

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE MATEMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA

Confiabilidade: Estimativas do Tempo Médio de Vida de Motores Diesel

Autora: Nara Regina Spall
Orientadora: Liane Werner

Monografia apresentada para
a obtenção do Título de
Bacharel em Estatística

Porto Alegre, dezembro de 1999

***Dedico aos meus pais, por tudo que significam para mim,
pelo amor incondicional,
pela doação constante,
pelo incentivo nesta caminhada.
Obrigada.***

“O conceito de probabilidade entra como um dos primeiros passos da atividade científica, em virtude do fato de que nenhuma observação é absolutamente exata. Acho que probabilidade é um conceito muito mais fundamental que causalidade, se numa causa concreta existem relações de causa-efeito, poderia somente estar decidido para aplicar as normas de probabilidade para as observações.”

Max Born

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à Maxion International Motores S.A. pela oportunidade concedida para a realização deste estudo na empresa.

Agradeço à José Anibal, Willian Silva de Abreu e a todos os funcionários que de alguma forma contribuíram para a coleta de dados. Em especial, à Antônio Augusto Pires da Silva pelo importante auxílio na condução dos trabalhos.

À amiga e professora Liane Werner pela orientação, não somente neste trabalho mas como no decorrer do curso.

Ao meu namorado Rafael Cassales Martins por todo incentivo e ajuda que sempre soube me dar, quando mais precisei.

Não posso deixar de agradecer aos meus irmãos, Éder e Marcelo, pela força dada e por terem acreditado que eu chegaria ao fim de mais uma etapa.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	CONFIABILIDADE.....	15
2.1	UMA BREVE HISTÓRIA DA CONFIABILIDADE	15
2.2	DEFINIÇÃO DE CONFIABILIDADE	16
2.3	MEDIDAS DE CONFIABILIDADE.....	18
2.3.1	<i>Função Confiabilidade</i>	18
2.3.2	<i>A Taxa de Falha e Função Risco</i>	20
2.3.3	<i>Vida Média</i>	24
2.3.3.1	MTBF e Confiabilidade	25
2.4	AMOSTRAGEM DE VIDA.....	27
2.5	ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS	32
2.6	MÉTODOS PARA ESTIMAR OS PARÂMETROS.....	34
2.6.1	<i>Método Gráfico: Papéis de Probabilidade</i>	34
2.6.2	<i>Método dos Momentos</i>	35
2.6.3	<i>Método da Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood Estimate – MLE)</i>	36
2.6.4	<i>Estimador de Kaplan-Meier</i>	39
2.7	PRINCIPAIS DISTRIBUIÇÕES DE VIDA	42
2.7.1	<i>Distribuição Normal</i>	43
2.7.2	<i>Distribuição Lognormal</i>	44
2.7.3	<i>Distribuição Exponencial</i>	46
2.7.4	<i>Distribuição Gama</i>	47
2.7.5	<i>Distribuição Weibull</i>	49
2.8	TESTES ACELERADOS DE SOBREVIDA.....	51
2.8.1	<i>Modelos para a Análise de Testes Acelerados</i>	53

3	ESTUDO DE CASO.....	55
3.1	HISTÓRICO DA EMPRESA.....	55
3.2	DESCRIÇÃO DO MOTOR	59
3.3	ANÁLISE DOS DADOS DE TESTES NOS DINAMÔMETROS	61
3.4	ANÁLISE DOS DADOS DE GARANTIA.....	66
3.5	ANÁLISE DOS DADOS DE CAMPO.....	72
3.6	COMPARAÇÕES	77
4	PROPOSIÇÃO DE MÉTODO.....	79
5.	CONCLUSÕES.....	84
6.	ANEXOS	89
	ANEXO A – RELAÇÃO DAS UNIDADES DE UM MOTOR BÁSICO HS	90
	ANEXO B – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL AOS DADOS DO TESTE DE DINAMÔMETRO.....	91
	ANEXO C – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL AOS DADOS DO TESTE DE DINAMÔMETRO	92
	ANEXO D – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO GAMA AOS DADOS DE GARANTIA.....	93
	ANEXO E – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL AOS DADOS DE GARANTIA.....	94
	ANEXO F – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL AOS DADOS DE GARANTIA	95
	ANEXO G – ESTIMATIVA DOS MOTORES MONTADOS EM 1997 E QUE FALHARAM NO MESMO ANO.....	96
	ANEXO H – QUILOMETRAGEM ESTIMADA DOS MOTORES CENSURADOS.....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
	GLOSSÁRIO.....	102

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1: Vida útil em t horas.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 2.2: $L(x_1, x_2 / \lambda)$</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 3.1: Resultados dos testes em dinamômetros</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 3.2 : Vendas ocorridas de 1997 à 1999 e atendimento das falhas nos anos de 1998/1999.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 3.3: Comparativo dos resultados dos dados de teste e de campo</i>	<i>78</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1: Relação entre F(t) e R(t).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.2: Curva da Banheira</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.3: Comportamentos usuais da função risco h(t), comportamentos elétricos e mecânicos.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.4: Curva de Confiabilidade.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.5: Gráfico da Função de Verossimilhança.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.6: Curvas da Distribuição Normal Padrão</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.7: Curvas da Distribuição Lognormal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2.8: Curvas da Distribuição Exponencial com $\lambda = 4$</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.9: Curvas da Distribuição Gama Padrão com $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 2$.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2.10: Curvas da Distribuição Weibull com parâmetros $\eta=1, \gamma=0, \beta=0,5, \beta=1, \beta=3$</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.1: Motor Hight Speed</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.2: Motor básico HS em duas fases de montagem.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.3: Papel de probabilidade exponencial referente ao teste em dinamômetros.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3.4: Papel de probabilidade weibull referente ao teste em dinamômetros.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.5: Papel de probabilidade exponencial referente aos dados de garantia</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.6: Papel de probabilidade weibull referente aos dados de garantia.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.7: Papel de probabilidade weibull referente a análise aos dados de campo.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.8: Função de confiabilidade dos dados de campo.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.9: Função de distribuição acumulada dos dados de campo.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.10: Taxa de falhas dos dados de campo.....</i>	<i>77</i>

Resumo

Esta monografia descreve um assunto que deve ser tratado com muita seriedade pelas empresas que tem interesse em manter seus clientes. O assunto em questão é a confiabilidade.

Para tanto, são avaliadas estimativas de tempo médio de vida de produtos. Além disso, apresenta uma proposta de metodologia da coleta de dados para estudos de confiabilidade, tanto na área de qualificação do produto quanto nos dados de cliente final.

É utilizado como subsídio para demonstrar as técnicas estatísticas um estudo de caso realizado na Maxion International Motores S.A. no qual estima o tempo médio de vida dos motores básicos *High Speed*.

Abstract

This monograph is about a subject that should be taken very seriously by the companies that would like to keep their customers. The subject is reliability.

To do that, the product's lifetime average is evaluated and, besides, it shows a methodological proposal of data acquisition for reliability study in the product qualification area and in the final customer data.

It's used as an aid to demonstrate the statistical techniques for a case study made at Maxion International Motores S.A., in which the lifetime average of High Speed basic engines was evaluated.

1. Introdução

Um produto confiável é aquele que realiza suas funções quando requerido, além do período pré-estabelecido de tempo para o uso. Confiabilidade é uma característica de qualidade que representa um dos principais fatores de aumento na demanda. Se um cliente fosse entrevistado em uma pesquisa de *marketing* sobre este assunto, ele diria simplesmente: “Quero comprar produtos que trabalhem corretamente dia após dia quando aperto o botão”.

Assim, reunindo requisitos de confiabilidade exigida, têm-se uma maior procura por produtos modernos de alta tecnologia. Compradores que uma vez compravam em produtos onde primeiramente haviam inovação ou simplesmente chamavam a atenção, agora concentram suas compras em produtos semelhantes porém, operam com confiabilidade.

Um estudo de confiabilidade preocupa-se com ocorrências aleatórias de eventos indesejáveis, ou seja, falhas durante a vida do produto. Estas pesquisas fornecem subsídios para as empresas garantirem aos seus clientes um desempenho de seus produtos sem falha para uma função especificada.

O presente trabalho de monografia tem por objetivo principal desenvolver um estudo de confiabilidade com os motores básicos HS (*High Speed*) produzidos pela Maxion International Motores S.A., empresa líder na produção de motores Diesel no Mercosul.

Além disso, o objetivo constitui-se de três partes: O primeiro é avaliar o tempo médio de vida dos motores básicos HS testados em dinamômetros, através de ensaios de durabilidade realizados pelo Departamento de Engenharia do Produto da empresa.

O segundo, é realizar uma análise exploratória nos dados provenientes de ocorrências de garantia, no intuito de conhecer melhor o comportamento do motores básicos que falharam após a venda ao cliente final.

Por último, avaliar o desempenho dos motores em condições de uso pelo cliente final, estudando o tempo de vida média dos motores básicos HS através das ocorrências de garantia e de motores que não falharam no período do estudo.

Existe ainda o interesse em apresentar algumas considerações sobre a metodologia de coleta de dados, que servirão de subsídios para estudos futuros de confiabilidade. Como o estudo de caso foi realizado na empresa Maxion International Motores S.A., espera-se que estas considerações possam aprimorar o desempenho do produto na referida empresa.

A abordagem do tema justifica-se, pois, a Maxion International Motores S.A., tem apresentado grande interesse na confiabilidade de seus

produtos, ou seja, possui interesse em elevar o tempo médio de vida dos motores básicos *High Speed*, garantindo assim, a satisfação de seus clientes.

A metodologia que será utilizada para atingir os objetivos será, num primeiro momento, a elaboração de uma revisão bibliográfica, sobre confiabilidade do produto, baseada em artigos de periódicos e livros tanto na área estatística como de engenharia e após, uma análise dos dados do estudo de caso.

O estudo de caso está dividido em três fases com diferentes populações e, por consequência diferentes fontes primárias e secundárias de informações.

Inicialmente, estudou-se os motores básicos *High Speed* ensaiados em dinamômetros para testes de durabilidade. Para tanto, será utilizado na análise relatórios dos testes com seus respectivos tempos de vida.

Num segundo momento, a população passa a ser os motores que falharam durante o período de garantia estipulada pela empresa e, cuja ocorrência da falha foi atendida pelo setor de garantia nos anos de 1998 e 1999. Nesta fase, utilizou-se como fontes secundárias de dados os relatórios de atendimento técnico, nas quais continham, entre outras informações, a data de venda, a data da falha e a quilometragem em que ocorreu a falha.

Na terceira fase do estudo de caso, será analisado os motores em uso pelo cliente final. Neste caso a população são os motores montados pela empresa no intervalo de janeiro de 1997 a maio de 1999. Servirão como

fontes de informação listagens mensais de motores vendidos pela empresa neste período, os dados obtidos na garantia e a quilometragem média anual percorrida pelo veículo.

Para a preservação dos resultados, uma transformação nos dados se fez necessário, visto que estes são informações de uso exclusivo da referida empresa.

Visando analisar o tempo médio de vida dos motores *High Speed* de maneira ordenada e sistemática, será utilizada a mesma metodologia de análise, nos testes de durabilidade da Engenharia do Produto, motores que retornaram em garantia e nos dados de clientes.

Para tanto, far-se-á, inicialmente uma análise gráfica, utilizando os papéis de probabilidades e em seguida teste de aderência, para verificar o ajustamento dos dados a uma função de distribuição conhecida.

A estimação dos parâmetros da distribuição de melhor ajuste será realizada através do método dos momentos e/ou método da máxima verossimilhança, após, com base nesses parâmetros, estima-se o tempo médio de vida dos motores.

Caso ocorra falta de ajustamento dos dados a uma função de distribuição conhecida, impossibilitando assim uma análise paramétrica, será utilizado análise de sobrevivência não-paramétrica de Kaplan-Meier.

A comparação entre as estimativas do tempo médio de vida do teste de durabilidade e dos dados de cliente final faz-se necessário para aprofundar as análises e aperfeiçoar os métodos de coleta de dados.

As considerações a respeito do método de coleta de dados, servirá de subsídio para análises futuras de confiabilidade, terá como base os resultados obtidos no estudo de caso, acrescido da revisão bibliográfica.

2 Confiabilidade

2.1 Uma Breve História da Confiabilidade

O campo das análises de confiabilidade é efeito indireto de problemas com sistemas eletrônicos inventados por volta de 1940 para uso em guerras. Como o sistema eletrônico desenvolvido era complexo, problemas com equipamento eletrônico eram também complicados, o que levou a *Air Force*, *Navy* e *Army* a organizarem comitês para investigação de problemas de confiabilidade. Em 1952, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos coordenou estes esforços para estabelecer o *Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE)*. Atualmente o campo da confiabilidade é um importante fator no sistema de projeto e desenvolvimento de produtos (Kapur, K. C., Lamberson, L. R., 1977, p. 5).

2.2 Definição de Confiabilidade

“Confiabilidade é a probabilidade de um produto desempenhar sem falha uma função especificada, sob dadas condições e durante um intervalo de tempo especificado” (AGREE Report, 06/57).

Segundo Feigenbaum, (1983), neste conceito existem quatro elementos significativos capazes de quantificar e mensurar a confiabilidade que são:

1. Probabilidade
2. Desempenho
3. Tempo
4. Condições de Operação

A primeira consideração é sobre a variabilidade natural do produto. Cada unidade de um produto será de alguma forma diferente das outras unidades. Alguns itens podem ter uma vida relativamente longa, outros não. Da variabilidade resultam as distribuições de falha do produto, que nos permitem prever, no sentido probabilístico, o seu tempo de vida.

O conceito de que a confiabilidade pode ser traduzida como uma probabilidade também tem o grande mérito de tirá-la do campo das coisas etéreas, tornando-a mensurável e podendo-se portanto avaliá-la objetivamente, compará-la com requisitos numéricos e tornar-se ações no sentido de melhorá-la.

A segunda consideração contida na definição é de que a confiabilidade é uma característica de qualidade de desempenho, estando associada a um conjunto de requisitos de uso que definem uma certa função a ser executada. O evento inerente à confiabilidade é o de desempenhar sua função integralmente, atendendo a todos os requisitos desde o início até o fim do uso, sem a ocorrência de qualquer falha.

O tempo é a terceira consideração na definição de confiabilidade. A probabilidade do produto desempenhar uma função, está necessariamente vinculada a um período definido de tempo.

Uma analogia pode ser realizada com as tabelas de seguros de vida. A probabilidade de um indivíduo viver até a próximo ano é diferente dele viver até a próxima década. Uma declaração sobre a confiabilidade do produto está ligado à esta vida pretendida, se 10 minutos ou 10 anos ou tudo aquilo que a vida alcançar.

A quarta consideração na definição são condições de operação, que incluem as circunstâncias ambientais e de operação nas quais o produto é utilizado. Estes fatores estabelecem as solicitações que serão impostas ao produto durante seu uso normal.

Além disso, devemos identificar três aspectos contidos no conceito de confiabilidade. Primeiro devemos identificar o ambiente ao qual o produto será submetido, ou seja, condições operacionais de projeto. Em seguida, devemos identificar as funções que o produto irá cumprir, isto é, as funções especificadas. Por último, temos que verificar a vida útil esperada para o produto, o período de tempo especificado.

2.3 Medidas de Confiabilidade

Para que o leitor possa ter um bom entendimento do trabalho, será descrito algumas definições fundamentais e conceitos de confiabilidade para familiarizar o leitor com o tema.

2.3.1 Função Confiabilidade

A probabilidade de falha como uma função do tempo pode ser definido como

$$P(\tau \leq t) = F(t), \quad t \geq 0 \quad (2.1)$$

Onde τ é uma variável aleatória indicando o tempo até falha. Então $F(t)$ é a probabilidade que o sistema falhará no tempo t , em outras palavras, $F(t)$ é a função de distribuição acumulada de falha (também chamado de função de não confiabilidade). Se definirmos confiabilidade como a probabilidade de sucesso, ou a probabilidade de que o sistema realizará a função pretendida em um certo tempo t , podemos escrever

$$R(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t) \quad (2.2)$$

Onde $R(t)$ é a função de confiabilidade.

Se o tempo até a falha é uma variável aleatória τ e possui função densidade $f(t)$, então

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

A Figura 2.1 demonstra a relação entre $F(t)$ que é a probabilidade do sistema falhar no tempo t e $R(t)$ que é a função de confiabilidade (probabilidade de sucesso).

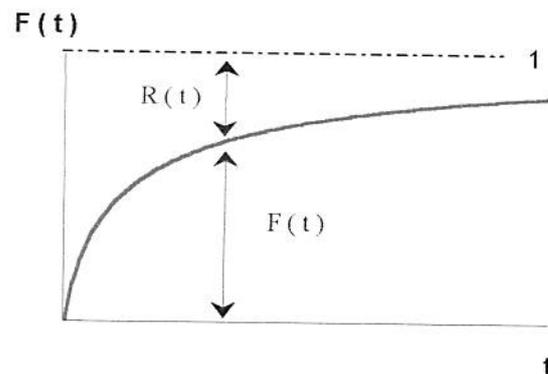


Figura 2.1: Relação entre $F(t)$ e $R(t)$

Sendo que $R(t)$ é válido para situações onde τ é o tempo de funcionamento adequado, não se define $R(t)$ para outros tipos de variáveis aleatórias. Assim, se X é a dimensão de um item, $F(X)$ é a fração de itens menores que um valor de x , mas $R(X)$ não existe.

