

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

Ensaio Acelerados : Uma nova metodologia.

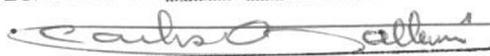
Número de Publicação FEM : 020/94

por Carlos Alberto do Prado [Guido] ^{1/94}
Orientado pelo Prof. Dr. Carlos Amadeu [Pallerosi] t

Trabalho apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 15 de junho de 1994.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Carlos A. do
Prado Guido E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 15 / 06 / 94.



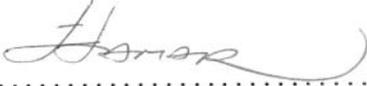
ORIENTADOR

UNICAMP*
BIBLIOTECA CENTRAL

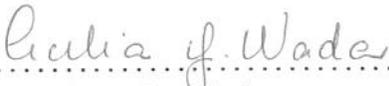
Tese defendida e aprovada, em 15 de junho de 1994, pela banca examinadora constituída pelos professores:



.....
Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi - Orientador



.....
Prof. Dr. Itamar Ferreira



.....
Prof. Dra. Cicilia Yuko Wada

aos meus pais.

Agradecimentos

Ao Prof. Carlos Amadeu Pallerosi pelo apoio, orientação e estímulo. Principalmente na confiança e amizade em mim depositadas.

Aos meus pais e toda a minha família pelo apoio e pela motivação ao longo destes anos.

À minha namorada, Érica Cristiane Groff, pelo apoio, estímulo, paciência e compreensão.

Ao amigo Waldemar Scudeller Junior, pelo apoio, amizade e ajuda na organização da parte gráfica deste trabalho.

Aos amigos Luiz Eduardo Roncato Cordeiro, Marcelo de Almeida Pierossi, Mauro Jorge Atalla e Delvonei Alves de Andrade pelo estímulo apoio e amizade.

À COPESP, em especial a Marcio Pinheiro de Abreu e Edval de Lourenço Silva, pela amizade, compreensão e apoio durante este trabalho.

Aos amigos Edson Ribeiro e Vanderlei Guimarães pelo apoio e auxílio nos gráficos deste trabalho.

Ao CnPQ pelo apoio financeiro no início do trabalho.

A todos do Departamento de Projeto Mecânico, pela ajuda e pela infra-estrutura.

Resumo

Proposta de uma nova metodologia para Ensaaios Acelerados baseado na distribuição de *Weibull*. Desenvolvimento de uma Função Acelerante geral mais precisa que os procedimentos em uso. Através de particularizações desta Função Acelerante geral, obtem-se os modelos teóricos dos procedimentos de cálculo em uso, juntamente com a unificação dos três tipos de Funções Acelerantes. Geração de um programa Computacional, ATP (Accelerated Testing Program), para determinação das constantes da Função Acelerante geral e para comparação dos resultados com os obtidos por outros métodos. Através dessas comparações concluiu-se que a metodologia utilizada melhora a precisão dos resultados, além de se mostrar mais prática.

Abstract

Accelerated Testing

This work proposes a new methodology for Accelerated Testing based on the Weibull distribution. The development of a general Accelerating Function that has more accuracy than the procedures actually in use. Particular cases of this Accelerating Function give us the theoretical model of some methods. A generation of a computer program, called ATP, calculate the Accelerating Function and compare the results with other methods. The results show us an improvement in the accuracy.

Terminologia

- $F(x)$: Função Probabilidade de Falha para Ensaio Normal;
 $F^*(x)$: Função Probabilidade de Falha para Ensaio Acelerado;
 $f(x)$: Função Densidade de Probabilidade de Falhas para Ensaio Normal;
 $f^*(x)$: Função Densidade de Probabilidade de Falhas para Ensaio Acelerado;
 $\lambda(x)$: Função Taxa de Falha Instantânea para Ensaio Normal
 $\lambda(x)^*$: Função Taxa de Falha Instantânea para Ensaio Acelerado;
 λ_o : Taxa de Falha Característica para Ensaio Normal;
 λ_o^* : Taxa de Falha Característica para Ensaio Acelerado;
 $h(x)$: Função Acelerante que relaciona o Ensaio Normal e o Ensaio Acelerado;
 K : Constante de Correlação da Função Acelerante;
 n : Expoente de Forma da Função Acelerante;
 γ : Vida Inicial na Equação de Weibull para Ensaio Normal;
 γ^* : Vida Inicial na Equação de Weibull para Ensaio Acelerado;
 α : Vida Característica na Equação de Weibull para Ensaio Normal;
 α^* : Vida Característica na Equação de Weibull para Ensaio Acelerado;
 β : Parâmetro de Forma na Equação de Weibull para Ensaio Normal;
 β^* : Parâmetro de Forma na Equação de Weibull para Ensaio Acelerado;
 x : Variável genérica para Ensaio Normal;
 x^* : Variável genérica para Ensaio Acelerado;
 a : Relação entre as Vidas Características do Ensaio Normal e o Ensaio Acelerado;
 A_f : Fator de Aceleração;
 A : Constante de Posição para a Equação de Arrhenius;
 B : Constante de Proporcionalidade para a Equação de Arrhenius;
 n : Tamanho da amostra;
 r : Quantidade de Falhas;
 C : Nível de Confiança;
 R : Confiabilidade ;
 k : Quantidade de Sucessos;
 X, Y : Sistema de coordenadas usado para se obter o Fator de Forma e a Taxa de Falha Característica do Ensaio;
 C_a : Coeficiente Angular de Reta no Sistema de Coordenadas XY;
 C_l : Coeficiente Linear de Reta no Sistema de Coordenadas XY;

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	i
Abstract	iii
Terminologia	iv
1 Introdução	1
1.1 Conceitos básicos	1
1.2 Definição das condições de ensaio	1
1.3 Principais tipos de Degradação	2
1.3.1 Fadiga	2
1.3.2 Fluência	3
1.3.3 Trincamento	4
1.3.4 Desgaste	5
1.3.5 Corrosão	5
1.4 Técnicas de aceleração	7
1.5 Tipos de Testes	8
1.5.1 Teste do “Elefante”	8
1.5.2 Teste por Degradação Ambiental Combinada	9
1.5.3 Teste por Degradação Ambiental Simples	9
1.5.4 Queima Inicial (<i>Burn-in</i>)	9
1.5.5 Morte Súbita	9
1.5.6 Método do Sucesso	10
2 Equação Geral da Função Acelerante	11
2.1 Equações básicas das probabilidades de falhas	11
2.2 Função Acelerante	12
2.3 Influência dos Parâmetros de Aceleração	15
2.3.1 Expoente de forma (n)	15
2.3.2 Coeficiente de Correlação (K)	15
2.4 Limite de Validade	15
2.5 Função Acelerante na Variável (x)	17

2.6	Função Acelerante para Equação de Arrhenius	20
2.7	Conclusão	21
3	Ensaio com Predominância de Falhas	22
3.1	Método da Categoria Mediana	22
3.1.1	Conceituação Básica	22
3.1.2	Natureza dos Dados	22
3.1.3	Ensaio Completo	23
3.1.4	Ensaio Incompleto Unicensurado, à Direita	24
3.1.5	Ensaio Incompleto, com Censura Múltipla	24
3.2	Teste da Morte Súbita	25
3.2.1	Conceituação Básica	25
3.2.2	Metodologia de Cálculo	25
4	Ensaio com Predominância de Suspensões	27
4.1	Método do Sucesso	27
4.1.1	Conceitos Básicos	27
4.1.2	Influência da Quantidade de Falhas na Confiabilidade	29
4.1.3	Influência da Quantidade de Falhas no Tamanho da Amostra	34
4.1.4	Influência da Amostra na Confiabilidade	36
4.1.5	Relação entre a Duração dos Testes e Amostras	36
5	Programa Computacional ATP	38
5.1	Objetivo do Programa	38
5.2	Estrutura do Programa	38
5.2.1	Principal	39
5.2.2	Módulo Ensaio Acelerado x Ensaio Normal	39
5.2.3	Morte Súbita	43
5.2.4	Método do Sucesso	45
5.2.5	Equação de Arrhenius	45
6	Estudo de Casos	46
6.1	Predominância de Falhas	46
6.1.1	Ensaio Completo	46
6.1.2	Ensaio Incompleto, Unicensurado à Direita	48
6.1.3	Ensaio Incompleto, com Censura Múltipla	50
6.1.4	Ensaio utilizando-se a Equação de Arrhenius	52
6.1.5	Ensaio de Morte-Súbita	52
6.2	Predominância de Suspensões	55
6.2.1	Método do Sucesso	55
6.2.2	Cálculo da Confiabilidade Mínima de uma Amostra	55
6.2.3	Cálculo do Tamanho Mínimo da Amostra	55
7	Conclusão	59

Lista de Figuras

1.1	Influência da quantidade de flexões na Probabilidade Acumulada de Falha (Desconfiabilidade), em um ensaio de aço Maraging, por flexão rotativa, em cinco diferente níveis de tensão [6].	3
1.2	Influência da carga (tensão) na vida (tempo até falha por fluência), para diferentes valores da temperatura, em um aço liga tipo <i>Nimonic</i> [6]	4
1.3	Influência da quantidade de flexões no surgimento de trincas em chapas de aço com médio carbono [6].	5
1.4	Influência da temperatura na Probabilidade de Falha, em função da duração do teste, para uma união por cola condutora, em um circuito elétrico [6].	6
2.1	Gráfico de <i>Weibull</i> para Ensaio Normais e Acelerados.	13
2.2	Influência do Expoente de Forma (n) na inclinação das retas correspondentes aos Ensaio Normais e Acelerados.	16
2.3	Limite de validade da aceleração para $n > 0$	17
2.4	Limite de validade da aceleração para $n < 0$	18
2.5	Limite de validade da aceleração para $n = 0$	18
2.6	Aceleração na variável com diferentes Parâmetros de forma.	19
2.7	Aceleração na variável, com Parâmetros de Forma Iguais.	20
3.1	Conjunto de dados Completos e Incompletos.	23
3.2	Conjunto de dados Unicensurados e por Censura Múltipla.	24
3.3	Probabilidade de Falha e Densidade de Probabilidade de Falha no Teste de Morte-Súbita	26
4.1	Influência da quantidade de falhas (r) e do Nível de Confiança (C) no valor da Confiabilidade (R).	28
4.2	Gráfico da Variação da Confiabilidade em função da amostra e da quantidade de falhas, para o Nível de Confiança 90 %.	30
4.3	Gráfico da Variação da Confiabilidade em função da amostra e da quantidade de falhas, para o Nível de Confiança 60 %.	31
4.4	Variação da Confiabilidade em função do Nível de Confiança e da quantidade de falhas, para amostras com $n=100$ componentes	32
4.5	Influência da quantidade de falhas no valor da Confiabilidade, em função da quantidade de amostras para um nível de Confiança de 90 %.	35

5.1	Fluxograma básico do Programa ATP	39
5.2	Menu de Seleção da Rotina Principal	40
5.3	Fluxograma da rotina Ensaio Normal x Ensaio Acelerado	41
5.4	Fluxograma da rotina Morte-súbita	44
5.5	Fluxograma da rotina Método do Sucesso	44
5.6	Fluxograma da rotina Equação de Arrhenius	45
6.1	Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP, para um Ensaio Completo	47
6.2	Gráfico do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado	48
6.3	Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP	49
6.4	Gráfico do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado	50
6.5	Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP	51
6.6	Gráfico do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado	52
6.7	Dados dos Ensaios	53
6.8	Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP	54
6.9	Gráfico da Curva Normal e da Curva de Morte-Súbita	55
6.10	Telas do Programa ATP para o Método do Sucesso	57
6.11	Telas do Programa ATP para o Método do Sucesso	58

Lista de Tabelas

1.1	Dias para falhas nas unidades testadas	6
6.1	Tabela das Falhas no Ensaio Acelerado	46
6.2	Tabela das Falhas do Ensaio Acelerado	48
6.3	Tabela das Falhas do Ensaio Acelerado	50
6.4	Tabela das Suspensões do Ensaio Acelerado	50
6.5	Tabela com dados dos Ensaios	52
6.6	Tabela das Falhas nos Grupos	56

Capítulo 1

Introdução

1.1 Conceitos básicos

Os “Ensaio Acelerados” correspondem a experimentos ou testes onde amostras de Componentes ou Sistemas são submetidos a condições de funcionamento superiores às normais (em uso), visando o surgimento mais rápido de falhas. Conseqüentemente, eles permitem uma avaliação mais econômica da Confiabilidade (ou Desconfiabilidade), por uma significativa redução dos tempos de duração dos ensaios e dos custos de execução. O objetivo maior é determinar com suficiente precisão o fator de aceleração no tempo de duração do processo de degradação que induz a falhas, ou do fator de desaceleração das Taxas de falha, correspondentes às relações entre os ensaios acelerados e os normais. As metodologias utilizadas nos ensaios acelerados devem permitir um julgamento comparativo entre os diferentes produtos ou de um mesmo produto em fase de projeto (protótipo) e desenvolvimento.

1.2 Definição das condições de ensaio

Devem ser consideradas quatro etapas:

I - Procura dos pontos sensíveis ao envelhecimento ou às degradações (físicas e químicas).

Esta etapa é referida a duas condições básicas, uma complementar à outra:

- experiências acumuladas em produtos similares;
- análise quantitativa detalhada dos modos e dos mecanismos de falhas.

II - Definição dos processos de degradação

Delineados os pontos sensíveis, deve-se procurar os processos de degradação envolvidos, como por exemplo, desgaste, fadiga, corrosão, etc.

III - Procura da Lei de degradação

Definido e conhecido o processo básico de degradação, deve-se estabelecer o modelo matemático mais aplicável para a velocidade de evolução do fenômeno de degradação, que acelerem as falhas em função dos esforços aplicados.

IV - Determinação da Lei de Aceleração (ou Desaceleração)

A “Lei de degradação” nem sempre pode ser diretamente transformada em “Lei de Aceleração” pois ela depende essencialmente das possibilidades de simulação nos ensaios, que dificilmente podem reproduzir o modelo real dos esforços ou ações físico-químicas aplicadas. É necessário realizar uma escolha dos parâmetros mais representativos e aplicar uma aceleração que corresponda, ao melhor possível, à “Lei de degradação”.

Em todos os casos deve-se assegurar que os esforços de aceleração impostos ao material não induzam fenômenos parasitas capazes de modificar os mecanismos naturais de falhas existentes na condição de uso normal.

1.3 Principais tipos de Degradação

No projeto ou avaliação de um “Ensaio Acelerado”, é importante a análise do tipo de degradação presente nas amostras, pois o ensaio deve causar o mesmo tipo de falha presente em uso normal do equipamento.

Os principais tipos de degradação são :

- Fadiga;
- Fluência;
- Trincamento;
- Desgaste;
- Corrosão;

que serão apresentados a seguir, de modo resumido. Não é objetivo deste trabalho a análise aprofundada dos diferentes tipos de degradação.

1.3.1 Fadiga

Os materiais usualmente falham por *fadiga* se estão sujeitos a repetidas solicitações cíclicas (carregamentos e descarregamentos), inclusive vibrações. Os materiais mais estudados são os metais, plásticos, cerâmicas e outros materiais estruturais e mecânicos. A fadiga é o mais importante mecanismo de falha de peças mecânicas, (por exemplo eixos, mancais, etc), e mesmo componentes elétricos (contatores, relés, etc). O principal fator de aceleração é a carga, mas a temperatura e agentes químicos (água, hidrogênio, oxigênio, etc) podem também atuar neste sentido.

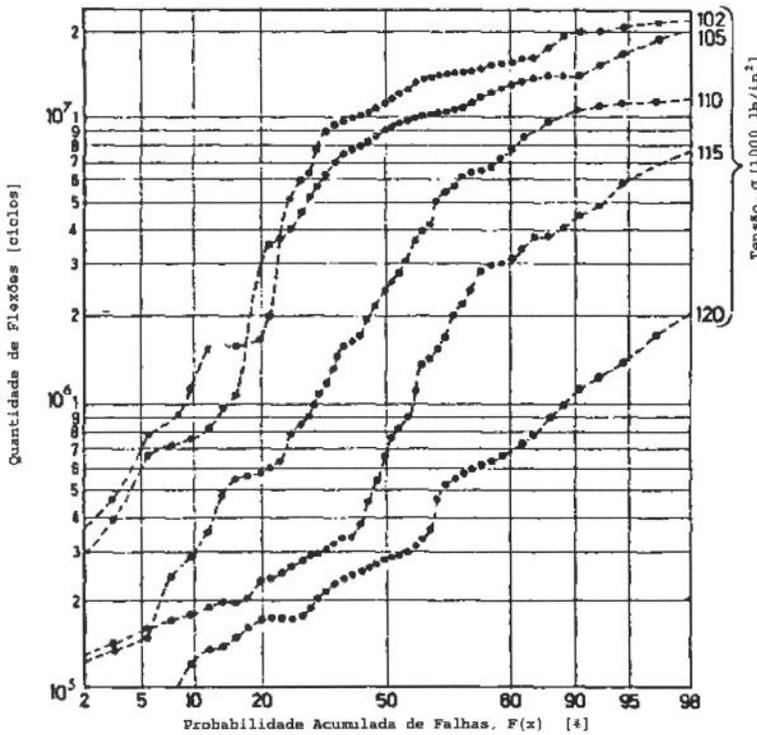


Figura 1.1: Influência da quantidade de flexões na Probabilidade Acumulada de Falha (Desconfiabilidade), em um ensaio de aço Maraging, por flexão rotativa, em cinco diferentes níveis de tensão [6].

Na Figura 1.1 é apresentada uma variação típica da Probabilidade Acumulada de Falhas $F(x)$ (ver Capítulo 2) por fadiga, devido a flexão rotativa. Verifica-se que um aumento de tensão (tração, compressão), para um dado valor de $F(x)$, causa uma redução da quantidade de ciclos (flexões). Conseqüentemente, se o teste for conduzido a níveis maiores de tensão, por exemplo, $\sigma = 120.000 \text{ lb/in}^2$, conhecendo-se a função acelerante em relação à variação para $\sigma = 102.000 \text{ lb/in}^2$, pode-se fazer uma boa previsão do comportamento do material em um nível mais baixo de tensão, com uma significativa redução no tempo e custo do teste.

Referências úteis para o assunto são: ASTM ([3], [4] e [5]), Frieman [9], Skelton [28], Graham [12], Tustin [30] e Waine [22].

