza representando a classificação das falhas em relação aos componentes com falha, ao mecanismo e à causa, após a análise de 242 casos.



Fonte: PANTAZOPOULOS, G. *et al*, 2019

### 2.1.2 Métodos de análise de falhas

A análise eficaz de falhas metalúrgicas depende da aplicação sistemática de métodos experimentais e normativos que permitem caracterizar o componente e identificar a causa-raiz do problema. O processo geralmente inicia com a inspeção visual detalhada da peça ou estrutura, seguida pela utilização de ensaios não destrutivos (END), como ultrassom, radiografia, partículas magnéticas, líquidos penetrantes e correntes parasitas. Esses métodos possibilitam detectar descontinuidades internas ou superficiais sem comprometer a integridade do componente. Em casos mais complexos, é comum recorrer a técnicas avançadas, como tomografia computadorizada industrial, que fornece imagens tridimensionais

de alta resolução, e análise de tensões residuais por difração de raios X ou métodos de Barkhausen, permitindo uma compreensão mais profunda do estado interno do material (ASM INTERNATIONAL, 2017; ABNT, 2018).

Após a etapa de END, são aplicadas técnicas destrutivas ou semi-destrutivas para examinar as características microestruturais e fractográficas. A metalografia permite observar a microestrutura do material por meio de cortes, polimento e ataque químico, auxiliando na identificação de fases, inclusões e defeitos de processamento.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), combinada com análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), fornece informações detalhadas sobre a morfologia de fraturas e a composição química de regiões críticas. Além disso, a fractografia é utilizada para determinar o modo de falha, distinguindo fraturas dúcteis, frágeis ou por fadiga. O uso combinado desses métodos, seguindo procedimentos normalizados, garante resultados consistentes e confiáveis, fundamentais para a elaboração de laudos técnicos e medidas corretivas eficazes (ANDERSON, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2020). O quadro 1 Inclui métodos aplicados diretamente no componente em serviço, sem necessidade de remoção de material, geralmente realizados em campo ou antes da falha final. O quadro 2 Inclui métodos que requerem remoção de amostras.

Quadro 1 – Métodos de análise de falhas: Ensaios Não Destrutivos (END)

Método de Análise	Informações Obtidas	Aplicações Típicas	Referências
Exame visual	Identificação preliminar de danos, trincas superficiais, deformações e indícios macroscópicos.	Primeira etapa de qualquer investigação; definição de locais de amostragem.	Sachs (2007); ASM International (2017)
Líquido penetrante	Deteção de trincas superficiais abertas.	Inspeção de soldas, superfícies usinadas, componentes sujeitos à fadiga.	AWS (2016); ASTM E165/E165M-18 (2018)
Partículas magnéticas	Deteção de trincas superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos.	Inspeção de eixos, chapas e peças críticas em aços carbono.	ABNT NBR 15224 (2016); AWS (2016)
Ultrassom (UT)	Localização e dimensionamento de descontinuidades internas.	Avaliação de juntas soldadas, forjados, laminados e vasos de pressão.	ABNT NBR 16441 (2016); Krautkrämer & Krautkrämer (1990)
Radiografia (RX)	Visualização de defeitos internos por contraste de densidade.	Inspeção de soldas, fundidos e componentes estruturais.	ASTM E1742/E1742M-18 (2018); AWS (2016)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em normas ABNT, ASTM, AWS e literatura técnica especializada.

Quadro 2 – Métodos de análise de falhas: Ensaios Destrutivos e Laboratoriais

Método de Análise	Informações Obtidas	Aplicações Típicas	Referências
Metalografia	Observação microestrutural (grãos, inclusões, trincas, precipitados).	Determinação de causas metalúrgicas, análise de processos térmicos e fabricação.	Vander Voort (1999); Callister & Rethwisch (2020)
MEV/EDS	Caracterização morfológica e química em alta resolução.	Fractografia, identificação de mecanismos de falha e contaminantes.	Goldstein et al. (2018); ASM International (2017)
Fractografia	Identificação de modo de fratura (fadiga, frágil, dúctil, SCC).	Determinação da causa-raiz de falhas.	Broek (2012); Anderson (2017)
Análise química	Determinação de composição química global ou local.	Verificação de especificações de material, identificação de contaminações.	ASTM E415-17 (2017); Callister & Rethwisch (2020)
Ensaios mecânicos	Determinação de propriedades mecânicas (dureza, tração, impacto, tenacidade).	Avaliação de alterações em serviço, correlação com falhas.	ASTM E8/E8M-16a (2016); Anderson (2017)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em normas ASTM, ASM International, Vander Voort (1999), Broek (2012).

## 2.2 Estruturas críticas e suas particularidades

As estruturas críticas são aquelas cuja falha pode resultar em consequências catastróficas para a segurança, o meio ambiente e a economia. Essas estruturas estão presentes em setores estratégicos, como o aeronáutico, naval, nuclear, petroquímico e de infraestrutura civil, onde a confiabilidade estrutural é um requisito fundamental. Cada setor apresenta condições específicas de operação, combinações particulares de esforços mecânicos e ambientes muitas vezes agressivos, exigindo materiais com propriedades adequadas, controle rigoroso de fabricação e programas de inspeção e manutenção bem estabelecidos. Nessas aplicações, falhas metalúrgicas, mesmo que localizadas, podem comprometer todo o sistema, levando a acidentes de grandes proporções (ANDERSON, 2017; ASM INTERNATIONAL, 2017).

No setor aeronáutico, por exemplo, as estruturas são submetidas a carregamentos cíclicos intensos, variações térmicas significativas e ambientes corrosivos em altitude, tornando a fadiga e a corrosão sob tensão mecanismos críticos. Já no setor naval, a presença constante de ambientes marinhos acelera processos de corrosão localizada e fadiga em juntas soldadas, exigindo o uso de aços estruturais de alta tenacidade e técnicas avançadas de inspeção. Em instalações nucleares, materiais devem resistir a altas temperaturas, radiação e

ambientes corrosivos, sendo comuns falhas associadas à fluência e corrosão intergranular. No setor petroquímico, dutos, vasos de pressão e trocadores de calor operam sob pressões e temperaturas elevadas, com riscos associados à fragilização por hidrogênio e trincas por corrosão sob tensão. Finalmente, na infraestrutura civil, como pontes e viadutos metálicos, problemas de fadiga, corrosão atmosférica e falta de manutenção adequada têm sido causas recorrentes de acidentes estruturais. Essas particularidades tornam a análise de falhas metalúrgicas uma ferramenta essencial para garantir a integridade desses sistemas ao longo de sua vida útil (BROEK, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2020). O quadro 3 mostra exemplo de estruturas críticas em função das condições de operação e falhas associadas.