Por exemplo, se o tempo de falha é descrita por uma função de densidade exponencial, então

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (2.4)$$

e este levará a função de confiabilidade

$$\begin{aligned} R(t) &= \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau \\ &= e^{-(\lambda t)}, \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Assim, obtendo uma particular função densidade de falha ou função de distribuição, a função de confiabilidade pode ser estabelecido diretamente.

2.3.2 A Taxa de Falha e Função Risco

A probabilidade de falha de um sistema num dado intervalo de tempo $[t_1, t_2]$ pode ser expresso em termos de função de não confiabilidade como

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = \int_{-\infty}^{t_2} f(t)dt - \int_{-\infty}^{t_1} f(t)dt = F(t_2) - F(t_1) \quad (2.6)$$

ou em termos da função de confiabilidade como

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = \int_{t_1}^{\infty} f(t)dt - \int_{t_2}^{\infty} f(t)dt = R(t_1) - R(t_2) \quad (2.7)$$

A medida que falhas ocorrem em um certo intervalo de tempo $[t_1, t_2]$ é chamado de taxa de falha durante esse intervalo. Taxa de falha é definido como a probabilidade que uma falha por unidade de tempo ocorra no intervalo, dado que uma falha não tenha ocorrido antes de t_1 , o começo do intervalo. Assim a taxa de falha é

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} \quad (2.8)$$

Note que a taxa de falha é uma função do tempo.

Se redefinirmos o intervalo como $[t, t + \Delta t]$, a expressão da equação (2.8) fica

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} \quad (2.9)$$

Segundo Kapur e Lamberson (1977), as taxas acima definidas são expressas como falhas por unidade de tempo; no lugar da unidade “tempo” pode ser usado também quilometragem, ciclos, etc.

A função risco¹ é definida como o limite da taxa de falha quando o intervalo tende a zero. Portanto a função risco é a taxa de falha instantânea. A função risco $h(t)$ é definida por

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{1}{R(t)} \left[-\frac{d}{dt} R(t) \right] \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

A quantidade $h(t)\Delta t$ representa a probabilidade de um item de idade t falhar no pequeno intervalo de tempo t até $t+\Delta t$. A importância da função risco é indicar a mudança na taxa de falha durante a vida de uma população de itens. Por exemplo, dois projetos podem fornecer as mesmas confiabilidades em um específico ponto no tempo, contudo, a taxa de falha até este ponto no tempo podem diferir.

É interessante fazer uma analogia com sobrevivência humana, para fixar este conceito. Chama-se taxa de mortalidade a fração de pessoas que morrem num ano, dentre as vivas no início daquele ano. Assim, dizer

¹ Função risco também é conhecida como função taxa de risco, função taxa de falhas instantânea ou simplesmente taxa de risco.

que a taxa de mortalidade no 1º ano de vida é de 10% significa que 10% dos nascidos com vida, morrem no 1º ano. A taxa de mortalidade é alta nos primeiros anos devido a problemas de má formação, de falta de cuidado adequado, análogos a problemas de fabricação ou de operação inadequada.

Passada a fase precoce, ou de mortalidade infantil, a taxa diminui e fica razoavelmente estável, com mortes devido a algum tipo de acidente. Posteriormente, tem-se o envelhecimento, e a taxa de mortalidade volta a subir, com mortes devidas a desgaste, enrijecimento, entupimento, o que se acentua cada vez mais.

Tem-se então uma evolução no tempo com aspecto dado pela Figura 2.2.

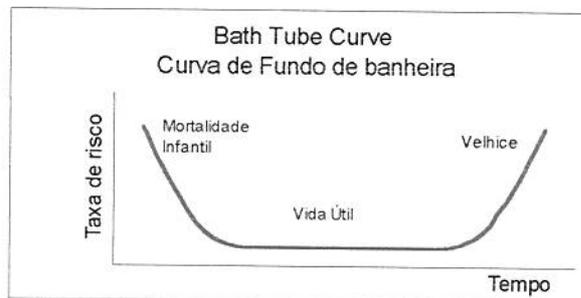


Figura 2.2: Curva da Banheira

Essa é a chamada “curva da banheira” que é típica também para muitos produtos. Na fase I (mortalidade infantil) temos mortes precoces devida a problemas de fabricação, como fixação mal feita, falta de componente, componente errado ou com defeito, ou uso inadequado como ligação errada, descuido, sobrecarga, devido a falta de conhecimento. Na fase II (vida útil) temos mortes por causas aleatórias e na fase III (velhice) mortes por fadiga, quebra por desgaste, formação de crostas.

Uma demonstração de pequenas variações usuais da curva da banheira é mostrada na Figura 2.3.

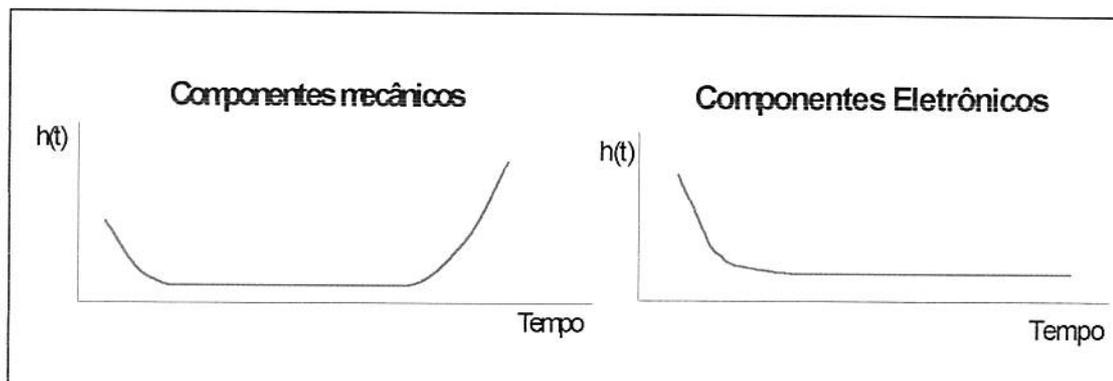


Figura 2.3: Comportamentos usuais da função risco $h(t)$, comportamentos elétricos e mecânicos

Uma distribuição de vida pode ser melhor compreendida ou caracterizada fisicamente através de função taxa de falhas instantânea, pois esta reflete o efeito do tempo sobre os itens sobreviventes.

Se a taxa de falhas é crescente em função do tempo, temos caracterizado um mecanismo de deterioração, pois à medida que o tempo passa os itens ficam mais propensos a falhar.

Se a taxa de falhas é decrescente, ocorre um processo de “depuração”, isto é, os itens que sobrevivem são mais robustos, e por isso têm menos probabilidades de vir a falhar.

Quando a taxa de falhas é constante, o tempo de operação não tem qualquer influência sobre a probabilidade de ocorrências de falhas.

2.3.3 Vida Média

A vida média é uma característica importante de um produto, informando o período de tempo durante o qual o produto vai funcionar adequadamente, em média.

O tempo esperado durante a qual um componente funcionará corretamente, é definido como

$$E(\tau) = \int_0^{\infty} \tau f(\tau) d\tau \quad (2.11)$$

Outro método conveniente para determinar a vida média é dada por

$$E(\tau) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.12)$$

As siglas MTBF e MTTF são usadas para a vida média, MTBF (*Mean Time Between Failures*) supondo que a cada falha, o item é reparado e então a vida média é o tempo médio entre falhas, e MTTF (*Mean Time to Failure*), considerando que o item não é reparado e a vida média é o tempo médio até falhar.

Ainda, segundo a norma BS4778 citado por O'Connor (1985), o tempo médio entre falhas (MTBF) é o valor médio do tempo de duração entre falhas consecutivas sendo computado como a razão do tempo total observado pelo número de falhas sob condições fixadas. Tempo médio até falhar (MTTF) (para itens não reparáveis) é o valor médio até a falha sendo obtido pela razão do tempo total na amostra pelo número de falhas na amostra durante o período sob condições fixadas.

Assim, ao testar um sistema, devemos ter um maior cuidado quanto as manutenções e reparos, pois, $E(\tau)$ é também conhecido como tempo médio entre falhas ou tempo médio até falhar.

No caso de haver reparo no item, o MTBF não inclui o tempo de reparo, ou seja, só leva em conta o período entre a entrada em operação e a falha. No entanto, o MTBF é mais consagrado e é usado mesmo quando o item não sofre reparo, ou seja, é trocado por outro quando falha.

Muitos produtos, após reparo, não ficam como novos, e então a segunda vida pode ter distribuição diferente da primeira. Assim a vida média também poderá ser diferente, bem como outras vidas após os reparos consecutivos. Contudo, o cálculo do MTBF pressupõe retorno as mesmas condições após cada reparo.

2.3.3.1 MTBF e Confiabilidade

A publicidade tem usado o tempo médio entre falhas como uma medida de confiabilidade, induzindo que um produto com MTBF alto tem uma alta confiabilidade. Usado desta maneira, o MTBF é mal aplicado pois este não é uma medida de confiabilidade de produtos.

O MTBF é um valor que indica a vida “média” de um produto e confiabilidade é a probabilidade de que um produto cumpra com as suas funções sob determinadas condições em um período de tempo especificado.

Para exemplificar, será usado uma curva de confiabilidade de um produto cuja vida útil foi estimada em 3.000 horas. Os dados estão na tabela 2.1 e mostrados na Figura 2.4.

Tabela 2.1: Vida útil em t horas

MTBF = 3000 horas		
t (em horas)	$\lambda = 1/\text{MTBF}$ $= t/3000$	$R = e^{-\lambda}$
500	0.1667	0.816
1000	0.3333	0.716
1500	0.5000	0.607
2000	0.6666	0.513
2500	0.8333	0.434
MTBF = 3000	1.0000	0.368
3500	1.1666	0.311
4000	1.3333	0.264

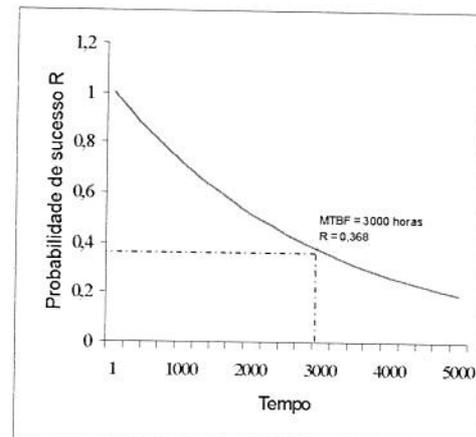


Figura 2.4: Curva de Confiabilidade

A Figura 2.4 indica uma probabilidade de sucesso (confiabilidade) de 0,368 ou 36,8% em 3.000 horas. Daí segue que a probabilidade de falha é 0,632 ou 63,2%. Esta interpretação significa que um produto tem probabilidade de 36,8% de operar por 3.000 horas ou que 63,2% dos produtos não irão funcionar 3.000 horas.

Há ainda outra relação de interesse entre o MTBF e a confiabilidade. Um aumento no MTBF não irá produzir o mesmo aumento na confiabilidade, isto fica evidente na relação da curva exponencial entre o MTBF e a confiabilidade mostrada na Figura 2.4.

O MTBF poderia ser usado para comparações entre produtos similares nos mesmos períodos de tempo. Quando utiliza-se definições de

confiabilidade, indica-se a probabilidade de sucesso, as horas de operação e as condições ambientais de uso.

Para aprofundar o assunto de medidas de confiabilidade, consulte Ebrahimi (1996), Feigenbaum (1983), Kapur & Lamberson (1977), Kossow & Preuss (1991), Mann, Shafer & Singdurwalla (1990), O'Connor (1985), Ribeiro (1995), Werner (1996).

2.4 Amostragem de Vida

Amostragem é uma das maneiras de se obter informações sobre um fenômeno aleatório. No caso, o interesse está na vida de itens até quebrar, falhar ou não operar de acordo com certos padrões.

A amostra deve ser colhida ao acaso, ou seja, deve-se evitar qualquer subjetividade na escolha dos itens amostrados, para que as conclusões não sejam distorcidas. Uma amostra viciada não leva o conhecimento correto do fenômeno, podendo conduzir a decisões erradas. Para que não haja tendenciosidade na amostragem, deve-se usar um processo aleatório para designar os itens que serão ensaiados.

Os ensaios de vida em laboratório são aqueles em que consegue-se criar uma situação com as condições exatas que desejaria ter e na qual se controla algumas e altera-se outras variáveis. Além disso pode-se observar e medir os efeitos dessa alteração das variáveis independentes

sobre as dependentes, numa situação em que os outros fatores relevantes são mantidos constantes. O ensaio de vida é feito submetendo-se o item as condições de operação ou em condições aceleradas, anotando-se o tempo decorrido até o fim da vida, ou seja, até deixar de funcionar adequadamente.

Os ensaios de vida podem ser realizados de vários modos ou combinações destas:

1. *Cronometragem contínua ou checagem periódica*: A verificação de término de vida pode ser contínua ou periódica.

Na contínua, sabe-se exatamente quando o item falhou, logo, esta verificação é mais informativa e deve ser preferida, caso não ocasionar custos elevados. Não é necessário alguém estar observando o item para se obter uma verificação contínua, podendo-se montar dispositivos medidores que são interrompidos quando o item falha.

Outro tipo de checagem é a periódica, na qual se trabalha com intervalos de duração de vida, neste, sabe-se apenas que o item falhou entre a última verificação e a anterior. Neste caso, não é recomendado tomar períodos de tempo muito longos.

2. *Atuação contínua ou intermitente*: O item pode ser solicitado continuamente durante o ensaio ou intermitentemente, ou seja, por períodos com interrupções. A interrupção permite um descanso, porém obriga nova partida, podendo ser favorável ou desfavorável à vida. Geralmente usa-se solicitação contínua em laboratório a fim de que se tenha um menor tempo total para a obtenção dos resultados, porém isto

pode resultar numa vida diferente da que seria obtida em condições reais, onde há paradas e relacionamentos.

3. *Carga normal ou sobrecarga (ensaio acelerado)*: Às vezes, para se conseguir respostas mais rápidas, principalmente quando a vida seria muito longa, submete-se o item a ensaio acelerado, ou seja, usam-se condições desfavoráveis à vida, por exemplo, de esforço, de temperatura, tensão elétrica, vibração entre outros. É claro que a vida diminui e não é representativa do desempenho normal, devendo-se então ter uma forma de conversão, ou fazer um levantamento experimental da relação entre a vida e condições de uso. Não confundir ensaio acelerados com testes de resistência a condições adversas, em que o objetivo é saber se por curtos períodos de tempo o item suporta condições anormais.

Os testes em condições normais podem ser: Completos, onde todos os itens falharam ao término do teste; ou incompletos, onde nem todos os itens falharam no fim do teste (censura).

4. *Ensaio com ou sem censura*: Os estudos que envolvam uma resposta temporal são freqüentemente prospectivos e de longa duração. Mesmo sendo longos, os ensaios de confiabilidade usualmente terminam antes que todos os itens no estudo venham a falhar. Uma característica decorrente destes estudos é então, a presença de observações incompletas ou parciais. Toda informação obtida sobre estes itens é que o seu tempo até a falha é superior ao tempo registrado até o último acompanhamento. Estas medidas são ditas censuradas.

Ressaltando o fato que, mesmo censurados, todos os resultados provenientes de um estudo de confiabilidade devem ser usados na análise estatística. Duas razões justificam tal procedimento: (i) a primeira razão diz que, mesmo sendo incompletas, as observações censuradas fornecem informações sobre o tempo de vida dos itens. (ii) a segunda razão diz respeito ao efeito da omissão das censuras no cálculo das estatísticas de interesse. Certamente se utilizarmos somente as observações não censuradas, as conclusões ficarão viciadas.

Alguns mecanismos de censura são diferenciados:

Censura do tipo I é aquela onde o estudo será terminado após um período pré-estabelecido de tempo. Neste truncamento têm-se n unidades em teste, testada por um período de tempo T (o teste termina ao final de T). Os tempos de falhas são $t_1, t_2, t_3, \dots, t_r$, assim, o número de unidades que falharam é r e o número de unidades que sobreviveram é $n-r$.

Censura do tipo II é aquela onde o estudo será terminado após ter ocorrido o evento de interesse em um número pré-estabelecido de itens, ou seja, têm-se n unidades em teste e o teste continua até que r unidades tenham falhado. Este é mais interessante do ponto de vista estatístico.

Um terceiro mecanismo de censura, o do tipo aleatório, ocorre quando um item é retirado no decorrer do estudo sem ter ocorrido a falha, ou seja, algumas unidades (em boas condições) são retiradas do teste em tempos aleatórios.

Alguns exemplos de censura serão apresentados:

- Acidente com o item que está sendo ensaiado, não se podendo completar seu ensaio;
- Interrupção porque já se passou muito tempo, ou seja, já se atingiu um limite pré-fixado de mortes entre os itens ensaiados;
- Interrupções porque já morreram vários itens ensaiados em paralelo, ou seja, já se atingiu um número pré-fixado de falhas entre os itens ensaiados;
- Também é chamado de censura quando a vida é menor que certo tempo, por só se saber da morte posteriormente;

Além de ensaios em laboratórios pode-se obter informações sobre a vida do item em estudo através de dados históricos e dados de campo.

