

A CONFIABILIDADE ESTATÍSTICA COMO BASE PARA A GESTÃO DA INCERTEZA E A PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL EM PROCESSOS DE SOLDAGEM

Rafael Ferreira de Oliveira Leite – rafaelferole@unifei.edu.br
Juliana Helena Daroz Gaudêncio - juliana.gaudencio@unifei.edu.br

Palavras-chave: Confiabilidade, Fadiga Estrutural, Análise Estatística, Estatística Aplicada.

1. INTRODUÇÃO

A integridade de componentes críticos desafia os diversos campos da engenharia, diante de carregamentos dinâmicos e ambientes adversos. A confiabilidade, ao aplicar métodos estatísticos, converte dados incertos em previsões robustas, sendo vital para validar modelos e apoiar decisões seguras (QIAN et al., 2025). Modelos de falha por degradação acelerada e algoritmos de segmentação dependem da confiabilidade na análise de defeitos em imagens radiográficas de soldagem (QIAN et al., 2025; XU et al., 2022). Na mecânica da fratura, o crescimento de trincas é modelado considerando tamanho inicial e Lei de Paris (NOROUZZADEH TOCHAEI et al., 2021). Estruturas como pontes de vigas de aço exigem análise de confiabilidade, pois tensões residuais afetam a durabilidade (ZHANG et al., 2022; CUI et al., 2020). A confiabilidade é essencial para analisar durabilidade de materiais em ambientes agressivos, como concreto sob sulfato e juntas soldadas sob corrosão (ZHANG et al., 2025; SHOJAI et al., 2025; ADIN, 2024).

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo analisar a importância da confiabilidade no âmbito da análise estatística, detalhando as implicações de sua aplicação rigorosa na avaliação da integridade e durabilidade de materiais e estruturas. Para isso, o estudo busca: a) conceituar a confiabilidade estatística e sua relação com a incerteza e a modelagem probabilística; b) demonstrar sua aplicação em diferentes mecanismos de falha, como fadiga, mecânica da fratura e degradação de materiais e c) sublinhar a relevância da confiabilidade para a validação de modelos preditivos e a segurança estrutural.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA CONFIABILIDADE E DA ANÁLISE ESTATÍSTICA EM ENGENHARIA

A confiabilidade é definida como a probabilidade de um item cumprir sua função sem falhar, sob condições específicas e por tempo determinado (JULIO, 2024). Na pesquisa, garante consistência dos dados e validade das conclusões, permitindo generalização dos resultados.

2.1.1 Confiabilidade e a Gestão da Incerteza

Em engenharia, a falha raramente é determinística, sendo geralmente fruto da combinação estocástica de variáveis do material, incertezas de carregamento e imperfeições de fabricação (ZHANG et al., 2022). A análise estatística de confiabilidade permite mensurar a probabilidade de falha, indo além da simples previsão de sua ocorrência.

A confiabilidade é indispensável em modelos preditivos complexos, como na estimativa do dano por fadiga em pavimentos de aço ortotrópicos de pontes estaiadas, que demandam abordagem multi-escala e consideração do fluxo estocástico de tráfego e dinâmica veículo-estrutura (CUI et al., 2020). A modelagem probabilística das variáveis de entrada, como carregamento e propriedades do material, possibilita determinar a chance de a resistência superar a demanda (QIAN et al., 2025).

2.1.2 Confiabilidade na Mecânica da Fratura e Fadiga

Um dos principais campos de aplicação da confiabilidade é a avaliação da fadiga em detalhes soldados, devido ao risco de rupturas catastróficas. A estimativa da vida útil remanescente (RLE) baseia-se em abordagens probabilísticas na Mecânica da Fratura Elástica Linear (LEFM), considerando variáveis estatísticas de propagação de trincas, como

o parâmetro da Lei de Paris e fatores de intensidade de tensão, além da atualização dos dados por monitoramento da saúde estrutural (SHM) (NOROUZZADEH TOCHAEI et al., 2021). Fatores de fabricação, como tensões residuais de soldagem, também reduzem o índice de confiabilidade, ressaltando a importância de incluir todas as incertezas na avaliação estatística (ZHANG et al., 2022; ADIN, 2024).

