

Engenharia da confiabilidade e materiais

Tecnologia dos Materiais 2024.2

22.03.2025

Aluno: Henrique Pedro da Silva

Professor: Edval J. P. Santos, PhD

Repositório: https://github.com/shapis/ufpe_ee/

Sumário

- 1 Introdução e Motivação 5
 - 1.a Introdução 6
 - 1.b Motivação 7
- 2 Intuição Física 8
 - 2.a Compreendendo Falhas e Desempenho ao Longo do Tempo 9
 - 2.b Mecanismos de Degradação e Confiabilidade Estrutural dos Materiais 10
 - 2.c Previsão de Falhas e Otimização do Desempenho de Materiais em Sistemas Complexos 11
- 3 Experimento de Fadiga por August Wöhler (Século XIX) 12
 - 3.a Contexto Histórico 13
 - 3.b O Caso da Quebra das Asas de Aviãos da Segunda Guerra Mundial 14
 - 3.c Curva S-N 15
 - 3.d Aplicação na Aviação 16
 - 3.e Impacto 17
- 4 Formalismo Matemático 18
 - 4.a Distribuição Exponencial 19
 - 4.b Distribuição Weibull 20

Sumário (ii)

4.c	Função de Confiabilidade	21
4.d	Taxa de Falha ($\lambda(t)$)	22
4.e	Taxa de Falha	23
4.f	Tempo Médio Até a Falha (MTTF - Mean Time to Failure)	24
4.g	Função de Disponibilidade ($A(t)$)	25
4.h	Modelo de Fadiga - Curva S-N (Wöhler)	26
4.i	Modelo de Fadiga - Curva S-N (Wöhler)	27
5	Equipamentos e Técnicas de Caracterização	28
5.a	Caracterização Microestrutural	29
5.b	Caracterização Mecânica	30
5.c	Caracterização Térmica	31
5.d	Caracterização Química	32
5.e	Ensaio Não Destrutivos (NDT - Non-Destructive Testing)	33
6	Normas	34
6.a	Normas Gerais de Confiabilidade	35
6.b	Normas para Ensaio Mecânicos e Caracterização de Materiais	36

Sumário (iii)

6.c	3. Normas para Ensaaios Não Destrutivos (NDT - Non-Destructive Testing)	37
6.d	Normas para Ensaaios de Degradação e Análise de Vida Útil	38
7	Aplicações	39
7.a	Confiabilidade em Sistemas Eletrônicos	40
7.b	Confiabilidade em Redes de Distribuição e Transmissão	41
7.c	Análise de Degradação em Baterias e Dispositivos de Armazenamento	42
8	Bibliografia	43
8.a	Fontes	44

1 Introdução e Motivação

Introdução

A Engenharia da Confiabilidade tem como objetivo garantir o desempenho seguro e eficiente de sistemas e componentes ao longo do tempo. No contexto industrial, a escolha e o comportamento dos materiais são fatores críticos para evitar falhas e otimizar a vida útil dos produtos. O estudo da degradação, ensaios mecânicos e técnicas preditivas são fundamentais para melhorar a confiabilidade dos materiais aplicados em diversos setores.

Motivação

A crescente demanda por produtos mais duráveis e eficientes exige um aprofundamento no estudo da confiabilidade dos materiais. Compreender os mecanismos de falha, prever desgastes e aplicar metodologias adequadas reduz custos de manutenção, melhora a segurança operacional e impulsiona a inovação. Esse seminário visa discutir abordagens e técnicas para aprimorar a confiabilidade dos materiais, contribuindo para o desenvolvimento de soluções industriais mais seguras e eficientes.

2 Intuição Física

Compreendendo Falhas e Desempenho ao Longo do Tempo

A engenharia da confiabilidade aplicada aos materiais busca entender e prever como e por que falhas ocorrem em componentes ao longo do tempo. A intuição física por trás desse problema está relacionada às respostas dos materiais a esforços mecânicos, térmicos e químicos.

Mecanismos de Degradação e Confiabilidade Estrutural dos Materiais

Os materiais, ao serem submetidos a cargas externas, sofrem deformações e podem acumular danos microscópicos, que eventualmente levam à falha estrutural. Fatores como fadiga, corrosão, fluência e impacto influenciam diretamente a durabilidade e a segurança dos componentes. A confiabilidade, portanto, depende de um equilíbrio entre as propriedades do material, as condições operacionais e os mecanismos de degradação.

Previsão de Falhas e Otimização do Desempenho de Materiais em Sistemas Complexos

Dessa forma, estudar a confiabilidade dos materiais permite prever falhas antes que ocorram, minimizando riscos e otimizando o desempenho de sistemas complexos, desde turbinas aeronáuticas até componentes eletrônicos.

3 Experimento de Fadiga por August Wöhler (Século XIX)

Contexto Histórico

Durante a Segunda Guerra Mundial, engenheiros começaram a observar falhas inesperadas nas asas de aeronaves, mesmo quando operavam dentro dos limites de carga especificados. Essas falhas ocorriam devido à fadiga do material, um fenômeno pouco compreendido na época.