Os *dados históricos* muitas vezes aparecem organizados sob a forma de um banco de dados, esses bancos contém informações sobre itens comumente manufaturadas e comercializadas.

Quando possível deve-se utilizar os *dados de campo (uso do cliente final)* acompanhando o desempenho em condições reais de uso do item em estudo, por exemplo, através de estatísticas de troca, reparos, assistência técnicas. A dificuldade que surge no ensaio de campo é que cada item pode ter sido submetido a períodos e condições diferentes de uso. Peça de carro, por exemplo, pode ter durado pouco tempo porque o carro rodou muita quilometragem e em condições desfavoráveis. Neste exemplo é

mais razoável medir a vida em quilômetros e não em dias, enquanto que as condições de uso podem ser registradas para se estimar a vida em cada situação, como é realizado no caso de trocas de óleo, filtros de ar, pneus e amortecedores.

Veja mais sobre o assunto em Feigenbaum (1983), Kapur & Lamberson (1977), O'Connor (1985), Soares & Colosimo (1995), Xiong (1998).

2.5 Estimação de Parâmetros

Ao estimar os parâmetros, deve ser considerado que um bom estimador deve apresentar as seguintes propriedades: não tendencioso, consistente, eficiente e suficiente. Deseja-se o estimador com maior número de propriedades.

Um estimador é não tendencioso se a esperança do estimador é igual ao parâmetro, ou seja, $E(\hat{\theta}) = \theta, \forall \theta \in \Theta$. A não tendenciosidade por si só não representa uma qualidade apreciável, pois se a variância do estimador for grande, a probabilidade de observarmos um valor de $\hat{\theta}$ que difira substancialmente de θ é grande. Quando $\hat{\theta}$ for não tendencioso, o erro quadrático médio coincide com a variância do estimador.

Um estimador é consistente quando o tamanho da amostra for suficientemente grande, e a probabilidade deste estimador estar próximo do parâmetro é grande, ou seja, as condições $\lim_{n \rightarrow \infty} E(\hat{\theta}_n) = \theta$ e $\lim_{n \rightarrow \infty} Var(\hat{\theta}_n) = 0$ são suficientes para que $\hat{\theta}_n$ seja consistente.

A eficiência é um critério para escolher entre dois estimadores, se $e(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) > 1$, então escolhemos $\hat{\theta}_1$, onde

$$e(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) = \frac{R(\hat{\theta}_2, \theta)}{R(\hat{\theta}_1, \theta)}, \quad \text{quando } R(\hat{\theta}_2, \theta) > 0 \quad (2.13)$$

sendo $R(\hat{\theta}_2, \theta)$ o risco do estimador. Se a função perda é quadrática, então

$$e(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) = \frac{E[(\hat{\theta}_2 - \theta)^2]}{E[(\hat{\theta}_1 - \theta)^2]} \quad (2.14)$$

Uma estatística é suficiente quando a distribuição da amostra, condicionada por um valor dessa estatística, não depende do parâmetro. Sendo assim, conhecido o valor da estatística suficiente, a restante informação da amostra passa a ser irrelevante, pois nada mais diz sobre parâmetro. A estatística suficiente condensa os dados sem perda de informação sobre o parâmetro.

Para maiores considerações ver, Murteira (1990) e Ribeiro (1995).

2.6 Métodos para Estimar os Parâmetros

Segue descrito alguns métodos de estimação mais utilizados.

2.6.1 Método Gráfico: Papéis de Probabilidade

Os papéis de probabilidade são freqüentemente usados na confiabilidade para determinar a distribuição que melhor se ajusta ao conjunto de dados de falhas. Este é baseado na função de distribuição acumulada $F(X)$ da distribuição densidade de probabilidade de interesse.

Os eixos do gráfico do papel de probabilidade são transformados de tal modo que a verdadeira função de distribuição acumulada resulte em uma linha reta. Por isso, se os dados amostrais podem ser ajustados por uma reta, os dados se ajustam a distribuição estudada, permitindo também, que os parâmetros sejam estimados. Assim dados de confiabilidade podem ser estimados.

Tem-se os papéis das distribuições de probabilidade normal, lognormal, weibull, exponencial e gama. Onde a variável cuja distribuição de probabilidade ajusta-se a um destes modelos, apresenta uma reta para $F(t)$ no papel de probabilidade.

Este método é considerado empírico, devendo ser usado apenas para uma análise inicial.

2.6.2 Método dos Momentos

Seja $\{f(x/\theta : \theta \in \Theta)\}$ uma família de funções de densidade de probabilidade. O momento ordinário populacional de ordem k é $\mu_k = \int x^k f(x/\theta) dx$ (ou $\mu_k = \sum x_i^k f(x_i/\theta) dx_i$) e o amostral é

$$M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k \quad (2.15)$$

onde (x_1, x_2, \dots, x_n) é uma amostra aleatória de $f(x/\theta)$.

Igualando-se os momentos populacionais com os momentos amostrais obtem-se um sistema de m equações, se $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$, ou seja, fazendo $\mu_k = M_k$. Resolvendo o sistema, as soluções são ditas estimadores de $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ pelo método dos momentos.

Exemplo:

Seja um processo de fabricação de lâmpadas na qual o tempo até a falha, em horas, possui uma distribuição exponencial. Considere uma amostra de 10 unidades em que a soma do tempo até a falha é igual a 570 horas, qual o tempo médio estimado para a vida da lâmpada?

Seja X o tempo de vida até a falha, temos

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$$

$$M_1 = E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x \lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda}$$

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad ; \quad \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \Rightarrow \quad \hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_i}$$

Como para a distribuição exponencial $E(X) = 1/\lambda$,

Então, $E(x) = 570/10 = 57$

Assim, o tempo médio para a vida da lâmpada estimada pelo método dos momentos é de 57 horas.

2.6.3 Método da Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood Estimate – MLE)

Seja (x_1, x_2, \dots, x_n) amostra aleatória de $f(x/\theta)$ e consideremos a função $L(x_1, x_2, \dots, x_n / \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i/\theta)$, onde $\theta \in \Theta$ e $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Omega^2$. Fixando (x_1, x_2, \dots, x_n) , a função L , com θ variando, é dita função de verossimilhança da amostra. A escolha do estimador de máxima verossimilhança baseia-se no argumento introdutivo: “obtida a amostra (x_1, x_2, \dots, x_n) , procuramos o valor de θ para o qual a probabilidade de (x_1, x_2, \dots, x_n) ser obtida seja o máximo possível”. Isto quer dizer que extraíndo-se um número grande de amostras de tamanho n , o valor mais provável de (x_1, x_2, \dots, x_n) ocorrerá com maior freqüência.

Definição: Seja $(x_1, x_2, \dots, x_n / \theta)$ a função de verossimilhança para uma amostra aleatória (x_1, x_2, \dots, x_n) observada de $f(x/\theta)$. Se para

² Ω = Espaço amostral

cada (x_1, x_2, \dots, x_n) , $\hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é um valor de θ que maximiza $L(x_1, x_2, \dots, x_n / \theta)$ então $\hat{\theta}$ é dito estimador de máxima verossimilhança para θ .

Freqüentemente as funções de verossimilhança satisfazem condições de regularidade que permitem obter o respectivo máximo por derivação, e assim, o estimador pode ser obtido resolvendo-se o seguinte sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \theta} L(x/\theta) = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} L(x/\theta) = 0 \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} \frac{\partial}{\partial \theta} \log L(x/\theta) = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \log L(x/\theta) = 0 \end{cases}$$

Exemplos:

- 1) O número de defeitos em uma linha de produção segue uma distribuição de Poisson com média λ desconhecida. Tira-se duas amostras e conta-se o número de defeitos que são iguais a 10 e 12. Qual estimativa de máxima verossimilhança para λ ?

Tem-se uma função de verossimilhança fazendo o produto de $P(10)$ e $P(12)$:

$$L(x_1, x_2 / \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^{10}}{10!} \times \frac{e^{-\lambda} \lambda^{12}}{12!} = \frac{e^{-2\lambda} \lambda^{22}}{10!12!}$$

o logaritmo de $L(x_1, x_2 / \lambda)$ é:

$$L'(x_1, x_2 / \lambda) = -2\lambda + 22 \log \lambda - \log(10!12!)$$

Uma vez que o último termo é constante, pode ser descartado no estudo de máximo, e assim:

$$L'(x_1, x_2 / \lambda) = -2\lambda + 22 \log \lambda$$

Na tabela 2.2 encontram-se os resultados calculados para alguns λ e na Figura 2.5 pode-se vê-los graficamente.

Tabela 2.2: $L'(x_1, x_2 / \lambda)$

λ	$L'(\lambda)$
6	27.41
8	29.74
10	30.60
11	30.75
12	30.66
14	30.05
16	28.99

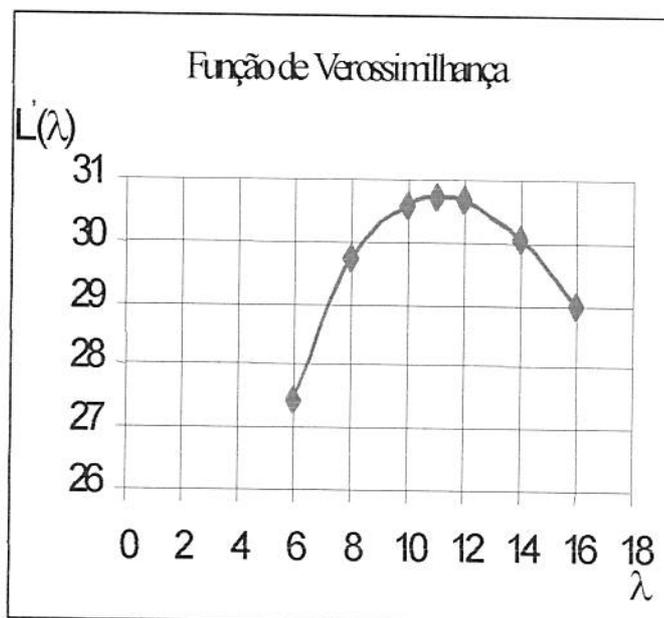


Figura 2.5: Gráfico da Função de Verossimilhança

Fazendo,

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} L'(x_1, x_2 / \lambda) = -2 + \frac{22}{\lambda}$$

$$-2 + \frac{22}{\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda = 11$$

Então, a média estimada pela máxima verossimilhança é igual a 11 defeitos na linha de produção.

2) Quando tem-se uma distribuição exponencial com uma amostra de n valores, x_1, x_2, \dots, x_n , temos:

$$f(x_1) = \lambda e^{-\lambda x_1}, \quad f(x_2) = \lambda e^{-\lambda x_2}, \quad \dots, \quad f(x_n) = \lambda e^{-\lambda x_n}$$

E a sua função de verossimilhança será:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n / \lambda) = \prod_{i=1}^n f(x_i) = \lambda^n \prod_{i=1}^n e^{-\lambda x_i} = \lambda^n e^{-\lambda \sum_{i=1}^n x_i}$$

Usando o logarítmo:

$$L'(x_1, x_2, \dots, x_n / \lambda) = n \log \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n x_i$$

Derivando e igualando a zero:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} L'(\lambda) = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n x_i = 0 \Rightarrow \hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_i}$$

para esta distribuição, coincide com o método dos momentos.

2.6.4 Estimador de Kaplan-Meier

O Kaplan-Meier é um estimador não-paramétrico para a função de sobrevivência. Segundo Soares & Colosimo (1995), o estimador foi proposto por Kaplan e Meier (1958) e é também chamado de estimador limite-produto. Ele é uma adaptação da função de sobrevivência empírica que, na ausência de censuras, é definida como:

$$\hat{S}(t) = \frac{\text{n}^\circ \text{ de observações que não falharam até o tempo } t}{\text{n}^\circ \text{ de observações no estudo}} \quad (2.16)$$

$\hat{S}'(t)$ é uma função escada com degraus tempos observados de falha de tamanho $1/n$, onde n é o tamanho da amostra.

O estimador de Kaplan-Meier, na sua construção, considera tantos intervalos de tempo quantos forem o número de falhas da amostra. O estimador de Kaplan-Meier é definido da seguinte forma:

Suponha que existem n itens no estudo e $K (\leq n)$ falhas distintas nos tempos $t_1 < t_2 < \dots < t_k$. Ocasionalmente, podem ocorrer mais de uma falha no mesmo tempo, o que é chamado de empate. Desta forma, vamos usar a seguinte notação:

- d_i : número de falhas no tempo t_i ;
- n_i : número de observações sob risco (não falhou e não foi censurado) até o tempo t_i (exclusive);

O estimador de Kaplan-Meier de $S(t)$ é definido como:

$$\hat{S}(t) = \prod_{i: t_i < t} \left(\frac{n_i - d_i}{n_i} \right) \quad (2.17)$$

Naturalmente, o estimador de Kaplan-Meier se reduz a função de sobrevivência empírica dado na equação (2.16) se não houver censuras. Este estimador também mantém esta forma em estudos envolvendo os mecanismos de censura do tipo I e II mas não atinge $S(t) = 0$ pois as últimas observações são censuradas.

Uma informação que pode ser obtida da curva de Kaplan-Meier é a probabilidade do item sobreviver a um determinado tempo t . Outras informações são o tempo médio e mediano de vida.

É necessário avaliar a precisão do estimador para que se possa construir intervalos de confiança e testar hipóteses para $S(t)$. A expressão para a variância assintótica é dada por:

$$\hat{V}ar(\hat{S}(t)) = \hat{S}(t)^2 \sum_{i/t_i < t} \frac{d_i}{n_i(n_i - d_i)} \quad (2.18)$$

A consistência e normalidade assintótica de $\hat{S}(t)$ foram provadas por Breslow e Crowley (1974) e Meier (1975) *apud* Soares & Colosimo (1995), sob certas condições de regularidade. Isto significa que, um intervalo aproximado de 95% de confiança para $S(t)$ em um certo tempo t é $\hat{S}(t) \pm 1,96 \sqrt{\hat{V}ar(\hat{S}(t))}$. Entretanto, em valores extremos de t este intervalo de confiança pode apresentar limite inferior negativo ou limite superior maior que um. Este problema pode ser resolvido utilizando uma transformação de $S(t)$. Por exemplo, a variância assintótica de

$$\hat{U}(t) = \log[-\log(\hat{S}(t))] \quad (2.19)$$

é estimada a partir da equação (2.17) como

$$\hat{V}ar(\hat{U}(t)) = \frac{\sum_{i/t_i < t} \frac{d_i}{n_i(n_i - d_i)}}{\left[\sum_{i/t_i < t} \log\left(\frac{n_i - d_i}{n_i}\right) \right]^2} \quad (2.20)$$

Um intervalo aproximado de 95% de confiança para $U(t)$ é então facilmente obtido e o correspondente intervalo para $S(t)$ é dado por

$$\hat{S}(t)^{\exp(\pm 1,96 \sqrt{\hat{V}ar(\hat{U}(t))})} \quad (2.21)$$

que assume valores no intervalo $[0, 1]$.

O estudo dos métodos para estimar parâmetros pode ser aprofundado com a consulta à Feigenbaum (1983), Kapur & Lamberson (1977), Murteira (1990), O'Connor (1985), Ribeiro (1995), Soares & Colosimo (1995).

2.7 Principais Distribuições de Vida

Para determinar a confiabilidade, no campo paramétrico, é fundamental que se conheça a distribuição de vida que melhor se aplica aos itens considerados. Tal aplicabilidade envolve dois aspectos: a primeira, é a capacidade da distribuição adotada em explicar ou ajustar-se aos dados de falha observados, a segunda são as considerações sobre leis físicas que determinam o mecanismo de falha considerado.

Como base para a escolha do particular tipo de distribuição (se normal, lognormal, exponencial, weibull, etc), deve-se levar em conta as premissas físicas por trás de cada modelo teórico, a literatura técnica disponível e experimentos anteriores.

Não é recomendável abandonar uma distribuição que historicamente é a que melhor se aplica a um mecanismo de falha, simplesmente porque os dados (usualmente limitados) de uma determinada amostra encaixam-se em outro tipo de distribuição.

Em suma, os dados da amostra e o conhecimento do mecanismo de falha devem complementar-se um ao outro na escolha da distribuição.

Uma vez caracterizada a distribuição de vida, e por consequência conhecidos seus parâmetros, pode-se expressar a confiabilidade do item através de números tais como a vida média, a taxa de falhas média ou o próprio valor da confiabilidade associado a um período de uso. Tais valores são chamados de características da confiabilidade, e exprimem a confiabilidade em termos numéricos.

Há muitos modelos disponíveis, porém, será comentado apenas os mais usados.

2.7.1 Distribuição Normal

O modelo normal é mais comumente usado para grandezas físicas, como dimensão, peso, resistência elétrica. É um bom modelo quando a variabilidade se deve à influência de um grande número de fatores independentes. Em geral não é um bom modelo para variáveis que têm grande probabilidade de ocorrência de valores próximos de zero e que apresentam assimetria. Se, portanto, tivermos distribuição de vida longe de zero, simétrica e com variabilidade devida a vários fatores, podemos então usar este modelo.