Quadro 3 – Estruturas críticas, condições de operação e falhas associadas

Setor / Estrutura Crítica	Condições de Operação	Mecanismos de Falha Predominantes	Exigências de Projeto, Inspeção e Manutenção
Aeronáutico (fuselagens, asas, motores, trens de pouso)	Carregamentos cíclicos; variações térmicas; ambiente corrosivo em altitude	Fadiga de alto ciclo; corrosão sob tensão; corrosão intergranular	Materiais leves e resistentes; controle rigoroso de fabricação; END periódicos; manutenção preventiva
Naval (casco, juntas soldadas, sistemas de propulsão)	Ambiente marinho com salinidade; esforços dinâmicos; soldas expostas	Corrosão localizada; fadiga em soldas; trincas por tensões residuais	Aços de alta tenacidade; revestimentos anticorrosivos; inspeções ultrassônicas e visuais; manutenção programada
Nuclear (vasos de pressão, tubulações, componentes internos)	Altas temperaturas; radiação; ciclos térmicos; meios aquosos corrosivos	Fluência; corrosão intergranular; trincas induzidas por radiação	Ligas resistentes à fluência e corrosão; controle metalúrgico rigoroso; END avançados (TOFD, radiografia digital)
Petroquímico (dutos, vasos, trocadores de calor)	Altas pressões e temperaturas; fluidos agressivos (H <sub>2</sub> S)	Fragilização por hidrogênio; trincas por corrosão sob tensão; corrosão interna	Ligas adequadas (Cr-Mo, inoxidáveis); controle de soldagem; programas de integridade mecânica; monitoramento online
Infraestrutura civil (pontes, viadutos, torres)	Exposição atmosférica; carregamentos variáveis; deficiências de manutenção	Fadiga em uniões; corrosão atmosférica generalizada; fraturas frágeis	Proteções anticorrosivas; inspeções visuais e ultrassônicas; reforços estruturais; manutenção preventiva

Fontes: Adaptado de ANDERSON (2017); ASM INTERNATIONAL (2017); BROEK (2012); CALLISTER; RETHWISCH (2020).

### 2.2.1 Setor aeronáutico

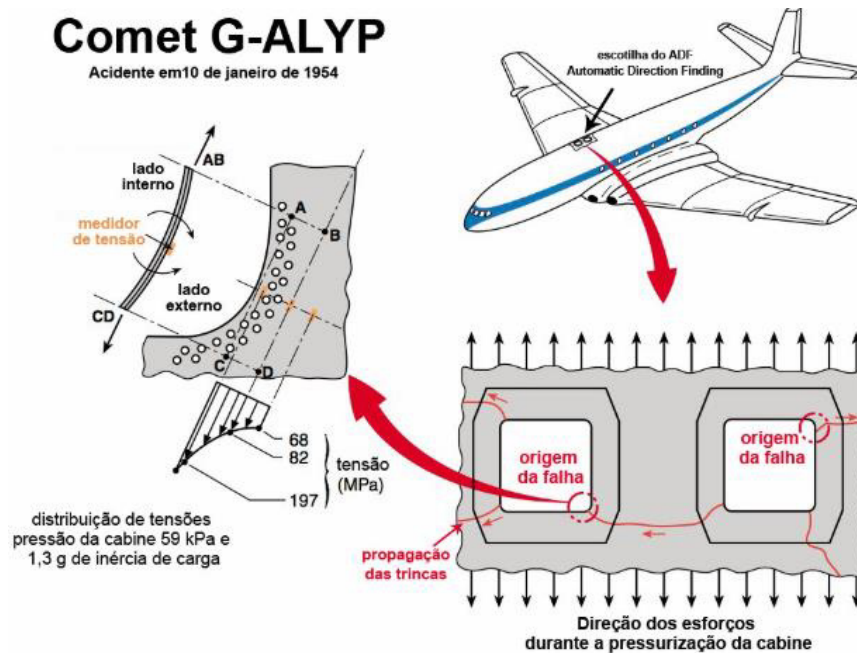
O setor aeronáutico é um dos ambientes mais desafiadores para o desempenho dos materiais metálicos, devido à combinação de carregamentos cíclicos intensos, variações térmicas significativas e exposição a atmosferas

corrosivas em altitude.

Estruturas aeronáuticas, como asas, fuselagens, longarinas e componentes do trem de pouso, são geralmente fabricadas em ligas de alumínio, titânio e aços de alta resistência, que precisam manter elevada integridade estrutural durante milhares de horas de voo. Nesses componentes, a fadiga de alto ciclo é um dos principais mecanismos de falha, uma vez que pequenas descontinuidades superficiais ou internas podem atuar como pontos de nucleação de trincas, que se propagam gradualmente até a ruptura. Além disso, o ambiente aeronáutico pode favorecer fenômenos como corrosão sob tensão e corrosão intergranular, especialmente em ligas envelhecidas ou mal protegidas, comprometendo a durabilidade e a segurança estrutural (BROEK, 2012; ANDERSON, 2017).

Casos históricos ilustram a gravidade das falhas metalúrgicas nesse setor. O acidente envolvendo os aviões De Havilland Comet, na década de 1950, é um exemplo clássico de falhas por fadiga em cantos reentrantes de janelas quadradas, levando a rupturas catastróficas em voo e motivando mudanças no projeto estrutural aeronáutico. A Figura 6 demonstra o avião Comet e a ocorrência da fratura ao longo da estrutura.

Figura 6 – Avião Comet e a ocorrência da fratura ao longo da estrutura.



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/search?q=fadiga>, 2025.

Outro exemplo marcante ocorreu com a frota de Boeing 737, que enfrentou problemas relacionados à fadiga em juntas rebitadas de fuselagens após milhares

de ciclos de pressurização e despressurização, exigindo inspeções mais rigorosas e modificações em procedimentos de manutenção. Esses casos evidenciam a importância da aplicação de análises metalúrgicas detalhadas, inspeções periódicas e monitoramento estrutural para garantir a integridade de aeronaves ao longo de sua vida útil (ASM INTERNATIONAL, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2020). A Figura 7 mostra o acidente da empresa aérea Aloha Airlines ocorrido em 1988, onde parte da fuselagem do teto foi perdida por fadiga devido ao grande número de voos.

Figura 7 – Fadiga na fuselagem do avião da Aloha.



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/search?q=fadiga>, 2025.

### 2.2.2 Setor naval

No setor naval, as estruturas metálicas estão constantemente expostas a ambientes marinhos agressivos, combinando esforços mecânicos complexos, variações térmicas e condições corrosivas severas. Navios, plataformas offshore e embarcações de apoio utilizam principalmente aços estruturais de alta resistência e tenacidade, projetados para suportar cargas dinâmicas, impacto de ondas e esforços de flexão em mares agitados. Nessas condições, mecanismos como corrosão localizada, corrosão sob tensão e fadiga em juntas soldadas são particularmente relevantes, podendo comprometer gradualmente a integridade estrutural se não forem controlados. A presença de salinidade elevada, oxigênio dissolvido e temperatura variável acelera processos de deterioração, exigindo a aplicação rigorosa de revestimentos protetivos, catodic protection (proteção catódica) e manutenção periódica (ASM INTERNATIONAL, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Historicamente, falhas em estruturas navais têm causado acidentes de grandes proporções, principalmente quando associadas à fadiga em regiões de concentração de tensões ou à degradação não detectada por inspeções preventivas. Um exemplo clássico ocorreu com os navios Liberty, durante a Segunda Guerra Mundial, que apresentaram rupturas súbitas de cascos devido à fragilidade do aço em baixas temperaturas e à presença de descontinuidades em soldas — um marco para o desenvolvimento posterior da engenharia de fratura. Em plataformas offshore modernas, trincas por fadiga em juntas estruturais ou em suportes de risers podem levar à paralisação de operações ou a acidentes ambientais graves. Por isso, normas internacionais, como a DNV-GL e a ABS, estabelecem critérios rigorosos de projeto, inspeção e manutenção para prevenir falhas metalúrgicas em ambientes marítimos (BROEK, 2012; ANDERSON, 2017). A Figura 8 mostra o corrido com a plataforma semi-submersível Alexander Kirk que virou repentinamente após o rompimento de uma de suas cinco colunas verticais que a sustentavam.

