

*Prof. Eduardo Gontijo Carrano - DEE/EE/UFGM*

---

# Confiabilidade de Sistemas

Testes de Confiabilidade

---

---

# Introdução

---

- ❖ Testes são parte essencial de um programa de desenvolvimento de um produto.
- ❖ Programa integrado de testes:
  - ❖ Testes de funcionalidade (requisitos).
  - ❖ Testes de ambiente.
  - ❖ Testes de confiabilidade.
  - ❖ Testes de segurança.

- ❖ Os testes de confiabilidade são necessários para garantir que o produto é confiável dentro de seu ciclo de vida previsto.
- ❖ nem sempre é possível analisar todas as causas possíveis de falhas.
- ❖ muitas vezes são ignoradas interações físicas / químicas ou efeitos conjuntos que podem levar a falha.



- ❖ O situação “ideal” para o responsável pelo teste é a não ocorrência de falhas.
- ❖ No entanto, um teste bem sucedido depende da ocorrência de falhas.
- ❖ Geralmente as falhas devem ser “estimuladas” com o intuito de tornar o teste mais rápido.
- ❖ Idealmente o teste de confiabilidade deve revelar todas as fraquezas do sistema.

- ❖ Os testes devem ser divididos em duas categorias:
  - ❖ **Testes de Sucesso:** testes em que as falhas são indesejáveis.
  - ❖ **Testes de Falha:** testes em que as falhas são forçadas.

---

# Testes de Sucesso

---

- ❖ Testes típicos:
  - ❖ testes estatísticos.
  - ❖ testes funcionais.
  - ❖ testes de ambiente.
- ❖ Os Testes de Sucesso geralmente ocorrem na etapa de Verificação do DfR.



---

# Testes de Falha

---

- ❖ Testes típicos:
  - ❖ testes de confiabilidade.
  - ❖ testes de segurança.
- ❖ Os resultados dos testes devem ser reportados, indicando a falha, o efeito e indicando ações corretivas possíveis.

- ❖ Os Testes de Falha devem iniciar assim que o sistema / produto está disponível em hardware e devem ocorrer até a etapa de Verificação do DfR.
- ❖ Tendo em vista que os custos de correção / alteração aumentam com o andamento do desenvolvimento do projeto, os testes devem ser programados de forma a ocorrer o mais cedo possível.



---

# Planejamento dos Testes de Confiabilidade

---

- ❖ Utilizando os dados da análise do projeto:
  - ❖ Os dados obtidos na análise do projeto devem ser utilizados como suporte para construir o plano dos testes de confiabilidade.
    - ❖ Se no FMECA uma falha é classificada como altamente crítica, os Testes de Confiabilidade devem garantir que a chance de ocorrência dessa falha é baixa durante a vida útil do produto, respeitada a condição de uso.
- ❖ Inevitavelmente os Testes de Confiabilidade vão identificar falhas não consideradas durante a análise do projeto.

---

# Variabilidade

---

- ❖ A variabilidade entre unidades pode afetar consideravelmente a confiabilidade do sistema.
- ❖ Os Testes de Confiabilidade devem ser capazes de cobrir os efeitos da variabilidade nos modos de falha esperados e não esperados.
- ❖ Os Testes de Confiabilidade podem ser planejados com base nos resultados obtidos pela variação de parâmetros (análise de sensibilidade) ou testes estatísticos para confirmar o efeito da variabilidade.



- ❖ Os Testes de Confiabilidade devem ser realizados em vários itens, com o intuito de “filtrar” os efeitos da variabilidade.
- ❖ A escolha do número de itens a serem testados deve levar em conta:
  - ❖ A controlabilidade das variáveis envolvidas.
  - ❖ A criticalidade da falha.
  - ❖ O custo dos testes e do hardware de teste.