Sua função densidade de probabilidade é

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.22)$$

Onde, μ : média, parâmetro de localização

σ : desvio padrão, parâmetro de dispersão

Deve-se considerar que a taxa de falhas $h(t)$ é crescente com o tempo, o que caracteriza processos de deterioração.

A Figura 2.6 mostra um exemplo da densidade de probabilidade, função de confiabilidade e a função risco, respectivamente.

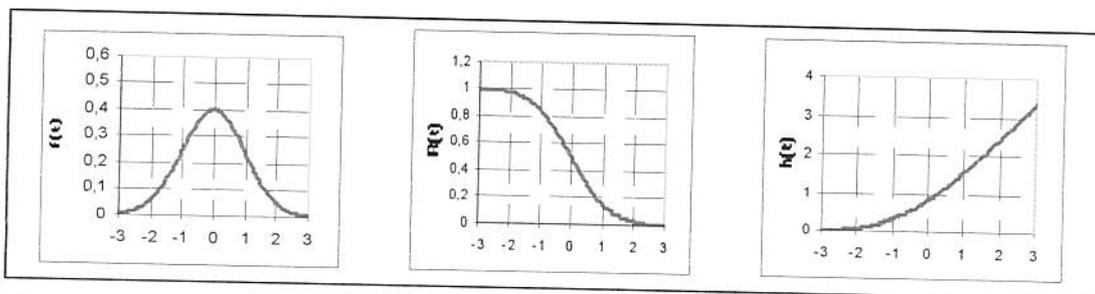


Figura 2.6: Curvas da Distribuição Normal Padrão

2.7.2 Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal aplica-se a processos de degradação multiplicativa, e tem sido utilizada para descrever a ocorrência de vários mecanismos de falha, como por exemplo os determinados por reações químicas tais como corrosão e formação de compostos intermetálicos, movimento de materiais devido a processos de difusão ou migração, ou ainda propagação de trincas.

O modelo lognormal teoricamente ocorre quando se tem produto de grande número de variáveis aleatórias independentes não negativas. Na prática ele é usado para casos em que os dados começam no zero e é alongada a direita. Do mesmo tipo tem-se a distribuição gama e a distribuição weibull, e então deve-se verificar qual modelo adere melhor aos dados observados.

A função densidade de probabilidade é positivamente assimétrica e é dada por

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.23)$$

Onde, μ : parâmetro de localização (média da variável $\ln t$)

σ : parâmetro de dispersão (desvio padrão da variável $\ln t$)

É importante ressaltar que média desta distribuição é

$$E(t) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \text{ e sua variância é } Var(t) = \exp(2\mu + \sigma^2) \cdot [\exp(\sigma^2) - 1].$$

Já sua função risco sai de zero em $t=0$, passa por um ponto de máximo e depois decresce, tendendo a zero. A Figura 2.7 exemplifica este fato mostrando um gráfico da densidade de probabilidade, outro da função de confiabilidade e um da função risco, respectivamente da distribuição lognormal.

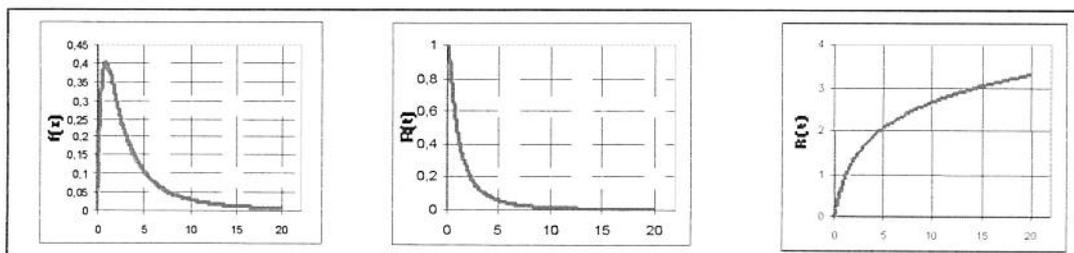


Figura 2.7: Curvas da Distribuição Lognormal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$

2.7.3 Distribuição Exponencial

A exponencial é uma das distribuições mais utilizadas no campo da confiabilidade, possuindo importância equivalente à que a distribuição normal tem em algumas outras áreas na qual aplica-se a Estatística. É a distribuição esperada para equipamentos complexos, compostos de grande número de componentes.

Contudo, vale ressaltar que a exponencial possui a propriedade de falta de memória, ou seja, se um item sobreviveu até um dado instante, a probabilidade de sobrevivência para o próximo intervalo de tempo é a mesma se o item foi posto em funcionamento pela primeira vez. As falhas ocorrem ao acaso e não estão associadas a processos de deterioração.

Este fato pode limitar as aplicações da exponencial, pois praticamente tudo no mundo físico real está sujeito a algum tipo de deterioração. Entretanto, se durante o período de vida útil ou de aplicação de um item este não apresenta mecanismos de deterioração significativos (ou se é realizada reposição de itens antes que tais mecanismos se manifestem, durante manutenção preventiva), e se não existem as falhas prematuras (ou foram previamente eliminadas), então a exponencial representa uma boa e conveniente escolha como distribuição de vida.

Talvez a maior aplicação da distribuição exponencial esteja na sua capacidade de modelar a parte plana da curva da banheira, correspondente ao período de vida útil de itens complexos.

Entretanto o uso deste modelo exige cautela, pois é sabido que a taxa de falhas na verdade é crescente, deve-se limitar as conclusões do estudo apenas ao intervalo de tempo considerado. Extrapolações para intervalos futuros podem resultar em erros graves.

Nesta distribuição, temos função densidade de probabilidade $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$ na qual possui média igual ao desvio padrão, ou seja

$$E(t) = Var(t) = \frac{1}{\lambda}.$$

Sua função de confiabilidade é $R(t) = \exp(-\lambda t)$ e a função taxa de falhas instantânea $h(t) = \lambda$.

Segue, na Figura 2.8 exemplos dos gráficos da função densidade de probabilidade, função de confiabilidade e a função taxa de falhas instantânea, respectivamente.

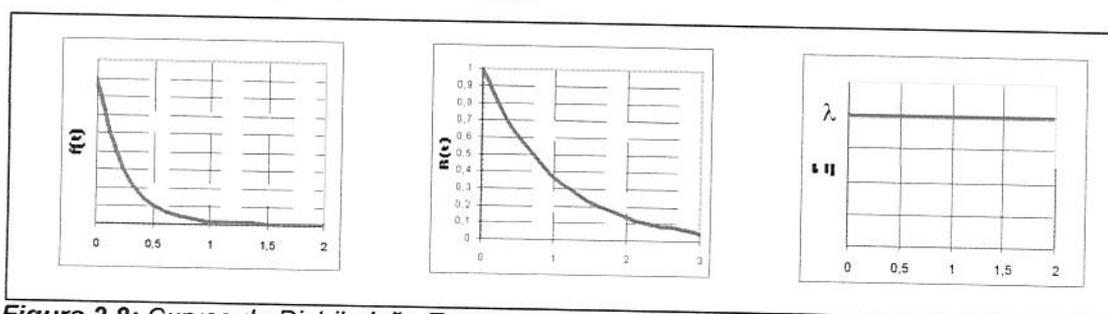


Figura 2.8: Curvas da Distribuição Exponencial com $\lambda = 4$

2.7.4 Distribuição Gama

A distribuição gama descreve, em termos de confiabilidade, a situação quando falhas parciais podem existir. Também pode ser usada para

modelar o tempo para a n -ésima falha de um item se a distribuição básica da falha é exponencial, isto é, se x_i é exponencialmente distribuído com parâmetro $\theta = 1/\lambda$, então $t = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ tem distribuição gama com parâmetros λ e n . Tempos de falha de sistemas apresentam uma distribuição gama se a falha do sistema está associada a ocorrência de n sub-falhas que aconteceram a uma taxa constante λ .

Também pode ser usada para descrever o decréscimo ou acréscimo da taxa de risco. Essa distribuição é muito usada quando temos variáveis aleatórias limitadas à esquerda.

A função densidade de probabilidade é

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} (\lambda t)^{\alpha-1} \exp(-\lambda t) \quad (2.24)$$

Onde, α : parâmetro de forma

λ : parâmetro de escala

É importante ressaltar que a distribuição tem média igual a α/λ

e variância igual a $\frac{\sqrt{\alpha}}{\lambda}$. A distribuição exponencial é um caso particular da distribuição gama, quando $\lambda = 1$.

Na Figura 2.9 está representado exemplos de $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$, respectivamente.

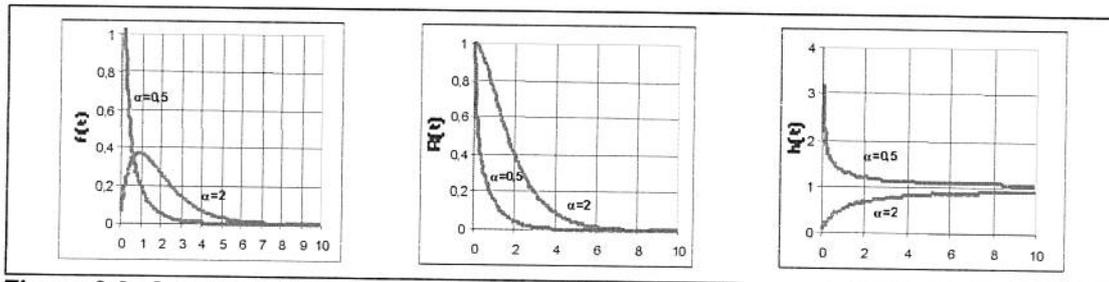


Figura 2.9: Curvas da Distribuição Gama Padrão com $\alpha = 0,5$ $\alpha = 2$

2.7.5 Distribuição Weibull

A distribuição de weibull é uma das mais populares no campo da Confiabilidade, prestando-se a descrever tanto os casos em que a taxa de falhas é crescente, decrescente ou constante (neste último, recai-se na exponencial).

Desde sua introdução em 1951, a distribuição de weibull tem sido aplicada a fenômenos de fadiga e fratura de materiais, ruptura de capacitores elétricos, corrosão de metais, falhas de rolamento, tubos de raios catódicos, entre outras.

Segundo Ribeiro (1995), pode-se demonstrar que a distribuição de weibull é o modelo para a distribuição de n valores provenientes de diversas distribuições iniciais limitadas à esquerda (por exemplo: exponencial e gama). Assim, se um circuito é composto por componentes idênticos conectados em série, e se o tempo de falha de cada componente segue uma distribuição gama, o tempo de falha do circuito seguirá uma distribuição de weibull.

Sua função densidade de probabilidade é

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{(t - \gamma)^\beta}{\eta}\right) \quad (2.25)$$

Onde, γ : vida mínima ou parâmetro de localização

η : vida característica ou parâmetro de escala

β : parâmetro de forma.

Sendo que, $E(t) = \eta \Gamma(1 + 1/\beta)$ e $\text{Var}(t) = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]$

A função de confiabilidade é dada por

$$R(t) = \exp\left(-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\eta}\right) \quad (2.26)$$

E a função taxa de falhas instantânea é

$$h(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (2.27)$$

Alguns exemplos de $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ serão mostrados na Figura 2.10, sendo que todos possuem parâmetro $\eta=1$ e $\gamma=0$.

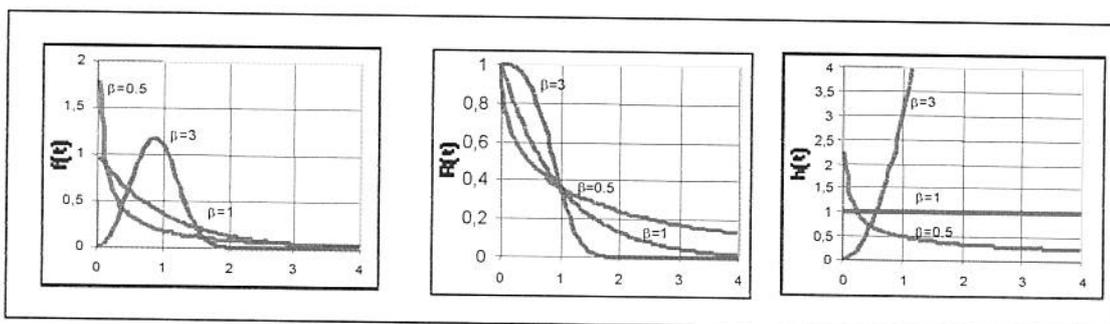


Figura 2.10: Curvas da Distribuição Weibull com parâmetros $\eta=1$, $\gamma=0$ e $\beta=0,5$, $\beta=1$, $\beta=3$.

Se $\beta=1$, a taxa de falha $h(t)$ é igual a um sobre n que é igual a uma constante, aproximando-se assim, da distribuição exponencial. Se $\beta>1$, $h(t)$ é crescente e pode ser associado a processos de deterioração, no caso de $\beta<1$, $h(t)$ é decrescente, pode-se associar a este caso à eliminação gradativa de falhas prematuras (processo de “depuração”). Se $\beta=3,44$ a distribuição aproxima-se da normal e se $\beta=2$, obtém-se a distribuição de Rayleigh (taxa de falhas linearmente crescente).

Dado as mensurações dos tempos de falhas (ciclos, milhas, etc) para uma amostra, pode ser obtido pelo uso de análise de papéis de probabilidades da weibull o valor da vida B_{10} (ou qualquer outra vida B_q) as vezes estimado. A vida B_{10} é o tempo (ciclos, milhas, Km) esperado que 10% das partes falhem, assim, há 90% de confiabilidade neste ponto. Muitas especificações de engenharia requerem que uma certa vida B_{10} seja obtida. Assim, o exigido (alvo) de confiabilidade naquele tempo, número de ciclos ou quilometragem é de 90%.

A vida B_q seria usada quando as especificações de engenharia pedem por um valor específico de B_q . Este método seria usado para comparar dois protótipos de mesmo componentes na base de tempo para falha. Este procedimento continuaria até que a confiabilidade desejada fosse obtida.

Para o estudo das principais distribuições de vida consulte Burr (1979), Feigenbaum (1983), Kapur & Lamberson (1977), Mann, Shafer & Singdurwalla (1990), Nair & Sankaran (1991), O'Connor (1985), Ribeiro (1995), Sarkadi & Vincze (1974), Siddal (1983).

2.8 Testes Acelerados de Sobrevida

São raras as situações em que se pode avaliar a confiabilidade de um item dentro de suas condições normais de uso. Quanto mais confiável

ele for, mais difícil é obter dados sobre sua confiabilidade, isto é, conseguir observar um número suficiente de falhas, dentro de um intervalo de tempo razoável.

Torna-se então necessário recorrer aos ensaios acelerados, de modo a obter os mesmos dados num menor intervalo de tempo. Isto equivale a dizer que é preciso acelerar a ocorrência de falhas.

Quanto ao tipo de solicitação, os ensaios podem ser agrupados em três categorias, embora alguns ensaios encontrados na prática sejam uma combinação de duas ou até as três categorias.

A primeira são os *ensaios ambientais* que verificam a capacidade do item suportar solicitações ambientais que podem surgir durante o uso, tais como umidade e temperatura. A segunda, são os *ensaios mecânicos* que verificam a capacidade do item suportar solicitações mecânicas tais como vibração e impacto, às quais o item pode estar sujeito durante o uso. Já os *ensaios de vida* verificam o comportamento do item quando submetido a dadas condições de operação.

Há duas formas de aceleração: uma que aumenta o tempo/freqüência de utilização, por exemplo em testes com disjuntores onde se aumenta o tempo de uso; outra que aumenta a tensão³ de trabalho, exemplo, aumentar a voltagem em ensaios com circuitos elétricos.

Para validar a análise de testes acelerados é necessário que o modo de falha em condições aceleradas seja o mesmo que em condições normais.

³ Tensão é um termo genérico, usado para representar qualquer tipo de sobrecarga

Para a análise, coleta-se dados em diferentes níveis (acelerados) de tensão e a partir desses dados, calcula-se o desempenho esperado em condições normais de operação.

2.8.1 Modelos para a Análise de Testes Acelerados

Existem muitos modelos de aceleração, específicos para cada tecnologia, ou mais particularmente ainda, para cada um dos vários mecanismos de falha que podem afetar uma determinada tecnologia. Isto torna praticamente impossível uma abordagem de todos eles. Logo apenas será citado os principais, separados por suas origens.

Os modelos físicos derivam de leis físicas conhecidas, são eles: modelo de Arrhenius, modelo Eyring de tensão única, modelo da lei de potência inversa, modelo combinado.

Já os modelos paramétricos derivam de distribuições de probabilidade, são eles: modelo de weibull, modelo gama, modelo exponencial, modelo lognormal.

Há ainda na literatura descritos outros modelos adequados para situações específicos, são eles: campo elétrico, modelo 1 para umidade, modelo 2 para a umidade, migração de elétrons.

Veja mais sobre testes acelerados em Kapur & Lamberson (1977), Mann, Shafer & Singdurwalla (1990), O'Connor (1985), Ribeiro (1995).

Para que o leitor tenha uma maior compreensão de todas as técnicas apresentadas neste capítulo, será apresentado um estudo de caso realizado numa empresa de motores a Diesel.

3 *Estudo de Caso*

Para um maior entendimento do assunto abordado, foi realizado um estudo na Maxion International Motores S.A. Será apresentado o histórico da empresa e logo após as análises desses estudos. Os pacotes estatísticos utilizados para as análises são SPSS, MINITAB, STATISTICA e RELEST.