Figura 8 – Plataforma Alexander Kirk virada após rompimento de uma coluna



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/search?q=Plataforma>, 2025.

### 2.2.3 Setor nuclear

O setor nuclear impõe condições extremamente severas aos materiais metálicos, exigindo níveis elevados de confiabilidade estrutural, resistência à corrosão e estabilidade microestrutural ao longo de longos períodos de operação. Componentes como vasos de pressão, tubos de geradores de vapor, sistemas de

refrigeração e estruturas de contenção estão sujeitos a altas temperaturas, ambientes radiativos intensos e pressões elevadas, o que favorece mecanismos de falha complexos e cumulativos. Entre os mecanismos mais relevantes destacam-se a fluência (creep) em condições de operação prolongada, a corrosão intergranular e sob tensão em meios aquosos contendo produtos de fissão, e a fragilização induzida por radiação, que altera a microestrutura e reduz a tenacidade dos materiais. Por essas razões, ligas específicas, como aços inoxidáveis austeníticos estabilizados, ligas de níquel e aços ferríticos-bainíticos de alta qualidade, são amplamente empregadas (ASM INTERNATIONAL, 2017; ANDERSON, 2017).

Falhas metalúrgicas em componentes nucleares podem ter consequências graves, envolvendo riscos à segurança pública, danos ambientais e altos custos econômicos. Um caso emblemático foi o acidente de Three Mile Island (EUA, 1979), em que problemas no sistema de refrigeração e falhas subsequentes levaram ao superaquecimento do núcleo, destacando a importância do controle rigoroso de materiais e inspeções. Outro exemplo é a ocorrência de trincas por corrosão sob tensão em tubos de geradores de vapor em usinas do tipo PWR (Pressurized Water Reactor), que motivaram programas internacionais de substituição de ligas e aprimoramento das práticas de monitoramento. Normas internacionais, como as do ASME Boiler and Pressure Vessel Code e da IAEA, estabelecem critérios rígidos para seleção de materiais, fabricação, testes e inspeções periódicas, visando minimizar falhas metalúrgicas nesse setor altamente sensível (BROEK, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2020). A Figura 9, apresenta a falha em uma tubulação de água quente pressurizada da usina nuclear de Mihama no Japão.

Figura 9 – Falha em tubulação devido a corrosão erosão.



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/2025>

#### 2.2.4 Setor petroquímico

O setor petroquímico envolve a operação contínua de dutos, vasos de pressão, trocadores de calor e reatores, frequentemente sob altas pressões, temperaturas elevadas e ambientes químicos agressivos. Essas condições criam um cenário propício para a ocorrência de falhas metalúrgicas complexas, onde mecanismos como fragilização por hidrogênio, corrosão sob tensão, erosão-corrosão e fadiga térmica são particularmente críticos. Materiais metálicos utilizados nesses sistemas, como aços carbono, aços inoxidáveis e ligas resistentes à corrosão, estão sujeitos a degradações progressivas que, se não identificadas a tempo, podem resultar em vazamentos, explosões ou paralisações operacionais significativas. Além disso, processos de soldagem, reparo e modificações de campo introduzem tensões residuais e potenciais zonas de fragilidade, que precisam ser avaliadas criteriosamente (ASM INTERNATIONAL, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2020). A Figura 10 demonstra a falha catastrófica em um trocador de calor na refinaria de Tesoro em Anacortes, no estado de Washington, nos Estados Unidos.

Figura 10 – Ruptura catastrófica casco do trocador de calor.



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/2025>

Diversos acidentes históricos evidenciam a importância do controle metalúrgico nesse setor. Casos de trincas por hidrogênio em vasos de pressão e de rupturas em linhas de transporte de gás e derivados têm motivado o desenvolvimento de normas mais rigorosas, como a API 579 (Fitness-for-Service), que orienta a avaliação de integridade de equipamentos em operação. A inspeção periódica por métodos não destrutivos, o monitoramento de parâmetros críticos de processo e a aplicação de

revestimentos internos ou trocas de ligas metálicas são estratégias essenciais para reduzir a ocorrência de falhas. Em ambientes petroquímicos brasileiros, onde muitas instalações operam além de sua vida útil projetada, a análise metalúrgica assume papel ainda mais relevante para garantir a integridade estrutural, prevenir acidentes e evitar impactos ambientais (BROEK, 2012; ANDERSON, 2017).

#### 2.2.5 Setor de Infraestrutura Civil

No setor de infraestrutura civil, estruturas metálicas como pontes, viadutos, passarelas, torres de transmissão e estruturas de edifícios estão frequentemente sujeitas à ação combinada de carregamentos estáticos e dinâmicos, variações térmicas sazonais e exposição atmosférica prolongada. A utilização predominante de aços estruturais carbono ou de baixa liga torna essas estruturas suscetíveis a mecanismos de degradação como corrosão atmosférica, fadiga em pontos de concentração de tensões e trincas induzidas por soldagem. Além disso, a manutenção preventiva muitas vezes é insuficiente ou inexistente, especialmente em estruturas mais antigas, o que favorece o acúmulo de danos ao longo do tempo. Esses fatores combinados tornam essencial a adoção de programas sistemáticos de inspeção e monitoramento estrutural para garantir a integridade e prolongar a vida útil das construções (ANDERSON, 2017; ASM INTERNATIONAL, 2017).

Falhas metalúrgicas em infraestrutura civil têm causado acidentes significativos em diversas partes do mundo. O colapso da Ponte Silver Bridge, nos Estados Unidos em 1967, é um caso emblemático: a ruptura de um olhal devido a uma trinca por fadiga levou à falha progressiva da estrutura e à morte de dezenas de pessoas. Mais recentemente, incidentes envolvendo viadutos e pontes metálicas em operação prolongada no Brasil evidenciaram deficiências na manutenção, corrosão avançada e falta de inspeções técnicas periódicas. Em muitos desses casos, os mecanismos de falha estavam relacionados a processos lentos de deterioração metálica, não detectados a tempo. Normas como a ABNT NBR 8800 e recomendações internacionais (AASHTO, Eurocode) fornecem diretrizes para projeto, inspeção e manutenção, mas sua aplicação prática ainda enfrenta desafios, especialmente em estruturas antigas ou em locais com restrições orçamentárias (BROEK, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

#### 2.3 Estudos clássicos e recentes de falhas documentadas

O estudo de casos clássicos de falhas estruturais é fundamental para a

compreensão dos mecanismos metalúrgicos e para o aprimoramento das práticas de engenharia. Ao longo do século XX, diversos acidentes serviram como marcos para o desenvolvimento de normas, metodologias de análise e avanços em ciência dos materiais. Um dos exemplos mais emblemáticos é o caso dos navios Liberty, durante a Segunda Guerra Mundial, cujos cascos sofreram rupturas frágeis em regiões soldadas devido à baixa tenacidade dos aços em temperaturas frias e à presença de descontinuidades internas. Outro caso histórico é o acidente com os aviões De Havilland Comet, na década de 1950, causado por trincas por fadiga em cantos reentrantes de janelas quadradas, o que levou à revisão completa de critérios de projeto e análise estrutural na aviação. O colapso da Ponte Silver Bridge (EUA, 1967), provocado pela propagação de uma trinca por fadiga em um olhal, também marcou a engenharia estrutural ao evidenciar a importância da inspeção periódica e da análise fractográfica detalhada (BROEK, 2012; ANDERSON, 2017). A Figura 11 mostra o colapso da ponte Silver Bridge (EUA), que ocorreu após uma falha na corrente de suspensão devido a defeitos na construção e a Figura 12 mostra a ocorrência de fratura frágil no navio SS Schenectady da série Liberty.