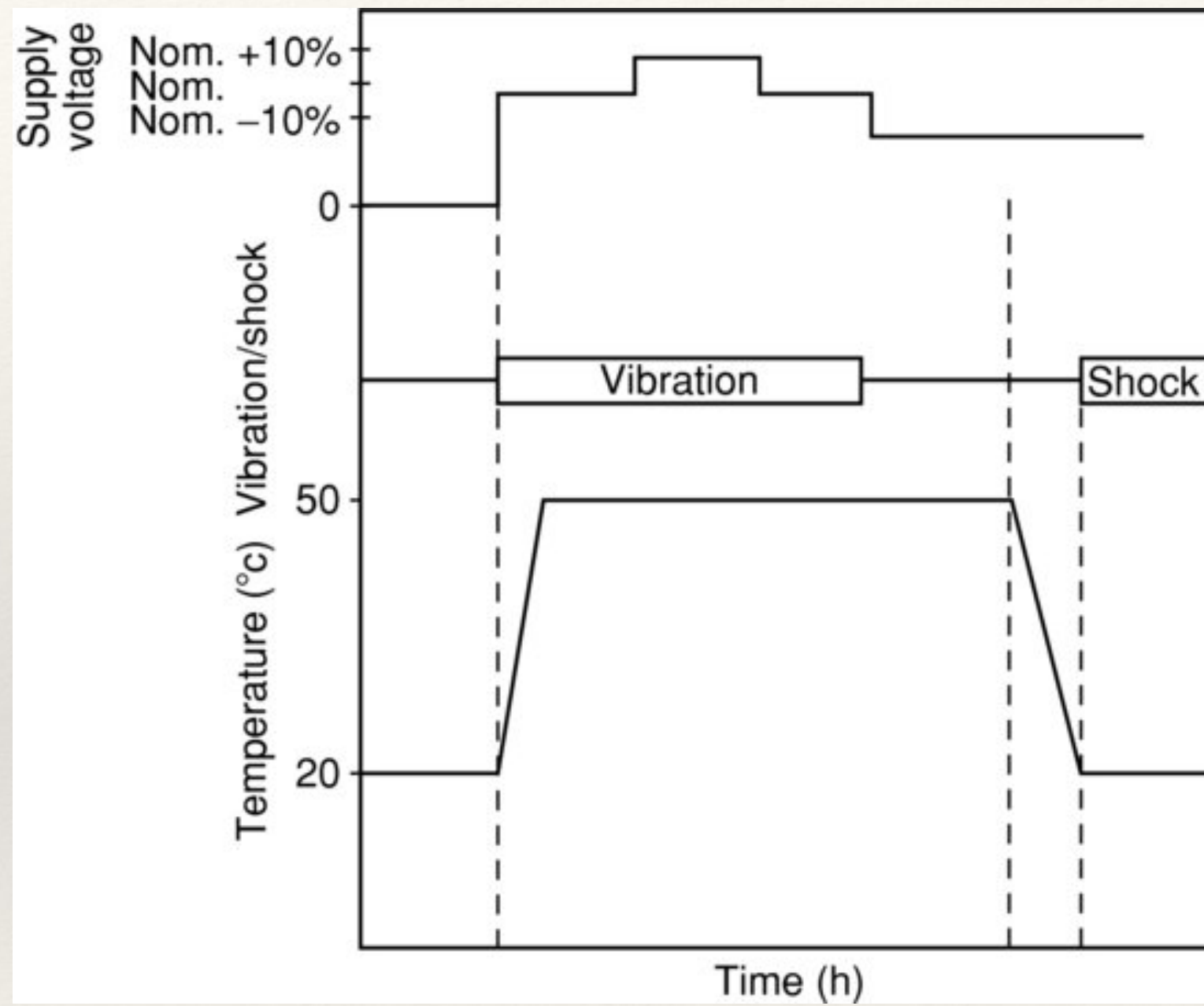


---

# Teste de Ambiente

---

- ❖ O produto deve ser testado nas condições ambientais a que ele pode estar sujeito. Exemplos de fatores que devem ser testados:
  - ❖ Temperatura, vibração, choque mecânico, humidade, potência de entrada e saída, tensão, sujeira, poeira, contaminantes, fungos, gases, poluição, pessoas, etc.
- ❖ Os testes devem garantir que os requisitos de ambiente são atendidos.



---

# Testes de Vibração

---

- ❖ Devem cobrir toda a faixa prevista de frequências e intensidades (ressonâncias).
- ❖ Testes usuais:
  - ❖ *Shake* (ondas senoidas).
  - ❖ Troca de frequências.
  - ❖ Aceleração de pico.



---

# Testes de Temperatura

---

- ❖ Testes usuais:
  - ❖ Temperatura constante: avalia a funcionalidade do sistema em temperaturas muito altas ou muito baixas.
  - ❖ Ciclos de Temperatura e Choque Térmico: avaliam a fadiga do sistema, tendo em conta os coeficientes de expansão térmica.
  - ❖ Oscilam entre temperaturas muito altas e muito baixas.

---

# Testes de Compatibilidade Eletromagnética

---

- ❖ Especialmente relevante em dispositivos eletrônicos.
  - ❖ Perda de dados devido a interferência eletromagnética (EMI).
- ❖ O sistema deve ser submetido a interferências eletromagnéticas e transitórios para confirmar seu bom funcionamento sob essas circunstâncias.
- ❖ Os níveis de EMI e transitórios devem ser escolhidos de forma a cobrir de forma adequada o ambiente de uso.
- ❖ Geralmente são feitos em câmaras anecoicas.







# Testando Confiabilidade e Durabilidade: Testes Acelerados

- ❖ Tem o intuito de garantir que os sistemas são confiáveis e duráveis quando em serviço.
- ❖ Abordagem convencional: a confiabilidade é tratada com uma característica de desempenho funcional, que pode ser medida pelo teste de itens no tempo.
  - ❖  $\text{Tempo de operação} / \text{número de falhas} = \text{estimativa para o tempo médio entre falhas (MTBF)}$ .
- ❖ Abordagem inadequada para garantia da confiabilidade: tenta mostrar o sucesso do uso.

- ❖ Paradigma adequado: *deve-se também testar para causar falhas e não só testar para demonstrar sucesso.*
- ❖ Amostras devem ser testadas até falhas para se inferir sobre as propriedades de resistência e fadiga do sistema.