1.3.2 Fluência

A Fluência (*creep*) é uma lenta, progressiva e permanente deformação plástica de materiais submetidos a um carregamento mecânico praticamente constante, que pode causar problemas no funcionamento do produto ou mesmo a sua ruptura. Os principais fatores deste mecanismo de falha são: temperatura, carregamento mecânico, carregamento cíclico e ataque químico. Na Figura 1.2 é mostrada a influência do nível de tensão de tração

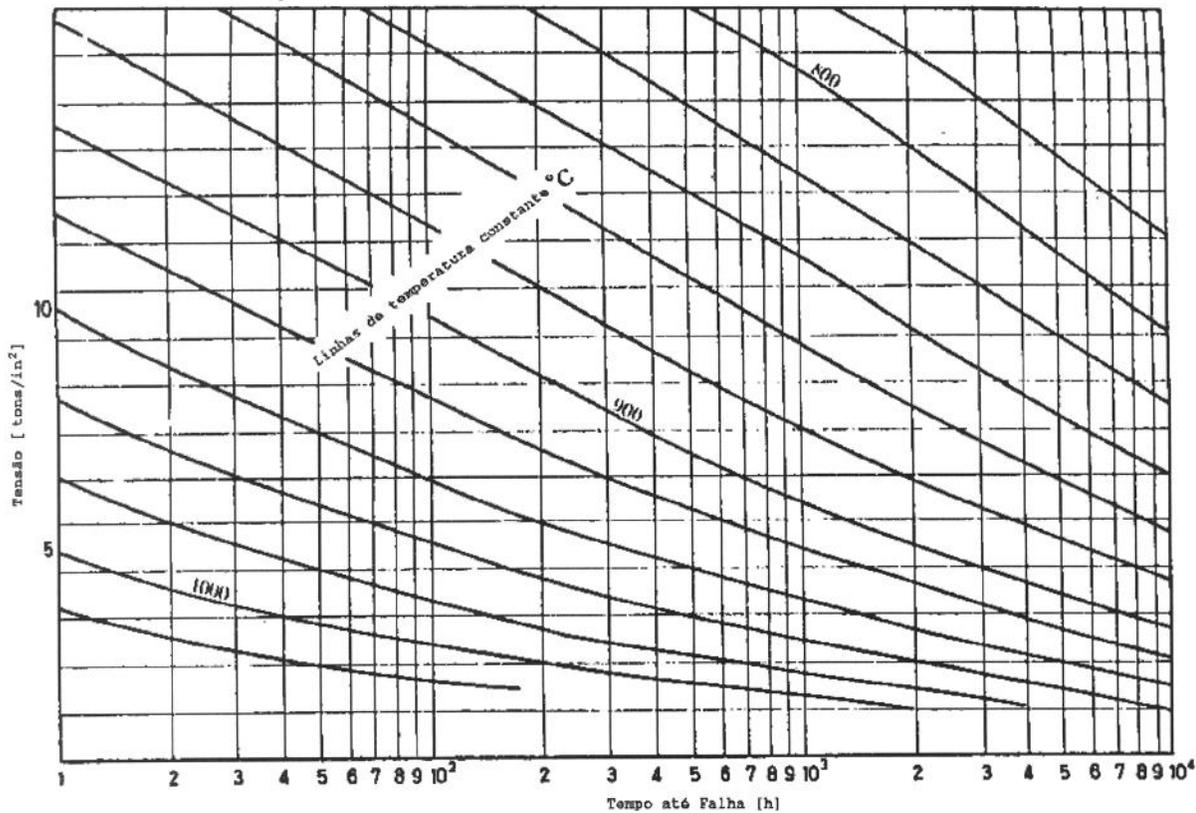


Figura 1.2: Influência da carga (tensão) na vida (tempo até falha por fluência), para diferentes valores da temperatura, em um aço liga tipo *Nimonic* [6].

e da temperatura no tempo até falha, onde um aumento dos correspondentes valores reduz a vida prevista (tempo até falha) [6].

Referências úteis para o assunto são: Goldhoff ([11] e [10]), Hahn [13], Skelton [28] e Waine [22].

1.3.3 Trincamento

Os metais, alguns plásticos, vidros, materiais cerâmicos e muitos outros apresentam trincamento (*cracking*). Os principais estudos das trincas e da sua propagação nos materiais indicam que os fatores mais significantes da aceleração deste mecanismo de falha correspondem ao carregamento (cíclico ou variável, à temperatura e ao ataque por agentes químicos.

O desenvolvimento de trincas é apresentado na Figura 1.3 onde nota-se que o aumento da quantidade de flexões aumenta o tamanho das trincas, com uma dada correlação [6].

Referência útil para o assunto é Bompas-Smith [6].

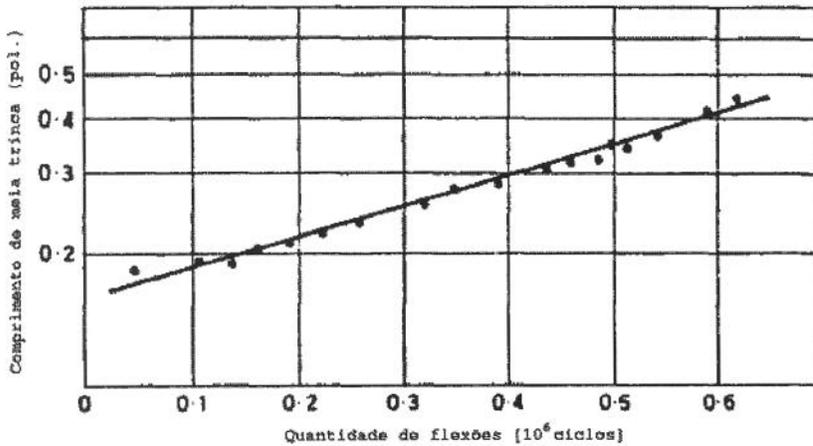


Figura 1.3: Influência da quantidade de flexões no surgimento de trincas em chapas de aço com médio carbono [6].

1.3.4 Desgaste

Em aplicações industriais, muitos materiais estão sujeitos à fricção (atrito), o que causa remoção de material, como por exemplo, correias de borracha, engrenagens, mancais, etc. Os principais fatores de aceleração do desgaste são: velocidade relativa, carregamento (magnitude e tipo), temperatura, lubrificação e ataques químicos.

Referências úteis para o assunto são: Rabinowitz [24], Peterson [23], DePaul [8], Boothroyd [7] e Waine [22].

1.3.5 Corrosão

A maioria dos metais, alimentos e alguns produtos farmacêuticos, se deterioram por reações químicas com o oxigênio (oxidação ou redução), fluor, cloro, ácidos, bases, sais, peróxido de hidrogênio e água. Os fatores de aceleração da corrosão incluem a concentração dos produtos químicos, catalisadores, temperatura, voltagem e carregamento (*stress-corrosion*).

Na Figura 1.4 tem-se uma variação típica da Probabilidade de Falha $F(x)$ em componentes eletrônicos unidos por cola condutora, que sofre degradação (oxidação) com o tempo e a temperatura ambiente [6]. Na tabela 1.1 tem-se os correspondentes valores experimentais que serão utilizados nos *estudos de casos* apresentados no Capítulo 6.

Um caso particular de corrosão corresponde aos agentes atmosféricos, em materiais de uso externo. Estes materiais incluem metais, revestimentos protetores (pintura e anodização), plásticos e borrachas. Os principais fatores de aceleração são: radiação solar (ultravioleta e infravermelho, e intensidade), ataques químicos (umidade, névoa salina, enxofre e ozônio). A degradação geralmente envolve corrosão, oxidação e outras reações químicas.

Referências úteis para o assunto são: Rychtera [26], Uhlig [32], DePaul [8] e Waine [22].

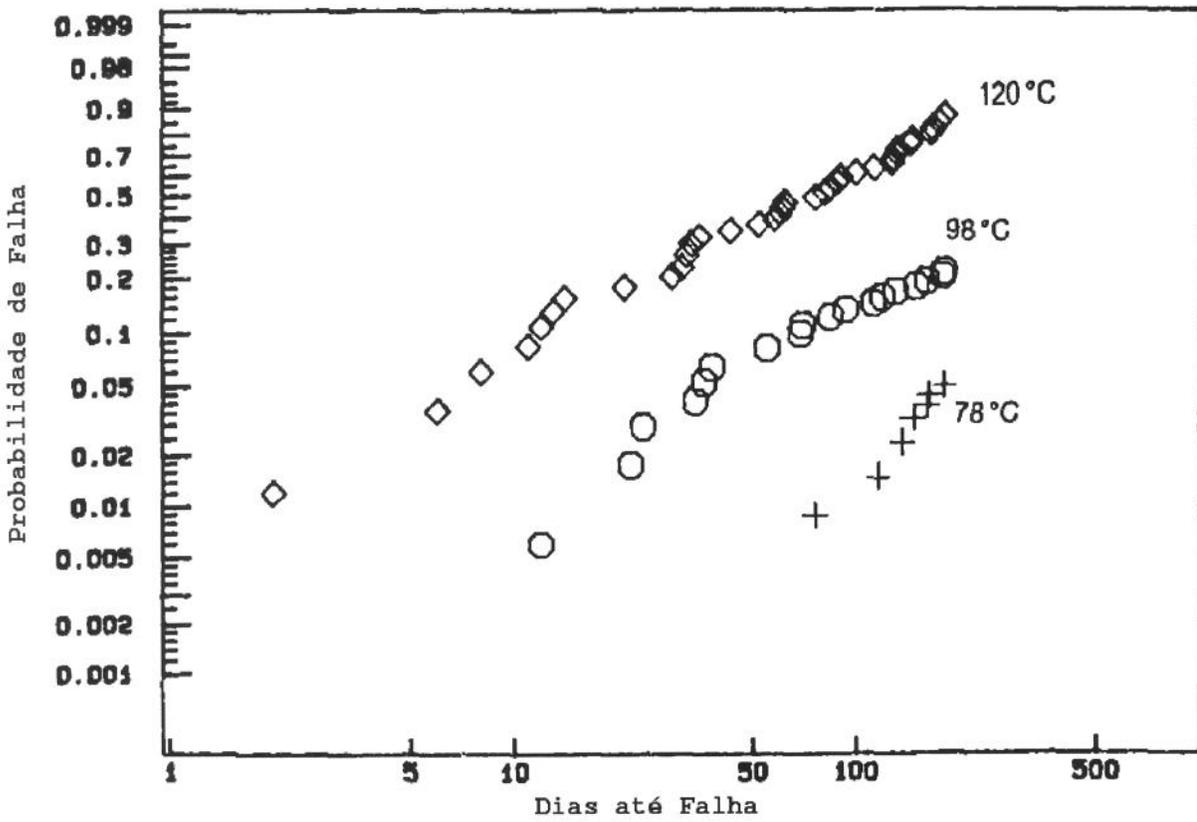


Figura 1.4: Influência da temperatura na Probabilidade de Falha, em função da duração do teste, para uma união por cola condutora, em um circuito elétrico [6].

Temperatura de Operação						
78°C	98°C		120°C			
6	12	70	2	31	61	128
76	22	84	6	32	62	129
116	24	93	8	32	76	132
137	34	112	11	33	81	133
137	36	119	12	35	84	145
149	38	130	13	43	88	146
163	55	150	14	52	90	167
164	55	161	21	58	100	168
181	69	179	29	60	113	175
		181				182

Tabela 1.1: Dias para falhas nas unidades testadas

1.4 Técnicas de aceleração

A obtenção das equações que regem as “Leis de degradação” do produto são baseadas nas seguintes principais técnicas de aceleração (ou desaceleração):

Tipo I - Relacionar as Taxas de falhas $\lambda(x)$ em uso normal e $\lambda^*(x)$ no Ensaio Acelerado, por meio de uma Função acelerante $h(x)$, na variável x , dada pela relação,

$$\lambda^*(x) = \lambda(x).h(x) \quad (1.1)$$

Como $\lambda(x) < \lambda^*(x)$, a função $h(x)$ é acelerante.

Tipo II - Relacionar as variáveis x do ensaio em uso normal e x^* no Ensaio acelerado, por meio de uma Função acelerante $h(x)$ da forma,

$$x = x^*.h(x) \quad (1.2)$$

onde $x^* < x$, ou seja, deseja-se por exemplo, um tempo de duração no Ensaio Acelerado menor que o tempo correspondente à degradação em uso normal.

Tipo III - Relacionar a Taxa de falha característica (λ_o^*) no Ensaio Acelerado a uma função do tipo

$$\lambda_o^* = A.e^{(-\frac{B}{T^*})} \quad (1.3)$$

denominada de *Arrhenius*, onde:

A = constante de posição;

B = E/k = fator proporcional à energia de ativação (E) e a Constante de Boltzman (k).

Esta função é particularmente aplicada à degradação de componentes eletro/eletrônicos e a processos de corrosão (ensaios de névoa salina), em função da variável T (que pode ser temperatura, tensão, corrente elétrica, etc).

Quando T corresponde à temperatura, utiliza-se a escala absoluta (Kelvin).

Um dos principais objetivos deste trabalho é a obtenção de uma metodologia única que correlacione estes três tipos de técnicas de aceleração, como será apresentado no Capítulo 2.

1.5 Tipos de Testes

As metodologias e procedimentos mais utilizados em Ensaaios Acelerados são:

- Teste do “Elefante”;
- Teste por Degradação Ambiental Simples;
- Teste por Degradação Ambiental Combinada;
- Queima inicial (*Burn-in*);

a seguir descritos, *de modo sucinto, pois não é objetivo deste trabalho um estudo detalhado destas técnicas.*

Os métodos estatísticos mais utilizados na determinação dos parâmetros da equação geral da aceleração são:

- Categoria Mediana (*Median Rank*);
- Teste da Morte-Súbita;
- Método do Sucesso;

a serem apresentados e analisados neste trabalho.

1.5.1 Teste do “Elefante”

Este teste é conhecido por vários outros nomes (*Killer Tests, Design Limits Tests, etc*) e consiste no seguinte procedimento: o produto a ser aprovado (testado) é submetido a condição muito severa de uso, para um tempo (ou ciclos, quilômetros, etc), prefixado. Se o produto resistir, ele passa nos testes, e conseqüentemente tem-se maior confiança na utilização do produto. Caso este venha a falhar, deve ser reprojeto, de maneira a evitar a causa da falha. A metodologia do teste utiliza um ou poucos componentes e vira principalmente uma avaliação apenas qualitativa, e não quantitativa. O Teste do “Elefante” pode não apresentar alguns modos de falhas importantes, que aparecem durante o uso dos equipamentos, mas pode-se usar vários testes para prever a influência dos diferentes modos de falhas.

Este tipo de ensaio é importante no desenvolvimento do produto, para eliminar as falhas de projeto. É um ensaio que resulta em informações apenas qualitativas (bom ou ruim) e não quantitativas.

Referências úteis para o assunto são: MIL-STD [19] e Waine [22].

1.5.2 Teste por Degradação Ambiental Combinada

Esse tipo de ensaio (*Environmental Stress Screening*) consiste em submeter o produto a uma combinação de fatores de degradação, tais como vibração aleatória (randômica), ciclos térmicos e impactos. Desta maneira é como se aplicássemos um Teste do “Elefante”, quando na fase do desenvolvimento do projeto (a fim de eliminar vários modos de falhas), e um teste de Queima inicial (com o objetivo de aumentar a Confiabilidade do equipamento). O *Environmental Stress Screening* é muito utilizado pela indústria e no desenvolvimento de equipamentos militares, como apresentados na [17].

Referências úteis para o assunto são: MIL-STD ([19], [16], [18], [20], [25] e [31]), Tustin ([29] e [30]), Schlagheck [27] e Waine [22].

1.5.3 Teste por Degradação Ambiental Simples

O Ensaio Acelerado com apenas um parâmetro consiste em submeter o produto a apenas uma condição de degradação, um pouco mais severa que a existente em uso normal e obter a vida do equipamento nesta situação. Em seguida, através de “Fatores de Aceleração” calculados ou obtidos de maneira clássica pela história do equipamento, estima-se qual seria sua vida em uso normal.

A principal diferença entre este ensaio e o Teste do “Elefante” consiste em que o Ensaio Acelerado de apenas um parâmetro resulta em uma resposta quantitativa e o Teste do “Elefante” fornece uma resposta qualitativa. O ensaio clássico possui três hipóteses:

- Fator de aceleração conhecido;
- Parâmetro de forma constante (equação de *Weibull*);
- Mesmos modos de falha que em uso normal.

No Capítulo 5 serão analisadas as duas primeiras hipóteses.

1.5.4 Queima Inicial (*Burn-in*)

Este ensaio consiste em testar o equipamento em condições normais de uso ou acelerada, por um pequeno intervalo de tempo. Esta é uma operação utilizada pela indústria para eliminar os equipamentos sujeitos a mortalidade infantil, ou seja, com parâmetros fracos de qualidade, não eliminados nas inspeções por amostragem.

Referências úteis para o assunto são: Jensen [14], e Waine [22].

1.5.5 Morte Súbita

O teste da Morte Súbita é um caso particular, aplicado com vantagem para grandes amostras, e quando deseja-se uma rápida avaliação do comportamento futuro do produto a partir de uma pequena amostra, como será apresentado em detalhes no Capítulo 3. Neste teste não existe um aumento dos esforços aplicados, ou seja, fisicamente o Ensaio

Acelerado é idêntico ao Ensaio Normal. A aceleração é considerada apenas na variável (tempo, quilômetros, ciclos, etc), objetivando-se obter os parâmetros da degradação em um menor tempo de avaliação.

1.5.6 Método do Sucesso

Os parâmetros para avaliação dos componentes, tanto em Ensaaios Acelerados como em Ensaaios Normais, são obtidos mesmo quando não existem falhas (ou então poucas falhas). Correspondem portanto a apenas *Suspensões*. Obviamente apresenta tempo de ensaio mais curto que os usuais, desenvolvidos até a falha dos componentes. Sua aplicação é cada vez mais utilizada, pelas inúmeras vantagens que apresenta, como será visto no Capítulo 4.

Capítulo 2

Equação Geral da Função Acelerante

2.1 Equações básicas das probabilidades de falhas

As Probabilidades de Falha (F), ou Desconfiabilidades, na utilização real (uso normal) do produto é dada pela equação geral ,

$$F(x) = 1 - e^{-\int_0^x \lambda(x) dx} , \quad (2.1)$$

onde $\lambda(x)$ é a Taxa Instantânea de Falha, dependente da variável x (tempo, quilômetros, número de ciclos, etc).