O Caso da Quebra das Asas de Aviões da Segunda Guerra Mundial

Antes mesmo da guerra, no século XIX, o engenheiro alemão August Wöhler conduziu experimentos pioneiros para estudar a resistência dos materiais submetidos a cargas cíclicas. Ele criou a curva S-N (Tensão vs. Número de ciclos até a falha), que demonstrava como materiais aparentemente resistentes poderiam falhar após repetidos ciclos de carga abaixo do limite de resistência estática.

Fonte: Solidworks. «Curva de tensão (S-N) - ciclo de vida», 2024. https://help.solidworks.com/2024/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_SN_Curve.htm.

Curva S-N

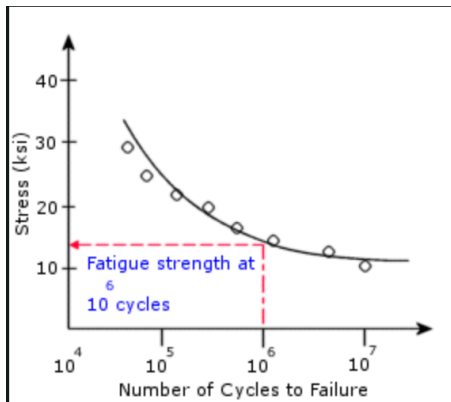


Figura 1: Curva S-N de um material metálico, mostrando a relação entre a tensão aplicada e o número de ciclos até a falha.

Fonte: Solidworks. «Curva de tensão (S-N) - ciclo de vida», 2024. https://help.solidworks.com/2024/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_SN_Curve.htm.

Aplicação na Aviação

Durante a Segunda Guerra, o conceito de fadiga foi revisitado por engenheiros aeronáuticos após falhas inesperadas em aeronaves como o P-51 Mustang e o B-24 Liberator. Os experimentos inspirados no trabalho de Wöhler levaram ao desenvolvimento de testes sistemáticos para prever a vida útil dos materiais sob cargas cíclicas, permitindo aprimorar a confiabilidade das estruturas aeronáuticas.

Impacto

Esse estudo revolucionou a engenharia da confiabilidade aplicada aos materiais, estabelecendo práticas modernas de ensaios de fadiga e garantindo que componentes críticos fossem projetados para resistir a longos períodos de uso sem falha inesperada. A partir desses experimentos, a engenharia passou a considerar a fadiga como um dos principais fatores na análise da confiabilidade estrutural.

4 Formalismo Matemático

Distribuição Exponencial

- **Distribuição Exponencial** (usada para falhas com taxa constante):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0$$

Onde:

- λ é a taxa de falha (constante no tempo)
- t é o tempo de operação até a falha

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Distribuição Weibull

- **Distribuição Weibull** (usada para modelar falhas em diferentes estágios da vida útil):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-(t/\eta)^\beta}, \quad t \geq 0$$

Onde:

- β (shape) indica o comportamento da falha (se $\beta < 1$, falha infantil; $\beta = 1$, falha aleatória; $\beta > 1$, falha por desgaste)
- η (scale) é o tempo característico da falha

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Função de Confiabilidade

2. Função de Confiabilidade (Reliability Function, $R(t)$)

A função de confiabilidade define a probabilidade de um componente operar sem falha até o tempo t .

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{para distribuição exponencial})$$

Para Weibull:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$$

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Taxa de Falha ($\lambda(t)$)

A taxa de falha é definida como a razão entre a função densidade de probabilidade $f(t)$ e a confiabilidade $R(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Taxa de Falha

Para a distribuição exponencial, a taxa de falha é constante:

$$\lambda(t) = \lambda$$

Para Weibull:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Tempo Médio Até a Falha (MTTF - Mean Time to Failure)

Para um sistema sem reparo, o tempo médio até a falha é dado por:

- Distribuição Exponencial:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

- Distribuição Weibull:

$$MTTF = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Onde $\Gamma(x)$ é a função gama.

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Função de Disponibilidade ($A(t)$)

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

- $MTBF$ = Tempo médio entre falhas
- $MTTR$ = Tempo médio para reparo

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Modelo de Fadiga - Curva S-N (Wöhler)

$$S = aN^b$$

Ou na forma logarítmica:

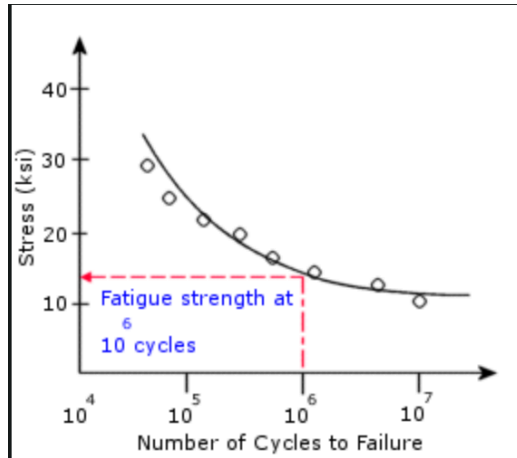
$$\log S = \log a + b \log N$$

Onde:

- S = tensão aplicada
- N = número de ciclos até a falha
- a, b = constantes obtidas experimentalmente