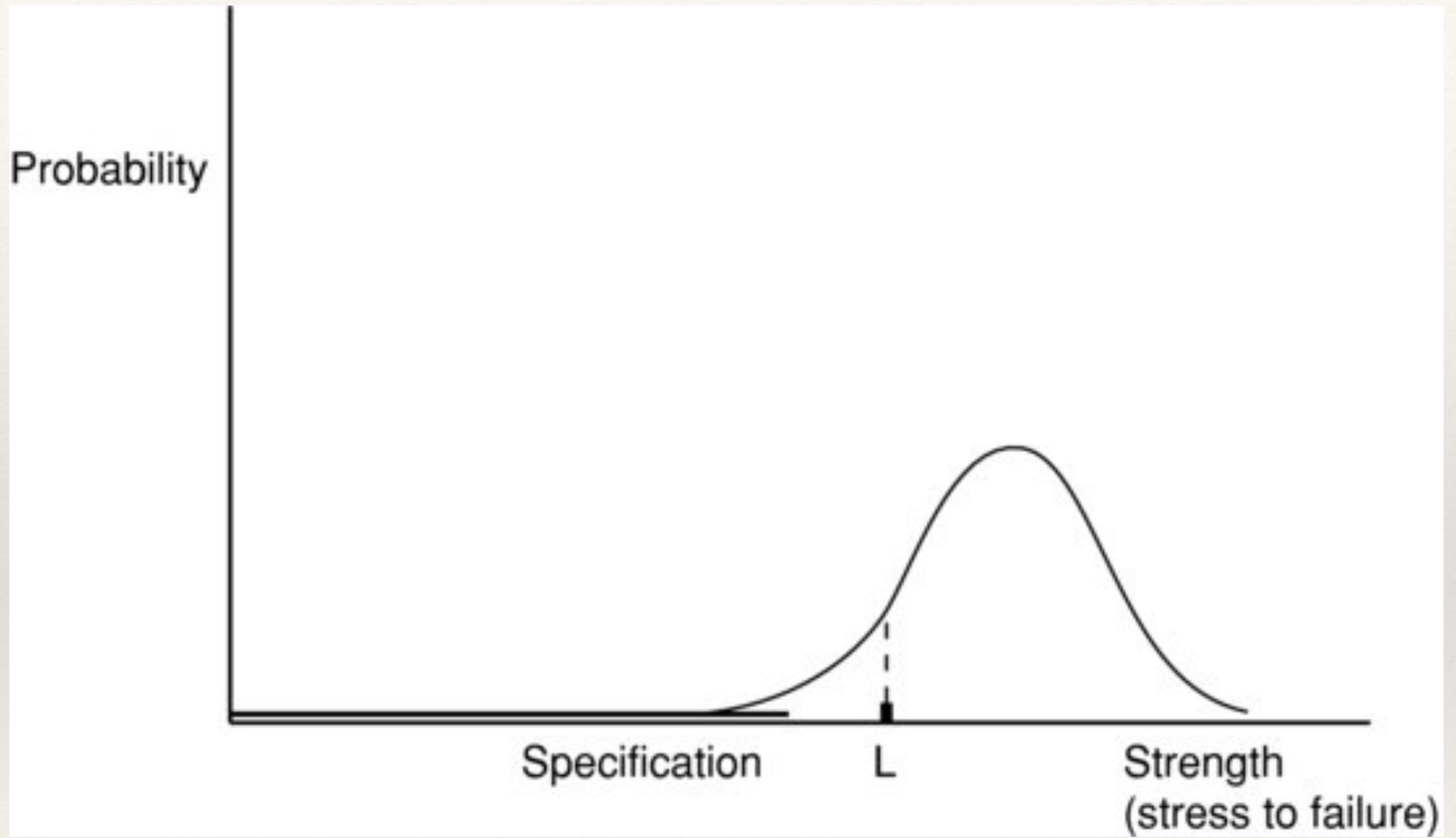


- ❖ Suponha que um sistema que está sendo projetado tem com especificação 40 graus como temperatura máxima de operação:
  - ❖ Em qual temperatura esse sistema deve ser testado?
  - ❖ Uma falha ocorrida a um teste a 42 graus é relevante?
    - ❖ Essa falha poderia ocorrer a 35 graus em outra unidade (variabilidade).
    - ❖ Essa falha poderia ocorrer dentro da faixa de temperatura especificada durante o tempo de garantia (falha dependente do tempo).
    - ❖ Combinações de, por exemplo 35 graus e uma pequena variação na tensão (dentro da especificação) poderiam levar a uma falha.
  - ❖ Falhas ocorridas a 50 ou 60 graus são representativas?
  - ❖ Como definir o limiar em que a falha pode ser ignorada?

- ❖ Essas não são as perguntas corretas!
- ❖ Após a ocorrência de uma falha, deve-se perguntar:
  - ❖ Essa falha pode ocorrer em uso?
  - ❖ É possível prevenir a ocorrência dessa falha em uso?
- ❖ Só faz sentido utilizar altos níveis de estresse caso existam evidências de que é possível aprimorar o projeto.
  - ❖ Aprimorar ou não é uma decisão gerencial:
    - ❖ Depende de custo, retorno, tempo, etc.

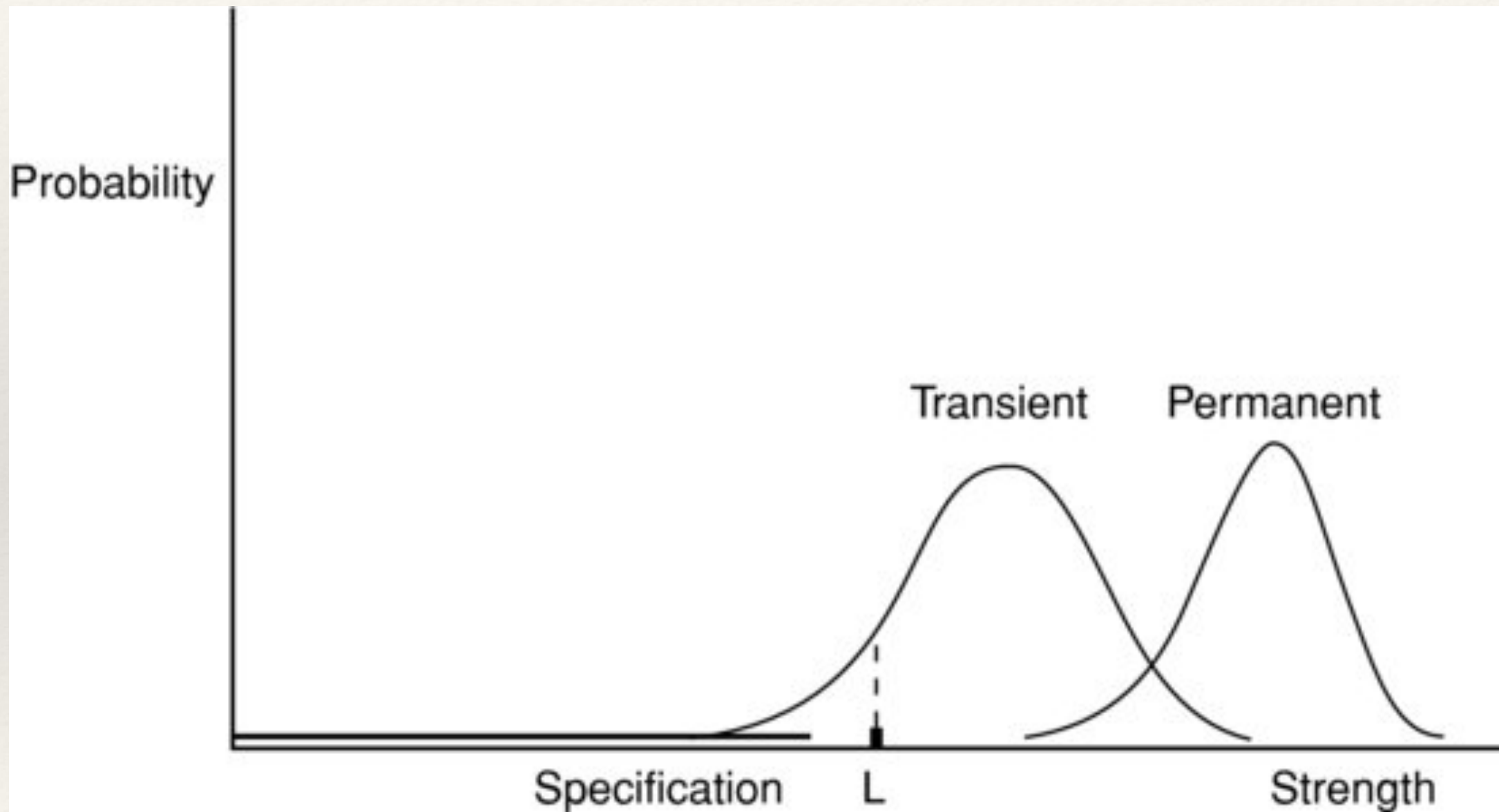


- ❖ Sucessivos testes levam a uma distribuição de falhas tendo em vista o fator de estresse analisado.
- ❖ Geralmente é difícil estimar adequadamente a distribuição nas caudas (melhores e piores items).
- ❖ Melhorias na confiabilidade causam um deslocamento da distribuição.
- ❖ Pode-se substituir grandes amostras por testes mais rígidos.