Figura 11 – Ponte Silver Bridge, colapsada após falhas estruturais



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Silver\\_Bridge](https://pt.wikipedia.org/wiki/Silver_Bridge), 2025

Figura 12 – Fratura ao meio no navio SS Schenectady da série Liberty ocorrida por fratura frágil.



Fonte: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/2025>

Estudos mais recentes continuam a evidenciar a relevância das análises metalúrgicas na prevenção de falhas. Casos documentados em setores como o petroquímico, nuclear e infraestrutura civil mostram que muitos acidentes decorrem da combinação de envelhecimento de materiais, deficiências de manutenção e ausência de inspeções sistemáticas. Investigações conduzidas em falhas de dutos de transporte de gás, por exemplo, têm identificado mecanismos como fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão como causas principais, motivando a adoção de normas internacionais mais rigorosas, como a API 579 e a ASME B31.8S. Da mesma forma, falhas em tubos de geradores de vapor em usinas nucleares levaram à substituição de ligas metálicas e ao desenvolvimento de novos métodos de monitoramento. Esses estudos mostram que a análise sistemática de casos, clássicos e contemporâneos, é uma ferramenta poderosa para retroalimentar o projeto, a fabricação e a manutenção de estruturas críticas, evitando recorrências (ASM INTERNATIONAL, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

### 2.3.1 Exemplos clássicos de falhas metalúrgicas

Os estudos clássicos de falhas metalúrgicas fornecem fundamentos importantes para a engenharia moderna, pois revelam como detalhes aparentemente pequenos podem levar a falhas estruturais catastróficas. Um exemplo emblemático é o dos navios Liberty, construídos em grande escala durante a Segunda Guerra Mundial. Essas embarcações apresentaram rupturas frágeis em cascos soldados, principalmente em regiões de concentração de tensões e em ambientes frios, devido à baixa tenacidade dos aços utilizados e à presença de descontinuidades de fabricação. As falhas ocorriam subitamente, sem sinais prévios de deformação plástica, resultando em quebras completas do casco. Este caso impulsionou o desenvolvimento da mecânica da fratura e a adoção de normas mais

rigorosas para controle de qualidade dos materiais e dos processos de soldagem em estruturas navais e civis (BROEK, 2012; ANDERSON, 2017).

Outro caso marcante é o acidente com os aviões De Havilland Comet, ocorrido na década de 1950. As aeronaves apresentaram falhas estruturais durante o voo devido à propagação de trincas por fadiga iniciadas nos cantos reentrantes das janelas quadradas. A repetição de ciclos de pressurização e despressurização do compartimento de passageiros levou ao crescimento gradual das trincas até a ruptura catastrófica da fuselagem. Esses eventos motivaram mudanças profundas nos critérios de projeto aeronáutico, incluindo o uso de janelas arredondadas, a aplicação sistemática de ensaios de fadiga em escala real e o aprimoramento das técnicas de análise fractográfica. Casos como os dos navios Liberty e dos aviões Comet tornaram-se referências clássicas no estudo de falhas, servindo de base para o desenvolvimento de metodologias modernas de prevenção e análise (ASM INTERNATIONAL, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

### 2.3.2 Tendências recentes e lições aprendidas

Nas últimas décadas, a análise de falhas metalúrgicas tem evoluído significativamente, acompanhando o avanço das tecnologias de inspeção, monitoramento e caracterização microestrutural. O uso de técnicas avançadas de ensaio não destrutivo (END), como tomografia computadorizada industrial, difração de raios X para mapeamento de tensões residuais e microscopia eletrônica de alta resolução, tem permitido identificar mecanismos de falha com maior precisão e em estágios mais iniciais. Além disso, ferramentas digitais e sistemas de monitoramento em tempo real, integrados a sensores de vibração, emissão acústica e análise estrutural, têm sido aplicados em setores críticos como o petroquímico, nuclear e infraestrutura civil para detectar danos incipientes antes que evoluam para falhas catastróficas. Essas tendências apontam para uma mudança de paradigma: de uma abordagem reativa, baseada em investigações pós-falha, para uma abordagem proativa e preditiva, voltada para a integridade estrutural ao longo de toda a vida útil do ativo (ASM INTERNATIONAL, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Lições importantes também têm sido extraídas de falhas recentes documentadas. Em dutos de transporte de hidrocarbonetos, por exemplo, investigações apontaram fragilização por hidrogênio, corrosão sob tensão e falta de inspeções adequadas como causas recorrentes de acidentes, levando à revisão de

normas internacionais, como a API 579 (Fitness-for-Service). Em estruturas civis, colapsos associados à corrosão atmosférica não monitorada e à fadiga acumulada em ligações metálicas têm impulsionado programas de inspeção mais rigorosos. No setor aeronáutico, sistemas de monitoramento estrutural baseados em sensores embutidos vêm permitindo identificar trincas por fadiga em tempo real. Essas experiências recentes reforçam que a combinação de avaliação metalúrgica sistemática, monitoramento contínuo e adoção de normas técnicas atualizadas constitui a base para reduzir a frequência e a gravidade de falhas em estruturas críticas (ANDERSON, 2017; BROEK, 2012). O quadro 4 apresenta as tendências recentes e lições aprendidas em análises de falhas metalúrgicas.

Quadro 4 – Tendências recentes e lições aprendidas em análise de falhas metalúrgicas

<b>Aspecto</b>	<b>Tendências Recentes</b>	<b>Lições Aprendidas</b>	<b>Referências</b>
Tecnologias de Inspeção e Caracterização	Uso crescente de tomografia computadorizada industrial, difração de raios X (mapeamento de tensões residuais) e microscopia eletrônica de alta resolução para identificar mecanismos de falha em estágios iniciais.	Falhas em dutos de hidrocarbonetos evidenciaram a importância de inspeções adequadas para evitar problemas como fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão, levando à atualização de normas (ex.: API 579 – Fitness-for-Service).	ASM INTERNATIONAL (2017); CALLISTER; RETHWISCH (2020);
Monitoramento em Tempo Real	Integração de sensores de vibração, emissão acústica e análise estrutural em sistemas digitais, permitindo detecção precoce de danos em setores críticos (petroquímico, nuclear, infraestrutura civil).	Colapsos em estruturas civis devido à corrosão atmosférica não monitorada e fadiga acumulada reforçaram a necessidade de programas de inspeção mais rigorosos e contínuos.	BROEK (2012); ANDERSON (2017)
Mudança de Paradigma	Transição de uma abordagem reativa (pós-falha) para uma abordagem proativa e preditiva, focada na integridade estrutural durante toda a vida útil do ativo.	Adoção de normas técnicas atualizadas, aliada à avaliação metalúrgica sistemática e ao monitoramento contínuo, mostrou-se fundamental para reduzir a frequência e a gravidade de falhas em ativos críticos.	ASM INTERNATIONAL (2017); CALLISTER; RETH
Setor Aeronáutico	Implantação de sistemas de monitoramento estrutural embutidos em aeronaves, possibilitando detecção de trincas por fadiga em tempo real.	Experiências recentes indicam que a integração entre sensoriamento, inspeção de alta precisão e engenharia metalúrgica é essencial para manter a segurança operacional em setores de alto risco, como o aeronáutico.	BROEK (2012); ANDERSON (2017)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ASM INTERNATIONAL (2017); CALLISTER; RETHWISCH (2020); ANDERSON (2017); BROEK (2012).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Natureza do estudo