3.1 Histórico da Empresa

A Maxion International Motores S.A. teve sua gênese no ano de 1959 quando a "Motores PerKins S.A." foi fundada, em 1962 passa a produzir seus motores para a marca Massey Ferguson S.A. No ano de 1975 a empresa atinge uma marca importante na sua história que é 300.000 motores Perkins produzidos no Brasil.

Na década de 80 a empresa atravessou diversas mudanças no seu controle, em 1980 houve a incorporação da Motores Perkins S.A. pela Massey Ferguson. Já em 1984 acontece um dos mais importantes eventos da empresa no Brasil, conclui-se o projeto de sua nacionalização e reestruturação, surgindo a nova Massey Perkins S.A., empresa Brasileira de capital aberto controlada pelo Grupo Iochepe. Em 1989 o nome da companhia muda para Maxion S.A., ocorrendo assim, o lançamento dos produtos Maxion.

No início da década de 90 o Grupo Iochepe adquire a participação da Varity na Maxion S.A., passando assim, a ter o controle total sobre a empresa. Neste ano, atinge 1.000.000 Motores Perkins produzidos no Brasil e a Divisão de Motores é concentrada em uma única planta (Alvarenga/SP). No ano de 1992 ocorre uma nova mudança na razão social da empresa que agora passa-se a chamar Iochpe-Maxion S.A. No Ano seguinte, mais um fato relevante na história da empresa, a planta da cidade de São Bernardo do Campo no estado de São Paulo é certificada pela ISO 9000.

Um acordo de transferência de tecnologia com o Rover Group foi assinado em 1994. Neste ano é estabelecida e dá-se o início da produção dos motores S4 na planta da Argentina.

A transferência da unidade fabril de São Bernardo do Campo em São Paulo para a cidade de Canoas no Rio Grande do Sul acontece em 1995, mesmo ano do lançamento da Pick-up Chevrolet S10 (com motor Maxion *High Speed*) e o início da produção do motores Caterpillar 3116.

No ano de 1997 as plantas de Canoas e São Bernardo do Campo são certificadas QS 9000, que se trata de uma norma redigida pelas empresas automobilísticas para garantir a qualidade dos fornecedores de componentes às montadoras. Neste ano, é inaugurada a linha de motores HS em Córdoba na Argentina e é lançado os motores Maxion HS para a Mercedes Benz Sprinter, que é o primeiro veículo Mercedes Benz que não utiliza motor da própria Montadora.

Já em 1998, a empresa registra firma como Maxion Motores Ltda e a planta de Córdoba na Argentina recebe o certificado QS 9000. Neste ano, atinge-se o número de 1.400.000 motores produzidos, sendo 100.000 motores HS. É lançado os motores Maxion HS da Pick-up Ford Ranger Turbo Diesel.

Em 1999 ocorre uma nova mudança na sua razão social devido a associação entre a Maxion S.A. e a Navistar International Transportation Corp quando surge, a denominação atual, Maxion International Motores S.A.

Atualmente, a empresa mantém sua liderança na produção de motores a diesel no Mercosul, com mais de 1,4 milhão de motores fabricados. Entre seus clientes estão as principais montadoras instaladas no Brasil e na Argentina, como General Motors, Ford, Mercedes-Benz, AGCO Land Rover, GMC, Dynapac e Jacto. E mais: associada à Navistar International Transportation Corp, líder mundial no desenvolvimento e fabricação de motores diesel de 160 a 300 hp, a companhia começa a expandir sua presença no mercado internacional.

Como resultado da parceria, a Maxion International Motores iniciará, até o final de 1999, a fabricação de motores V8 de 7,3 litros. Esse motor equipa pick-ups, vans, caminhões e ônibus das principais montadoras com as quais a Navistar tem acordo de fornecimento de longo prazo. Além da Navistar, a empresa tem como parceiros a Perkins e a Land Rover.

Hoje a empresa está estruturada em três plantas: uma em Canoas no Rio Grande do Sul com capacidade para produzir 150.000 motores/ano e produzirá inicialmente 50.000 unidades ano do modelo V8, para tanto a empresa fez investimentos de cerca de 25 milhões de reais; outra em São Bernardo do Campo em São Paulo onde está localizado o seu Centro de Tecnologia e Negócios, centro este que desenvolve motores de alta tecnologia para importantes clientes da indústria automobilística e a terceira em Córdoba na Argentina com capacidade para produzir 35.000 motores/ano.

Os atuais motores montados pela Maxion International Motores S.A. são veiculares, agrícolas e industriais e estão assim distribuídos:

- Veicular:
 - Linha HS(High Speed):HS 2.5 T e HS 2.5 Tcc
 - Linha MS (Medium Speed): S4 e S4 T
 - Linha Internacional: T 444E , DT 466E e 530E

- Industrial:
 - Linha Internacional: DT 466E e 530E
 - Linha Perkins: 4236 , 1006-6 e 1006-6T
 - Linha MS (Medium Speed): P-4001 e P-4001-T

- Agrícola: - Linha Internacional: DT 466E e 530E
 - Linha Perkins: 4236 , 1006-6 e 1006-6T
 - Linha MS (Medium Speed): P-4001 e P-4001-T

3.2 Descrição do Motor

Segundo a administração do produto do Departamento da Engenharia de Projetos da Maxion International S.A, um motor é composto por unidades básicas, grupos operacionais, grupos acessórios e itens avulsos (se necessário).

Os grupos operacionais e acessórios, são a vestimenta do motor (parte externa) e são via de regra, criados ou rearranjados de acordo com a necessidade do cliente. Exemplo: Bomba injetora, suporte do motor, carcaça do volante, filtros de óleo.

Por definição, os grupos básicos são aqueles compostos por itens vitais do motor, tais como: bloco, cabeçote, árvore de manivelas, eixo de comando, biela.

Todas as análises realizadas neste trabalho referem-se apenas ao motor básico, cuja relação de componentes encontram-se no ANEXO A.

A Figura 3.1 mostra um exemplo de um motor, ou seja, com os componentes básicos, operacionais, acessórios e itens avulsos.

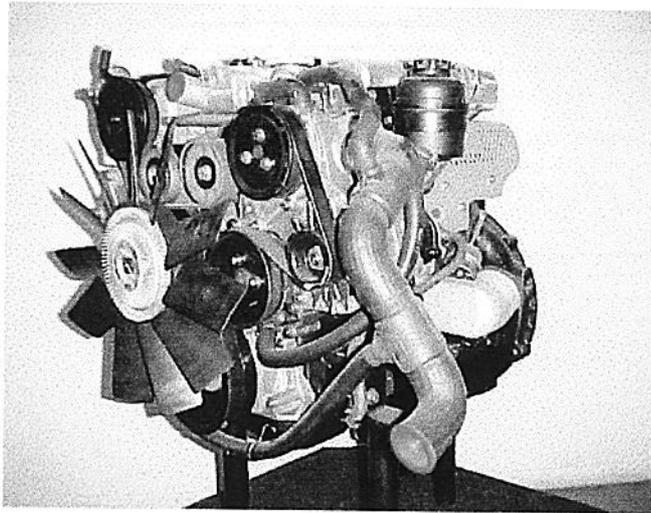


Figura 3.1: Motor *Hight Speed*

Já a Figura 3.2 mostra o motor básico em duas fases de montagens, a primeira quando é montado o virabrequim e a segunda mostra os pistões.

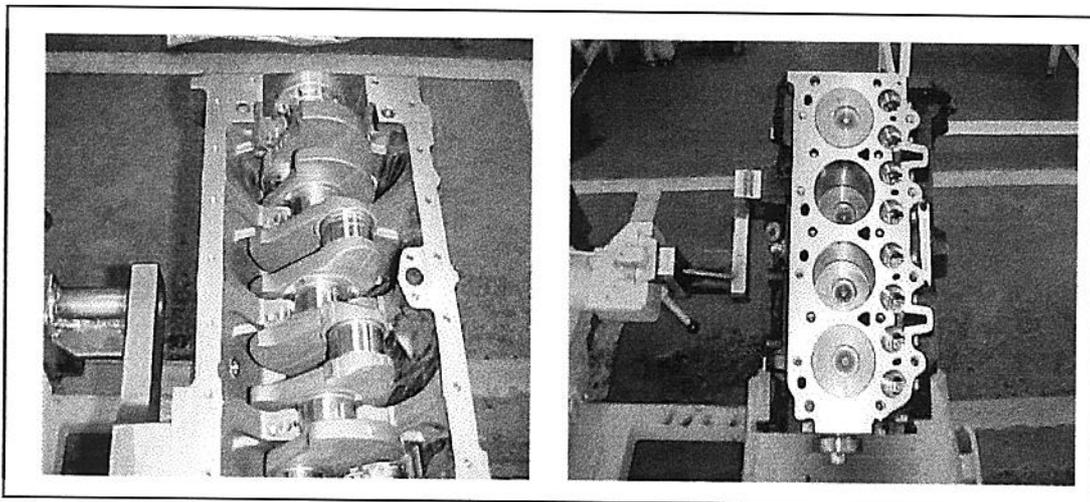


Figura 3.2: Motor básico HS em duas fases de montagem

3.3 Análise dos Dados de Testes nos Dinamômetros

Será avaliado o tempo médio entre falhas dos motores básicos *High Speed* testados em dinamômetros⁴, através de ensaios de durabilidade realizados pelo Departamento de Engenharia do Produto da Maxion International Motores S.A.

Testou-se seis motores básicos *High Speed* cujo o diâmetro do cilindro que possui limites de especificação igual a $90,732 \pm 0,006$ milímetros. Estes motores possuem duas potências distintas, três motores tem 95 CV e os outros três 115 CV. Por ser inviável fazer análises ramificando estes dados, supôs-se que não havia diferença significativa entre as potências dos motores.

Os testes foram conduzidos em dinamômetros localizados na planta de Canoas e São Bernardo do Campo da Maxion International Motores S.A. e em um dinamômetro similar fora da empresa, como os dados provenientes destes estudos são poucos, também se supôs que não existe diferença entres os bancos de testes.

Nestes testes usou-se ciclos de 2 horas com carga e rotação variáveis e pré – determinadas, além disso, a cada 20 horas a verificação do consumo de óleo lubrificante foi efetuada. Estes testes simulam as condições de operação do motor em aplicação nos veículos, não se trata de teste acelerado.

⁴ Vide glossário

O tempo de truncamento do teste nos dinamômetros foi de 2.578 horas. Como estes dados estão em número de horas de teste, será efetuada uma conversão de número de horas para quilometragem, utilizada pela empresa para teste de durabilidade. Esta conversão facilitará a comparação com os dados de ocorrências de garantia e de campo. Assim, realizando a conversão, testou-se o equivalente a 206.271 quilômetros.

Dos seis motores testados, apenas um apresentou falha antes do término do ensaio. A tabela 3.1 mostra estes resultados:

Tabela 3.1: Resultados dos testes em dinamômetros

Tempo de teste (horas)	Tempo da falha (horas)	Tempo da falha (KM)	Potência	Local teste
2.578	2.578	206.271	95cv	Maxion/Canoas
2.578	490	39.192	95cv	Maxion/SBC
2.578	2.578	206.271	95cv	Outra empresa
2.578	2.578	206.271	115cv	Maxion/Canoas
2.578	2.578	206.271	115cv	Maxion/SBC
2.578	2.578	206.271	115cv	Outra empresa

Para verificar a possibilidade de utilizar análise paramétrica, inicialmente procurou-se um ajustamento dos dados a uma conhecida e específica função de distribuição.

Ao testar os dados com relação a distribuição exponencial, verificou-se primeiramente o papel de probabilidade que é mostrado e na

Figura 3.3, logo após realizou-se o teste de aderência (*Goodness of fit*) para o ajustamento dos dados, e assim obteve-se:

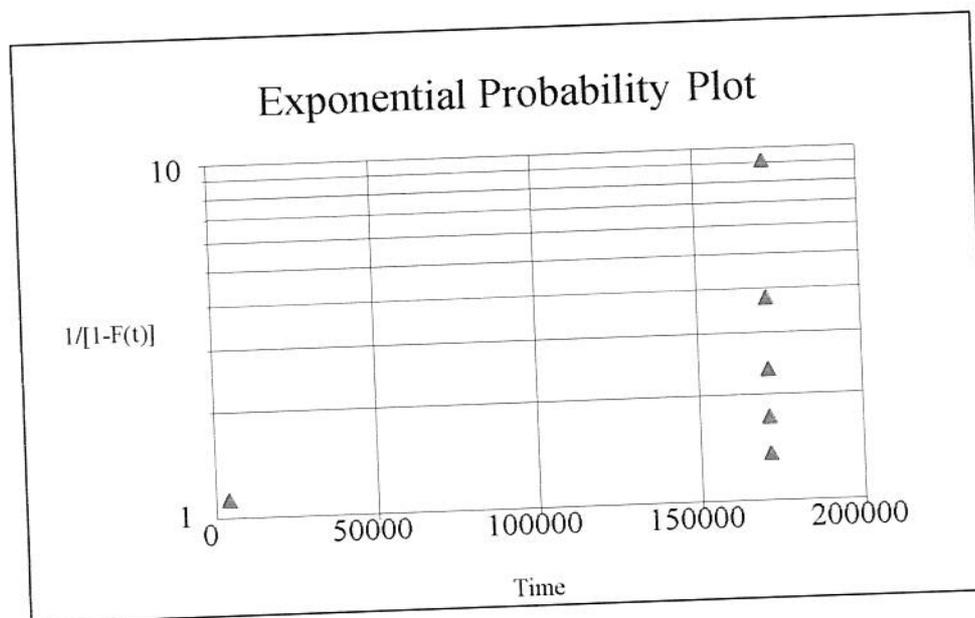


Figura 3.3: Papel de probabilidade exponencial referente ao teste em dinamômetros

Goodness of Fit Tests:

Chi-Square test:

Lower Limit	Uper Limit	Observed Frequency	Expected Frequency	Chi-square Value
35014,	94884,333	1	2	0,54
94884,333	154754,67	0	1,3	1,35
154754,67	above	5	2,6	2,21

Chi-square = 4,09 with 1 d.f.
Significance level = 0,0431

Kolmogorov-Smirnov test:
Estimated Kolmogorov DN = 0.53038
Approximate significance level = 0.0001

O papel de probabilidade demonstra falta de ajuste a distribuição exponencial uma vez que não se ajusta nenhuma reta aos dados amostrais.

Analisando o teste de aderência Qui-quadrado (*chi-square*) observamos que as freqüências esperadas são menores de 5, logo não se aplica neste caso. Já no teste de Kolmogorov-Smirnov, rejeitamos a hipótese de que os dados observados possuem distribuição exponencial ao nível de significância de 5%.

Em seguida analisou-se o papel de probabilidade da distribuição weibull que é mostrado na Figura 3.4.

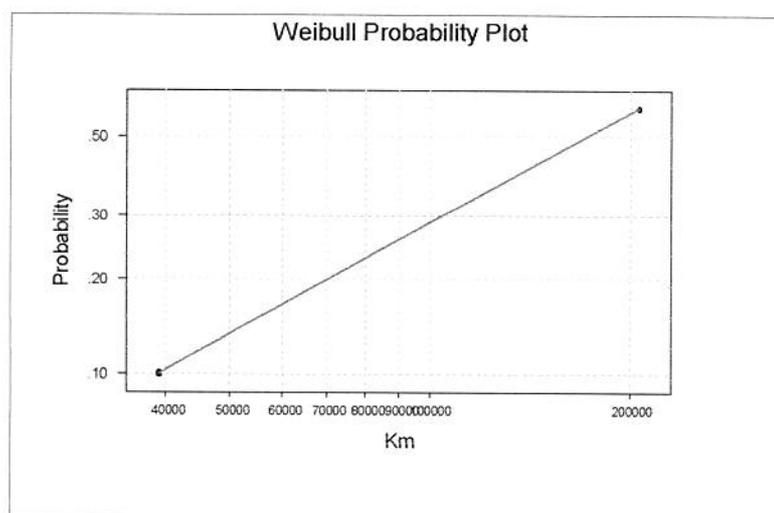


Figura 3.4: Papel de probabilidade weibull referente ao teste em dinamômetros

A Figura 3.4 demonstra que os dados não se ajustam à nenhuma reta, assim, rejeita-se a hipótese de que os dados amostrais possuem distribuição de weibull.

Além destas, foram verificadas os ajustes em relação as distribuições normal e lognormal cujos resultados encontram-se no ANEXO B e ANEXO C, respectivamente.

Em todos os testes de aderência, o ajustamento de uma função de distribuição conhecida a amostra de dados foi rejeitada, ou seja, os dados não se comportam de forma a se ajustar alguma distribuição conhecida. Isso pode ser consequência de serem poucos dados, muitos deles são censurados.