A aceleração do processo de degradação por meio de um Ensaio Acelerado implica em uma nova Probabilidade de Falha,

$$F^*(x) = 1 - e^{-\int_0^x \lambda^*(x) dx} , \quad (2.2)$$

onde $\lambda^*(x)$ é a Taxa Instantânea de Falha no Ensaio Acelerado.

As equações 2.1 e 2.2 resultam que , se $F^*(x)$ é uma aceleração de $F(x)$, tem-se a relação,

$$\int_0^x \lambda^*(x) dx \geq \int_0^x \lambda(x) dx. \quad (2.3)$$

A condição suficiente para que $F^*(x)$ seja uma aceleração de $F(x)$ é que $\lambda^*(x) \geq \lambda(x)$. Existe então uma Função Acelerante $h(x)$, de tal modo que,

$$F^*(x) = F[h(x)], \quad (2.4)$$

cujas correspondentes “Densidades de Probabilidades de falhas” (f) são dadas por,

$$\text{Ensaio Normal : } f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \quad (2.5)$$

$$\text{Ensaio Acelerado : } f^*(x) = \frac{dF^*(x)}{dx} = \frac{dF^*[h(x)]}{dx}, \quad (2.6)$$

com as correspondentes “Taxas Instantâneas de Falha” (λ),

$$\text{Ensaio Normal : } \lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)}, \quad (2.7)$$

$$\text{Ensaio Acelerado : } \lambda^*(x) = \frac{f^*(x)}{1 - F^*(x)}. \quad (2.8)$$

2.2 Função Acelerante

Para uma generalização do método no caso de Funções Acelerantes, pretende-se consolidar em uma única metodologia os casos de Funções Acelerantes Tipo I, Tipo II e Tipo III (ver Capítulo 1). Inicialmente apresenta-se a dedução para o caso de Função Acelerante do Tipo I, objetivando-se a obtenção de uma equação geral da relação entre Ensaios Acelerados e Normais. Adota-se uma Função Acelerante $h(x)$ das Taxas de Falhas Instantâneas (λ^*, λ) na forma:

$$h(x) = K \cdot x^{-n}, \quad (2.9)$$

onde:

K = Constante de correlação;

n = Expoente de forma.

Substituindo-se $h(x)$ na equação 1.1, resulta:

$$\lambda^*(x) = K \cdot x^{-n} \cdot \lambda(x). \quad (2.10)$$

Considerando-se a *Equação Geral de Weibull*, na forma tripamétrica, segue que:

$$\text{Ensaio Normal : } F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (2.11)$$

$$\text{Ensaio Acelerado : } F^*(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma^*}{\alpha^*}\right)^\beta}, \quad (2.12)$$

onde para os correspondentes Ensaios Normais ou Acelerados,

γ, γ^* = vida inicial;

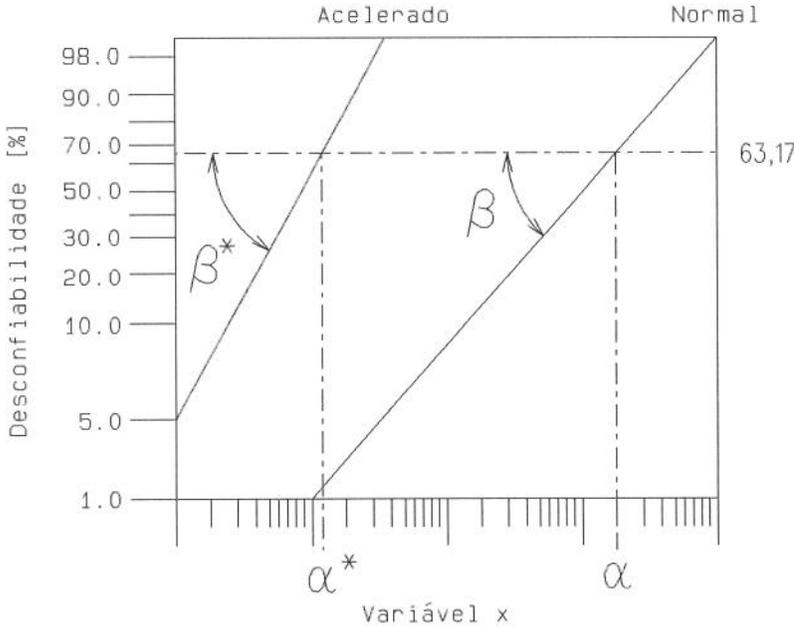


Figura 2.1: Gráfico de Weibull para Ensaios Normais e Acelerados.

α, α^* = vida característica (para $1-F(\alpha) = \frac{1}{e} = 0.37$);
 β, β^* = parâmetro de forma.

Na Figura 2.1 é mostrada a variação típica das Probabilidades de Falha (F^*, F) em função dos parâmetros da equação de Weibull com $\gamma = \gamma^* = 0$ (vida inicial nula).

Para a forma biparamétrica da equação geral de Weibull, com $\gamma = \gamma^* = 0$, tem-se :

$$\text{Ensaio Normal : } F(x) = 1 - e^{-(\lambda_0 \cdot x)^\beta}, \quad (2.13)$$

$$\text{Ensaio Acelerado : } F^*(x) = 1 - e^{-(\lambda_0^* \cdot x)^{\beta^*}}, \quad (2.14)$$

onde λ_0, λ_0^* correspondem à Taxa de Falha Característica, para os Ensaios Normais e Acelerados, respectivamente.

Considerando-se as equações 2.7 e 2.8 resulta na distribuição de Weibull, as correspondentes Taxas Instantâneas de Falha,

$$\text{Ensaio Normal : } \lambda(x) = \beta(\lambda_0)^\beta \cdot x^{\beta-1}, \quad (2.15)$$

$$\text{Ensaio Acelerado : } \lambda^*(x) = \beta^*(\lambda_0^*)^{\beta^*} \cdot x^{\beta^*-1}. \quad (2.16)$$

Dividindo-se ambas as equações, resulta :

$$\lambda^*(x) = \frac{\beta^*}{\beta} \cdot \frac{(\lambda_0^*)^{\beta^*}}{(\lambda_0)^\beta} \cdot x^{\beta^*-\beta} \cdot \lambda(x). \quad (2.17)$$

Comparando-se ambos os termos com a equação 2.10, segue que:

$$K \cdot x^{-n} = \frac{\beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*}}{\beta \cdot (\lambda_0)^\beta} \cdot x^{\beta^* - \beta}, \quad (2.18)$$

ou seja, devem ser satisfeitas as igualdades,

$$n = \beta - \beta^*, \quad (2.19)$$

$$K = \frac{\beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*}}{\beta \cdot (\lambda_0)^\beta} = \frac{\beta^* \cdot (\alpha)^\beta}{\beta \cdot (\alpha^*)^{\beta^*}}, \quad (2.20)$$

onde:

n = Expoente de Forma;

K = Coeficiente de Correlação;

sendo ambos coeficientes adimensionais.

Para a Probabilidade de Falha no Ensaio Normal, conforme as equações 2.10 e 2.13, tem-se:

$$\begin{aligned} F(x) &= 1 - e^{-\int_0^x \lambda(x) dx} \\ \lambda(x) &= \frac{x^n}{K} \cdot \lambda^*(x) = \frac{x^n}{K} \cdot \beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*} \cdot x^{\beta^* - 1} \\ \int \lambda(x) dx &= \frac{\beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*}}{K \cdot \beta} \cdot \int x^n \cdot x^{\beta^* - 1} \cdot dx \\ n &= \beta - \beta^* \\ \int \lambda(x) dx &= \frac{\beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*}}{K \cdot \beta} \int x^{\beta - 1} \cdot dx = \frac{\beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*} \cdot x^\beta}{K \cdot \beta} \\ F(x) &= 1 - e^{-\frac{\beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*} \cdot x^\beta}{K \cdot \beta}} = 1 - e^{-\frac{\beta^* \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^*} \cdot x^{(\beta^* + n)}}{K \cdot (\beta^* + n)}}. \end{aligned}$$

Casos Particulares:

1. $n = 0$ (retas paralelas), $\beta^* = \beta$;

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{(\lambda_0^* \cdot x)^{\beta^*}}{K}}.$$

2. $K = 1$ e $n = 0$ (sem aceleração), $\lambda^*(x) = \lambda(x)$;

$$F(x) = 1 - e^{-(\lambda_0^* \cdot x)^{\beta^*}}.$$

3. $K = 0$ (aceleração infinita);

$$F(x) = 1 - 0 = 1 \text{ (falha instantânea).}$$

2.3 Influência dos Parâmetros de Aceleração

2.3.1 Expoente de forma (n)

Este parâmetro correlaciona as inclinações das retas no gráfico de *Weibull* como mostrado na Figura 2.2, ou seja, é um *Coefficiente Angular*, que indica a diferença das inclinações das retas correspondentes aos Ensaios Normais e Acelerados. Consequentemente, resultam retas *convergentes, paralelas ou divergentes*.

O processo de degradação implica em um limite de validade das equações 2.13 e 2.14 quando $n \neq 0$, ou seja, aos pontos de intersecção (limites) das retas no gráfico de *Weibull*, como será apresentado na Secção 2.4 .

2.3.2 Coeficiente de Correlação (K)

Denomina-se *Relação de vidas características (a)* ao valor,

$$a = \frac{\alpha}{\alpha^*} = \frac{\lambda_0^*}{\lambda_0}. \quad (2.21)$$

A equação 2.20 pode ser posta nas formas:

$$K = \frac{\beta^* (\lambda_0^*)^{\beta^*}}{\beta (\lambda_0)^\beta} = \frac{\beta^*}{\beta} \cdot a^\beta \cdot (\lambda_0^*)^{\beta^* - \beta} = \frac{\beta^*}{\beta} \cdot a^{\beta^*} \cdot (\lambda_0)^{\beta^* - \beta}. \quad (2.22)$$

Quando $\beta^* = \beta$ (retas paralelas), resulta:

$$K = a^{\beta^*}, \quad (2.23)$$

e ainda, quando $\beta = \beta^* = 1$ (distribuição Exponencial),

$$K = a, \quad (2.24)$$

ou seja, na distribuição Exponencial o *Coefficiente de Correlação (K)* depende apenas das Vidas Características (α^* , α) nos Ensaios Acelerados e Normais.

2.4 Limite de Validade

Da condição $F^*(x_l) = F(x_l)$ resulta o ponto de intersecção das retas correspondentes aos Ensaios Acelerado e Normal. Através das equações 2.13 e 2.14, obtêm-se a relação para o ponto x_l (equação 2.25), e sua utilização é apresentada nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5:

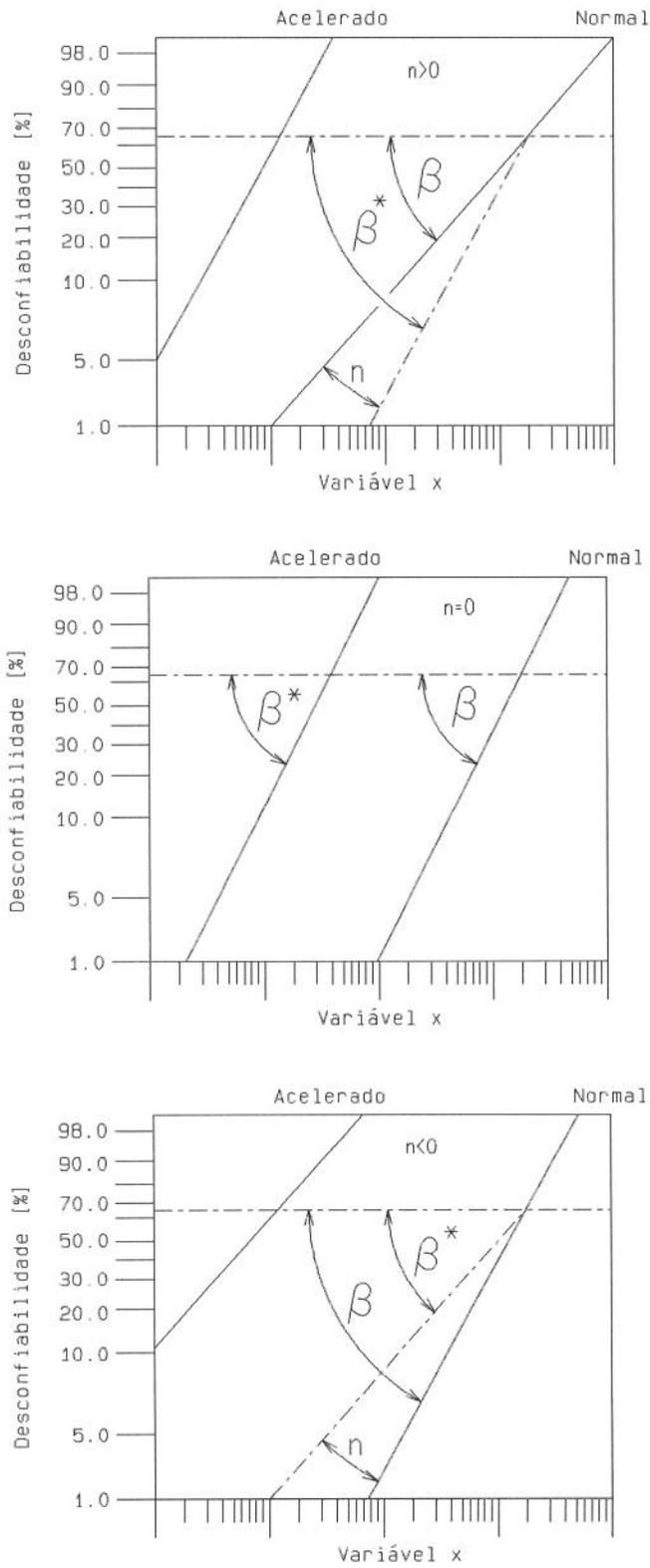


Figura 2.2: Influência do Expoente de Forma (n) na inclinação das retas correspondentes aos Ensaio Normais e Acelerados.

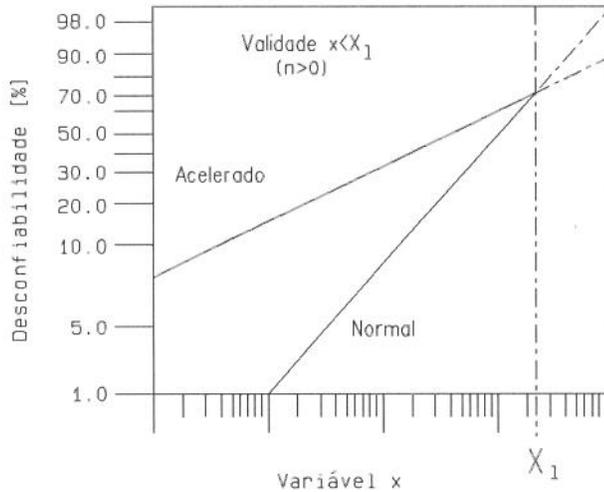


Figura 2.3: Limite de validade da aceleração para $n > 0$.

$$1 - e^{-(\lambda_0 \cdot x_l)^\beta} = 1 - e^{-(\lambda_0^* \cdot x_l)^{\beta^*}},$$

$$(\lambda_0)^\beta \cdot x_l^\beta = (\lambda_0^*)^{\beta^*} \cdot x_l^{\beta^*}.$$

Considerando-se agora as equações 2.19 e 2.20 segue que :

$$(\lambda_0)^\beta \cdot x_l^n = K \cdot \beta \cdot (\lambda_0)^\beta,$$

$$x_l = \left[K \cdot \frac{\beta}{\beta^*} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (2.25)$$

Deve-se admitir *três casos limites*:

1. Quando $\beta > \beta^*$, $n > 0$, resultam retas *convergentes* e a condição $x < x_l$ (ver Figura 2.3).
2. Quando $\beta < \beta^*$, $n < 0$, resultam retas *divergentes* e a condição $x > x_l$ (ver Figura 2.4).
3. Quando $\beta = \beta^*$, $n = 0$, resultam retas *paralelas* e a condição $x_l = \infty$ (ver Figura 2.5).

2.5 Função Acelerante na Variável (x)

Neste caso que corresponde ao Tipo II, (ver Capítulo 1) para uma dada Probabilidade de Falha, igual aos Ensaios Normais e Acelerados ($F(x) = F^*(x^*)$), deseja-se

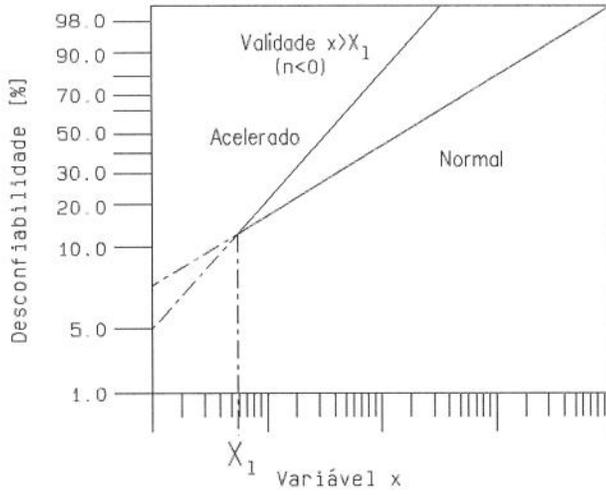


Figura 2.4: Limite de validade da aceleração para $n < 0$.

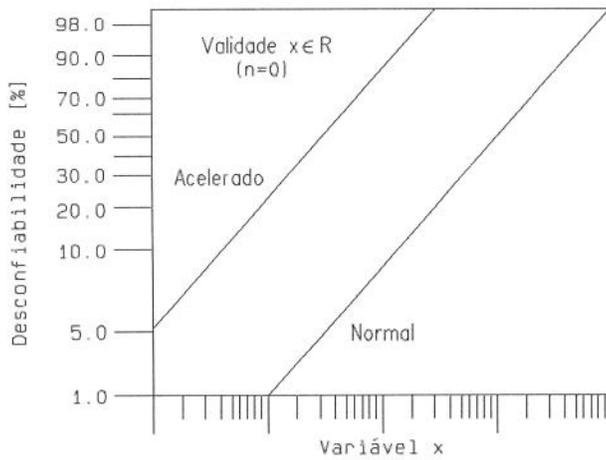


Figura 2.5: Limite de validade da aceleração para $n = 0$.