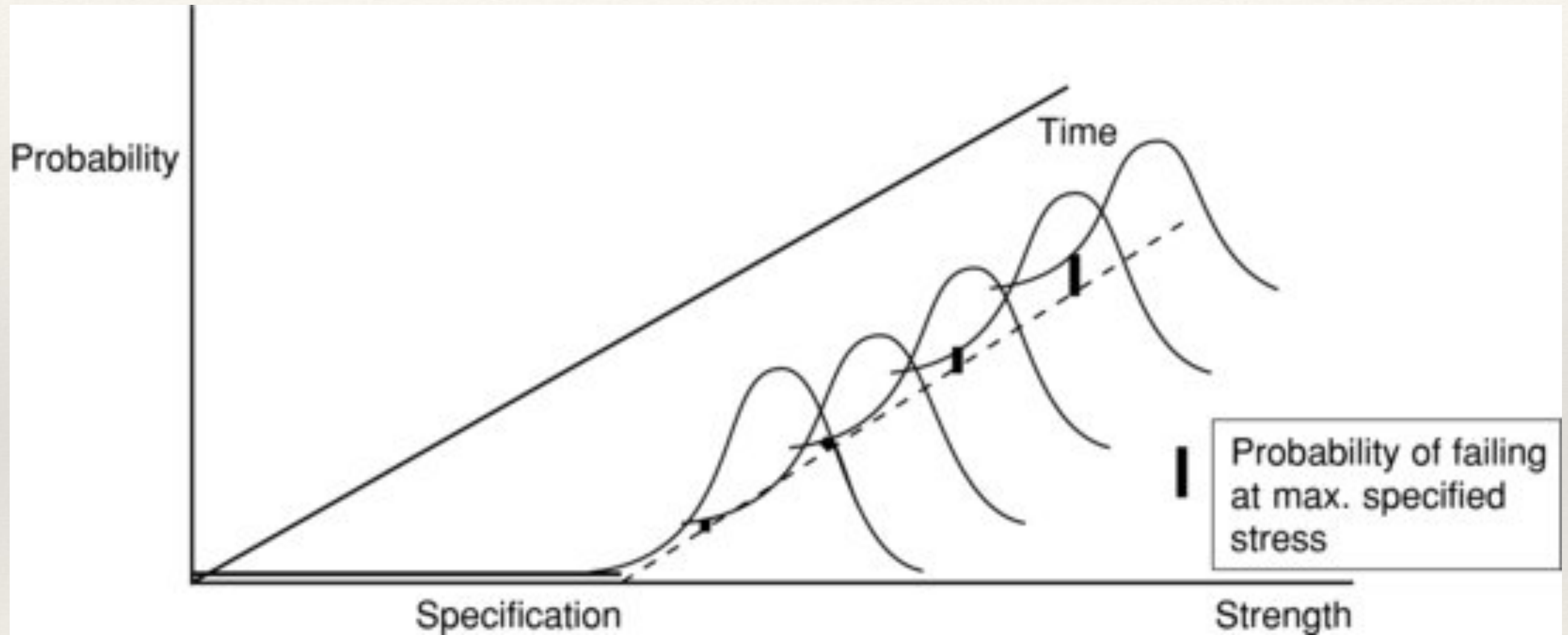




# Falhas transitórias e permanentes



# Estudo de falha por fadiga





- ❖ O objetivo não é estimar com precisão as distribuições, mas melhorar o projeto.
- ❖ Arrastar as distribuições para a direita.
- ❖ Informações sobre as tendências centrais das distribuições e alguma variabilidade no entorno são, em geral, suficientes.

- ❖ Normalmente, as falhas não são oriundas de um único fator de estresse ou carga.
- ❖ Combinações desses fatores geralmente levam às falhas.
- ❖ Princípio básico de Confiabilidade de Projetos: deve-se aumentar os estresses para provocar falhas e usar a informação dessas falhas para aumentar a durabilidade e a confiabilidade do sistema.
- ❖ DESIGN-ANALYZE-VERIFY do ciclo DfR.

- ❖ Razões para se utilizar níveis de estresse “pouco representativos”:
  - ❖ As causas de falha do sistema em uso são muito incertas.
  - ❖ As probabilidades e durações até falha também são muito incertos.
  - ❖ O custo de testes é geralmente muito alto.
  - ❖ Estimar e corrigir falhas durante o desenvolvimento é consideravelmente mais barato que em uso.