Este trabalho caracteriza-se como teórico, exploratório e bibliográfico, fundamentado em revisão sistemática de literatura técnica e científica. O objetivo é compreender e discutir os principais mecanismos metalúrgicos de falhas em estruturas críticas, com base em casos reais documentados e em referenciais consolidados da engenharia de materiais. Não foram realizadas atividades experimentais ou ensaios laboratoriais, uma vez que o enfoque recai sobre a análise qualitativa e comparativa de informações já disponíveis em fontes confiáveis.

#### 3.2 Critérios de seleção de casos analisados

A seleção dos casos e fontes bibliográficas seguiu critérios específicos de relevância técnica, abrangência temática e confiabilidade. Foram priorizados:

- Estudos clássicos que se tornaram marcos na análise de falhas (ex.: navios Liberty, aviões Comet, Ponte Silver Bridge);
- Casos contemporâneos documentados em setores estratégicos, como petroquímico, nuclear e infraestrutura civil;
- Normas técnicas nacionais e internacionais relacionadas à integridade estrutural e análise de falhas (ABNT, ASME, API, entre outras);
- Livros, manuais técnicos e artigos com reconhecimento acadêmico e uso consolidado na engenharia.

Esses critérios asseguraram que os casos selecionados refletissem diversos mecanismos de falha, diferentes contextos setoriais e impactos reais, permitindo uma visão abrangente e fundamentada do tema.

#### 3.3 Procedimentos de análise crítica da literatura

Após a coleta e seleção do material, foi conduzida uma análise qualitativa e crítica, com organização dos conteúdos por categorias temáticas: fundamentos da análise de falhas, particularidades setoriais, exemplos clássicos e tendências recentes. Foram identificados padrões recorrentes, mecanismos predominantes e lições técnicas extraídas de cada estudo. O cruzamento das informações possibilitou construir uma discussão estruturada, destacando os fatores metalúrgicos comuns às falhas analisadas e suas implicações para a engenharia e a manutenção de

estruturas críticas.

#### 3.4 Limitações da pesquisa

Por se tratar de uma pesquisa de natureza exclusivamente teórica e bibliográfica, não foram realizados ensaios experimentais, simulações ou inspeções em campo. As conclusões e análises apresentadas dependem, portanto, da qualidade, profundidade e disponibilidade das fontes consultadas. Outra limitação refere-se à impossibilidade de acesso a relatórios técnicos confidenciais ou dados industriais restritos, o que restringiu a análise a casos públicos ou publicados em literatura especializada. Ainda assim, os critérios adotados garantem a consistência técnica e acadêmica dos resultados apresentados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1 Análise comparativa dos mecanismos de falha

A análise comparativa dos mecanismos de falha permitiu compreender como diferentes fenômenos metalúrgicos conseguiram afetar estruturas críticas em distintos contextos operacionais, ocasionando perdas irreparáveis, falhas críticas onde em vários casos várias vidas foram ceifadas.

Ao longo da revisão bibliográfica, observou-se que fadiga, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio, fluência e defeitos de fabricação são os mecanismos mais recorrentes nos casos analisados. Embora cada um apresente características próprias, eles frequentemente atuam de forma combinada, agravando a degradação estrutural e reduzindo a vida útil dos componentes. Por exemplo, trincas por fadiga iniciadas em regiões de solda favorecem a sua propagação quando associadas à corrosão localizada ou à presença de tensões residuais elevadas. Da mesma forma, ambientes agressivos favorecem a corrosão sob tensão, que pode atuar em conjunto com defeitos de fabricação para precipitar falhas prematuras.

Nos diferentes setores estudados, foi possível identificar padrões distintos de predominância dos mecanismos. No setor aeronáutico, a fadiga foi o mecanismo principal, devido aos ciclos de pressurização e esforços repetitivos; no naval, destacou-se corrosão e fadiga em juntas soldadas; no nuclear, os efeitos de fluência e corrosão intergranular em altas temperaturas e radiação foram os mais relevantes; no petroquímico, a fragilização por hidrogênio e a corrosão sob tensão foram as causas mais recorrentes; e na infraestrutura civil, predominou a corrosão atmosférica e a fadiga em ligações metálicas.

Essa distribuição demonstrou que a compreensão detalhada do ambiente de operação e da história do material é essencial para determinar os mecanismos atuantes e propor medidas preventivas adequadas. A análise comparativa também evidenciou que falhas não resultam de um único fator isolado, mas sim da interação entre propriedades do material, condições de operação e processos metalúrgicos, reforçando a importância de uma abordagem integrada na engenharia de integridade estrutural. O Quadro 5 evidencia os principais mecanismos recorrentes de falhas em componentes metálicos.

Quadro 5 – Principais mecanismos recorrentes de falhas em componentes metálicos

Mecanismo de Falha	Descrição Resumida	Causas Típicas	Consequências Comuns
Fadiga	Ruptura progressiva devido à aplicação de tensões cíclicas, mesmo abaixo do limite de escoamento. Ocorre nucleação, propagação e falha final súbita.	Geometrias com concentrações de tensões, cargas alternadas, vibrações, ausência de controle de superfície e inspeção insuficiente.	Trincas iniciam em regiões críticas (entalhes, furos) e podem causar falhas catastróficas sem sinais prévios.
Corrosão sob Tensão	Degradação acelerada pela ação simultânea de meio corrosivo e tensões trativas, levando à nucleação e propagação de trincas intergranulares ou transgranulares.	Ambientes corrosivos (cloretos, H <sub>2</sub> S), tensões residuais de soldagem, falta de alívio térmico, materiais suscetíveis.	Rupturas inesperadas em componentes pressurizados ou estruturas metálicas, frequentemente sem grandes deformações plásticas prévias.
Fragilização por Hidrogênio	Absorção e difusão de hidrogênio atômico no metal, reduzindo ductilidade e tenacidade, podendo causar fraturas frágeis repentinas.	Reações eletroquímicas (decapagem, galvanização), ambientes contendo hidrogênio (dutos de petróleo/gás), soldagem sem controle de difusão.	Trincas internas ou superficiais, falhas em serviço de componentes sujeitos a pressão ou tensão, especialmente em aços de alta resistência.
Fluência	Deformação lenta e progressiva sob tensão constante em temperaturas elevadas, típica em ligas metálicas submetidas a altas temperaturas por longos períodos.	Operação prolongada acima de 0,4 temp. fusão, tensões internas constantes, falta de manutenção preventiva em equipamentos térmicos (turbinas, caldeiras).	Alongamentos progressivos, fissuração intergranular e ruptura sem aviso prévio após longo tempo de operação.
Defeitos de Fabricação	Falhas originadas em processos produtivos: soldagem, fundição, forjamento ou usinagem, podendo atuar como pontos de nucleação de trincas ou reduzir a resistência global do componente.	Inclusões não metálicas, porosidades, falta de fusão na solda, retrações, microtrincas, descontinuidades geométricas, tratamentos térmicos inadequados.	Redução da vida útil, falhas prematuras em serviço, propagação acelerada de danos por fadiga ou corrosão, dificuldades na inspeção e reparo.