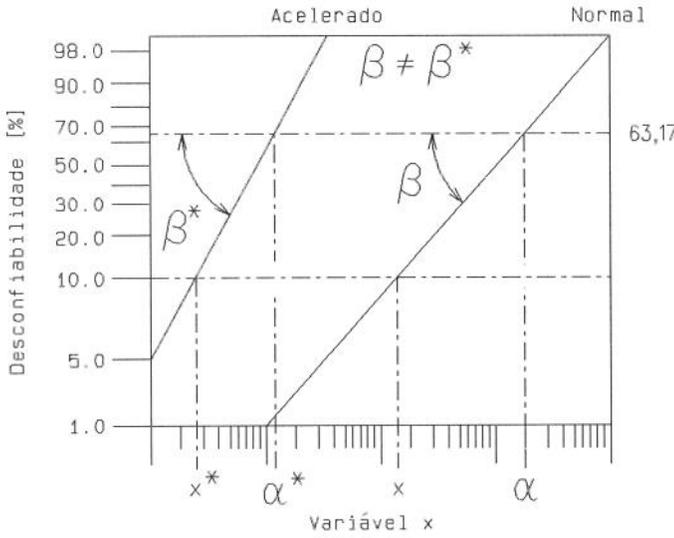


Figura 2.6: Aceleração na variável com diferentes Parâmetros de forma.

determinar, a partir de um dado valor de x^* da variável (tempo, ciclos, quilômetros, etc) no Ensaio Acelerado, qual a vida correspondente x em uso normal. Da Figura 2.6 e das equações 2.13 e 2.14, resulta:

$$\begin{aligned} (\lambda_0 \cdot x)^\beta &= (\lambda_0^* \cdot x^*)^{\beta^*}, \\ x &= \frac{(\lambda_0^*)^{\frac{\beta^*}{\beta}}}{\lambda_0} \cdot [x^*]^{\frac{\beta^*}{\beta}}, \end{aligned} \tag{2.26}$$

ou ainda, de acordo com as equações 2.21 e 2.22,

$$x = [K \cdot \frac{\beta}{\beta^*}]^{\frac{1}{\beta}} \cdot [x^*]^{\frac{\beta^*}{\beta}} = A_f \cdot [x^*]^{\frac{\beta^*}{\beta}}, \tag{2.27}$$

onde $A_f = [K \cdot \frac{\beta}{\beta^*}]^{1/\beta}$.

Quando $\beta^* = \beta$ (retas paralelas), segue que,

$$x = K^{\frac{1}{\beta}} \cdot x^* = A_f \cdot x^*; \tag{2.28}$$

com $A_f = K^{\frac{1}{\beta}}$, onde o *Fator de Aceleração* A_f representa o aumento (multiplicação) da variável, geralmente o *tempo de Ensaio Acelerado*, que resulta no *tempo de uso real (vida)*.

No caso particular de *Distribuição Exponencial* $\beta^* = \beta = 1$, resultam as relações:

$$A_f = K = a = \frac{\alpha}{\alpha^*} = \frac{\lambda_0^*}{\lambda_0}. \tag{2.29}$$

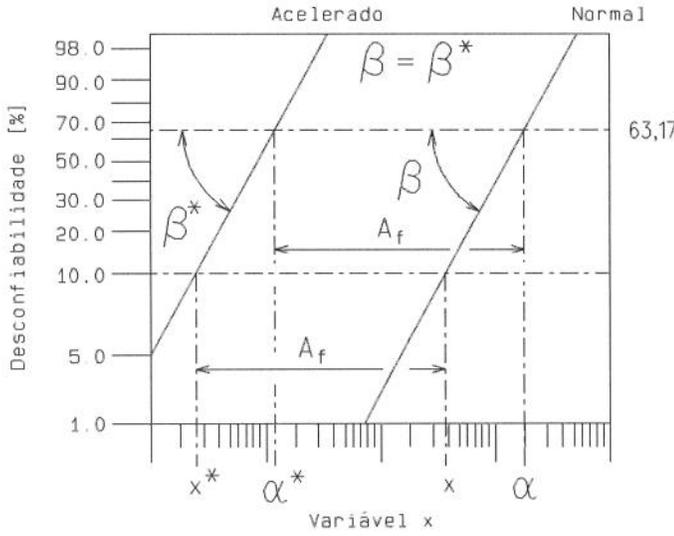


Figura 2.7: Aceleração na variável, com Parâmetros de Forma Iguais.

2.6 Função Acelerante para Equação de Arrhenius

Para duas diferentes condições de ensaio, conforme a equação 1.3, tem-se:

$$\text{Ensaio Normal : } \lambda_o = A.e^{-\left(\frac{B}{T}\right)}, \quad (2.30)$$

$$\text{Ensaio Acelerado : } \lambda_o^* = A.e^{-\left(\frac{B}{T^*}\right)}, \quad (2.31)$$

cuja relação será:

$$\lambda_o^* = \lambda_o.e^{-B\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}\right)}, \quad (2.32)$$

Considerando-se as equações 2.19 e 2.20, obtemos:

$$K = \frac{\beta^* \cdot (\lambda_o \cdot e^{-B\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}\right)})^{\beta^*}}{\beta \cdot (\lambda_o)^\beta}. \quad (2.33)$$

Manipulando a equação 2.33, temos:

$$K = \frac{(\beta - n)}{\beta \cdot \lambda_o^n} \cdot (e^{-B\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}\right)})^{(\beta - n)}. \quad (2.34)$$

Portanto, para o cálculo do B e da constante de posição temos:

$$B = \frac{-1 * \text{Ln}\left(\frac{K \cdot \beta \cdot \lambda_o^n}{(\beta - n)}\right)}{\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}\right) \cdot (\beta - n)}; \quad (2.35)$$

$$A = \frac{\lambda_o}{e^{\frac{-B}{T}}} = \frac{\lambda_o^*}{e^{\frac{-B}{T^*}}}. \quad (2.36)$$

Casos particulares:

1. $n = 0$ (retas paralelas):

$$B = \frac{-\text{Ln}(K^{\frac{1}{\beta}})}{\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}}; \quad (2.37)$$

$$(2.38)$$

comparando a equação 2.29 com a equação 2.33 temos:

$$K^{\frac{1}{\beta}} = A_f = \frac{\lambda^*(x)}{\lambda(x)} = e^{-B\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}\right)}. \quad (2.39)$$

2. $\beta = \beta^* = 1$ (Distribuição exponencial):

$$B = \frac{-\text{Ln}(K)}{\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}}, \quad (2.40)$$

$$\text{e} \quad A_f = K. \quad (2.41)$$

3. $K = 0$ (aceleração infinita):

$$B = \frac{\text{Ln}\left(\frac{1}{K}\right)}{\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}}; \quad (2.42)$$

$$B = \infty; \quad (2.43)$$

$$\lambda^* = \lambda \cdot e^{-B\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}\right)}; \quad (2.44)$$

$$\lambda^* = \infty; \quad (2.45)$$

Portanto $F^*(x) \rightarrow 1$ (Falha instantânea).

2.7 Conclusão

Como proposto no início da dedução da Função Acelerante, obteve-se uma metodologia única que correlaciona os três casos propostos, ou seja, a metodologia utilizada para a Função Acelerante do Tipo I, serve para os casos Tipo II e Tipo III. Assim tem-se uma consolidação da teoria com a prática, resultando no desenvolvimento de um único programa computacional que pode ser utilizado para qualquer um dos casos apresentados.

Capítulo 3

Ensaio com Predominância de Falhas

3.1 Método da Categoria Mediana

3.1.1 Conceituação Básica

Constitui um método para correção dos valores das probabilidades obtidos através de ensaios, devido à pequena quantidade de dados normalmente disponíveis na avaliação da Confiabilidade. A técnica aplicada é particularmente importante para corrigir as distorções e possibilitar uma melhor correlação dos dados.

3.1.2 Natureza dos Dados

Ao efetuar-se ensaios para medida da vida até falha de um elemento (componente ou sistema), verifica-se que, para um dado valor da vida, alguns apresentam falhas e outros ainda não falharam. Classifica-se, neste caso, ao conjunto de dados como:

- Incompleto: nem todos falharam;
- Completo: todos falharam;

como mostrado na Figura 3.1 para o tempo t_i os dados seriam *Incompletos*, pois 4 elementos eram *Sobreviventes*, e no tempo t_c os dados seriam *Completos*. Para os elementos sobre os quais sabe-se apenas que sua vida é maior que seu tempo de operação observado (tempo de efetivo funcionamento), os dados são denominados *Censurados à direita*. No caso, para o tempo t_i da Figura 3.1, correspondem aos elementos 2, 4, 5 e 6. Em alguns casos, alguns elementos apresentaram falhas antes do início da observação, e são então denominados *Censurados à Esquerda* caso do elemento 1, quando o início da observação ocorre no tempo t_o mostrado na Figura 3.1.

Nos ensaios planejados, normalmente todas as unidades participantes do experimento iniciam o teste de vida no mesmo instante (t_o) como mostrado na Figura 3.2,

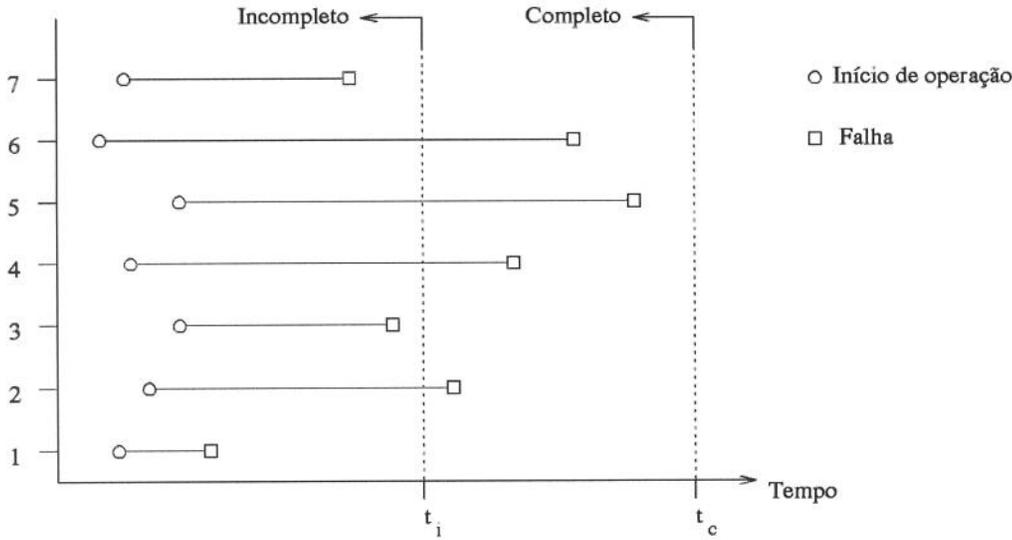


Figura 3.1: Conjunto de dados Completos e Incompletos.

registrando-se no fim do experimento o tempo correspondente à falha (vida). Esta situação corresponde a dois tipos de ensaios:

- Unicensurados, à direita: Os tempos de falha são menores que o tempo de censura ou tempo limite (t_l) de duração. Em alguns experimentos a censura implica em nenhuma falha, caso de aplicação do “Método do Sucesso” (ver Capítulo 4).
- Censura Multipla, à direita: Quando as unidades em operação são colocadas em tempos diferentes (t_{o1}, t_{o2}), correspondem diferentes tempos de censura (t_{l1}, t_{l2}), ou seja, os dados são progressivamente censurados.

Em ambos os casos, pode-se ainda ter outros tipos de censura:

- Tipo I : Censura pela duração (tempo, ciclos, etc.), sendo a quantidade de falhas aleatória.
- Tipo II : Censura pela falha, sendo a duração uma variável aleatória.

3.1.3 Ensaios Completos

Neste tipo de ensaio, a quantidade de falhas é igual ao tamanho da amostra. Assim para cada j -ésimo valor da variação é dado pela relação [2]:

$$r_j = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (3.1)$$

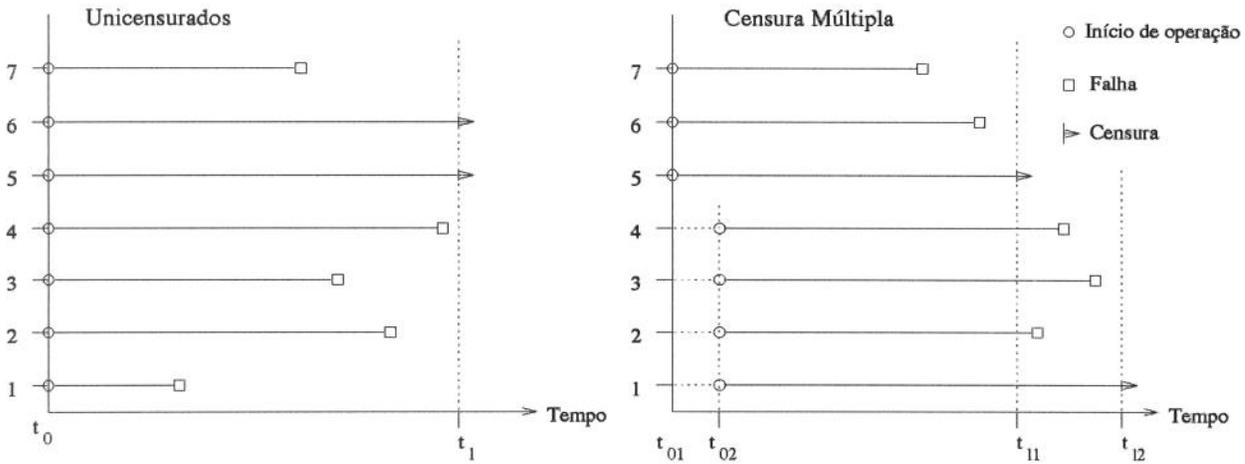


Figura 3.2: Conjunto de dados Uncensurados e por Censura Múltipla.

onde “ n ” é o tamanho da amostra, e j é a quantidade de falhas, determinada experimentalmente. A equação 3.1 é uma relação aproximada, porém com uma boa precisão para a grande maioria das aplicações práticas, devido à pequena quantidade de dados disponíveis. No Capítulo 6 será apresentado um caso prático desta metodologia a um Ensaio Completo.

3.1.4 Ensaios Incompletos Uncensurados, à Direita

É interessante notar-se que a equação 3.1 pode ser aplicada também para dados *Uncensurados à Direita* (ver Figura 3.2), ou seja, para censura após um dado tempo limite de ensaio, onde resultam itens sobreviventes, ou seja, a quantidade de falhas é menor que o tamanho da amostra. Este tipo de censura geralmente corresponde a testes com custo relativamente altos, onde o prolongamento do tempo (ou ciclos, etc) não é relevante. O fato de um elemento em teste sobreviver a uma dada duração é uma importante condição, que influi na avaliação dos resultados obtidos. No Capítulo 6 será apresentado o correspondente estudo de caso.

3.1.5 Ensaios Incompletos, com Censura Múltipla

Quando são consideradas apenas as amostras que falharam, desprezando-se as suspensas, incorre-se em erro, pois os resultados seriam bastante diferentes. Se todas as amostras falham, para cada amostra corresponde um Número de Ordem (j) inteiro, e a seguir, calcula-se a Categoria Mediana. Porém, na presença de amostras *suspensas*, os Números de Ordem para as amostras que não falharam não são mais números inteiros e sim fracionários.

O Número Corrigido de Ordem (N) das amostras que falharam é função de cada novo Incremento (I_j) para o Número de Ordem, quando uma ou mais suspensões são encontradas na sequência dos itens ensaiados, baseados na equação [2]:

$$N_j = N_{i-1} + I_j \quad (3.2)$$

com um incremento

$$I_j = \frac{n + 1 - N_{j-1}}{n + 1 + O_j} \quad (3.3)$$

onde: $N_{j-1} = N_{j-2} + I_{j-1}$ é o Número de Ordem da falha anterior. No Capítulo 6 será apresentado o correspondente estudo de caso.

3.2 Teste da Morte Súbita

3.2.1 Conceituação Básica

Constitue uma técnica bastante simples e útil para a obtenção rápida da Curva de Vida de uma população (componentes) relativamente grande, com menor custo, utilizando-se os dados de uma dada distribuição (Normal, Weibull, Exponencial, etc.).

O objetivo principal é extrapolar os resultados obtidos em amostras, para a população total. A metodologia permite previsões do comportamento (falhas) da população, a partir de uma pequena amostra. Quanto maior a amostra, mais precisos serão os resultados obtidos.

O Teste da Morte Súbita pode ser também entendido como um *Ensaio Acelerado*, ao permitir a análise de uma população a partir de uma amostra, em menor tempo (ou ciclos, etc.) que o de efetiva utilização. Esta situação é mostrada na Figura 3.3, relativa a um ensaio, onde são comparadas as correspondentes Curvas de Vida (Morte Súbita e População) e Densidades de Probabilidade de Falha.

3.2.2 Metodologia de Cálculo

A metodologia envolve as seguintes etapas:

Etapa 1: Divide-se a amostra com “ Q ” componentes em “ g ” grupos, cada grupo com “ n ” componentes, ou seja, “ $Q = n.g$ ”.

Etapa 2: Cada grupo é testado até que ocorra a primeira falha em cada um dos “ g ” grupos. Estas falhas vão gerar os pontos da curva de morte-súbita, no gráfico da correspondente distribuição (Weibull, etc.).

Etapa 3: Aplica-se a Categoria Mediana para local os pontos (percentuais das probabilidades acumuladas de falha), como foi apresentado no Capítulo 3 (Ensaio Completos).