Por essa razão não é possível fazer uma análise paramétrica, então partiu-se para a análise de sobrevivência não-paramétrica de Kaplan-Meier. Na análise temos:

Kaplan-Meier

Survival Analysis for KM

Time	Status	Cumulative Survival	Standard Error	Cumulative Events	Number Remaining
39191,56	falhado	,8333	,1521	1	5
206271,4	censurado			1	4
206271,4	censurado			1	3
206271,4	censurado			1	2
206271,4	censurado			1	1
206271,4	censurado			1	0

Number of Cases: 6 Censored: 5 (83,33%) Events: 1

	Survival Time	Standard Error	95% Confidence Interval
Mean:	178424,73	25420,38343	(128600,78; 228248,69)
(Limited to 206271)			
Median:	,	,	(, ; ,)

>No plot can be drawn since there is only one valid survival function value

Verifica-se que o tempo médio de vida do motor básico HS é estimado em 178.424,73 quilômetros, com um erro padrão de 25.420,38343.

Com 95% de confiança o intervalo (128.600,78; 228.248,69) contem a vida média do motor básico HS.

O principal motivo pelo qual a média estimada é baixa é resultado do baixo tempo de truncamento estabelecido previamente.

Não foi possível representar o gráfico de confiabilidade pois ocorreu apenas um caso de falha.

No teste de durabilidade gerou-se poucos dados e conseqüentemente, a nível estatístico, os resultados obtidos são pouco confiáveis.

3.4 Análise dos Dados de Garantia

Nesta fase, será analisado os motores básicos *High Speed* cujo diâmetro nominal do cilindro 90,732 milímetros independentemente da potência segundo a suposição feita anteriormente e que estejam no período de garantia. O período de garantia destes motores é de dois anos ou quilometragem pré estabelecida pela empresa.

Será considerado nas análises apenas os motores montados no Brasil no período de janeiro de 1997 à maio de 1999 cuja a ocorrência de falha foi atendido pelo setor de garantia da empresa nos meses de janeiro de 1998 à maio de 1999. A tabela 3.2 apresenta os resultados de motores que falharam neste período.

Tabela 3.2 : Vendas ocorridas de 1997 à 1999 e atendimento das falhas nos anos de 1998/1999

Caso	Mês da Venda	Mês da Falha	Tempo da falha (em KM)
01	Fev/97	Jun/98	280.632
02	Fev/97	Fev/99	206.261
03	Abr/97	Set/97	1.289
04	Mai/97	Jul/98	230.080
05	Jun/97	Out/98	335.191
06	Jun/97	Mar/98	14.614
07	Jul/97	Out/97	5.157
08	Set/97	Mar/98	197.020
09	Set/97	Abr/98	187.361
10	Dez/97	Jan/99	148.561
11	Dez/97	Jan/98	1.042
12	Jan/98	Jan/99	75.485
13	Fev/98	Fev/98	1.418
14	Fev/98	Mar/98	11.969
15	Fev/98	Fev/98	846
16	Mar/98	Mar/98	11.541
17	Mar/98	Mai/98	33.808
18	Mar/98	Mar/98	2.960
19	Abr/98	Set/98	104.935
20	Abr/98	Jul/98	52.795
21	Abr/98	Mar/99	140.234
22	Mai/98	Out/98	65.656
23	Mai/98	Abr/98	141.585
24	Mai/98	Mai/98	2.522
25	Mai/98	Mai/98	62
26	Mai/98	Jul/98	9.772
27	Jun/98	Jan/99	125.145
28	Jul/98	Jul/98	516
29	Jul/98	Mai/99	226.899
30	Set/98	Jan/99	74.031
31	Set/98	Set/98	180
32	Set/98	Jun/99	140.337
33	Nov/98	Nov/98	2.346
34	Abr/99	Mai/99	2.326
35	Abr/99	Jul/99	36.788

Nesta análise, foi verificado inicialmente o ajuste da amostra a alguma distribuição conhecida através de papéis de probabilidades.

Com relação a distribuição exponencial temos na Figura 3.5 o papel de probabilidade.

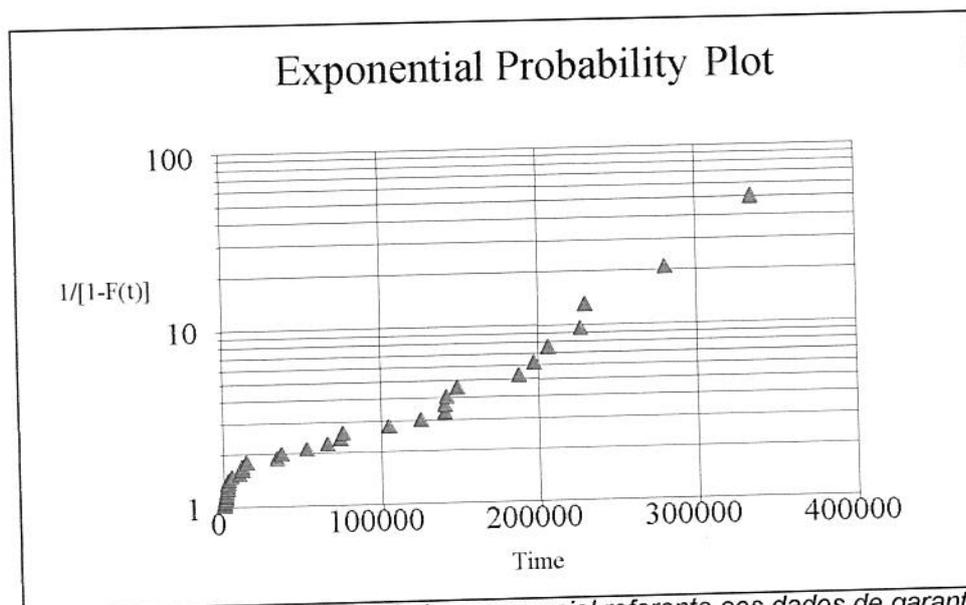


Figura 3.5: Papel de probabilidade exponencial referente aos dados de garantia

Goodness of Fit Tests:

Chi-Square test:

Lower Limit	Uper Limit	Observed Frequency	Expected Frequency	Chi-square Value
0	58657,742	19	17,9	0,07
58657,742	117315,48	4	8,7	2,58
117315,48	175973,23	5	4,3	0,12
175973,23	234630,97	5	2,1	4,04
234630,97	293288,71	1	1	0,00
293288,71	above	1	1	0,00

Chi-square = 6,81 with 4 d.f.
Significance level = 0,1464

Kolmogorov-Smirnov test:
Estimated Kolmogorov DN = 0.29397
Approximate significance level = 0.0001

Aqui, também o papel de probabilidade demonstra falta de ajuste a distribuição exponencial.

Analisando o teste de aderência Qui-quadrado (*chi-square*) observa-se que as frequências esperadas são menores de 5, logo também não se aplica neste caso, mas no teste de Kolmogorov-Smirnov a hipótese de que os dados observados possuem distribuição exponencial é rejeitada ao nível de significância de 5%.

Em seguida analisou-se o ajustamento com relação a distribuição weibull que é mostrado na Figura 3.6.

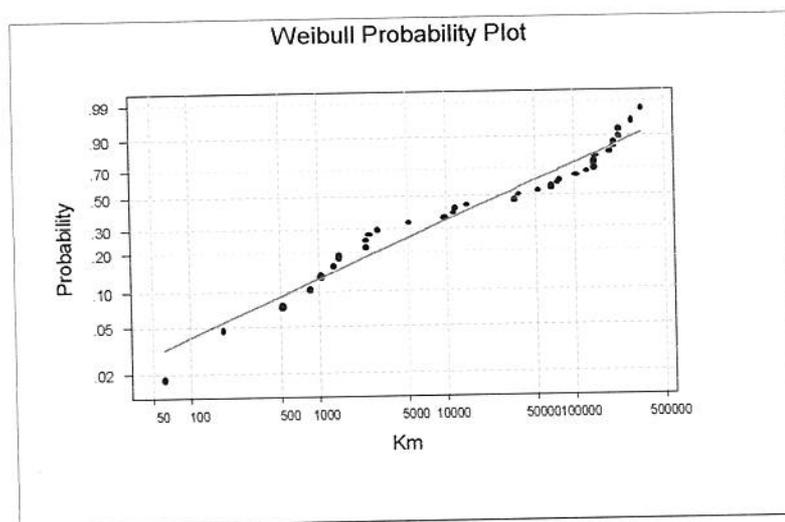


Figura 3.6: Papel de probabilidade weibull referente aos dados de garantia

Goodness of Fit Tests:

Chi-Square test:

Lower Limit	Uper Limit	Observed Frequency	Expected Frequency	Chi-square Value
0	58657,742	19	22,8	0,63
58657,742	117315,48	4	4,6	0,08
117315,48	175973,23	5	2,4	2,96
175973,23	234630,97	5	1,4	8,97
234630,97	293288,71	1	0,9	0,00
293288,71	above	1	2,9	1,22

Chi-square = 13,86 with 3 d.f.
Significance level = 0,0031

Kolmogorov-Smirnov test:

Estimated Kolmogorov DN = 0.13737
Approximate significance level = 0.0926

Pelo mesmo motivo já descrito anteriormente, o teste Qui-quadrado não se aplica, mas o teste Kolmogorov-Smirnov aceita a hipótese de que os dados das ocorrências em garantia apresentam distribuição de weibull.

Com isso, estimou-se os parâmetros pelo método da máxima verossimilhança onde obteve-se os seguintes resultados:

$$\gamma = 0 \quad ; \quad \beta = 0,5595 \quad ; \quad \eta = 54.788,683;$$

$$\text{Var}(\beta) = 0,00544 \quad ; \quad \text{Var}(\eta) = 3,0384\text{E}+08;$$

$$\text{Cov}(\beta, \eta) = 402,305;$$

Intervalo de confiança de 95%:

Para $\beta = (0,39206 ; 0,66793)$

Para $\eta = (25.708,874 ; 102.868,356)$

Logo, $MTBF = \eta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) = 90.881,3256$ quilômetros

Com os dados de garantia tem-se apenas o início da distribuição da população, pois, aqui analisou-se apenas os 35 motores que falharam, dos 51.356 motores desse tipo montados no Brasil no período em estudo. Por tanto, não será possível estimar o tempo de vida dos motores sem considerar os motores que não falharam. Mesmo porque se considerar apenas estas análises, os resultados serão viciados por não usar as censuras.

Além destas, foram verificadas os ajustes em relação a outras distribuições, apenas com relação a distribuição gama, cujo resultados encontram-se no ANEXO D, verificou-se um ajustamento dos dados. Mas como a gama é um caso particular da weibull preferiu-se trabalhar com a última.

Com relação as distribuições normal, lognormal não houve ajustamento dos dados a nenhuma destas distribuições. Os resultados destas análises encontram-se no, ANEXO E e ANEXO F, respectivamente.

3.5 Análise dos Dados de Campo

Para estimar o tempo médio de vida dos motores HS, utilizou-se os dados de garantia somados com os dados de motores que não falharam no período. Para tanto, foi feito um levantamento do total de motores vendidos por mês no período de janeiro de 1997 à maio de 1999.

Como a informação de quantos motores montados no ano de 1997 falharam no mesmo ano não pode ser levantada, estimou-se este total supondo que a proporção destes motores é a mesma dos motores montados em 1998 e que falharam em 1998. Em 1998, 0,09% do total de motores montados falharam no mesmo ano. Considerando essa mesma proporção, em 1997 teria falhado 25 motores montados em 1997. No ANEXO G encontram-se os cálculos desta estimativa.

A seguir foi descontado mês a mês os motores que falharam, obtendo assim o total de motores que até maio de 1999 estavam em condições de uso. Estes motores foram considerados dados censurados.

Para a obtenção da quilometragem percorrida pelos motores censurados utilizou-se a única estimativa da quilometragem média (empírica) dos motores em estudo, informada pelo departamento de Pós-vendas da Maxion International Motores S.A. que é de 154.704 Km/ano. Logo teríamos uma média estimada de 12.892 Km/mês.

Usando esta informação, a quilometragem média estimada para os motores em estudo é o número de meses da data da venda até maio

de 1999 multiplicado pela quilometragem média por mês. Estes cálculos estão apresentados no ANEXO I.

Assim como nas demais análises, verificou-se o ajustamento do dados com relação a distribuições weibull na qual o papel de probabilidade encontra-se na Figura 3.7.

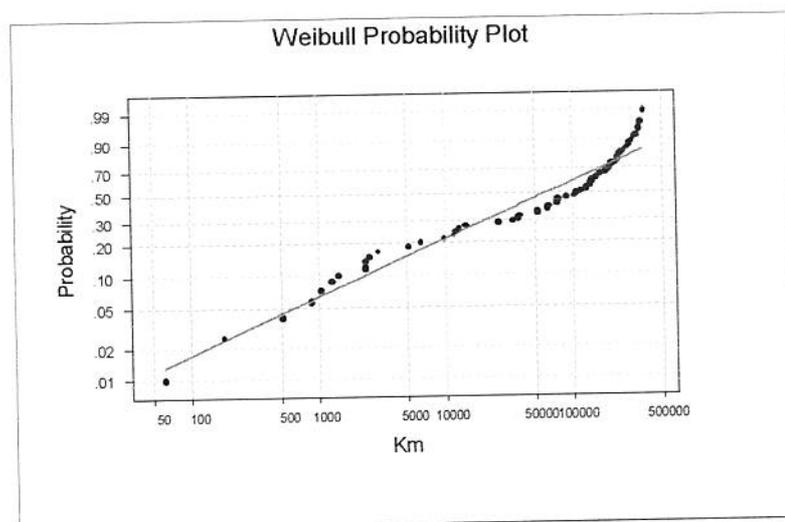


Figura 3.7: Papel de probabilidade weibull referente a análise aos dados de campo

Através da análise do papel de probabilidade conclui-se que o conjunto de dados de falhas no campo não se ajustam a função de distribuição de weibull uma vez que não há um bom ajustamento dos dados a reta.

Uma vez que a análise paramétrica não é viável por falta de ajustamento à uma função de distribuição conhecida, optou-se pela análise de sobrevivência não-paramétrica de Kaplan-Meier. Neste caso, obteve-se os seguintes resultados:

Kaplan-Meier

Survival Analysis for KM

Time	Status	Cumulative Survival	Standard Error	Cumulative Events	Number Remaining
61,88	falha	1,0000	,0000	1	51355
180,49	falha	1,0000	,0000	2	51354
515,68	falha	,9999	,0000	3	51353
845,71	falha	,9999	,0000	4	51352
1041,67	falha	,9999	,0000	5	51351
1289,20	falha	,9999	,0000	6	51350
1418,12	falha	,9999	,0001	7	51349
2325,71	falha	,9998	,0001	8	51348
2346,34	falha	,9998	,0001	9	51347
2521,67	falha	,9998	,0001	10	51346
2959,99	falha	,9998	,0001	11	51345
5156,78	falha	,9998	,0001	12	51344
6445,98	censura			12	49621
9772,11	falha	,9997	,0001	13	49620
11540,88	falha	,9997	,0001	14	49619
11968,90	falha	,9997	,0001	15	49618
12891,96	censura			15	48388
14614,33	falha	,9997	,0001	16	48387
25783,92	censura			16	46922
33807,88	falha	,9997	,0001	17	46921
36788,50	falha	,9996	,0001	18	46920
38675,88	censura			18	45843
51567,84	censura			18	45382
52795,16	falha	,9996	,0001	19	45381
64459,80	censura			19	44581
65656,18	falha	,9996	,0001	20	44580
74030,79	falha	,9996	,0001	21	44579
75485,01	falha	,9996	,0001	22	44578
77351,76	censura			22	44006
90243,72	censura			22	42569
103135,7	censura			22	40715
104935,4	falha	,9995	,0001	23	40714
116027,6	censura			23	39228
125144,8	falha	,9995	,0001	24	39227
128919,6	censura			24	37516
140233,6	falha	,9995	,0001	25	37515
140336,7	falha	,9995	,0001	26	37514
141584,7	falha	,9994	,0001	27	37513
141811,6	censura			27	36051
148561,8	falha	,9994	,0001	28	36050
154703,5	censura			28	33951
167595,5	censura			28	31864
180487,4	censura			28	30146
187361,4	falha	,9994	,0001	29	30145
193379,4	censura			29	28717
197020,1	falha	,9993	,0001	30	28716
206261,1	falha	,9993	,0001	31	28715
206271,4	censura			31	27613
219163,3	censura			31	26550
226898,5	falha	,9993	,0001	32	26549
230080,2	falha	,9992	,0001	33	26548
232055,3	censura			33	25104
244947,3	censura			33	22452
257839,2	censura			33	19895
270731,2	censura			33	17252
280632,2	falha	,9992	,0002	34	17251
283623,1	censura			34	14767
296515,1	censura			34	12291
309407,1	censura			34	9583
322299,0	censura			34	6979
335191,0	falha	,9990	,0002	35	6978
335191,0	censura			35	4002
348082,9	censura			35	2253
360974,9	censura			35	0

Number of Cases: 51356 Censored: 51321 (99,93%) Events: 35

	Survival Time	Standard Error	95% Confidence Interval
Mean:	360751,57	38,06	(360676,98 ; 360826,17)
(Limited to	360975)		
Median:	,	,	(, ; ,)

	Percentiles		
	25,00	50,00	75,00
Value	,	,	,
Standard Error	,	,	,

Com os dados de campo constata-se que o tempo médio de vida (360751,57) é superior ao encontrado no estudo dos dados de teste de durabilidade. Esta diferença ocorreu devido ao tempo de teste ser inferior ao tempo de falha no campo. Além disso, observamos que o intervalo (360676,98 ; 360826,17) tem uma confiança de 95% de conter o tempo de vida médio dos motores básicos HS.