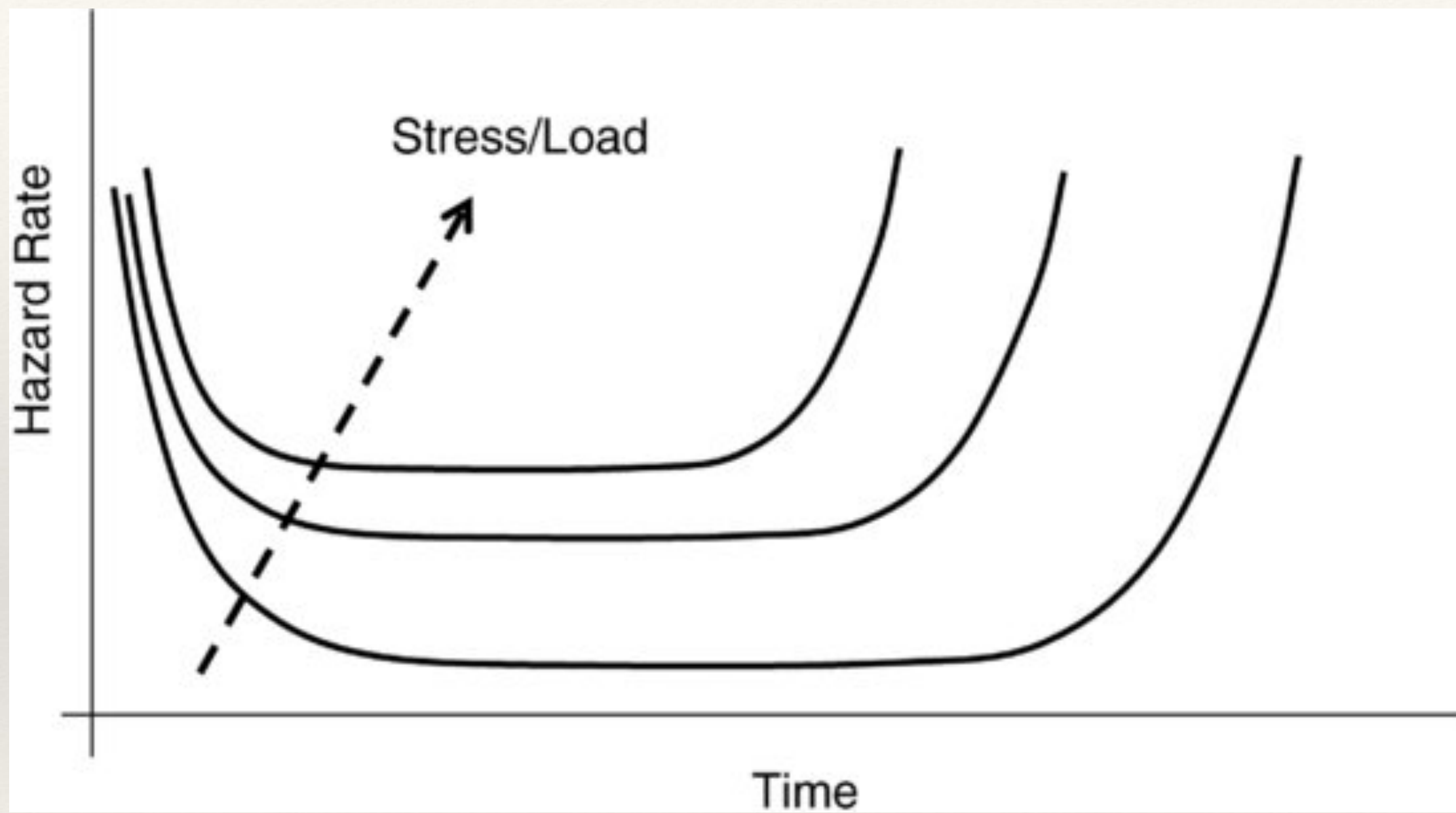


---

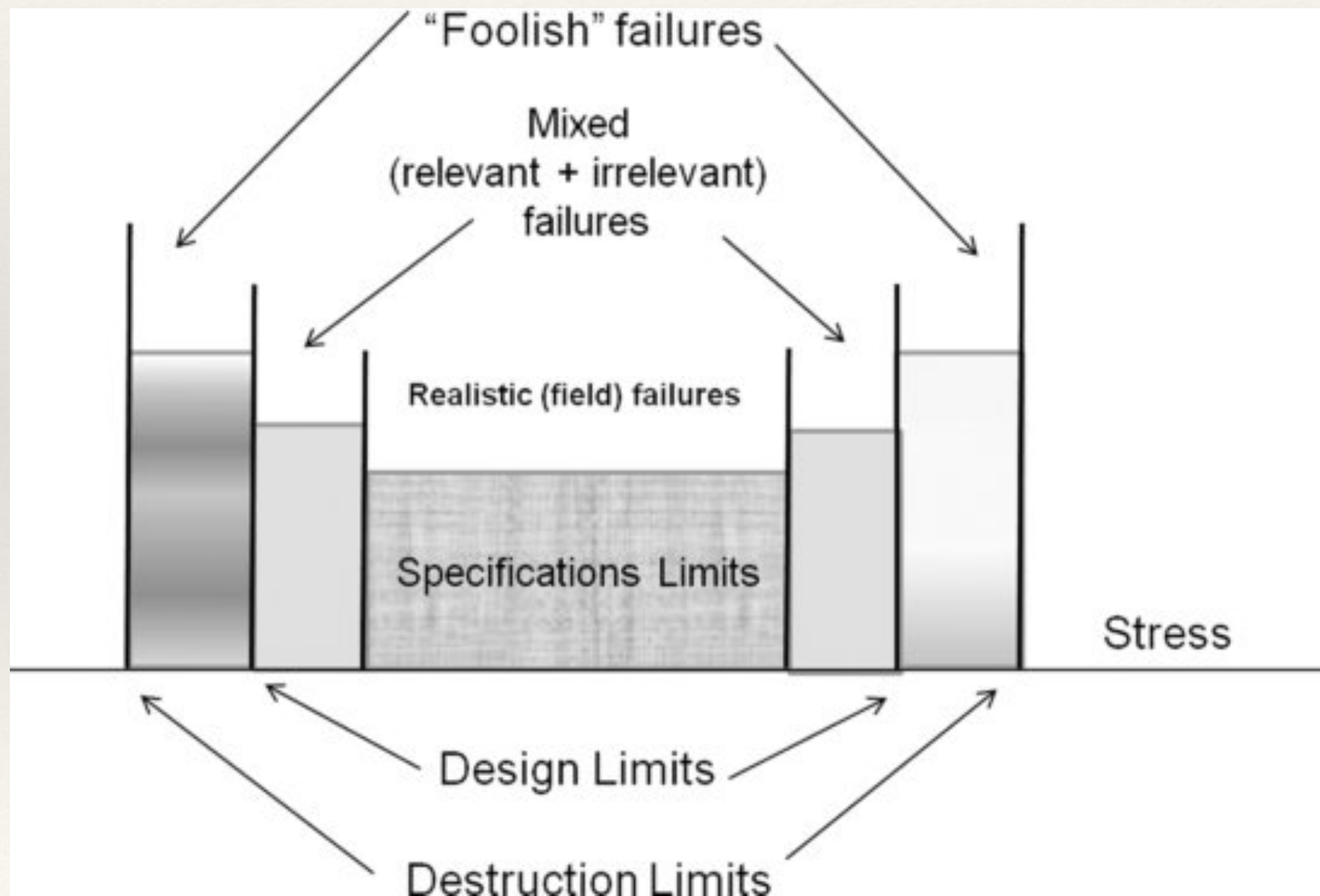
# Testes Acelerados

---

- ❖ Testa-se o produto em níveis de estresse e carga acima dos especificados, acelerando assim a ocorrência de falhas.
- ❖ Reduz o tempo e custo de desenvolvimento.
- ❖ Os elementos de ambiente (temperatura, vibração, humidade, etc) devem ser considerados nos testes acelerados.