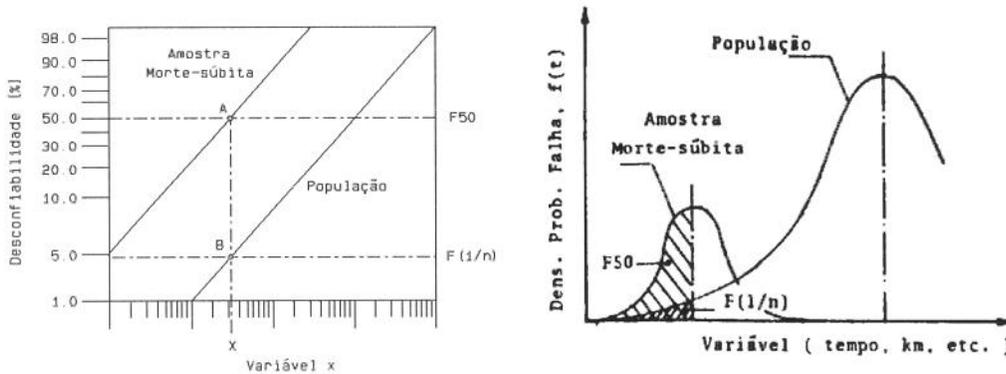


Figura 3.3: Probabilidade de Falha e Densidade de Probabilidade de Falha no Teste de Morte-Súbita

Etapa 4: Interpola-se graficamente os pontos obtidos para obter uma reta, que representa a variação da Morte-Súbita e obtém-se o Fator de Forma (β) e a Taxa de Falha Característica (λ_o) da amostra. A interpolação deve apresentar uma boa correlação dos dados. Caso contrário, deve-se procurar uma nova distribuição, que proporcione uma boa correlação.

Etapa 5: Calcula-se a probabilidade da 1ª falha para “n” componentes ($F(1/n)$), usando a Categoria Mediana, ou seja,

$$F(1/n) = \frac{1 - 0,3}{n + 0,4} \quad (3.4)$$

correspondente à 1ª falha, em um grupo no qual todos os itens (componentes) que não apresentaram falhas são suspensos.

Etapa 6: Traça-se a Curva de Vida da população paralela à Morte-Súbita, como mostrado na Figura 3.3, a partir do ponto B, obtida pela intersecção da reta vertical traçada pelo ponto A, correspondente à probabilidade $F50 = 0,50$.

Etapa 7: Determinar a Vida Característica (α) da Equação de Weibull, a partir da seguinte equação:

$$\lambda_o = \frac{-(\ln(1 - F(1/n)))^{\frac{1}{\beta}}}{X} \quad (3.5)$$

onde X é o valor da variável no ponto A (ou B).

No Capítulo 6 será apresentado o correspondente estudo de caso (exemplo prático).

Capítulo 4

Ensaio com Predominância de Suspensões

4.1 Método do Sucesso

4.1.1 Conceitos Básicos

O método denominado do “Sucesso” é utilizado para determinar (demonstrar) a Confiabilidade (R), quando uma *dada quantidade* (n) de componentes (amostra), é *testada durante um dado período de tempo t ou Vida* (ciclos, quilômetros, etc.). No período de teste alguns poucos componentes poderão falhar antes do período fixado (t), e os outros (maioria) completarão o teste sem falha. Por outro lado, ele é utilizado para verificar se o produto satisfaz a Confiabilidade (R) desejada, em função da quantidade de sobreviventes (k) ou “Sucessos”, para um lote com “ n ” componentes (amostra) testados para uma dada duração (Vida), em definidas condições operacionais e Nível de Confiança (C). O método é baseado na *distribuição Binomial*, cuja Densidade de probabilidade de falha $f(x)$ é dada por:

$$f(x) = \binom{n}{c} \cdot (1 - R)^{n-x} \cdot R^x \quad (4.1)$$

$$\binom{n}{c} = \frac{n!}{x!(n-x)!} \quad (4.2)$$

onde $x = 1, 2, \dots, n$ é a variável aleatória que representa a quantidade de sucessos.

A Probabilidade da ocorrência de “ k ” ou mais sucessos, é dado pela condição (Limite Unilateral Inferior),

$$P(x \geq k) = \sum_{x=k}^n \binom{n}{c} \cdot (1 - R)^{n-x} \cdot R^x \leq 1 - C \quad (4.3)$$

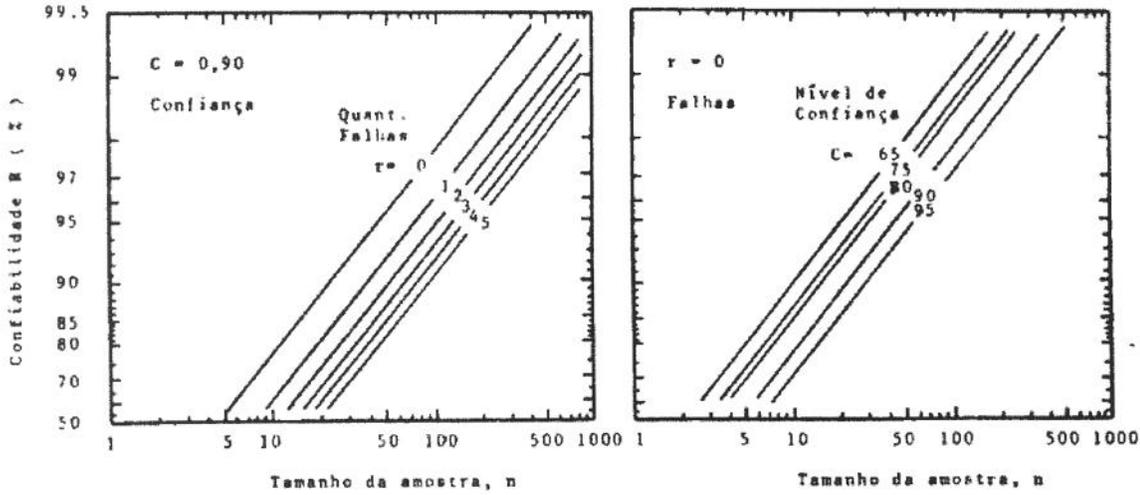


Figura 4.1: Influência da quantidade de falhas (r) e do Nível de Confiança (C) no valor da Confiabilidade (R).

onde “ C ” é o Nível de Confiança desejado ou especificado. O valor de maior interesse é a Confiabilidade (R), ou seja, à probabilidade de que o componente opere sem falha por um dado período (vida). Obviamente, quanto maior a quantidade de sobreviventes (menor a quantidade de falhas), maior o “Sucesso”, como pode ser notado na Figura 4.1. Por outro lado, o Nível de Confiança (C) exerce particular importância, pois quanto maior o valor desejado, menor a Confiabilidade (R) associada, para uma dada amostra (n), como apresentado na Figura 4.1.

O objetivo principal é a obtenção do valor R , dados n , k e C . A solução da equação 4.3, para $k \leq n - 1$, ou seja com uma ou mais falhas, é geralmente trabalhosa, exigindo uma solução por tentativa e erro, ou preferencialmente por um programa computacional do tipo interativo, como pode-se verificar pela forma das equações 4.4 e 4.6. Outros objetivos são:

- Determinar o *tamanho da amostra* (n), dados R , k e C .
- Determinar qual o *Nível de Confiança* (C), associado a dados valores de R , n e k .
- Determinar quantos *sobreviventes* (K) ou falhas $r = n - k$ são esperados, dados R , n e C .

Uma solução prática da equação 4.3 corresponde ao uso da distribuição χ^2 como uma aproximação da Distribuição Binomial, dada por:

$$R \geq 1 - \frac{\chi_{1-C, \nu}^2}{2.n} \quad (4.4)$$

ou,

$$n \geq \frac{\chi_{1-C, \nu}^2}{2 \cdot (1 - R)} \quad (4.5)$$

onde $\nu = 2(n - k + 1) = 2(r + 1)$ é o Grau de Liberdade. Quanto maior a quantidade (n) da amostra, melhor a precisão do resultado obtido. Para uma rápida estimativa dos valores da Confiabilidade (R) são apresentados os gráficos da Figuras 4.2 e 4.3. Nestes gráficos, inversamente, pode-se estimar o tamanho (n) da amostra, para um dado R . Os gráficos são referidos aos Níveis de Confiança $C = 60$ e 90 %, mais utilizados nas aplicações práticas.

No caso geral de “ r ” falhas, correspondentes a uma quantidade $k = n - r$ sobreviventes, a equação geral 4.3 pode ser posta na forma:

$$n \cdot (n - 1) \cdot (n - 2) \dots (n - r + 1) \cdot (1 - R)^r \cdot R^{n-r} + \dots + n \cdot (1 - R) \cdot R^n + R^n < 1 - C \quad (4.6)$$

cuja solução é indireta, por meio de tentativa e erro.

Os valores a serem utilizados no Cálculo da Confiabilidade (R), ou do tamanho da amostra (n), dados pela Distribuição χ^2 , correspondem apenas aos Graus de Liberdade $\nu = 2, 4, 6, 8, \dots$, ou seja, apenas a números pares. Os demais valores (números ímpares) serão utilizados em outros métodos de cálculos, como por exemplo na determinação dos Limites de Confiança (inferior ou bilateral).

A influência do Nível de Confiança (C) e da quantidade de falhas (r) no valor da Confiabilidade, pra uma dada quantidade (n) da amostra, é apresentada na Figura 4.4. Nota-se que:

- quanto maior o Nível de Confiança (C) ou a quantidade de falhas (r) admitida, menor o valor associado à Confiabilidade (R);
- altos níveis de Confiança (C) implicam em acentuada redução da Confiabilidade, principalmente para $C > 90\%$. Para $C > 99\%$, os ensaios são praticamente inviáveis, por exigirem uma amostra (n) muito grande.

4.1.2 Influência da Quantidade de Falhas na Confiabilidade

Os testes de verificação da conformidade da qualidade quanto à Confiabilidade, geralmente são conduzidos de tal modo que poucas falhas, ou preferencialmente *nenhuma falha*, possa indicar se o produto é aceitável ou não, nas condições operacionais e ambientais especificadas, e como os testes devem ser conduzidos, considerando-se a quantidade testada (n) e o Nível de Confiança (C) especificado.

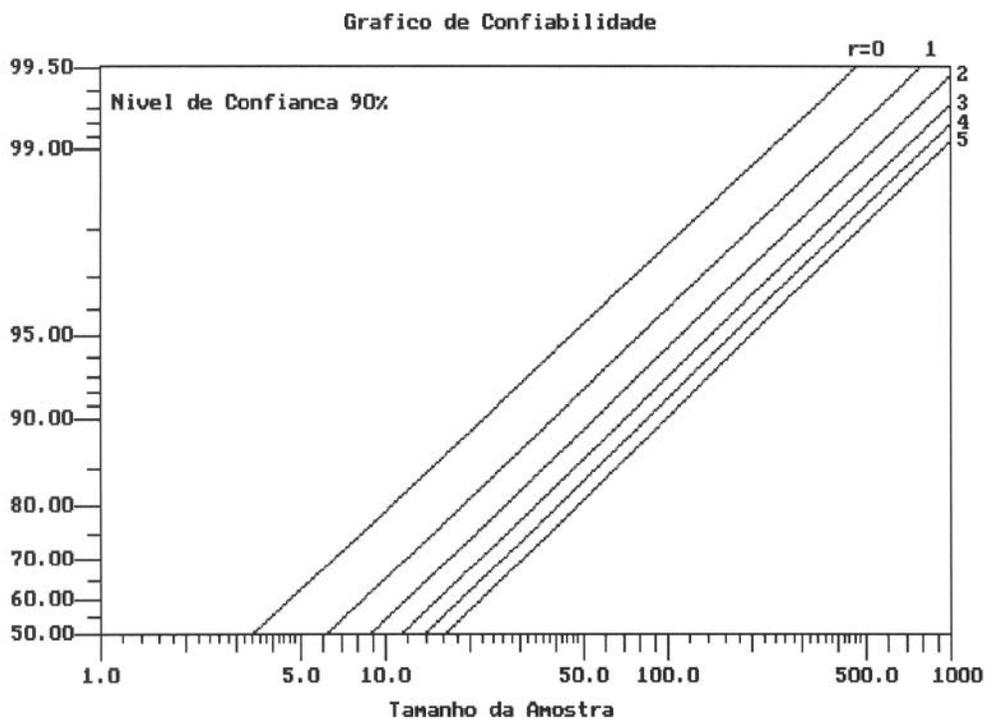


Figura 4.2: Gráfico da Variação da Confiabilidade em função da amostra e da quantidade de falhas, para o Nível de Confiança 90 %.

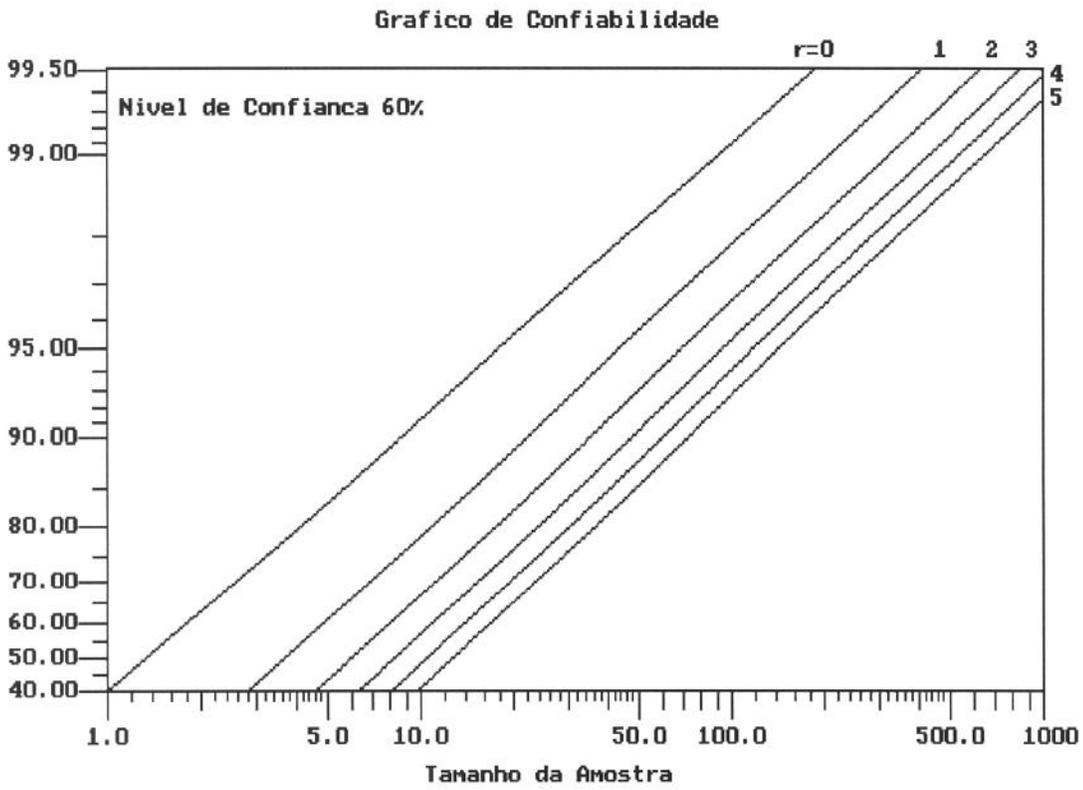


Figura 4.3: Gráfico da Variação da Confiabilidade em função da amostra e da quantidade de falhas, para o Nível de Confiança 60 %.

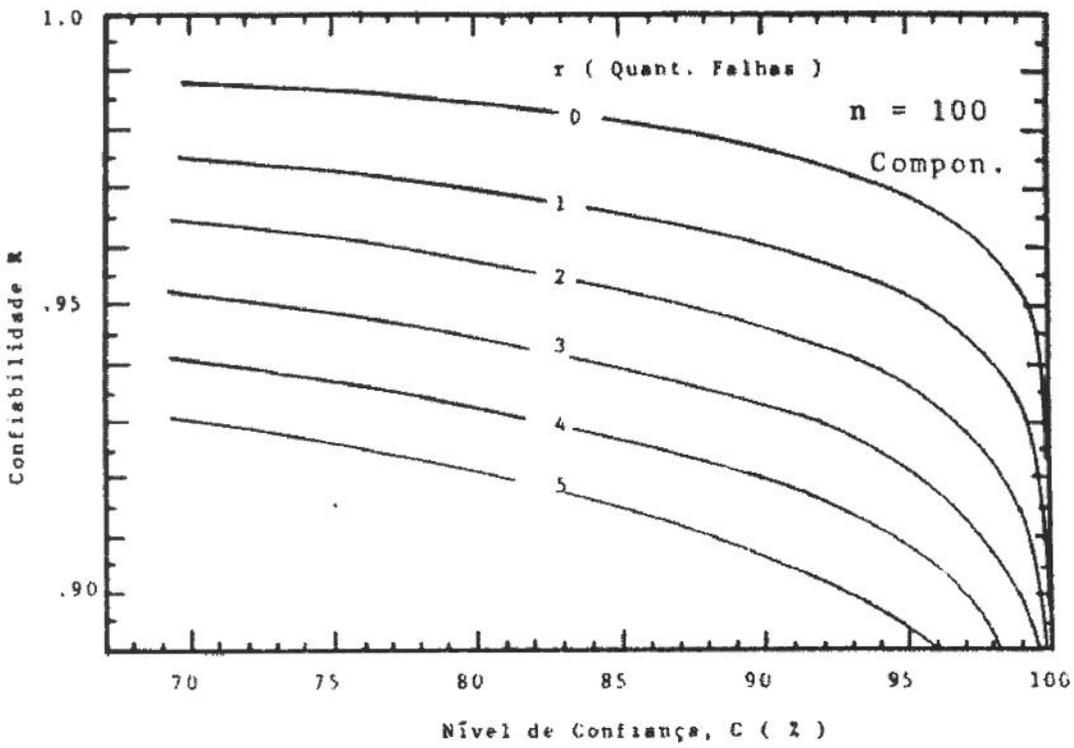


Figura 4.4: Variação da Confiabilidade em função do Nível de Confiança e da quantidade de falhas, para amostras com $n=100$ componentes

Condição com nenhuma falha ($k = n$)

Quando $k = n$, ou seja, não há ocorrência de falhas, a equação 4.3 reduz-se para:

$$R_0^n \leq 1 - C \quad , \text{ou} \quad R_0 \leq (1 - C)^{1/n} \quad (4.7)$$

Alguns autores adotam $(n+1)$ no expoente ao invés de (n) , porém este procedimento resulta em uma *solução otimista* para a Confiabilidade (R), não adotada neste trabalho.