A Figura 3.8 mostra que a função de confiabilidade é constante ao longo do tempo, ou seja, a probabilidade do motor realizar a função pretendida é constante.

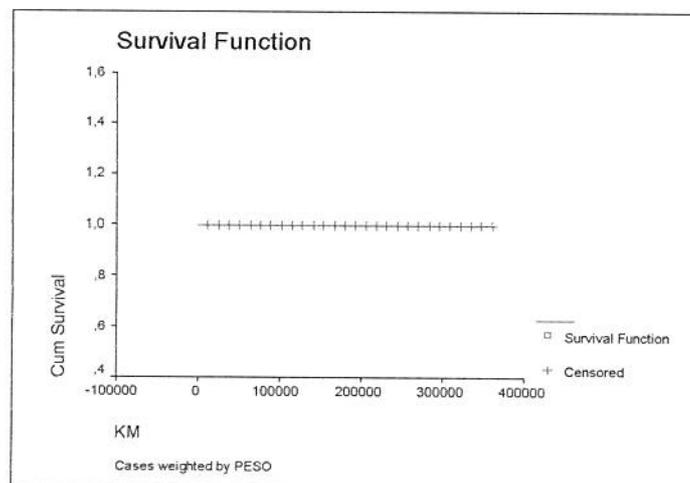


Figura 3.8: Função de confiabilidade dos dados de campo

A função de distribuição acumulada da falha ou função de não confiabilidade ($F(t) = 1 - R(t)$) tem um comportamento crescente, ou seja, a probabilidade do motor falhar ao decorrer do tempo vai aumentando. É o que comprova a Figura 3.9.

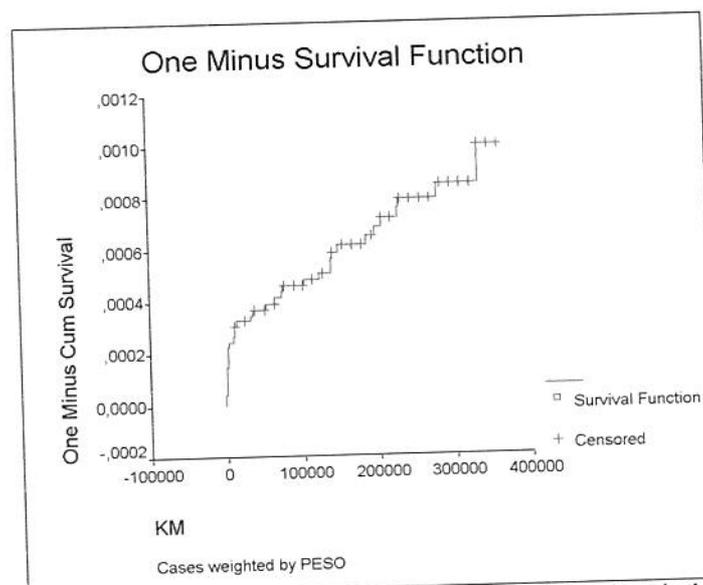


Figura 3.9: Função de distribuição acumulada dos dados de campo

A taxa de falha é crescente em função do tempo, caracterizando assim um mecanismo de deterioração, pois com o passar do tempo o motor fica mais propenso a falhar. A Figura 3.10 mostra este crescimento da taxa de falhas.

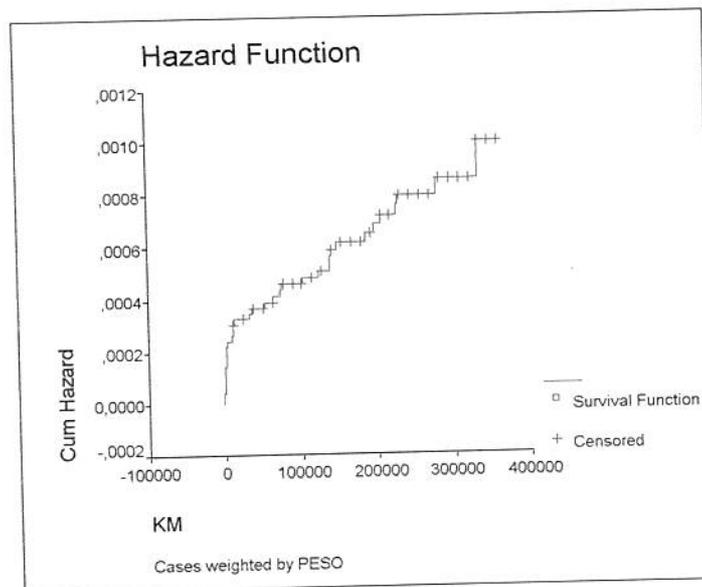


Figura 3.10: Taxa de falhas dos dados de campo

3.6 Comparações

Para um melhor entendimento do comportamento dos motores básicos *High Speed* faz-se agora uma comparação dos resultados obtidos das diferentes análises realizados com esse tipo de motor.

Tanto nos testes de durabilidade quanto com os dados de campo pode-se observar uma falta de ajuste dos dados a uma função de distribuição conhecida. Conclui-se então que, este fato provavelmente ocorreu devido a grande quantidade de censura.

Nos dados de teste isso seria minimizado aumentando o número de horas de ensaio. Já com os dados de campo, seria mais

complicado uma vez que para minimizar o número de motores censurados, seria necessário um acompanhamento maior depois do tempo de garantia, o que é extremamente difícil.

Quando se analisou apenas os motores que falharam no tempo de garantia obteve-se um ajustamento dos dados em estudo com a função de distribuição de weibull. Contudo não é possível tomar o tempo médio deste estudo e extrapolar para o tempo médio de vida do motor básico HS pois, uma vez que representa apenas 0,07% dos motores montados no período em estudo (janeiro de 1997 à maio de 1999) temos apenas o início da função de distribuição de falha real.

A tabela 3.3 mostra um comparativo dos resultados obtidos nas análises dos dados de teste em dinamômetros e do campo.

Tabela 3.3: Comparativo dos resultados dos dados de teste e de campo

	Média	Erro Padrão	Intervalo de Confiança de 95%
Teste	178.424,73	25.420,38	(128.600,78 ; 228.248,69)
Campo	360.751,57	38,06	(360.676,98 ; 360.826,17)

O truncamento das horas de teste em 2578,392 foi insuficiente para se estimar o tempo de vida média dos motores básicos HS, isto é comprovado pela grande diferença entre a média do tempo de vida dos dados de teste em relação aos dados de campo.

4 Considerações a Respeito do Método de Coleta de Dados

Este capítulo visa propor uma metodologia de coleta de dados que aprimorará futuras análises de confiabilidade, mais especificamente, atender a situação estudada no capítulo anterior.

A metodologia proposta a seguir objetiva estabelecer critérios para o planejamento da coleta dos dados a serem utilizados para implementar o uso das técnicas de confiabilidade, a fim de informar o desempenho do produto.

A proposta da metodologia está estruturada em duas etapas, uma visando descrever métodos a serem utilizados em ensaios a serem realizados na empresa e outra, com dados provenientes dos clientes.

Na empresa, propõe-se ensaios em laboratórios na qual devem-se ter alguns cuidados essenciais para obter maior precisão e exatidão dos dados, e assim aumentando a credibilidade dos resultados.

Visando minimizar a variabilidade do ensaio, sugere-se ensaiar os itens em condições idênticas (muito similares), ou seja, controlar o maior

número de variáveis como operadores, bancada de teste (instrumento de medição), modo de realização do teste.

Além disso, com o objetivo de evitar variabilidade devido a fatores que não estão em estudo, deve-se fixar todos os fatores possíveis como componentes, potência e diâmetro do cilindro.

Estabelecer antes do início do ensaio que tipo de teste será realizado quanto à aceleração; ao truncamento; a periodicidade da coleta de dados e as interrupções.

Os estudos podem ser realizados tanto simulando condições reais de operação quanto acelerando estas condições. Para decidir entre estas duas metodologias deve-se considerar que no primeiro caso, quanto mais confiável for o item em estudo maior será o tempo de ensaio o que acarretará altos custos; quanto aos testes acelerados, estes são mais favoráveis visto que geram maior economia financeira e menor tempo de estudo. Contudo, conhecer o modelo de aceleração que modela o fenômeno em geral é um problema de difícil resolução.

O truncamento é um estágio muito importante do planejamento pois dependendo do tipo de truncamento poderá alterar as análises. No caso de ser o truncamento do tipo I, determinar o tempo de término do estudo; se o truncamento for do tipo II, determinar o número de produtos que devem falhar; ou se o truncamento é aleatório, onde retira-se os itens em tempos aleatórios.

A verificação do tempo de vida pode ser periódica ou contínua. A utilização de sistemas que acompanham continuamente o produto são desejáveis, pois os resultados finais são mais informativos e precisos.

Outra decisão prévia é quanto as interrupções durante o estudo. A interrupção permite um descanso, porém obriga nova partida, podendo ser favorável ou desfavorável à vida. Utilizar o modo mais adequado para o produto em estudo, principalmente quando em condições reais há paradas.

A decisão de qual ensaio utilizar deve ser tomada levando em conta o tipo de produto e as possibilidades da empresa atender os requisitos como bancada, operador, bem como o tempo e o recurso financeiro.

Caso haja alguma falha no instrumento de medição durante o teste, prosseguir com o ensaio apenas se não restar dúvidas de que esta falha não influenciará nos resultados, como exemplo o dinamômetro que fornece água, óleo ao motor durante o teste, caso falhe pode alterar alguma destas condições e afetar o rendimento do motor.

Se a falha do equipamento de medição não tenha afetado o item em estudo pode-se consertar o equipamento de medição e prosseguir o teste, continuar o teste em outro equipamento similar ao que estava sendo usado ou ainda, considerar como truncamento aleatório.

Evitar efetuar trocas de componentes durante os testes a fim de que nas conclusões tenha-se certeza de que o item realmente falhou (não por interferência da troca de componente).

Tomando estes cuidados no planejamento da coleta de dados minimizará a variabilidade dos resultados acarretando em respostas muito mais confiáveis.

A segunda etapa da estrutura desta proposta visa utilizar os dados provenientes do uso do cliente final, na qual também deve-se tomar alguns cuidados.

Agregar o máximo de informação para que se tenha uma estimativa da função de distribuição confiável. Apenas os dados de garantia, podem ocasionar vícios nos resultados pois representa o início da função de distribuição dos dados.

Nos itens que não falharam no período de garantia, fazer um levantamento mais detalhado para saber qual o tempo de vida no momento do estudo utilizando informações obtidas de revendas ou diretamente do cliente final.

Estas informações são difíceis de serem levantadas portanto é importante ter um planejamento amostral bem estruturado para a coleta de dados que contemple todas as variáveis que afetem o tempo de vida do produto, tais como: o clima; a região onde está o produto; a aplicação (o uso) do produto, no caso dos motores, se o veículo é de carga ou de passeio ou então se o veículo circula em zona urbana ou rural.

Considerar dados históricos como estudos feitos em oportunidades anteriores, volume de produção do período em estudo, falhas internas e falhas no cliente.

O uso dos dados de cliente possibilitam a obtenção de dados mais condizentes com a realidade, contudo devem bem ser planejados, o que requer mais recursos humanos e financeiros.

A escolha do método dependerá da política da empresa, que poderá optar por realizar seus estudos na empresa , com clientes finais ou então ambos sem prejuízo de informações.

5. Conclusões

Com relação ao estudo de caso discutido no capítulo anterior chega-se as seguintes conclusões, nas quais estão divididas em quatro fases.

Na primeira fase, os resultados foram obtidos a partir de ensaios realizados em dinamômetros e foram sensivelmente prejudicados pela impossibilidade de serem testados mais que seis motores, tal fato deve-se alto custo de cada motor.

O tempo de 2.578 horas no qual foi truncado os ensaios na empresa, fez com que se detectasse a falha de apenas um dos seis motores em teste. Além disso, no momento da falha, este motor apresentava poucas horas de ensaio.

Para verificar o ajustamento a uma função de distribuição conhecida, utilizou-se inicialmente o método do papel de probabilidade e em seguida os testes de aderência. Devido ao número de motores testados e ao tempo de truncamento utilizado, os dados não se ajustaram as funções de distribuição testadas, que são: exponencial, weibull, normal e lognormal.

Como não foi possível ajustar os dados a nenhuma função de distribuição conhecida, não foi possível utilizar análise paramétrica nos dados, sendo assim, utilizou-se análise de sobrevivência não-paramétrica de Kaplan-Meier.

Nesta análise, obteve-se que o tempo de vida médio estimado para o motor básico HS está entre 128.600,78 e 228.248,69 quilômetros, sendo que, este intervalo tem uma confiança de 95 % de conter o tempo de vida média do motor básico HS. A média encontrada neste ensaio foi abaixo do esperado, isso provavelmente ocorreu devido ao número de motores testados serem poucos e muitos deles serem censurados.

Em outra fase do estudo de caso, analisou-se os dados obtidos de motores produzidos entre janeiro de 1997 e maio de 1999, cuja as ocorrências de garantia foram atendidas no período de janeiro de 1998 à maio de 1999. Estes levantamentos foram feitos em caráter exploratório, uma vez que estes dados representam apenas o início da função de distribuição dos dados do cliente final.

Ao avaliar o ajustamento dos dados a uma função de distribuição conhecida, verificou-se que os dados se ajustam a função de distribuição de weibull e a função de distribuição gama ao nível de significância de 5%.

Após isto, optou-se por fazer as análises a partir da distribuição de weibull, uma vez que a gama é um caso particular da weibull e esta última tem um maior respaldo bibliográfico nesta área.

Concluiu-se então que a média de vida estimada pelo método da máxima verossimilhança dos motores básicos HS atendidos em garantia é de 90.881,33 quilômetros.

O fato da média dos motores atendidos em garantia ser muito baixo é esperado, uma vez que é estimado em apenas 0,07% do total produzido no período de janeiro de 1997 à maio de 1999. Além disso, a análise foi feita apenas com os motores que falharam.

Numa terceira fase dos estudos trabalhou-se os dados de clientes finais. Utilizou-se para tanto os dados obtidos com ocorrências de garantia, juntamente com uma estimativa da quilometragem média percorrida pelos motores que não falharam.

O fato de estimar o número de motores montados em 1997 e que falharam no mesmo ano, juntamente com o fato de utilizar uma informação empírica da quilometragem média anual dos motores que não falharam, fazem com que ocorra um erro experimental maior do que obtendo estas informações de algum estudo realizado anteriormente. Contudo eram as únicas informações disponíveis para a realização destes estudos.

As análises de ajustamento a uma função de distribuição conhecida foi extremamente difícil devido ao grande número de dados (total de 51.356 casos) e o enorme número de dados censurados (número de casos censurados é igual a 51.321, ou seja, 99,93% do dados).

Em virtude disso, apenas a função de distribuição de weibull foi testada, através do método de papel de probabilidade, na qual o resultado rejeita a hipótese de que os dados seguem uma função de distribuição

weibull. Este fato impossibilita o uso de uma análise paramétrica, utilizou-se então a análise de sobrevivência não-paramétrica Kaplan-Meier.

Nestas análises conclui-se que a vida média estimada dos motores básicos HS está contida no intervalo de 360.676,98 à 360.826,17 quilômetros. Este intervalo tem 95% de confiança de conter a verdadeiro tempo médio de vida dos motores básicos HS.

Na última fase temos uma comparação dos resultados dos dados de campo com os resultados dos testes realizados em dinamômetros, na qual verificamos que o tempo de vida média nos dados de cliente é muito superior aos do ensaio na empresa.

Esta diferença entre os resultados é explicada pelo fato de que os dados ensaiados nos dinamômetros tiveram um tempo de truncamento abaixo do tempo médio de vida esperado.

Com base nas conclusões de cada fase conclui-se então, que a grande discrepância entre os resultados obtidos dos testes em dinamômetros e os resultados da análise dos dados de campo pode ser diminuída, principalmente, aumentando o número de horas do truncamento nos ensaios que serão realizados na empresa.

Além disso, deve-se ter um bom planejamento da coleta de dados para os ensaios na empresa, levando-se em conta estudos realizados anteriormente, tempo de censura, periodicidade de coleta, interrupções e condições de teste (acelerado ou não).

Para aproximar ainda mais os resultados de campo à realidade, deve-se realizar um estudo prévio para obter com maior precisão

a quilometragem média efetuada pelos clientes finais. Para tanto deve-se ter um bom planejamento amostral da coleta de dados junto aos clientes.