- ❖ É fundamental entender os mecanismos potenciais de falhas e os limites de projeto para se desenvolver um bom teste acelerado.





---

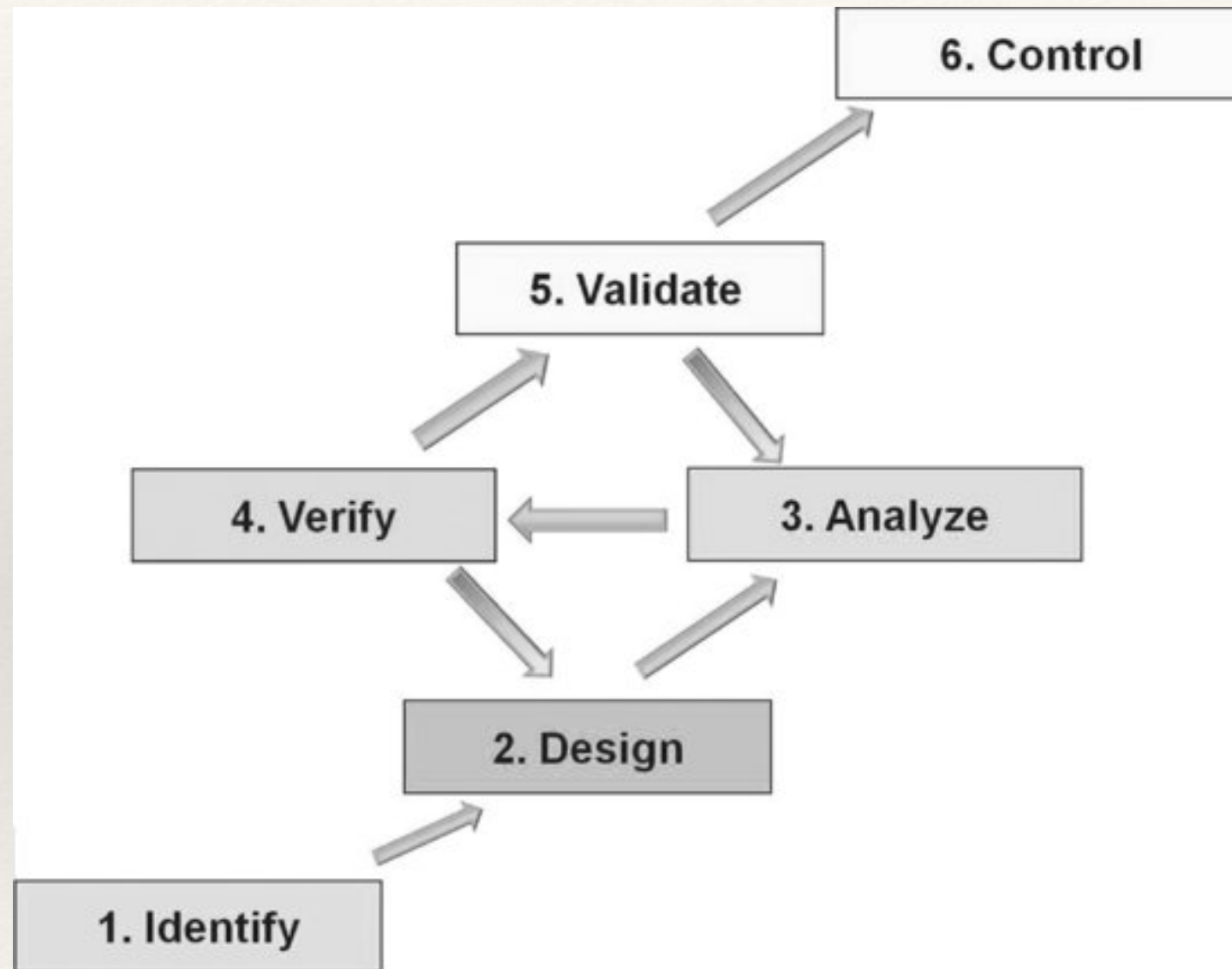
# Abordagem de Teste para Testes Acelerados

---

- (1) Determinar quais falhas podem ocorrer em uso.
- (2) Listar as aplicações e fatores de estresse que podem levar a essas falhas.
- (3) Identificar os fatores de estresse que podem ser incluídos no teste, com maior chance de causar falhas previstas e imprevistas.
- (4) Aplicar um único fator de estresse, próximo do nível máximo de especificação, e aumentar o nível em degraus até a primeira falha.

- (5) Determinar a causa e tomar alguma ação para melhoria do projeto (permanente ou temporária).
- (6) Continuar aumentando o estresse para identificar novas causas de falhas (ou novos níveis para as já conhecidas), e tomar ações como no passo (5).
- (7) Continuar até que todos os modos de falha temporários e permanentes do fator de estresse em questão sejam descobertos e, corrigir em projeto os que são tecnologicamente e economicamente viáveis. Repetir para outros fatores de estresse individuais.
- (8) Decidir quando parar (limite tecnológico, de teste, financeiro, carga, etc).
- (9) Repita o processo utilizando fatores de estresse combinados.