Ocorrência de apenas 1 falha ($k = n - 1$)

Da equação geral 4.3 resulta:

$$\begin{aligned} \binom{n}{n-1} \cdot (1 - R_1) \cdot R_1^{n-1} + \binom{n}{n} \cdot (1 - R_1)^0 \cdot R_1^n &\leq 1 - C \\ \frac{n!}{(n-1)! \cdot 1!} \cdot (1 - R_1) \cdot R_1^{n-1} + \frac{n!}{n! \cdot 0!} \cdot R_1^n &\leq 1 - C \\ n \cdot (1 - R_1) \cdot R_1^{n-1} + R_1^n &\leq 1 - C \end{aligned} \quad (4.8)$$

Esta equação poderia ter sido obtido diretamente da equação 4.6. Para a solução aproximada (equação 4.4), resulta:

$$R_1 = 1 - \frac{\chi_{1-C,4}^2}{2 \cdot n} \quad (4.9)$$

com $\nu = 2 \cdot (r + 1) = 2 \cdot (1 + 1) = 4$ Graus de Liberdade. A equação 4.9 *otimista*, ou seja, resulta em um valor maior que o valor exato da equação 4.8.

Ocorrência de 2 falhas ($k = n - 2$)

Da equação geral 4.3 resulta:

$$\begin{aligned} \binom{n}{n-2} \cdot (1 - R_2)^2 \cdot R_2^{n-2} + \binom{n}{n-1} \cdot (1 - R_2) \cdot R_2^{n-1} + \\ + \binom{n}{n} \cdot (1 - R_2)^0 \cdot R_2^n &\leq 1 - C \end{aligned} \quad (4.10)$$

e da equação aproximada 4.4,

$$R_2 = 1 - \frac{\chi_{1-C,6}^2}{2 \cdot n} \quad (4.11)$$

com $\nu = 2(r + 1) = 2(2 + 1) = 6$ Graus de Liberdade.

Ocorrência de 3 falhas ($k = n - 3$)

Da equação geral 4.6 resulta:

$$n \cdot (n - 1) \cdot (n - 2) \cdot (1 - R_3)^3 \cdot R_3^{n-3} + n \cdot (n - 1) \cdot (1 - R_3)^2 \cdot R_3^{n-2} + n \cdot (1 - R_3) \cdot R_3^{n-1} + R_3^n \leq 1 - C \quad (4.12)$$

com solução aproximada (equação 4.4) resulta:

$$R_3 = 1 - \frac{\chi_{1-C,8}^2}{2 \cdot n} \quad (4.13)$$

com $\nu = 2(r + 1) = 2(3 + 1) = 8$ Graus de Liberdade

Caso geral de “r” falhas ($k = n - r$)

Neste caso, a solução é obtida a partir da equação geral 4.6 anteriormente apresentada e a solução aproximada dada diretamente pela equação 4.4.

Comparando-se os valores exatos calculados para R_0 , R_1 , R_2 e R_3 com os valores aproximados (baseados em χ^2), verifica-se que a solução aproximada é otimista, ou seja, produz valores maiores que a solução exata.

É interessante notar-se que, nas aplicações práticas a maior utilização do “Método do Sucesso” corresponde a $k = n$, ou seja, *nenhuma falha* ($r = 0$). Nestes casos, ocorre uma *sensível redução no tamanho da amostra* (n) para dados valores da Confiabilidade (R) e do Nível de Confiança, como pode ser notado na Figura 4.5, obtida da Figura 4.3 referida a $C = 90\%$.

4.1.3 Influência da Quantidade de Falhas no Tamanho da Amostra

No planejamento dos testes é muito importante a determinação do tamanho da amostra (n) ou lote, que define a duração e o custo dos testes. O valor de “ n ” aumenta com a quantidade de falhas (r) admitidas nos testes. Por isso, frequentemente é utilizada a condição *nenhuma falha* ($r = 0$), que reduz o tamanho da amostra (n).

Nenhuma falha ($r = 0$)

Da equação 4.6 resulta:

$$\ln(R_0) = \frac{\ln(1 - C)}{n_0}$$

ou seja, $n_0 \geq \frac{\ln(1 - C)}{\ln(R_0)}$ (4.14)

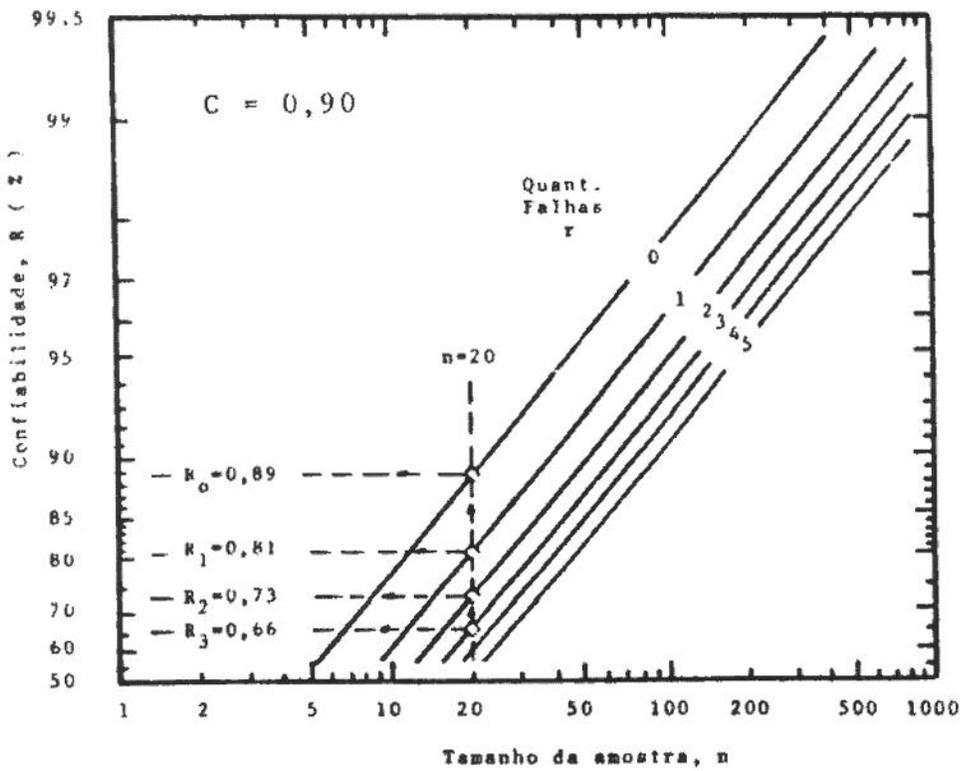


Figura 4.5: Influência da quantidade de falhas no valor da Confiabilidade, em função da quantidade de amostras para um nível de Confiança de 90 %.

considerando-se que “ n_0 ” deve ser número inteiro.

Por outro lado, da equação 4.5 resulta o valor aproximado,

$$n_0 \geq \frac{\chi_{1-C,2}^2}{2(1-R_0)} \quad (4.15)$$

onde $\nu = 2(r+1) = 2(0+1) = 2$ Graus de Liberdade.

Apenas uma falha ($k = n - 1$)

Neste caso é mais conveniente utilizar-se a equação 4.5 para calcular o valor aproximado,

$$n_1 = \frac{\chi_{1-C,4}^2}{2(1-R_1)} \quad (4.16)$$

com $\nu = 2(r+1) = 2(1+1) = 4$ Graus de Liberdade, e a seguir calcular o valor exato a partir da equação 4.6, ou seja,

$$n_1(1-R_1).R_1^{n_1-1} + R_1^{n_1} \leq 1-C \quad (4.17)$$

onde n_1 é sempre um número inteiro.

4.1.4 Influência da Amostra na Confiabilidade

Aumentando-se a quantidade (n) dos Componentes da amostra, para um dado Nível (C) de Confiança e quantidade de falhas (sobreviventes), a Confiabilidade aumenta. Consequentemente, quanto maior o Nível de Confiança (C), para uma dada amostra (n), sem a ocorrência de falhas ($k = n$), menor o valor associado à Confiabilidade (R).

4.1.5 Relação entre a Duração dos Testes e Amostras

Admitindo-se uma Distribuição de Weibull, que apresenta uma grande variedade e aplicabilidade nos testes, na sua forma triparamétrica, para duas diferentes durações de teste (t_a, t_b), tem-se:

$$R_a = e^{-\left(\frac{t_a-t_i}{\alpha}\right)^\beta}, R_b = e^{-\left(\frac{t_b-t_i}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4.18)$$

onde a Vida Inicial (t_i), o Parâmetro de forma (β) e a Vida Característica (α) são iguais, pois são referidas a um mesmo componente e condições operacionais no teste. Da equação 4.7, resultam as condições para nenhuma falha ($r = 0$),

$$R_a \leq (1 - C)^{1/n_a}, R_b \leq (1 - C)^{1/n_b} \quad (4.19)$$

Igualando-se com as equações anteriores e aplicando-se o logaritmo em ambos os lados das relações, resulta:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_a} \cdot \ln(1 - C) &\geq -\left(\frac{t_a - t_i}{\alpha}\right)^\beta \\ \frac{1}{n_b} \cdot \ln(1 - C) &\geq -\left(\frac{t_b - t_i}{\alpha}\right)^\beta \end{aligned} \quad (4.20)$$

Dividindo-se ambas equações, segue que:

$$\frac{n_b}{n_a} \geq \left(\frac{t_a - t_i}{t_b - t_i}\right)^\beta \quad (4.21)$$

$$\text{ou } \frac{t_a - t_i}{t_b - t_i} \geq \left(\frac{n_b}{n_a}\right)^{1/\beta} \quad (4.22)$$

que correlaciona a quantidade (n) da amostra, para um dado Nível de Confiança (C), com a duração (t) dos testes (horas, ciclos, quilômetros, etc.). Esta influência pode ser verificada nas seguintes condições:

a) Tamanho da amostra (n)

- Um aumento de “ n ” reduz o tempo de teste (t);
- Uma diminuição de “ n ” amplia o tempo de teste (t);

b) Duração do teste (t)

- Um aumento de “ t ” reduz o tamanho da amostra (n);
- Uma diminuição de “ t ” amplia o tamanho da amostra (n);

Capítulo 5

Programa Computacional ATP

5.1 Objetivo do Programa

O Programa ATP (Accelerated Testing Program) consiste de cinco módulos principais, sendo que quatro efetuam os cálculos apresentados nos Capítulos 2, 3 e 4 e um manipula arquivos. Estes módulos são:

- **Ensaio Normal x Ensaio Acelerado** : tem por função a comparação da curva do Ensaio Normal com a do Ensaio Acelerado, através da Função Acelerante apresentada no Capítulo 2. Este módulo adicionalmente permite o cálculo da Taxa de Falha e do Parâmetro de Forma ,tanto do Ensaio Acelerado como do Ensaio Normal (para Ensaio Completos, Incompletos Unicensurados a Direita e Incompletos com Censura Múltipla, como apresentado no Capítulo 3), além da apresentação gráfica dos resultados.
- **Morte Súbita**: calcula a Taxa de Falha e o Parâmetro de Forma do produto em utilização real, através da metodologia apresentada no Capítulo 3, e apresenta graficamente os resultados obtidos.
- **Método do Sucesso**: calcula a Confiabilidade mínima de uma determinada amostra, ou o número mínimo de componentes de um lote para teste, através do método apresentado no Capítulo 4.
- **Ensaio de Arrhenius**: Calcula a Constante de posição (A) e o Fator de Proporcionalidade (B) da Equação de Arrhenius, através dos parâmetros e das temperaturas dos respectivos ensaios.
- **Deleta arquivos**: elimina os arquivos selecionados.

5.2 Estrutura do Programa

A Figura 5.1 apresenta o fluxograma do Programa ATP, o qual será apresentado em módulos.

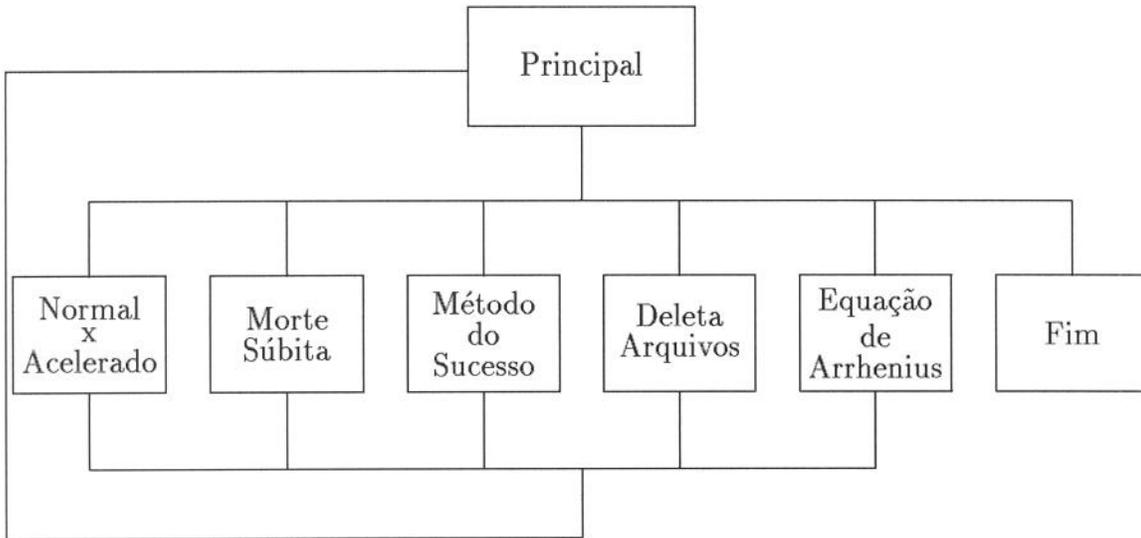


Figura 5.1: Fluxograma básico do Programa ATP

5.2.1 Principal

1. **Ensaio Normal x Ensaio Acelerado:** seleciona a rotina Ensaio Normal x Ensaio Acelerado.
2. **Teste da Morte-súbita:** seleciona a rotina Morte-súbita.
3. **Método do Sucesso:** seleciona a rotina Método do Sucesso.
4. **Deleta arquivo:** utilizado para deletar os arquivos selecionados pelo usuário.
5. **Equação de Arrhenius:** seleciona a rotina Equação de Arrhenius.
6. **Fim:** encerra o uso do Programa.

5.2.2 Módulo Ensaio Acelerado x Ensaio Normal

Menu 1

1. **Determinação do Parâmetros do Ensaio Normal :** calcula o Fator de Forma e a Taxa de Falha do Ensaio Normal através da entrada de dados via teclado. Inicialmente é fornecido o tamanho da amostra analisada e a quantidade de ocorrências (falhas ou suspensões) apresentadas. Em seguida digita-se o valor do deslocamento (ciclos, quilômetros, etc.) e o tipo de ocorrência. Através destes dados o Programa

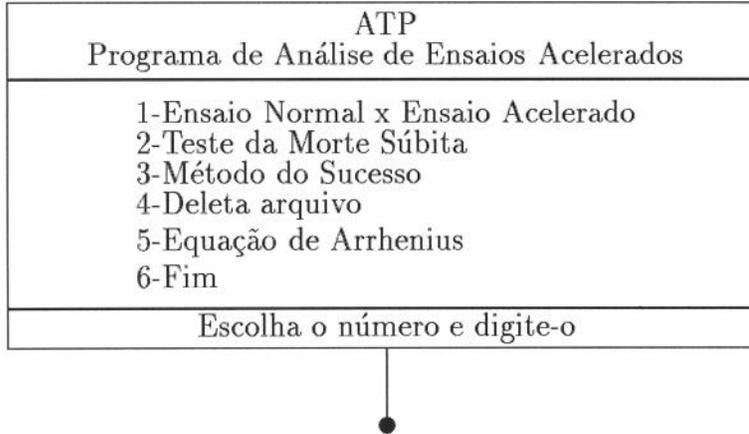


Figura 5.2: Menu de Seleção da Rotina Principal

organiza os deslocamentos em ordem crescente, calcula a Desconfiabilidade para cada falha (as suspensões servem apenas para auxiliar o cálculo do Incremento para as unidades em falha, como apresentado no Capítulo 3) e armazena-se esses dados em vetor. Uma subrotina de cálculo faz uma transformação de coordenadas e uma regressão linear (método dos mínimos quadrados) dos dados para calcular o Parâmetro de Forma, a Taxa de Falha e o Fator de Correlação dos dados da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= 1 - e^{-(\lambda_o \cdot x)^\beta} \\
 1 - F(x) &= e^{-(\lambda_o \cdot x)^\beta} \\
 Ln(1 - F(x)) &= -(\lambda_o \cdot x)^\beta \\
 Ln(-1 * Ln(1 - F(x))) &= \beta \cdot Ln(\lambda_o \cdot x) \\
 Ln(-1 * Ln(1 - F(x))) &= \beta \cdot Ln(\lambda_o) + \beta \cdot Ln(x)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

e a equação de reta,

$$Y = C_a \cdot X + C_l \tag{5.2}$$

Comparando-se as equações 5.1 e 5.2, resulta:

$$X = Ln(x) \tag{5.3}$$

$$Y = Ln(-1 * Ln(1 - F(x))) \tag{5.4}$$

$$C_a = \beta \tag{5.5}$$

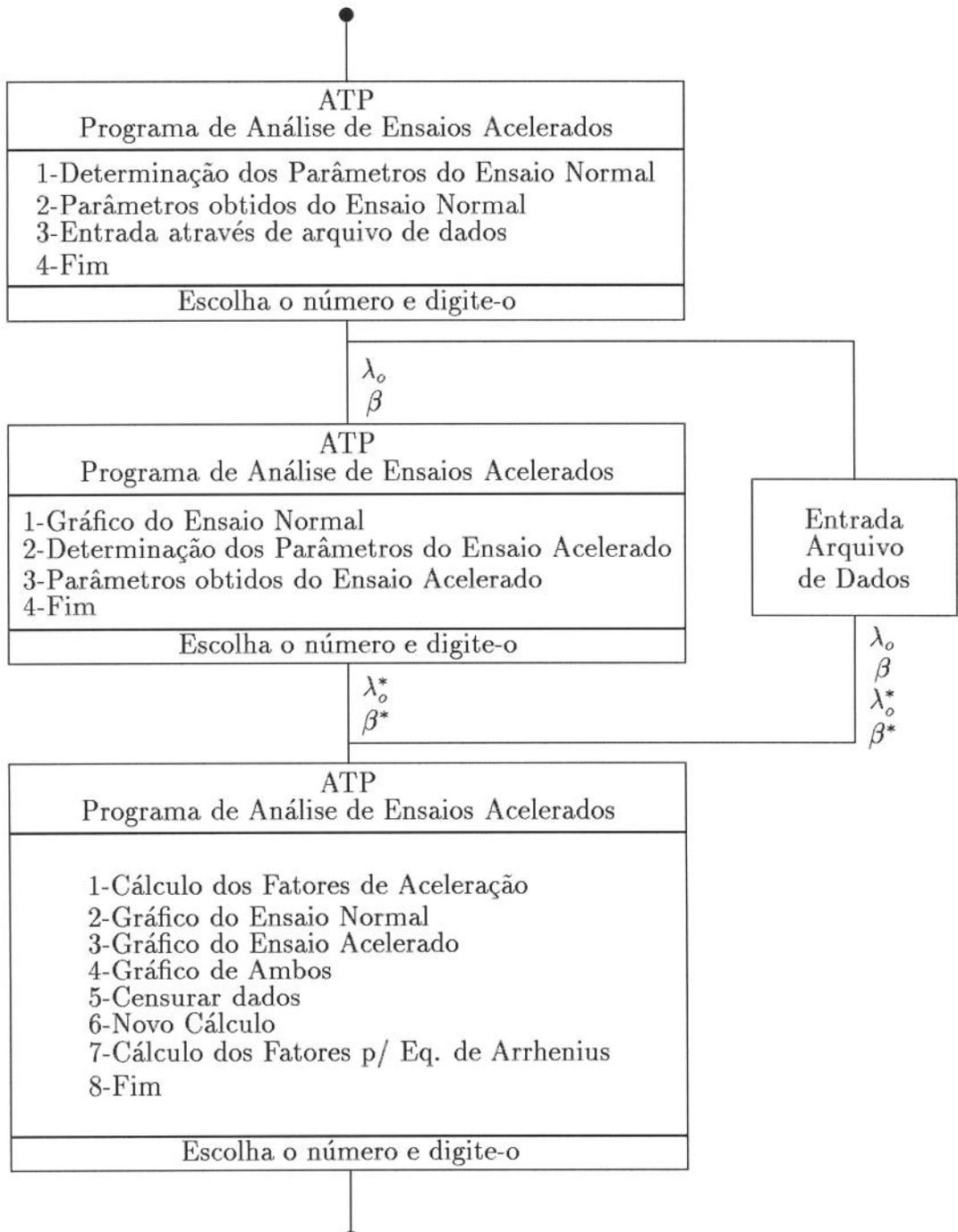


Figura 5.3: Fluxograma da rotina Ensaio Normal x Ensaio Acelerado

$$C_l = \beta.Ln(\lambda_o) \quad (5.6)$$

ou

$$\beta = C_a \quad (5.7)$$

$$\lambda_o = e^{\frac{C_l}{C_a}} \quad (5.8)$$

onde:

x e $F(x)$: Variável Genérica e Função Probabilidade de Falha (tais dados foram armazenados em um vetor, como descrito anteriormente);