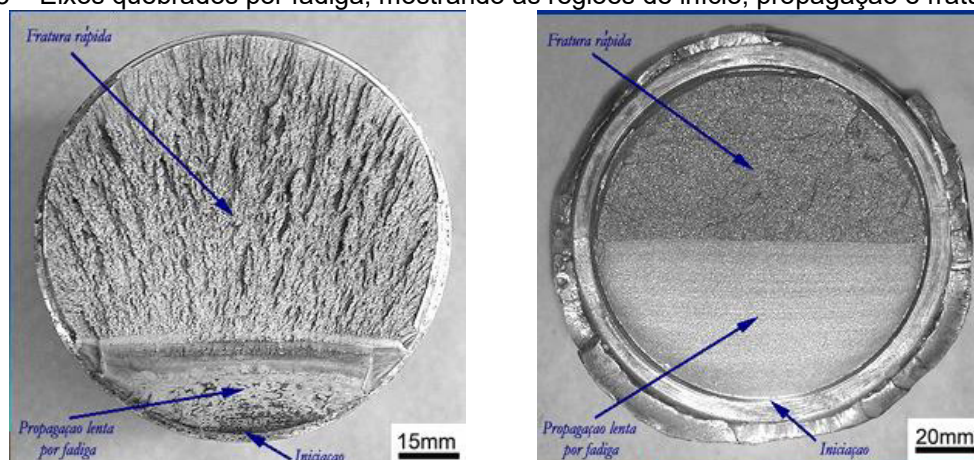
Fonte: Elaborado pelo autor com base em ASM INTERNATIONAL (2017); CALLISTER; RETHWISCH (2020); ANDERSON (2017); BROEK (2012).

A análise do Quadro 5 evidenciou que os mecanismos de fadiga, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio, fluência e defeitos de fabricação estão entre as principais causas de falhas em componentes metálicos. Cada mecanismo apresenta condições específicas de ocorrência, podendo atuar isoladamente ou de forma combinada. Destaca-se que defeitos de fabricação frequentemente funcionam como pontos de iniciação para outros mecanismos, acelerando a degradação. Assim, a prevenção eficaz requer controle de qualidade na fabricação, seleção adequada de materiais e monitoramento contínuo em serviço.

#### 4.2 Relação entre tipo de mecanismo de falha e morfologia da fratura / microestrutura

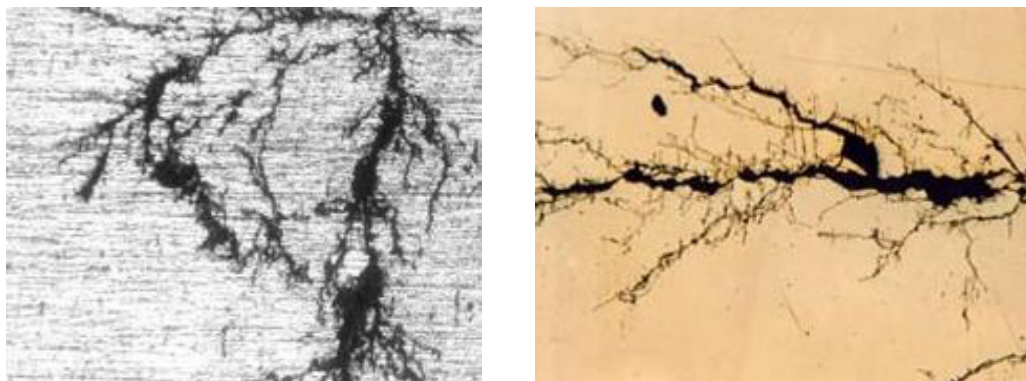
A análise da morfologia da fratura e da microestrutura do material foi uma etapa essencial para identificar corretamente os mecanismos de falha em estruturas críticas. Cada mecanismo deixou assinaturas características na superfície de fratura e na microestrutura adjacente, permitindo inferir a sequência dos eventos que levaram à ruptura. Falhas por fadiga, por exemplo, apresentou superfícies com marcas concêntricas ou estrias de propagação, originando-se em um ponto de nucleação e avançando gradualmente até atingir a ruptura final, geralmente com aspecto frágil no estágio final, conforme demonstrado na Figura 13. Já fraturas por corrosão sob tensão costumou exibir superfícies intergranulares ou transgranulares, com múltiplos pontos de nucleação, associadas à presença de produtos de corrosão, conforme demonstrado na figura 14. Nos casos de fragilização por hidrogênio, observou-se fraturas intergranulares lisas, sem deformação plástica aparente, muitas vezes acompanhadas de microcavidades ou fissuras dispersas na microestrutura.

Figura 13 – Eixos quebrados por fadiga, mostrando as regiões de início, propagação e fratura rápida.



Fonte: *Prevenção e Análise de Falhas*, 2025

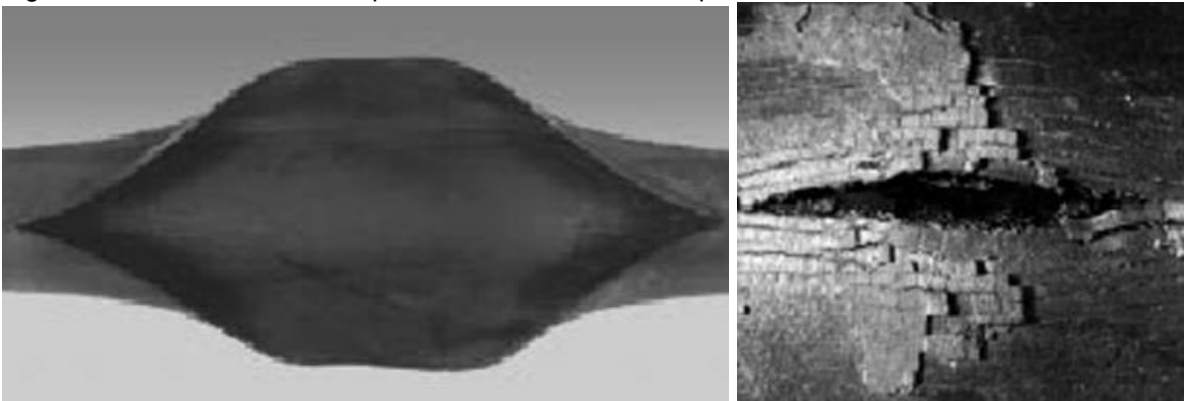
Figura 14 – Micrografias de material com corrosão sob tensão evidenciando trincas com oxidação.