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Modelo de Fadiga - Curva S-N (Wöhler)



Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

5 Equipamentos e Técnicas de Caracterização

Caracterização Microestrutural

- Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM - Scanning Electron Microscopy)
- Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM - Transmission Electron Microscopy)
- Microscopia Óptica (OM - Optical Microscopy)
- Difração de Raios X (XRD - X-Ray Diffraction)

Caracterização Mecânica

- Ensaio de Dureza (Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop)
- Ensaio de Tração
- Ensaio de Impacto (Charpy e Izod)
- Ensaio de Fadiga
- Ensaio de Fluência

Caracterização Térmica

- Análise Termogravimétrica (TGA - Thermogravimetric Analysis)
- Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC - Differential Scanning Calorimetry)
- Análise Dinâmico-Mecânica (DMA - Dynamic Mechanical Analysis)

Caracterização Química

- Espectroscopia de Infravermelho (FTIR - Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
- Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (XRF - X-Ray Fluorescence Spectroscopy)
- Espectrometria de Massa (MS - Mass Spectrometry)

Ensaaios Não Destrutivos (NDT - Non-Destructive Testing)

- Ultrassom (UT - Ultrasonic Testing)
- Radiografia Industrial (Raio-X e Gama)
- Partículas Magnéticas (MT - Magnetic Particle Testing)
- Líquidos Penetrantes (PT - Penetrant Testing)

6 Normas

Normas Gerais de Confiabilidade

- ISO 31010 – Gestão de Riscos e Métodos de Avaliação

Apresenta metodologias para identificação e análise de riscos em engenharia de confiabilidade.

- IEC 60300 – Dependability Management

Série de normas da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) que cobre princípios gerais de confiabilidade.

- MIL-HDBK-217 – Reliability Prediction of Electronic Equipment

Manual do Departamento de Defesa dos EUA para prever a confiabilidade de equipamentos eletrônicos.

Normas para Ensaios Mecânicos e Caracterização de Materiais

- ASTM E8 / E8M – Ensaio de Tração em Materiais Metálicos

Define métodos para medir resistência à tração, escoamento e alongamento de metais.

- ASTM E23 – Ensaio de Impacto Charpy

Padroniza testes de impacto para medir tenacidade de materiais.

- ASTM E466 – Ensaio de Fadiga

Especifica procedimentos para ensaios de resistência à fadiga em materiais metálicos.

- ISO 6507 – Dureza Vickers

Padroniza medições de dureza usando o método Vickers.

- ISO 6508 – Dureza Rockwell

Define os procedimentos para medição de dureza pelo método Rockwell.

3. Normas para Ensaaios Não Destrutivos (NDT - Non-Destructive Testing)

- ISO 9712 – Qualificação e Certificação de Pessoal em Ensaaios Não Destrutivos
- ASTM E1444 – Ensaio de Partículas Magnéticas
- ASTM E165 – Ensaio de Líquidos Penetrantes
- ASTM E213 – Teste Ultrassônico para Tubos Metálicos
- IEC 60068 – Testes Ambientais em Componentes Eletrônicos

Normas para Ensaios de Degradação e Análise de Vida Útil

- ASTM G154 – Ensaio de Envelhecimento Acelerado por UV

Define procedimentos para testes de degradação de polímeros e revestimentos por exposição a radiação UV.

- ASTM G31 – Corrosão por Imersão em Meio Aquoso

Normativa para avaliação da corrosão de materiais em soluções líquidas.

- ISO 9227 – Teste de Névoa Salina

Padrão para ensaios de resistência à corrosão em metais e revestimentos.

- IEC 60068 – Testes Ambientais em Componentes Eletrônicos

Série de normas que definem testes climáticos e mecânicos para componentes eletrônicos.

7 Aplicações

Confiabilidade em Sistemas Eletrônicos

- Predição de vida útil de componentes eletrônicos (capacitores, resistores, transistores, microprocessadores).
- Análise de falha em circuitos impressos (PCBs) devido a fadiga térmica e ciclos de carga.
- Uso do MIL-HDBK-217 para prever falhas e aumentar a confiabilidade de sistemas eletrônicos.

Fonte: Elsayed, Elsayed A. *Reliability Engineering*, 2021.

Confiabilidade em Redes de Distribuição e Transmissão

- Monitoramento da degradação de isoladores elétricos devido a poluição e descargas elétricas.
- Modelagem da falha de transformadores usando análise de óleo isolante para prever falhas internas.
- Uso de ensaios térmicos (TGA e DSC) para avaliar a degradação de materiais dielétricos.

Análise de Degradação em Baterias e Dispositivos de Armazenamento

- Análise de ciclos de carga e descarga em baterias de íon-lítio usadas em sistemas fotovoltaicos.
- Modelagem da degradação exponencial para prever a perda de capacidade ao longo do tempo.

8 Bibliografia

Fontes

- [1] Solidworks, «Curva de tensão (S-N) - ciclo de vida», 2024, [Online]. Disponível em: https://help.solidworks.com/2024/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_SN_Curve.htm
- [2] E. A. Elsayed, *Reliability Engineering*. 2021.