X e Y : representam x e $F(x)$ no novo sistema de coordenadas (transformação realizada pela subrotina de cálculo);

C_a e C_l : Coeficiente Angular e Linear da reta no sistema de coordenadas XY ;

β e λ_o : Os Valores do Parâmetro de Forma e Taxa de Falha característica (obtidos através da equações 5.7 e 5.8).

2. **Parâmetros do Ensaio Normal:** Os valores do Parâmetro de Forma e da Taxa de Falha característica do Ensaio Normal é fornecido via teclado.
3. **Entrada através de Arquivo de Dados:** Os Dados do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado são fornecidos através de um arquivo de dados.
4. **Fim:** encerra a utilização do programa.

Menu 2

1. **Gráfico Ensaio Normal:** Apresenta os dados do Ensaio Normal graficamente.
2. **Determinação dos Parâmetros do Ensaio Acelerado:** Rotina equivalente à do Menu 1 para Ensaio Normal.
3. **Parâmetros do Ensaio Acelerado:** O Parâmetro de Forma e a Taxa de Falha do Ensaio Acelerado é fornecido via teclado.
4. **Fim:** Encerra a utilização do programa.

Menu 3

1. **Cálculo dos Fatores de Aceleração :** Apresenta o Parâmetro de Forma, a Taxa de Falha e o Fator de Correlação do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado, além dos Fatores de Aceleração n e K , (apresentados no Capítulo 2).
2. **Gráfico do Ensaio Normal:** Apresenta graficamente os dados do Ensaio Normal.
3. **Gráfico Ensaio Acelerado:** Apresenta graficamente os dados do Ensaio Acelerado.

4. **Gráfico de Ambos:** Apresenta graficamente os dados do Ensaio Normal e Acelerado.
5. **Censurar dados:** Fornecido o valor da Censura, o programa recalcula o valor da Taxa de Falha, do Parâmetro de Forma e do Fator de Correlação para o Ensaio Acelerado, onde se despreza os valores da Desconfiabilidade acima do valor de Censura para este ensaio.
6. **Novo Cálculo:** Retorna para o início do Programa.
7. **Cálculo dos fatores para a Equação de Arrhenius:** Calcula o Fator de proporcionalidade (B) e a Constante de Posição (A) (para a Equação de Arrhenius) dos Ensaio através das temperaturas dos ensaios (como apresentado no Capítulo 2).
8. **Fim:** encerra a utilização do programa.

5.2.3 Morte Súbita

Este módulo permite a entrada de dados através do Menu 1.

Menu 1

Inicialmente é fornecido a quantidade de grupos, o tamanho de cada grupo e o valor da variável (tempo, ciclos, quilômetros, etc.) de cada grupo, até a primeira falha. A seguir a rotina de cálculo (apresentada no Módulo Ensaio Normal x Ensaio Acelerado) calcula a Taxa de Falha e o Parâmetro de Forma da Curva de Morte-Súbita, e através do método apresentado no Capítulo 3, obtem-se a Taxa de Falha e o Parâmetro de Forma do equipamento em uso normal (real).

Menu 2

1. **Cálculo dos Parâmetros do Ensaio :** Apresenta os valores do Parâmetro de Forma, da Taxa de Falha e do fator de correlação do Ensaio Acelerado, bem como os Parâmetros do equipamento em condições de uso real, além dos Fatores de Aceleração n e K , apresentados no Capítulo 2.
2. **Gráfico do Ensaio:** Apresenta graficamente a Curva de Morte-Súbita e a Curva Calculada para vida normal.
3. **Novo Cálculo:** Retorna para o início do Programa.
4. **Fim:** encerra a utilização do programa.

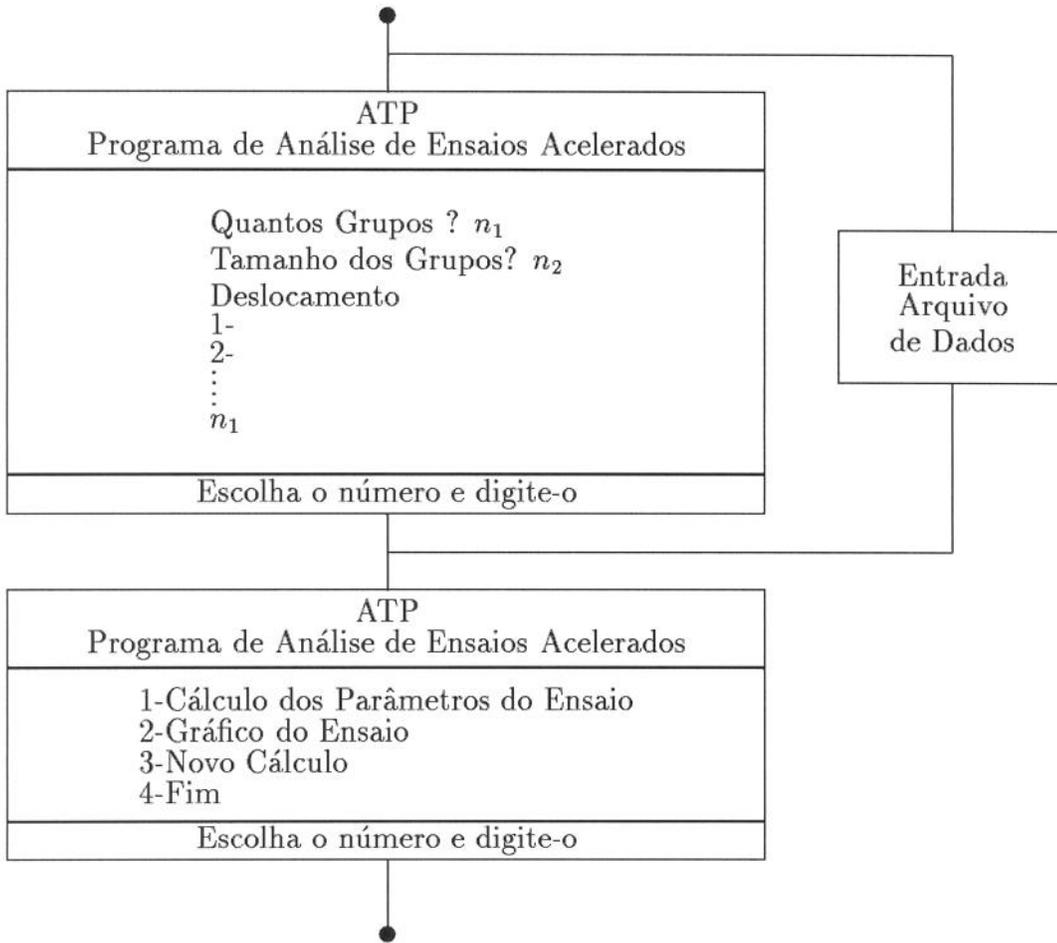


Figura 5.4: Fluxograma da rotina Morte-súbita

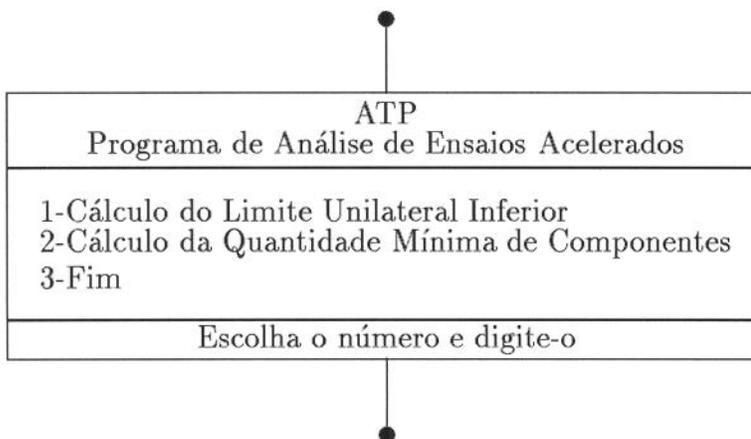


Figura 5.5: Fluxograma da rotina Método do Sucesso

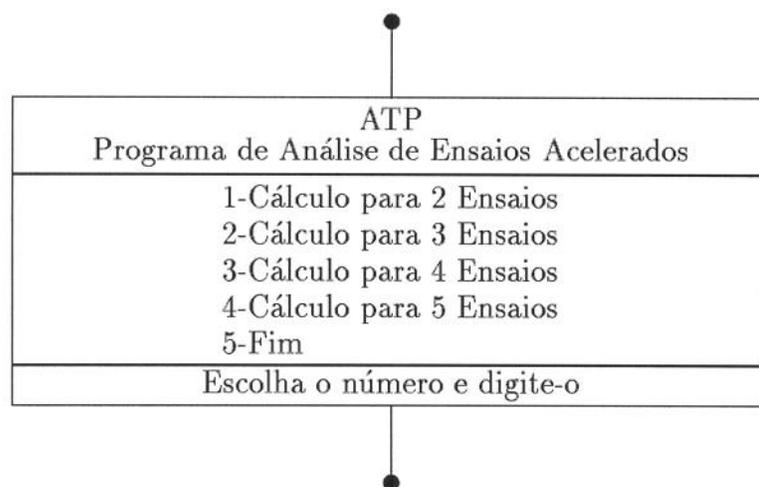


Figura 5.6: Fluxograma da rotina Equação de Arrhenius

5.2.4 Método do Sucesso

- Cálculo do Limite Unilateral Inferior:** Calcula a Confiabilidade mínima (através da metodologia apresentada no Capítulo 4) através do tamanho da amostra, do Nível de Confiança e da quantidade de falhas obtida no ensaio. Este cálculo é baseado na equação 4.3 e a para a solução numérica deste problema, utiliza-se um algoritmo de convergência do tipo Newton-Rahpson.
- Cálculo da Quantidade Mínima de Componentes :** Calcula o tamanho mínimo da amostra, através da Confiabilidade, Nível de Confiança e Confiabilidade mínima desejados (calculado através da metodologia apresentada no Capítulo 4 e utilizando a metodologia utilizada no item anterior).
- Fim:** encerra a utilização do programa.

5.2.5 Equação de Arrhenius

Este módulo permite o cálculo de uma Equação de Arrhenius para até 5 ensaios. A rotina de cálculo faz todas as combinações possíveis entre os ensaios e calcula o Fator de Proporcionalidade B para cada combinação e tira a média, caso o número de ensaios seja maior que 2; em seguida calcula o valor médio da Constante de Posição A. terminado o cálculo o programa apresenta os dados de entrada, juntamente com a taxas de falhas obtidas através da equação de Arrhenius.

Capítulo 6

Estudo de Casos

6.1 Predominância de Falhas

6.1.1 Ensaio Completo

Uma transmissão em uso normal possui uma Taxa de Falha $\lambda = 250.10^{-6}$ [1/h] e um Parâmetro de Forma $\beta = 1$. Um Ensaio Acelerado realizado com 8 peças proporcionou os seguintes resultados:

Falha	1	2	3	4	5	6	7	8
Tempo (h)	41	53	69	80	85	93	116	132

Tabela 6.1: Tabela das Falhas no Ensaio Acelerado

Através do Programa ATP calculou-se os parâmetros do Ensaio e os resultados estão nas Figura 6.1 e 6.2. Analisando-se a equação 2.25 tem-se que a intersecção das curvas ocorre em:

$$x_l = [K \cdot \frac{\beta}{\beta^*}]^{1/n} = 11,9$$

Assim, como $n < 0$ temos que o intervalo de validade desta análise é $x > 11,9$ horas.

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados
Parâmetros do Ensaio Normal Taxa de Falha: 250.000×10^{-6} Parâmetro de Forma : 1.000
Dados do Ensaio Normal.Pressione qualquer tecla para continuar

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados	
Variável(tempo,ciclos, etc)	Desconfiabilidade
1 41	8.33
2 53	20.24
3 69	32.14
4 80	44.05
5 85	55.95
6 93	67.86
7 116	79.76
8 132	91.67
Pressione qualquer tecla para continuar	

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados	
Parâmetros do Ensaio Normal Taxa de falha: 250.00×10^{-6} Parâmetro de Forma: 1.000 Correlação: 1.000	
Parâmetros do Ensaio Acelerado Taxa de falha: 10596.27×10^{-6} Parâmetro de Forma: 2.805 Correlação: 0.995	
Fatores de Aceleração Fator k : 0.032 Fator n : -1.805	
Pressione qualquer tecla para continuar	

Figura 6.1: Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP, para um Ensaio Completo

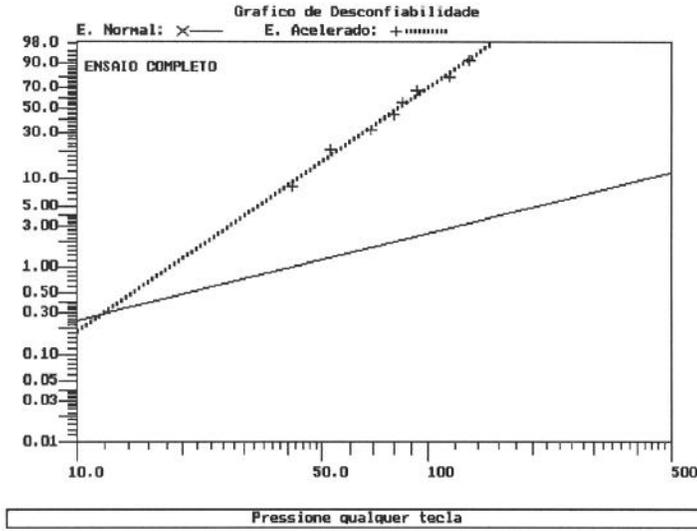


Figura 6.2: Gráfico do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado

6.1.2 Ensaio Incompleto, Unicensurado à Direita

Uma transmissão em uso normal possui uma Taxa de Falha $\lambda = 7500 \cdot 10^{-6}$ [1/h] e um Parâmetro de Forma $\beta = 5$. Um Ensaio Acelerado realizado com 10 peças resultou em 8 falhas, relacionadas na tabela 6.1.2.

Falha	1	2	3	4	5	6	7	8
Tempo (h)	41	53	69	80	85	93	116	132

Tabela 6.2: Tabela das Falhas do Ensaio Acelerado

Através do Programa ATP calculou-se os parâmetros do Ensaio e os resultados estão nas Figuras 6.3 e 6.4. Analisando-se a equação 2.25 tem-se que a intersecção das curvas ocorre em:

$$x_l = \left[K \cdot \frac{\beta}{\beta^*} \right]^{1/n} = 161,7$$

Assim, como $n > 0$ temos que o intervalo de validade desta análise é $x < 161,7$ horas.