Fonte: *Prevenção e Análise de Falhas*, 2025

Mecanismos térmicos, como a fluência (creep) em altas temperaturas, geraram fraturas com características distintas, incluindo deformação plástica localizada, cavidades intergranulares e alongamento dos grãos na direção da carga, conforme demonstrado na Figura 15. Defeitos de fabricação, como inclusões não metálicas, trincas de solidificação ou falta de fusão em soldas, funcionaram como pontos preferenciais de nucleação de trincas, influenciando diretamente a morfologia da fratura subsequente. A correlação entre essas evidências fractográficas e metalográficas foi fundamental para diferenciar falhas de origem metalúrgica, de projeto ou de operação. Em investigações bem conduzidas, a análise conjunta de superfícies de fratura, microestruturas e histórico operacional permitiu estabelecer com alta confiabilidade o mecanismo envolvido, direcionando medidas corretivas eficazes.

Figura 15 - Material com trinca por fluência devido alta temperatura.



Fonte: *Prevenção e Análise de Falhas*, 2025

#### 4.3 Impacto dos mecanismos de falha na integridade estrutural e vida em serviço

Os mecanismos metalúrgicos de falha mostraram influência direta sobre a integridade estrutural e a vida em serviço de componentes utilizados em setores críticos. A presença de defeitos internos, degradação microestrutural ou processos de deterioração progressiva pode reduzir significativamente a capacidade de suportar cargas, comprometer a segurança operacional e levar à ruptura prematura. Mecanismos como fadiga, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio e fluência atuam muitas vezes de maneira lenta e cumulativa, sem sinais externos evidentes até estágios avançados, tornando sua identificação precoce essencial para evitar falhas catastróficas. Em estruturas metálicas de grande porte como pontes, cascos de navios, reatores ou dutos, a propagação de trincas pode atingir dimensões críticas antes de ser detectada, comprometendo de forma irreversível a integridade

global.

A compreensão detalhada dos mecanismos de falha permite prever a vida residual dos componentes e planejar intervenções de manutenção mais precisas. Modelos baseados em mecânica da fratura e em curvas S–N (tensão versus número de ciclos) são utilizados para estimar a vida útil sob fadiga; métodos de avaliação de corrosão e de degradação térmica complementam essas análises em ambientes agressivos ou de alta temperatura. Além disso, o conhecimento dos mecanismos metalúrgicos auxilia na definição de intervalos de inspeção, escolha de técnicas adequadas de END e priorização de componentes críticos em programas de integridade. Dessa forma, a análise metalúrgica não apenas explica falhas ocorridas, mas se torna uma ferramenta estratégica para prevenção, gestão de risco e extensão segura da vida em serviço de equipamentos e estruturas.

#### 4.4 Discussão crítica dos casos e divergências entre autores

A revisão da literatura mostrou que, apesar do consenso sobre os principais mecanismos de falhas, há divergências entre autores quanto às causas predominantes. Em falhas por fadiga, alguns enfatizam as tensões operacionais, enquanto outros destacam a qualidade do material e a microestrutura. Já na corrosão sob tensão, parte dos estudos aponta o ambiente químico como fator principal, enquanto outros atribuem maior importância às tensões residuais e aos tratamentos térmicos. O Quadro 6 evidencia as principais divergências entre autores a respeito de causas predominantes de falhas.

**Quadro 6 – Principais Divergências entre autores sobre causas predominantes de falhas**

Mecanismo de Falha	Ponto de Divergência	Ênfase de Alguns Autores	Ênfase de Outros Autores
Fadiga	Interpretação da causa predominante em falhas reais	Destacam a importância das tensões operacionais e do histórico de carregamento como fatores principais para a nucleação de trincas.	Enfatizam a influência da qualidade do material, presença de inclusões e microestrutura gerada pelos processos de fabricação.
Corrosão sob Tensão (SCC)	Fator determinante para o surgimento e propagação de trincas	Prioriza o ambiente químico e as estratégias de proteção superficial (controle químico, revestimentos, inibidores de corrosão).	Destaca as tensões residuais e recomenda tratamentos térmicos e alívio de tensões como medidas preventivas principais.

*Fonte: Elaborado pelo autor com base na revisão crítica da literatura.*

Embora o Quadro 6 evidencie que, exista consenso sobre os mecanismos de

falha, as interpretações sobre suas causas predominantes variam conforme o enfoque dos autores. Essas divergências refletem diferenças metodológicas e contextuais, destacando a importância de análises integradas que considerem tanto fatores operacionais quanto características metalúrgicas para uma compreensão mais completa dos modos de falha.

A análise da literatura mostrou também que existem divergências entre setores e abordagens metodológicas quanto à interpretação dos mecanismos de falha. No setor aeronáutico, variam as opiniões sobre a contribuição relativa entre fadiga e corrosão, enquanto no petroquímico há discordâncias entre a fragilização por hidrogênio e a corrosão sob tensão como causa principal. Além disso, ensaios laboratoriais tendem a simplificar condições reais, ao passo que estudos de campo oferecem cenários mais representativos, porém menos controlados. O Quadro 7, destaca as divergências setoriais e metodológicas na interpretação das falhas.

Quadro 7 – Divergências setoriais e metodológicas na interpretação de mecanismos de falha

Contexto / Setor	Ponto de Divergência	Ênfase de Alguns Estudos	Ênfase de Outros Estudos
Setor Aeronáutico	Contribuição relativa da fadiga e da corrosão em juntas rebitadas e regiões de alta concentração de tensões	Destacam a fadiga como mecanismo predominante, devido a carregamentos cíclicos e concentrações de tensões estruturais.	Apontam a corrosão como fator significativo, acelerando a nucleação e propagação de trincas em ambientes agressivos.
Setor Petroquímico	Mecanismo desencadeante em ambientes específicos	Consideram a fragilização por hidrogênio como o principal mecanismo de falha em componentes críticos.	Defendem que a corrosão sob tensão é o fator predominante em determinadas condições operacionais e ambientais.
Abordagens Metodológicas	Influência do tipo de investigação (laboratorial vs campo) na interpretação das causas de falha	Ensaios laboratoriais oferecem condições controladas, mas podem simplificar cenários reais.	Estudos de campo representam condições mais realistas, porém com menor controle experimental.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na revisão crítica da literatura, 2025.

#### 4.5 Aplicações práticas dos resultados

Os resultados obtidos com a análise teórica e comparativa dos mecanismos de falha possuem ampla relevância prática, permitindo prevenir falhas, aumentar a confiabilidade estrutural e prolongar a vida útil de componentes metálicos. O domínio de aspectos fractográficos, ambientais e metalúrgicos orienta estratégias de inspeção e manutenção mais eficazes. Casos históricos, como as fraturas dos navios Liberty e os acidentes com os aviões Comet, foram fundamentais para

consolidar conhecimentos sobre tenacidade, fadiga e técnicas de END, resultando em avanços significativos em normas e práticas de engenharia.

Em setores atuais, como o petroquímico, o entendimento dos mecanismos de fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão orienta a seleção adequada de materiais, tratamentos térmicos e medidas preventivas. No setor nuclear, a detecção precoce de mecanismos como fluência possibilita manutenção preditiva, enquanto na infraestrutura civil os resultados embasam programas de reabilitação estrutural. Além disso, essas aplicações fortalecem a formação técnica e a cultura de prevenção, unindo aprendizado histórico e análise científica para aprimorar a gestão da integridade estrutural em diferentes contextos industriais. O Quadro 8, demonstra em uma linha do tempo alguns acidentes clássicos e os aprendizados técnicos que se obtiveram com essas catástrofes.