2.1.3 Confiabilidade na Avaliação da Degradação de Materiais

A durabilidade dos materiais em ambientes agressivos demanda alta confiabilidade estatística para separar e quantificar mecanismos de dano.

Em estruturas offshore, a corrosão intensifica concentrações de tensão em soldas, acelerando a fadiga; modelos de confiabilidade devem prever o efeito de solda e tensões residuais sob corrosão acelerada (SHOJAI et al., 2025).

Para concreto exposto a sulfato, testes confiáveis desacoplam danos químicos e físicos, especialmente em ciclos de molhado-seco (ZHANG et al., 2025). Tal distinção é essencial para novos materiais, como pastas de cimento ativadas por álcalis, avaliando carbonatação e alterações estruturais com métodos estatísticos robustos (YUE et al., 2025).

2.2 METODOLOGIA

A metodologia deste artigo consistiu em uma Revisão Bibliográfica e Análise Crítica-Conceitual, fundamentada apenas em artigos encontrados na base da Scopus. O objetivo foi consolidar e validar a relevância da confiabilidade estatística em áreas como estruturas, materiais e projetos de precisão. Inicialmente, coletaram-se artigos de destaque que serviram como “estudos de caso”. Em seguida, realizou-se a Análise Crítica dos Conceitos, extraindo e comparando definições de confiabilidade, validade e risco, situando a confiabilidade como ferramenta essencial para a gestão da incerteza em fenômenos complexos, como fadiga e degradação de materiais oriundos do processo de soldagem. Na etapa de Quantificação e Validação, detalhou-se o uso de ferramentas estatísticas (Simulação de Monte Carlo, distribuições Log-Normal e Weibull) para mensurar a consistência dos modelos, comprovando que a análise estatística garante precisão e segurança nas conclusões de engenharia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO: VALIDAÇÃO DA CONFIABILIDADE NO CONTEXTO DA ENGENHARIA

Esta seção apresenta e discute os principais resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos de análise estatística, validando o papel da confiabilidade na precisão do diagnóstico e na predição de falhas em engenharia.

3.1 A Confiança Estatística como Pré-requisito para a Segurança Estrutural

A análise dos estudos de fadiga demonstra que a confiabilidade probabilística é indispensável para mensurar o risco real, superando as limitações dos modelos determinísticos.

- **Inadequação de Modelos Determinísticos:** Em avaliações de pontes metálicas, estimativas de vida útil remanescente baseadas em abordagens determinísticas foram associadas a um Índice de Confiabilidade ($\beta \approx 0,3$) muito baixo, de aproximadamente 0,3, valor que não atende aos requisitos de segurança que exigem ($\beta \geq 2,3$). Este resultado crucial justifica a substituição completa da análise determinística pela probabilística em projetos de infraestrutura.
- **Confiabilidade Frente à Incerteza da Engenharia:** A incorporação de fatores estocásticos (aleatórios) na função de estado limite é fundamental.
 - **Tensão Residual de Soldagem:** O estresse residual de soldagem, oriundo do processo de fabricação, foi um fator determinante de incerteza, sendo responsável por uma redução de 21% no Índice de Confiabilidade (β) ao longo de 100 anos de serviço em vigas de alma de aço corrugado, quando comparado ao cenário sem este estresse.
 - **Distribuições de Carregamento:** O espectro de tensões de veículos e trens, por ser bimodal, exige a modelagem por distribuições de mistura (Log-Normal e Weibull) para representar o risco com acurácia, provando que a escolha do modelo estatístico influencia diretamente a predição da vida útil.
- **Confiabilidade na Prognose de Fadiga:** Em pavimentos de aço ortotrópicos, a negligência do fluxo de tráfego estocástico e da variação da posição transversal do veículo leva a uma superestimação da vida útil do componente⁷. A modelagem com

dados de tráfego em tempo real é essencial para alcançar uma prognose de dano por fadiga que seja estatisticamente confiável.