# Planejamento de Testes





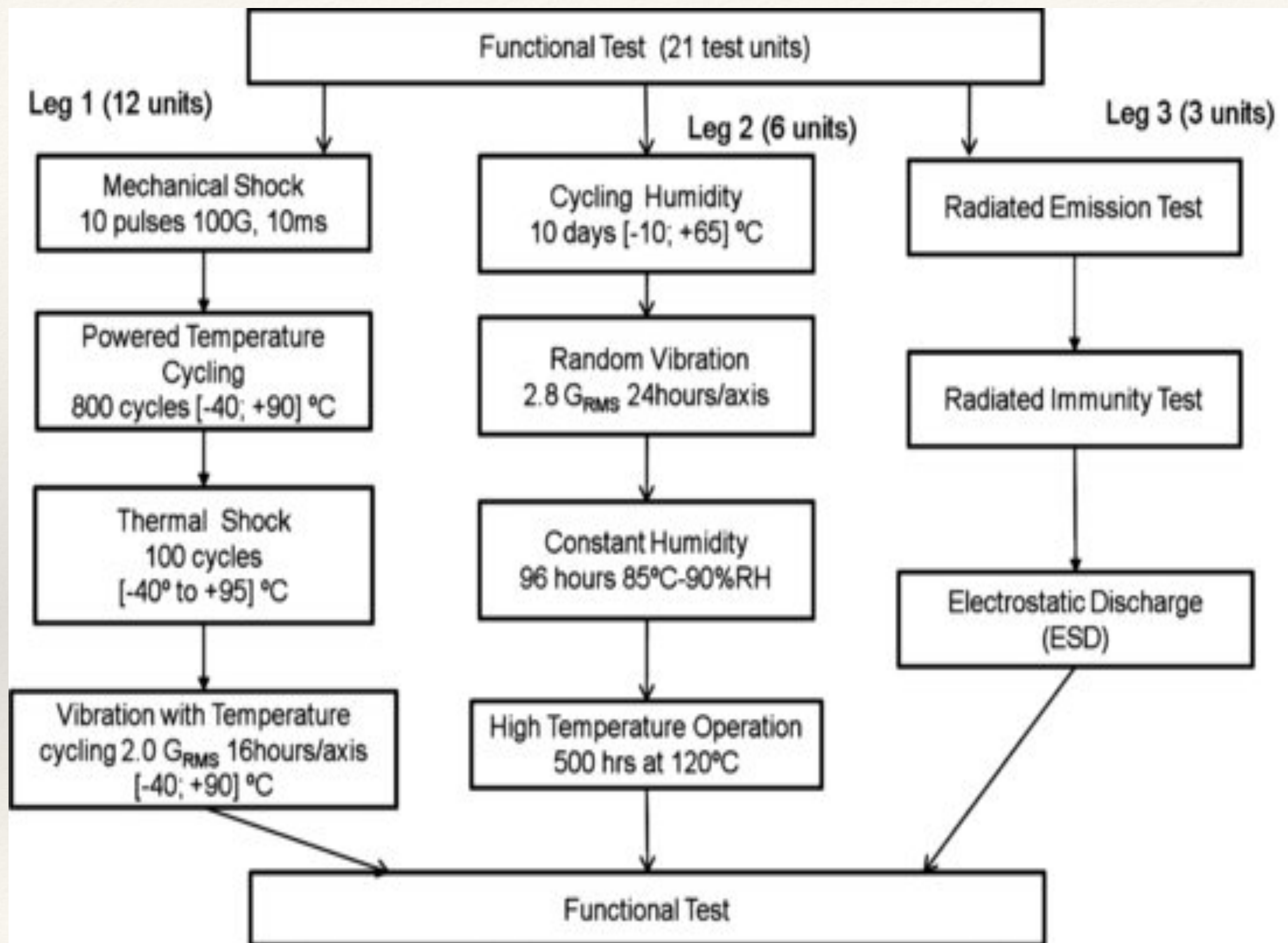
- ❖ Os testes podem começar na etapa de projeto (Design), mas geralmente são mais aplicados nas etapas de verificação (Verify) e validação (Validation).
- ❖ No projeto e verificação, os testes são geralmente aplicados para se avaliar preocupações de projeto ou identificar mecanismos de falha. Geralmente se aplicam a partes menores do sistema.
- ❖ Na validação os testes são feitos geralmente a nível de sistema, com o objetivo de verificar se este está adequado para produção.

- ❖ O planejamento do mecanismo de validação deve levar em conta vários aspectos:
  - ❖ Características de confiabilidade das partes.
  - ❖ Características do ambiente de uso.
  - ❖ Possíveis mecanismos de falha.
  - ❖ Modelos acelerados, etc.
- ❖ Em alguns casos existem normas que estabelecem procedimentos mínimos de teste.



- ❖ Em um cenário ideal, todos os fatores de estresse deveriam ser aplicados simultaneamente às mesmas unidades de teste, em um experimento combinatório.
- ❖ Na prática, os testes geralmente só podem ser feitos de forma sequencial.
- ❖ Testes paralelos:
  - ❖ Reduzem o tempo de teste e desenvolvimento.
  - ❖ Dependem de um rigoroso entendimento das interações entre os mecanismos de falha e os fatores de estresse.
  - ❖ Mecanismos de falha decorrentes de efeitos combinados devem ser testados juntos, enquanto que mecanismos não correlacionados podem ser tratados separadamente.





---

# Eficácia das Ações Corretivas

---

- ❖ Quando uma alteração é feita no projeto com o intuito de corrigir uma causa de falha, é necessário repetir o processo que causou a falha para identificar se a ação corretiva foi efetiva.
- ❖ Ações corretivas podem, eventualmente, não funcionar.
- ❖ A eficácia esperada da ação corretiva deve ser levada em conta durante as análises.