Quadro 8 – Linha do tempo de acidentes clássicos e aprendizados técnicos

Período / Ano	Evento / Acidente	Mecanismo de Falha Identificado	Lições e Avanços Técnicos
1940	Colapso da Ponte Tacoma Narrows (EUA)	Vibrações aero elásticas e ressonância estrutural	Desenvolvimento da área de aero elasticidade, novos critérios de projeto dinâmico e revisão das normas de pontes suspensas.
1943–1945	Fraturas em Navios Liberty	Fratura frágil por tensões residuais, soldas rígidas e baixas temperaturas	Avanços no conhecimento de tenacidade à fratura, controle de tensões residuais e melhoria dos projetos navais.
1954	Acidentes com Aviões Comet (Reino Unido)	Fadiga em cantos vivos das janelas da fuselagem	Introdução de ensaios estruturais em escala real, novos critérios de fadiga para aviação e uso sistemático de END.
1967	Colapso da Silver Bridge (EUA)	Fadiga em pino de olhal, ausência de redundância estrutural	Implantação de inspeções periódicas obrigatórias em pontes e revisão dos critérios de redundância estrutural.
1979	Three Mile Island (EUA)	Falhas mecânicas combinadas com erros humanos e deficiências de projeto	Reforço dos programas de manutenção preventiva, implementação de sistemas redundantes e cultura de segurança nuclear.
1988	Explosão da Plataforma Piper Alpha (Mar do Norte)	Falhas de comunicação e manutenção agravadas por incêndios estruturais	Revisão dos protocolos de segurança offshore, melhoria de sistemas de emergência e procedimentos de manutenção.
2000s	Infraestruturas metálicas envelhecidas (global)	Fadiga acumulada e corrosão em estruturas antigas	Desenvolvimento de programas de reabilitação estrutural, monitoramento contínuo e priorização de intervenções em pontos críticos.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na revisão crítica da literatura, 2025.

#### 4.6 Considerações finais dos resultados e síntese

A análise teórica permitiu identificar com clareza os principais mecanismos metalúrgicos de falha que afetam estruturas críticas em diferentes setores, como fadiga, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio, fluência e defeitos de fabricação. Esses mecanismos, muitas vezes atuando de forma combinada e silenciosa, exigem detecção precoce e abordagens específicas conforme o ambiente e as condições operacionais. Apesar da existência de metodologias consolidadas, persistem divergências quanto à interpretação das causas predominantes e estratégias de mitigação, o que reforça a importância de abordagens multidisciplinares e bem fundamentadas.

Mesmo com o avanço do conhecimento técnico e o desenvolvimento de novas ferramentas analíticas, grandes catástrofes ainda ocorrem. Fatores como imprudência operacional, uso inadequado de materiais, decisões motivadas por ganância ou redução de custos e falta de manutenção criteriosa continuam a ser determinantes em falhas estruturais severas. Isso evidencia que a técnica, por si só, não basta: é fundamental aplicar rigorosamente as boas práticas de engenharia, fortalecer a fiscalização e consolidar uma cultura de segurança para evitar a repetição de erros já conhecidos.

## 5 – CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu compreender, a partir de uma análise teórica e comparativa, os principais mecanismos metalúrgicos responsáveis por falhas em estruturas críticas de diferentes setores industriais, destacando-se fadiga, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio, fluência e defeitos de fabricação. A metodologia adotada, fundamentada em revisão bibliográfica e análise crítica de casos clássicos e contemporâneos, possibilitou identificar padrões recorrentes e interações entre fatores metalúrgicos, condições operacionais e ambientes de serviço, evidenciando como essas combinações podem levar a falhas graves quando não há controle adequado.

Os resultados mostraram que, embora existam técnicas avançadas de monitoramento, inspeção e análise de falhas, ainda persistem divergências entre autores e práticas setoriais, além de desafios na aplicação efetiva do conhecimento. A análise histórica evidenciou que muitos avanços na engenharia ocorreram em resposta a acidentes catastróficos, como os casos dos navios Liberty, do avião Comet e da ponte Silver Bridge, que impulsionaram melhorias técnicas e normativas.

Apesar da evolução significativa das ferramentas analíticas e da ampliação do conhecimento técnico, grandes falhas continuam a ocorrer por fatores humanos e organizacionais, como imprudência operacional, uso inadequado de materiais, decisões baseadas em ganhos econômicos imediatos e manutenção deficiente. Isso reforça que o domínio técnico, por si só, não é suficiente: é necessário um compromisso contínuo com a aplicação rigorosa das boas práticas de engenharia, fiscalização efetiva e cultura de segurança. Assim, os objetivos propostos foram plenamente alcançados, contribuindo para uma visão crítica e integrada da análise de falhas metalúrgicas e de sua importância estratégica para a confiabilidade estrutural e a prevenção de acidentes.

### 5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras

Há espaço para aprofundamentos futuros, principalmente no uso de monitoramento em tempo real, modelagem numérica e análises probabilísticas de confiabilidade. A comparação entre casos nacionais e internacionais e a integração com técnicas digitais avançadas, como tomografia industrial, representam caminhos promissores para novas pesquisas e aplicações.

## REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 9. ed. Washington, D.C.: AASHTO, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15224: Ensaio não destrutivo – Ensaio por partículas magnéticas. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16441: Ensaio não destrutivo – Ultrassom. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

ASM INTERNATIONAL. *Metals Handbook – Volume 11: Failure Analysis and Prevention*. 10. ed. Ohio: ASM International, 2017.

ASTM. E165/E165M-18: *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM. E1742/E1742M-18: *Standard Practice for Radiographic Examination*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM. E415-17: *American Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Emission Spectrometry*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM. E8/E8M-16a: *American Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY. *AWS B1.10M/B1.10: Guide for the Nondestructive Examination of Welds*. Miami: AWS, 2016.

BLOG INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS: ESTUDO DE CASOS. Disponível em: <https://inspecaoequipto.blogspot.com/search?q=fadiga>. Acesso em: 07 out. 2025.

BROEK, D. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. 4. ed. Springer, 2012.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma*

*Introdução*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

EUROCODE - European Committee for Standardization (CEN). *Eurocode: Basis of structural design (EN 1990) and structural steel design (EN 1993)*. Brussels: CEN, 2005.

GOLDSTEIN, J. I. et al. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. 4. ed. Springer, 2018.

KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H. *Ultrasonic Testing of Materials*. 4. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1990.

PANTAZOPOULOS, G. et al. Failure Analysis of Industrial Products and Components: From Identification to Process Based Approach. In: *Materials Science & Technology, MS&T19*, Portland, Oregon, p. 904-911, 2019. DOI: 10.7449/2019/MST\_2019\_904\_911.

PETROBRAS. *Relatórios de Integridade de Dutos*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2020. Prevenção e Análise de Falhas. [S.l.]: [s.n.], [ano]. Disponível em: <file:///E:/An%C3%A1lise%20de%20Falhas/Preven%C3%A7%C3%A3o%20e%20An%C3%A1lise%20de%20Falhas.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

SACHS, N. W. *Practical Plant Failure Analysis: A Guide to Understanding Machinery Deterioration and Improving Equipment Reliability*. Boca Raton: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2007.

VANDER VOORT, G. F. *Metallography: Principles and Practice*. ASM International, 1999.

WIKIPÉDIA. Silver Bridge. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Silver\\_Bridge](https://pt.wikipedia.org/wiki/Silver_Bridge). Acesso em: 10 out. 2025.