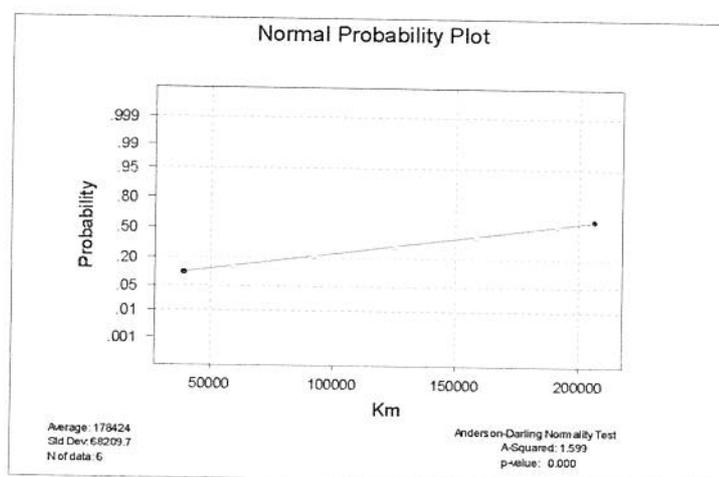
6. Anexos

ANEXO A – RELAÇÃO DAS UNIDADES DE UM MOTOR BÁSICO HS

Os grupos básicos são aqueles compostos por itens vitais do motor, segue a relação destes itens:

- GB11/... – Grupo Básico – Bloco de Cilindros
- GB12/... – Grupo Básico – Caixa de Distribuição
- GB13/... – Grupo Básico – Árvore de Manivelas
- GB14/... – Grupo Básico – Pistão e Biela
- GB15/... – Grupo Básico – Bomba de Óleo Lubrificante
- GB16/... – Grupo Básico – Eixo Acionam Auxiliar
- GB17/... – Grupo Básico – Cabeçote
- GB18/... – Grupo Básico – Válvulas e Balanceiros
- GB19/... – Grupo Básico – Vedador Traseiro Árvore Manivelas
- GB20/... – Grupo Básico – Eixo Comando de Válvulas
- GB21/... – Grupo Básico – Engrenagens Intermediárias
- GB22/... – Grupo Básico – Correia e Tensor

ANEXO B – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO
NORMAL AOS DADOS DO TESTE DE DINAMÔMETRO



Goodness of Fit Tests:⁵

Chi-Square test:

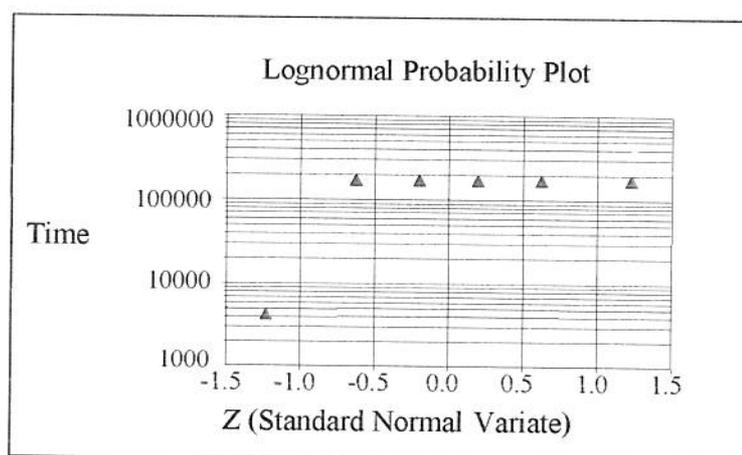
Chi-square = 3,93 with 1 d.f.
Significance level = 0,0474

Kolmogorov-Smirnov test:

Estimated Kolmogorov DN = 0.4918
Approximate significance level = 0.0001

⁵ Foram utilizados os software Minitab e Relest

ANEXO C – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO
LOGNORMAL AOS DADOS DO TESTE DE DINAMÔMETRO⁶



⁶ Utilizou-se o software Relest

**ANEXO D – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO
GAMA AOS DADOS DE GARANTIA**

Goodness of Fit Tests:⁷

Chi-Square test:

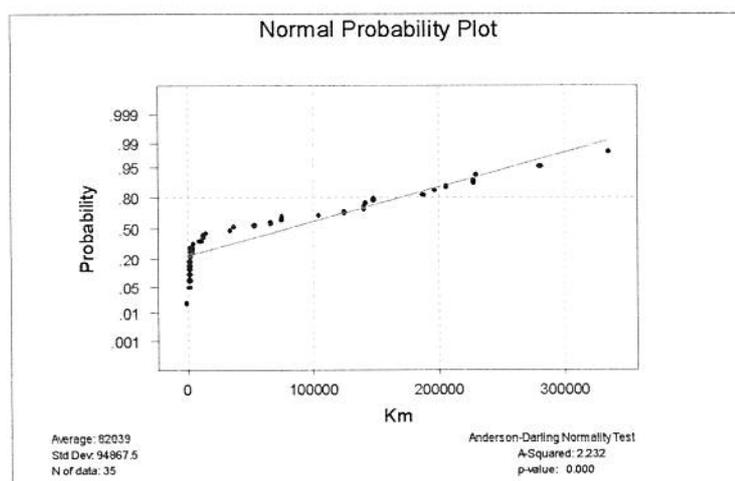
Lower Limit	Uper Limit	Observed Frequency	Expected Frequency	Chi-square Value
0	58657,742	19	20,1	0,06
58657,742	117315,48	4	4,7	0,11
117315,48	175973,23	5	2,5	2,38
175973,23	234630,97	5	1,5	8,06
234630,97	293288,71	1	0,9	0,01
293288,71	above	1	5,2	3,39

Chi-square = 14,00 with 3 d.f.
Significance level = 0,0029

Kolmogorov-Smirnov test:
Estimated Kolmogorov DN = 0.1358
Approximate significance level = 0.1008

⁷ Utilizou-se o software Relest

ANEXO E – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL AOS DADOS DE GARANTIA



Goodness of Fit Tests:⁸

Chi-Square test:

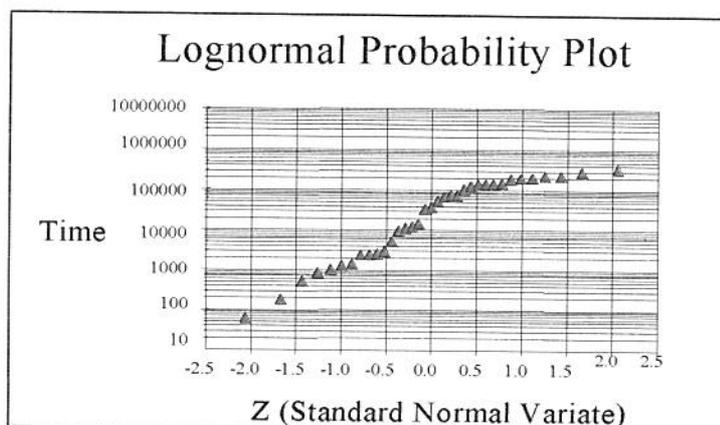
Chi-square = 5,75 with 3 d.f.
Significance level = 0,1246

Kolmogorov-Smirnov test:

Estimated Kolmogorov DN = 0.2185
Approximate significance level = 0.0002

⁸ Utilizou-se os softwares Minitab e Relest

**ANEXO F – TESTES DE ADERÊNCIA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO
LOGNORMAL AOS DADOS DE GARANTIA**



Goodness of Fit Tests:⁹

Chi-Square test:

Lower Limit	Uper Limit	Observed Frequency	Expected Frequency	Chi-square Value
0	58657,742	19	24,1	1,09
58657,742	117315,48	4	3,3	0,13
117315,48	175973,23	5	1,6	6,85
175973,23	234630,97	5	1	15,67
234630,97	293288,71	1	0,7	0,13
293288,71	above	1	4,2	2,41

Chi-square = 26,28 with 3 d.f.

Significance level = 0,0001

Kolmogorov-Smirnov test:

Estimated Kolmogorov DN = 0.16323

Approximate significance level = 0.0190

⁹ Utilizou-se o software Relcost

**ANEXO G – ESTIMATIVA DOS MOTORES MONTADOS EM 1997 E QUE
FALHARAM NO MESMO ANO**

Ano	Total vendido
97	27645
98	17778
99	5958
Total	51381

Ano de Atendimento pelo setor de garantia	Motores vendidos em ...	Motores falhados	Proporção %	Estimativa de motores falhados em 1997
97	94			
	95			
	96			
	97			24,880189
98	95			
	96	5		
	97	9		
	98	16	0,0899989	
99	96	1		
	97	2		
	98	6		
	99	2		

**ANEXO H - QUILOMETRAGEM ESTIMADA DOS MOTORES
CENSURADOS**

Mês	Total Vendas HS	Falhas na garantia	Falhas estimadas 97	Total não falhado	Meses até maio/99	km média/mês	Total percorrido por motor
Jan/97	2256		3	2253	28	12891,96	360974,90
Fev/97	1754	2	3	1749	27	12891,96	348082,94
Mar/97	2979		3	2976	26	12891,96	335190,98
Abr/97	2608	1	3	2604	25	12891,96	322299,01
Mai/97	2712	1	3	2708	24	12891,96	309407,05
Jun/97	2481	2	3	2476	23	12891,96	296515,09
Jul/97	2487	1	2	2484	22	12891,96	283623,13
Ago/97	2644		1	2643	21	12891,96	270731,17
Set/97	2560	2	1	2557	20	12891,96	257839,21
Out/97	2654		2	2652	19	12891,96	244947,251
Nov/97	1445		1	1444	18	12891,96	232055,29
Dez/97	1065	2		1063	17	12891,96	219163,33
Jan/98	1104	2		1102	16	12891,96	206271,37
Fev/98	1431	3		1428	15	12891,96	193379,41
Mar/98	1721	3		1718	14	12891,96	180487,45
Abr/98	2089	2		2087	13	12891,96	167595,49
Mai/98	2105	6		2099	12	12891,96	154703,53
Jun/98	1463	1		1462	11	12891,96	141811,57
Jul/98	1712	1		1711	10	12891,96	128919,61
Ago/98	1486			1486	9	12891,96	116027,65
Set/98	1857	3		1854	8	12891,96	103135,68
Out/98	1437			1437	7	12891,96	90243,72
Nov/98	573	1		572	6	12891,96	77351,76
Dez/98	800			800	5	12891,96	64459,80
Jan/99	461			461	4	12891,96	51567,84
Fev/99	1077			1077	3	12891,96	38675,88
Mar/99	1465			1465	2	12891,96	25783,92
Abr/99	1232	2		1230	1	12891,96	12891,96
Mai/99	1723			1723	0,5	12891,96	6445,98
Total	51381	35	25	51321			

Referências Bibliográficas

AMSTADTER, Bertram L., **Reliability Mathematics: Fundamentals; Practices; Procedures**. New York: ed. McGRAW-HILL, 1971. 408p.

BURR, Irving W., **Elementary Statistical Quality Control (Statistics: textbooks and monographs)**, New York: ed. Macel Bekker, v. 25, 1979. 413p. p. 371 – 384,

CAMPOS, Humberto de, **Estatística Experimental Não – Paramétrica**, São Paulo: ed USP, 4º edição, 1983. 349p.

EBRAHIMI, Nader, **Engineering Notion of Mean-Residual-Life & Hazard-Rate for Finite Populations with Known Distributions**, IEEE Transactions on Reliability, v. 45, nº 3, p. 362 - 368, setembro 1996.

ENCONTRO INTERNACIONAL EM QUALIDADE E CONFIABILIDADE, 1º, 1992, Porto Alegre. **Anais do 1º Encontro Internacional em Qualidade e Confiabilidade**. Porto Alegre: UFRGS;PPGEP, 1992

ENGELHART, Max, GUFFEY, James M., **Tests for Positive Jumps in the Intensity of a Poisson Process: A Power Study**, IEEE Transactions on Reliability, v. 39, n° 3, p. 356-360, august 1990.

FEIGENBAUM, Armand Vallin, **Total Quality Control**, New York, ed. McGraw-Hill, third edition, 1983. 851p. p. 570 – 612.

FMEA - **Análise de Modos e Efeitos de Falha Potencial**, Manual de Referência da QS 9000, 3° edição, São Paulo, 1997 p. 25-35.

FORD Automotive Operations – Quality, **FAO Reliability Guide – PD Useful Life Reliability Commitment – Tools & Methods Modeles – Modele 3: Reliability Growth Curves**, United States of America, 1996, edition 1.

FORD Automotive Operations – Quality, **FAO Reliability Guide – PD Useful Life Reliability Commitment – Tools & Methods Modeles – Modele 5: Funcional & Reliability Target Setting**, United States of America, 1997, edition 2.

GARCIA, Osvaldo, BRUNETTI, Franco, **Motores de Combustão Interna**, São Paulo, 1992. 367p.

GNEDENKO, B. V., BELYAYEV, Yu K., and Solovyev, A. D., **Mathematical Methods of Reliability Theory (Probability and Mathematical Statistics – A Series of monographs and textbooks)**, New York, ed. Academic Press – 1969. 506p.

KAPPER, K. C., LAMBERSON, L. R. , **Reliability in Engineering Design**, New York, ed. John Wiley & Sons, 1977

KOSSOW, Andreas, PREUSS, Wolfgang, **Mean Time-to-Failure for a Linear-Consecutive-K-out-of-n: F System**, IEEE Transactions on Reliability, v. 40, n° 3, p. 271 – 272, august 1991.

MANN, Nancy R., SHAFER, Ray E., SINGDURWALLA, Nozer D., **Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data**, New York, ed John Wiley & Sons, 1990.

Murteira, B. J. F., **Probabilidade e Estatística**, São Paulo, McGraw-Hill, v. 2, 1990.

NAIR, N Unnikrishnan, SANKARAN,P. G., **Characterization of the Pearson Family of Distributions**, IEEE Transactions on Reliability, v. 40, n° 1, p.75-77, april 1991

O'CONNOR. Patrik D.T., **Pratical Reliability Engineering**, New York, ed. John Wiley & Sons, second edition, 1985

QPB Consultoria e Treinamento S/C Ltda, **Confiabilidade de Sistemas**: 1994

RIBEIRO, J.L.D. **Confiabilidade de Sistemas**, UFRGS , Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 1995.

SARKADI, K., VINCZE, I., **Mathematical Methods of Statistical Quality Control (Probability and Mathematical Statistics – A Series of monographs and textbooks)**, New York: ed. Academic Press, , 1974. 415p.
p.358 – 377

SIDDAL, James N, **Probabilistic Engineering Design: Principles and Applications**, New York: ed Marcel Bekker, 1983 p. 353 – 382.

SIEGEL, Sidney, **Estatística Não – Paramétrica**, São Paulo: ed McGRAW-HILL, 1977. 350p.

SOARES, José Francisco, COLOSIMO, Enrico A., **Métodos Estatísticos na Pesquisa Clínica**, 40ª Reunião Anual da RBRAS e 6º SEAGRO, Ribeirão Preto, SP, 1995.

WERNER, Liane, **Controle Estatístico de Qualidade**, Porto Alegre, UFRGS, série B, nº 32, p.99 – 103, 1996.

XIONG, Chengjie, **Inferences on a Simple Step-Stress Model with Type-II Censored Exponential Data**, IEEE Transactions on Reliability, v. 47, nº 2, p.142-146, june 1998.

Glossário

Causa da Falha: É definida como a forma pela qual a falha poderia ocorrer, descrita em termos de alguma coisa que possa ser corrigida ou possa ser controlada (Manual de referência FMEA da QS 9000).

Dinamômetro Hidráulico: O dinamômetro hidráulico é um dispositivo destinado a absorção e medição de potência produzida por uma fonte capaz de acioná-lo, no estudo de caso, o motor a Diesel. Para que funcione é necessário o suprimento de um fluxo de água contínuo, para absorver a energia mecânica e trocar o calor gerado.

O dinamômetro possui um rotor aletado que gira no interior de uma carcaça com estatores também aletados. A água entra na câmara do rotor axialmente, ao centro. Pela ação centrífuga, a água é acelerada e lança para a saída, formando um anel no interior da câmara do rotor, que gira com rotação aproximadamente igual a metade da velocidade do disco do rotor. Finalmente, a água sai da câmara do rotor através do bocal situado na parte inferior da carcaça.

A energia mecânica fornecida pelo motor em ensaio é absorvida e convertida em calor por um remoinho que é gerado com a passagem da água entre as aletas do rotor e dos estatores. O calço resultante aplica uma resistência ao movimento de rotação do rotor e tende a girar a carcaça no sentido inverso com igual esforço. Este esforço é transmitido, por meio de um braço, a uma célula de carga instalada a uma distância fixa da linha de centro do dinamômetro. (GARCIA, O., BRUNETTI, F, 1992)

Disponibilidade: A habilidade de um item (sob aspectos combinados de confiabilidade, manutenibilidade e suporte da manutenção) para realizar as funções exigidas no instante estabelecido de tempo ou depois de um período de tempo estabelecido (BS4778 *apud* O'Connor, 1985).

Durabilidade: A capacidade de um produto de atender à função exigida, em determinadas condições de uso e manutenção, até a consecução de uma situação limite.

Falha: O término da habilidade de um item realizar a função exigida (BS4778 *apud* O'Connor, 1985).

Manutenibilidade: A habilidade de um item, em condições de uso estabelecido, de ser mantido ou restaurado, quando a manutenção é feita

sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos descritos (BS4778 *apud* O'Connor, 1985).

Mecanismos de Falha: São os processos físicos, químicos, elétricos, térmicos ou outros, que levam o item à falha.

Modo de Falha: É definido como a maneira pela qual o produto falharia em atender aos requisitos do processo/projeto (Manual de referência FMEA da QS 9000).

Qualidade do Produto: É a capacidade do produto satisfazer as expectativas do cliente.

Redundância: A existência de mais de uma maneira de realizar uma dada função. Os modos de realizar a função não precisam necessariamente serem idênticos. (MIL-STD-721B *apud* O'Connor, 1985).