3.2 Validação de Modelos no processo de soldagem

A confiabilidade não apenas prediz a falha, mas também valida a precisão dos métodos de inspeção e modelagem de longo prazo.

- **Acurácia de Sistemas de Inspeção Automatizada:** A confiabilidade dos algoritmos de inspeção de defeitos de soldagem é confirmada por métricas estatísticas robustas.
- **Consistência de Modelos de Degradação de Longo Prazo:** A acurácia de modelos de degradação acelerada em mecanismos de precisão (como conectores elétricos) foi confirmada por altos valores do coeficiente de correlação (próximos a 1,0), validando a capacidade de o modelo traduzir dados de curto prazo para cenários de degradação prolongada.
- **Confiabilidade vs. Corrosão e Geometria de Solda:** Em juntas soldadas sob ambientes marinhos, a confiabilidade é essencial para gerenciar o risco que a corrosão impõe. A avaliação probabilística da geometria de solda revelou um "efeito de equalização" do dano: a corrosão aumentou a concentração de tensão em soldas inicialmente mais *blunt* (topo) e a diminuiu em soldas mais *sharp* (ângulo), um achado que deve ser considerado para a correta aplicação dos conceitos de tensão de entalhe e fadiga¹¹.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo confirmou a confiabilidade estatística como base para diagnósticos e segurança em engenharia. O tratamento probabilístico da incerteza é crucial para avaliar durabilidade e vida útil. Resultados mostraram que modelos probabilísticos são indispensáveis, e fatores estocásticos, como estresse residual de soldagem (reduzindo confiabilidade em 21%), devem ser considerados. Inconsistências em testes acelerados, como a carbonatação, apontam necessidade de revisar protocolos. Assim, a confiabilidade

assegura qualidade na pesquisa, consolidando seu papel na gestão de riscos e otimização da vida útil dos componentes analisados.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a UNIFEI e ao Programa de Pós-Graduação da Engenharia de Produção ao NOMATI e, em especial, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), CAPES e CNPq.

REFERÊNCIAS

1. ADIN, M. Ş. A parametric study on the mechanical properties of MIG and TIG welded dissimilar steel joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 38, n. 1, p. 115–138, 2024.
2. CUI, C. et al. Vehicle-induced fatigue damage prognosis of orthotropic steel decks of cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, v. 212, p. 110509, 2020.
3. JULIO, C. V. de J. C. de A. Avaliação da confiabilidade de bombas centrífugas utilizando dados de acionamento de garantia como falha em campo. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024.
4. NOROUZZADEH TOCHAEI, E. et al. Structural monitoring and remaining fatigue life estimation of typical welded crack details in the Manhattan Bridge. *Engineering Structures*, v. 231, p. 111760, 2021.
5. QIAN, P. et al. Reliability Modeling and Verification of Locking Mechanisms Based on Failure Mechanisms. *Actuators*, v. 14, n. 5, p. 205, 2025.
6. SHOJAI, S. et al. Impact of accelerated corrosion on weld geometry, hardness and residual stresses of offshore steel joints over time. *Materials & Design*, v. 251, p. 113578, 2025.
7. XU, H. et al. Defect detection in welding radiographic images based on semantic segmentation methods. *Measurement*, v. 188, p. 110569, 2022.



IEPG SUMMIT'25

Pensando o futuro com *inteligência*
artificial e consciência social

8. YUE, Z. et al. Structural alterations in alkali-sulfate-activated slag cement pastes induced by natural and accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 187, p. 107713, 2025.
9. ZHANG, H. et al. Effects of welding residual stresses on fatigue reliability assessment of a PC beam bridge with corrugated steel webs under dynamic vehicle loading. *Structures*, v. 45, p. 1561–1572, 2022.
10. ZHANG, M. et al. Decoupling chemical and physical sulfate attack on OPC and L. SAC concrete under wet-dry cycles. *Journal of Building Engineering*, v. 99, p. 111637, 2025.



Inatel