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados
Parâmetros do Ensaio Normal Taxa de falha: 7500.000×10^{-6} Fator de forma : 5.000
Dados do Ensaio Normal.Pressione qualquer tecla para continuar

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados	
Variável(tempo,ciclos, etc)	Desconfiabilidade
1	41
2	53
3	69
4	80
5	85
6	93
7	116
8	132
Pressione qualquer tecla para continuar	

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados	
Parâmetros do Ensaio Normal Taxa de falha: 7500.00×10^{-6} Parâmetro de Forma: 5.000 Correlação: 1.000	
Parâmetros do Ensaio Acelerado Taxa de falha: 9067.95×10^{-6} Parâmetro de Forma: 2.514 Correlação: 0.990	
Fatores de Aceleração Fator k : 155645.197 Fator n : 2.486	
Pressione qualquer tecla para continuar	

Figura 6.3: Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP

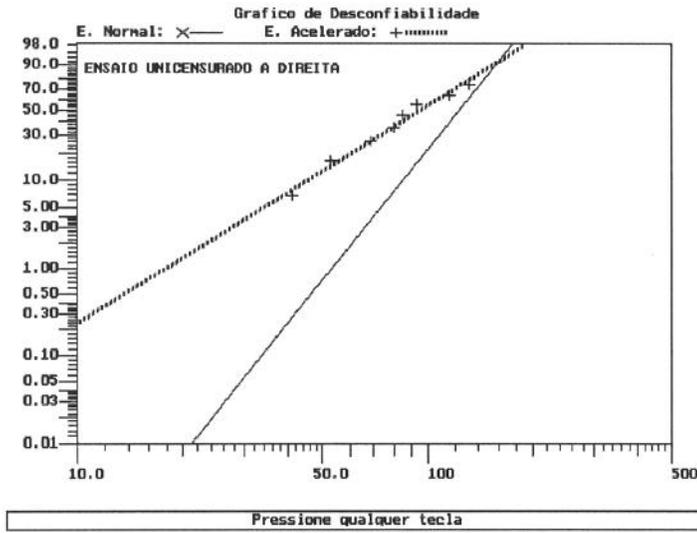


Figura 6.4: Gráfico do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado

6.1.3 Ensaio Incompleto, com Censura Múltipla

Uma transmissão em uso normal possui uma Taxa de Falha $\lambda = 300 \cdot 10^{-6}$ [1/h] e um Parâmetro de Forma $\beta = 1,937$. Um Ensaio Acelerado realizado com 10 peças resultou em 7 falhas, relacionadas na tabela 6.3, e 3 suspensões, relacionadas na tabela 6.4.

Falha	1	2	3	4	5	6	7
Tempo (h)	33	52	76	94	112	150	152

Tabela 6.3: Tabela das Falhas do Ensaio Acelerado

Suspensão	1	2	3
Tempo (h)	17	58	114

Tabela 6.4: Tabela das Suspensões do Ensaio Acelerado

Através do Programa ATP calculou-se os parâmetros do Ensaio e os resultados estão nas Figuras 6.5 e 6.6. Como $n = 0$ temos que o intervalo de validade desta análise é $\forall x \in \mathfrak{R}$, ou seja, corresponde a retas paralelas.

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados
Parâmetros do Ensaio Normal Taxa de falha: 300.000×10^{-6} Fator de forma : 1.937
Dados do Ensaio Normal.Pressione qualquer tecla para continuar

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados		
Variável(tempo,ciclos, etc)		Desconfiabilidade
		Suspensão
1	17	7.69
2	33	18.27
3	52	Suspensão
4	58	30.36
5	76	42.44
6	94	54.53
7	112	Suspensão
8	114	70.65
9	150	86.76
10	152	
Pressione qualquer tecla para continuar		

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados	
Parâmetros do Ensaio Normal Taxa de falha: 300.00×10^{-6} Parâmetro de Forma: 1.937 Correlação: 1.000	
Parâmetros do Ensaio Acelerado Taxa de falha: 8124.32×10^{-6} Parâmetro de Forma: 1.937 Correlação: 0.990	
Fatores de Aceleração Fator k : 595.785 Fator n : 0.000	
Pressione qualquer tecla para continuar	

Figura 6.5: Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP

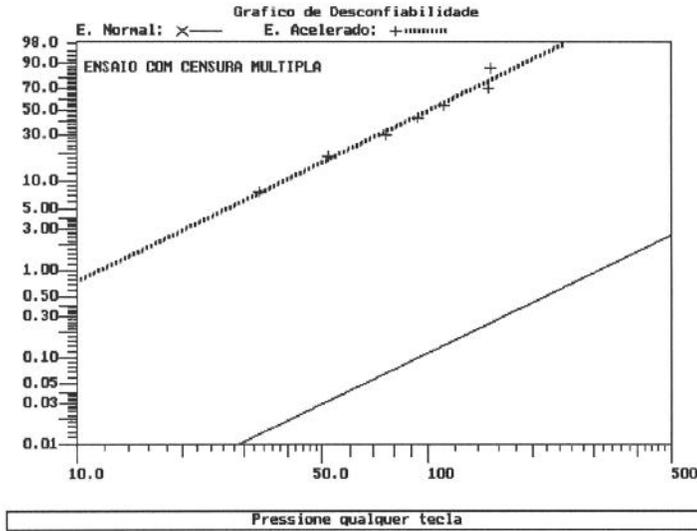


Figura 6.6: Gráfico do Ensaio Normal e do Ensaio Acelerado

6.1.4 Ensaio utilizando-se a Equação de Arrhenius

Um grupo de componentes, submetido a três temperaturas diferentes, forneceu os seguintes resultados, apresentados na Figura 1.4.

Amostra	Taxa de Falha [1/h]	Parâmetro de Forma	Temperatura do Ensaio (C)	Temperatura do Ensaio (K)
1	1921.78E-6	2.920	78	351
2	4181.55E-6	1.581	98	371
3	9543.88E-6	0.995	120	393

Tabela 6.5: Tabela com dados dos Ensaios

Com base nos dados da tabela e usando-se o Programa ATP, obteve-se os resultados apresentados na Figura 6.7.

6.1.5 Ensaio de Morte-Súbita

Uma amostra com 60 ônibus é dividida em 10 grupos de 6 veículos e as quilometragens das primeiras falhas observadas em cada grupo são apresentadas na Tabela 6.6.

Através do Programa ATP calculou-se os parâmetros do Ensaio e os resultados estão nas Figuras 6.8 e 6.9. Como $n = 0$ temos que o intervalo de validade desta análise é $\forall x \in \mathcal{R}$.

ATP Programa de Análise de Ensaio Acelerados			
Taxa de Falha (x 1.0E-6)	Parametro de Forma	Temperatura do Ensaio (C)	Taxa de Falha (x 1.0E-6) Calc.
1921.78	2.920	78.0	1901.88
4181.55	1.581	98.0	4269.30
9543.88	0.995	120.0	9448.53
Comparativo	Fator K	Fator n	Fator B
1 - 2	8025.43	1.339	5061.89
1 - 3	284349.10	1.925	5263.67
2 - 3	35.43	0.586	5469.06
Media do Fator A : 6215.01		Media do Fator B: 5264.871	
Pressione qualquer tecla para continuar			

Figura 6.7: Dados dos Ensaio

ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados		
Variável(tempo,ciclos, etc)		Desconfiabilidade
1	9876.0	6.73
2	17819.0	16.35
3	24913.0	25.96
4	30125.0	35.58
5	36047.0	45.19
6	41718.0	54.81
7	48026.0	64.42
8	60820.0	74.04
9	71625.0	83.65
10	92104.0	93.27
Pressione qualquer tecla para continuar		

ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Parâmetros do Ensaio Normal Taxa de falha: 6.85×10^{-6} Parâmetro de Forma: 1.657 Correlação: 1.000 Parâmetros do Ensaio Acelerado Taxa de falha: 20.16×10^{-6} Parâmetro de Forma: 1.657 Correlação: 0.999 Fatores de Aceleração Fator k : 5.984 Fator n : 0.000
Pressione qualquer tecla para continuar

Figura 6.8: Telas com dados e resultados, calculados pelo programa ATP

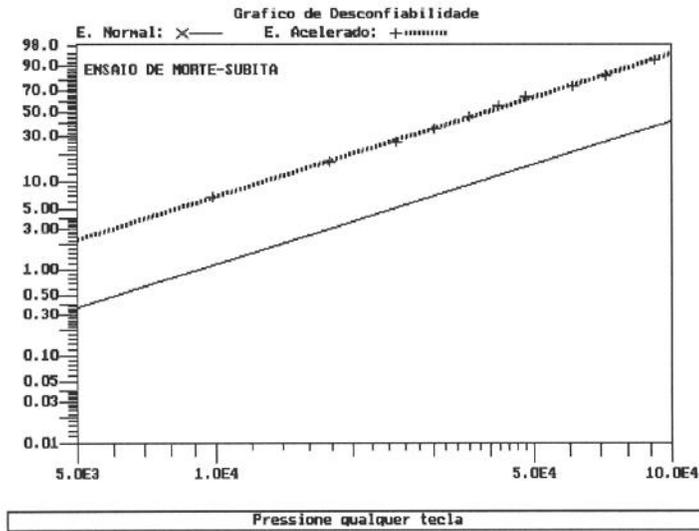


Figura 6.9: Gráfico da Curva Normal e da Curva de Morte-Súbita

6.2 Predominância de Suspensões

6.2.1 Método do Sucesso

6.2.2 Cálculo da Confiabilidade Mínima de uma Amostra

Para uma amostra de 20 componentes, calcular a Confiabilidade Mínima com um Nível de Confiança de 90 %, considerando-se 3, 2, 1 e nenhuma falha. Os resultados são apresentados na Figura 6.10.

6.2.3 Cálculo do Tamanho Mínimo da Amostra

Determinar o Tamanho Mínimo da amostra para obter-se uma Confiabilidade de 90 % com um Nível de Confiança de 90 %, considerando-se 3, 2, 1 e nenhuma falha. Os resultados são apresentados na Figura 6.11.

Falha	Quilometragem
1	9876
2	17819
3	24913
4	30125
5	36047
6	41718
7	48026
8	60820
9	71625
10	92104

Tabela 6.6: Tabela das Falhas nos Grupos

ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Tamanho do Lote : 20 Número de Falhas : 0 Nível de Confiança : 90 % Limite Unilateral Inferior: 89.125094 %
Aperte qualquer tecla para continuar

ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Tamanho do Lote : 20 Número de Falhas : 1 Nível de Confiança : 90 % Limite Unilateral Inferior: 81.902473 %
Aperte qualquer tecla para continuar

ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Tamanho do Lote : 20 Número de Falhas : 2 Nível de Confiança : 90 % Limite Unilateral Inferior: 75.523468 %
Aperte qualquer tecla para continuar

ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Tamanho do Lote : 20 Número de Falhas : 3 Nível de Confiança : 90 % Limite Unilateral Inferior: 69.581319 %
Aperte qualquer tecla para continuar

Figura 6.10: Telas do Programa ATP para o Método do Sucesso

ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Nível de Confiabilidade : 90 % Número de Falhas : 0 Nível de Confiança : 90 % Quantidade de Componentes no Lote : 22
Aperte qualquer tecla para continuar
ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Nível de Confiabilidade : 90 % Número de Falhas : 1 Nível de Confiança : 90 % Quantidade de Componentes no Lote : 38
Aperte qualquer tecla para continuar
ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Nível de Confiabilidade : 90 % Número de Falhas : 2 Nível de Confiança : 90 % Quantidade de Componentes no Lote : 52
Aperte qualquer tecla para continuar
ATP Programa de Análise de Ensaios Acelerados
Nível de Confiabilidade : 90 % Número de Falhas : 3 Nível de Confiança : 90 % Quantidade de Componentes no Lote : 65
Aperte qualquer tecla para continuar

Figura 6.11: Telas do Programa ATP para o Método do Sucesso

Capítulo 7

Conclusão

O presente trabalho, apresenta uma nova metodologia para o cálculo de ensaios acelerados, a qual correlaciona todas as técnicas de aceleração pesquisadas (apresentada no Capítulo 1). A dedução e análise desta nova metodologia, bem como o intervalo de validade estão contidos no Capítulo 2.

Criou-se uma referência bibliográfica para os principais tipos de degradação e dos tipos de testes, com o intuito de facilitar a preparação e análise de ensaios acelerados, presentes no Capítulo 1.

Uma análise de tipos de ensaios foram expostos no Capítulo 3, onde são apresentados os ensaios com predominância de Falhas, e no Capítulo 4, o correspondente aos ensaios com predominância de Suspensões.

Paralelamente com estes estudos desenvolveu-se um programa computacional para o cálculo dos parâmetros dos Ensaios e apresentou-se uma breve descrição do seu algoritmo no Capítulo 5. A utilização deste programa é apresentado no Capítulo 6, onde são apresentados os problemas resolvidos através do programa.

A nova metodologia criada se mostrou interessante por unificar todos os tipos de Funções Acelerantes estudadas e por apresentar um aumento na precisão dos resultados. Assim sendo, o uso desta metodologia juntamente com a distribuição de *Weibull* nos permite um campo muito grande para a sua utilização prática.

Capítulo 8

Sugestões para novos trabalhos

- Eliminar as falhas de programação existentes no programa.
- Criação de um grupo de rotinas de cálculo, utilizadas no Programa ATP, para permitir a elaboração de novos programas com maior facilidade.
- Otimização do Programa ATP e elaboração de uma versão para o ambiente gráfico Windows e outra para o sistema operacional UNIX.
- Melhorar a rotina da Equação de Arrhenius, de modo que esta possa manipular dados experimentais para mais do que dois ensaios de campo.
- Implementar a rotina gráfica para a rotina Método do Sucesso.

Bibliografia

- [1] ABNT NBR 6742 (Janeiro 1987), "*Utilização da Distribuição de Weibull para interpretação dos ensaios de durabilidade por fadiga*", ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [2] ABNT NBR 9321 (Abril 1986), "*Cálculo de estimativas por pontos e limites de confiança resultante de ensaios de determinação da confiabilidade de equipamentos*", ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [3] ASTM STP 648, Hoepfner, D. W. (1978), "*Fatigue Testing Weldments*", American Society for Testing and Materials, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.
- [4] ASTM STP 738 (1981), "*Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis*", American Society for Testing and Materials, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.
- [5] ASTM STP 748 (1981), "*Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*", American Society for Testing and Materials, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.
- [6] Bompas-Smith, J. H. (1973), "*Mechanical Survival: the use of reliability data*", McGraw-Hill Book Company (UK) limited, Maidenhead, Berkshire, England.
- [7] Boothroyd, G. (1975), "*Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*", MacGraw-Hill, New York.
- [8] DePaul, D. J., Ed. (1957), "*Corrosion and Wear Handbook*", Emitido por Naval Reactors Branch Division of Reactor Development, U. S. Atomic Energy Comm., McGraw-Hill, New York.
- [9] Frieman, S. W. (1980), "*Fracture Mechanism of Glass*", em Glass Science and Technology Vol. 5, "*Elasticity and Strength in Glasses*", D. R. Ullman e N. J. Kreidl, Eds., pp 21-78, Academic Press, New York.
- [10] Goldhoof, R. M. e outros (1979), "*Development of a Standart Methodology for Correlation and Extrapolation of Elevate Temperature Creep and Rupture Data*", EPRI FP-1062, Project 638-1 Relatório Final, Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA.

- [11] Goldhoof, R. M.; Hanh, G. J. (1968), *“Correlation and Extrapolation of Creep-Rupture Data of Several Steels and Superalloys Using Time-Temperature Parameters”*, ASM Publ. No. D8-100, Amer. Soc. for Metals, Metals Park, OH 44073.
- [12] Graham, J. A. (1968), *“Fatigue Design Handbook”*, Society of Automotive Engineers, Inc., 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096.
- [13] Hahn, G. J. (1979), *“Statistical Methods for Creep, Fatigue and Fracture Data Analysis”*, Journal of Engineering Materials and Technology 101, 344-348.
- [14] Jensen, F.; Peterson, N. E. (1982), *“Burn-in: An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-in Procedures”*, Wiley, New York.
- [15] Meeker, William Q.; Hahn, Gerald J. (1985), *“How to Plan An Accelerated Life Test - Some Practical Guidelines”*, American Society for Quality Control, 230 West Wells Street, Milwaukee, Wisconsin 53202.
- [16] MIL-HDBK-344 (27/10/1986), *“Environmental Stress Screening - Electronic Equipment”*, disponível em Naval Publications and Form Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120, (215)697-3321.
- [17] MIL-STD-781 C (21/10/1977), *“Reliability Design Qualification and Production Acceptance Tests: Exponential Distribution”*, disponível em Naval Publications and Form Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120, (215)697-3321.
- [18] MIL-STD-810D (19/07/1983), *“Environmental Test Methods and Engineering Guidelines”*, disponível em Naval Publications and Form Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120, (215)697-3321.
- [19] MIL-STD-883 (29/11/1985), *“Test Methods and Procedures for Microelectronics”*, disponível em Naval Publications and Form Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120, (215)697-3321.
- [20] MIL-STD-2164 (05/04/1985), *“Environmental Stress Screening Process for Electronic Equipments”*, disponível em Naval Publications and Form Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120, (215)697-3321.
- [21] Moura, Eduardo C. (1991), *“How to determine sample size and estimate failure rate in life testing”*, American Society for Quality Control, 611 East Wisconsin Av., Milwaukee, Wisconsin 53202.
- [22] Nelson, Wayne (1990), *“ACCELERATED TESTING Statistical Models, Test Plans and Data Analyses”*, Wiley Interscience Pub., New York.
- [23] Peterson, M.; Winer, W., Eds. (1980), *“Wear Control Handbook”*, ASME Order Dept., 22 Law Dr., P.O. Box 2300, Fairfield, NJ 07007, (201)882-1167, Cat. No. G00169.

- [24] Rabinowitz, E (1988), *"Friction and Wear of Metals"*, 2nd. ed., Wiley, New York.
- [25] RADC TR-86-139 (Aug. 1986), *"RADC Guide to Enviromental Stress Screening"*, RADC, Griffiss AFB, NY 13441.
- [26] Rychtera, M. (1985), *"Atmosferic Deterioration of Technologic Materials, a Technoclimatic Atlas, Part A: Africa"* Academia (Prague) e co-publicado por Elsevier Sciece Publ. Co., Amsterdam, 225 pp.
- [27] Schlagheck, J. G. (1988), *"Methodology and Techniques of Environmental Stress Screening"*, Tustin Technical Institute, Inc., 22 E. Los Olivos St., Santa Barbara, CA 93105, (805)682-7171, Dr. Wayne Tustin.
- [28] Skelton, R. P. (1982), *"Fatigue at High Temperature"*, Elsevier Science Publ. Co., New York.
- [29] Tustin, W. (1986), *"Recipe for Reliability: Shake and Bake"*, IEEE Spectrum 23, no. 12, 37-42.
- [30] Tustin, W.; Mercado, R. (1984), *"Random Vibration in Perspective"*, Tustin Technical Institute, Inc., 22 E. Los Olivos St., Santa Barbara, CA 93105, (805)682-7171, Dr. Wayne Tustin.
- [31] U. S. Navy Document P-9492 (May 1979), *"Navy Manufacturing Screening Program"*, disponível em Naval Publications and Form Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120, (215)697-3321.
- [32] Uhlig, H. H.; Revie, R. W. (1985), *"Corrosion and Corrosion Control"*, Wiley-Interscience, 458 pp.