# Analizando os Dados de Confiabilidade



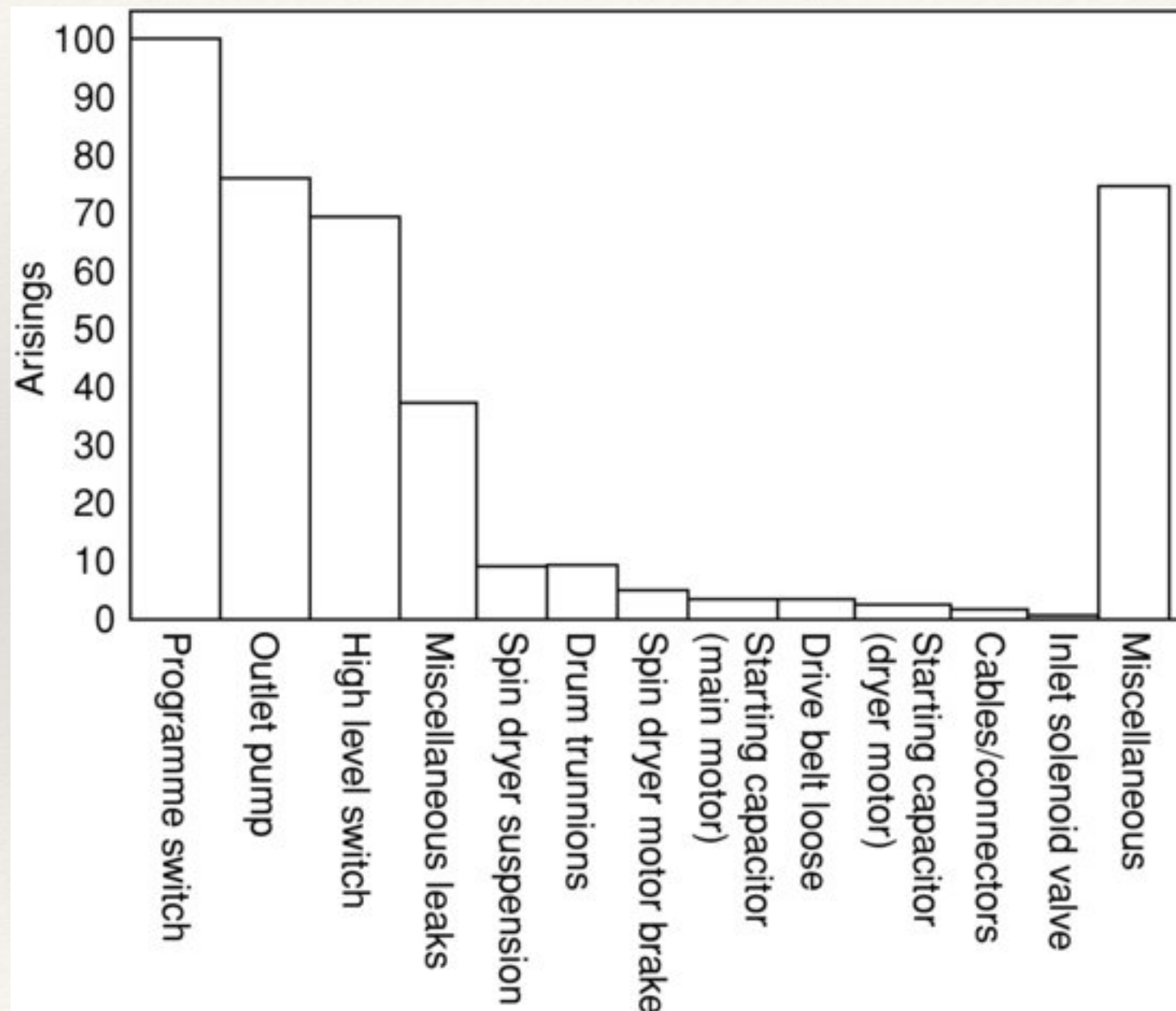
---

# Gráfico de Pareto

---

- ❖ *A maior parte das faltas é decorrente de um número pequeno de causas.*
- ❖ Uma análise dos dados de falha pode ajudar a resolver a maior parte das faltas com o uso racional dos recursos disponíveis.

Exemplo: dados de falha em relatórios de garantia de uma máquina de lavagem doméstica.



- ❖ **Program switch:** 77 falhas devido à circuito aberto na armadura do motor do timer; 10 falhas por problema de enrolamento do motor do timer; 10 outras falhas. Taxa de risco decrescente durante o período de garantia.
- ❖ **Outlet pump:** 79 falhas devido a vazamentos na blindagem, que permitiram água nas bobinas; 21 outras falhas. Taxa de risco crescente.
- ❖ **High level switch:** 58 falhas nos pontos de solda, causando curto circuito; 10 outras falhas. Taxa de risco decrescente.



- ❖ Ações corretivas:
  - ❖ **Timer Motor e High Level Switch:** problemas construtivos.
  - ❖ **Outlet pump:** problema de adequação ou uso.
- ❖ Supondo que ações corretivas sejam tomadas nesses três fatores e que essas ações sejam 80% efetivas, o número de chamadas de garantia iria reduzir em 40%.

---

# Análise de Dados de Testes Acelerados

---

$$Life = A \cdot \epsilon^{-X(Stress)}$$

$$Life = A \cdot Stress^{-X}$$

- ❖ A: constante empírica.
- ❖ X: constante / função que relaciona nível de estresse e tempo.

---

# Fator de Aceleração

---

- ❖ Razão entre o tempo de vida do sistema em condição de campo e em condição de teste (acelerado).

$$AF = \frac{L_{field}}{L_{Test}}$$



$$t_{field} = t_{test} \cdot AF$$

$$R_{field}(t) = R_{test}(t/AF)$$

$$h_{field}(t) = \frac{1}{AF} h_{test}(t/AF)$$

---

# Modelos de Aceleração

---

- ❖ Temperatura:
- ❖ Modelo de Arrhenius

$$AF = \exp \left[ \frac{E_A}{k} \left( \frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]$$

- EA: energia de ativação do processo.
- k: constante de Boltzmann.
- $T_{field}$  e  $T_{test}$ : temperaturas absolutas (em K).

❖ Temperatura:

❖ Modelo de Temperatura-Humidade de Peck:

$$AF = \left( \frac{RH_{test}}{RH_{field}} \right)^m \exp \left[ \frac{E_A}{k} \left( \frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]$$

- m: constante de potência de humidade.
- RH: humidade relativa.



- ❖ Tensão:
- ❖ Modelo exponencial:

$$AF = \exp [B(V_{test} - V_{field})]$$

- B: parâmetro de aceleração de tensão.

❖ Vibração:

❖ Vibração Senoidal:

$$AF = \left( \frac{G_{RMS \text{ test}}}{G_{RMS \text{ field}}} \right)^b$$

❖ Vibração Aleatória:

$$AF = \left( \frac{G_{peak-test}}{G_{peak-field}} \right)^b$$



b: expoente de fadiga.

---

# Análise Estatística de Dados de Testes Acelerados

---

- ❖ As conclusões obtidas com os modelos “prontos” são baseados em sistemas genéricos.
- ❖ Os dados observados em testes podem ser utilizados para ajustar distribuições de probabilidade para o tempo até falha em testes acelerados.
- ❖ Geralmente softwares são utilizados para ajustar estes modelos:
  - ❖ Ex.: ReliaSoft ALTA e WinSMITH.



