

FABRÍCIO LOURENÇO

ESTUDO DE CONFIABILIDADE DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO E O  
IMPACTO DO TEMPO DE PÁTIO NA SUA CONFIABILIDADE

São Paulo

2010

FABRÍCIO LOURENÇO

ESTUDO DE CONFIABILIDADE DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO E O  
IMPACTO DO TEMPO DE PÁTIO NA SUA CONFIABILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do Título de Mestre Profissional em  
Engenharia Automotiva.

Área de Concentração:  
Engenharia Automotiva

Orientador:  
Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo  
2010

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Lourenço, Fabrício**

**Estudo de confiabilidade de baterias de chumbo-ácido e o impacto do tempo de pátio na sua confiabilidade / F. Lourenço. - São Paulo, 2010.**

**94 p.**

**Trabalho de conclusão de curso (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.**

**1. Indústria automobilística 2. Baterias elétricas (Confiabilidade) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica II. t.**

*Dedico este trabalho com amor à Cristiane, pelos momentos em que não pude lhe dar a devida atenção e aos meus pais, Odilon e Denilde.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Doutor Gilberto Francisco Martha de Souza, que compartilhou seu conhecimento e orientação durante a execução desse trabalho.

O meu agradecimento aos meus superiores pela compreensão, incentivo e suporte prestado durante o meu período de Mestrado.

Aos meus pais, sogros, irmãos, cunhadas e sobrinhas, que souberam compreender minhas ausências durante os finais de semana em virtude da elaboração deste trabalho.

Finalmente, a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

## RESUMO

As baterias automotivas de chumbo-ácido são componentes, que em grande parte dos fabricantes de automóveis nacionais, estão garantidas (ou dentro do período de garantia) por um ano. Mesmo sendo um período considerado curto para garantia de um veículo nos dias atuais, a bateria tem uma contribuição expressiva para os custos de garantia nas empresas por este período.

Com o intuito de conhecer a confiabilidade deste componente e verificar a influência do período de armazenagem do veículo produzido na confiabilidade da bateria, foi elaborado um estudo com dados coletados em campo por um determinado fabricante de automóveis de passeio. Os parâmetros de entrada destes dados são o tempo de pátio do veículo, o tempo em que uma falha na bateria foi detectada no período de um ano de garantia e a quantidade de falhas observadas no período.

Os dados permitiram análises em função do tempo, de forma que pelo método de análise paramétrica foram traçadas as curvas de confiabilidade do produto representadas por uma distribuição de Weibull de dois parâmetros, bem como, da densidade de probabilidade de falha e ainda da taxa de falha. As análises forneceram uma estimativa da confiabilidade da bateria em função do tempo, da qual foi possível extrair algumas conclusões que serão descritas neste trabalho, tais como : o comportamento de falha por desgaste das baterias automotivas e a diminuição da confiabilidade de baterias de acordo com o tempo de pátio.

## **ABSTRACT**

The guarantee for the automotive batteries at the majority of the national vehicle manufactures is given for 1 year. Even considering this as a short period actually, this component has an expressive contribution to the guarantee costs of the companies.

With the intention to know the reliability of the automotive batteries and to evaluate the vehicle storage time influence, it was carried out a study case, which had as inputs collected data from a particular vehicle manufacturer. The selected input parameters for the analysis were the vehicle storage time, time to failure and the failures amount detected in a period of 1 year.

This data provided information to analyze the time domain and, supported by the reliability parametric methods, estimate the reliability of the automotive batteries. The two parameter Weibull distribution is used to model the probability density function, the failure rate analysis and reliability providing information for the conclusion of this study, like the batteries behavior of failure by wear and the reliability decrease according to the storage time.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Critério na compra de um carro .....	18
Figura 2 - Histograma de freqüência de falhas - a) dados de falha coletados; b) tempos de falha agrupados; c) histograma de freqüência das falhas com a função densidade de probabilidade empírica.....	23
Figura 3 - Histograma de freqüência de falhas e função densidade de probabilidade empírica.....	24
Figura 4 - Histograma de freqüência das falhas e função densidade de probabilidade, com o número de amostras tendendo a infinito.....	25
Figura 5 - Função densidade de probabilidade para mortes humanas. ....	26
Figura 6 - a) histograma da freqüência de falhas; b) histograma de falhas acumuladas e função empírica de probabilidade de falha acumulada .....	27
Figura 7 - Histograma e função de probabilidade acumulada com o número de amostras tendendo à infinito .....	28
Figura 8 - Função de probabilidade acumulada para morte de seres humanos.....	29
Figura 9 - Histograma de sobrevivência e Função confiabilidade. ....	30
Figura 10 - $R(t)$ como complemento da $F(t)$ em uma função de densidade de probabilidade.....	31
Figura 11 - Função confiabilidade para vida de humanos.....	31
Figura 12 - Histograma empírico da taxa de falha.....	32
Figura 13 - Taxa de falha baseada na f.d.p. e função confiabilidade. ....	33
Figura 14 - Taxa de falha para expectativa de vida humana.....	34
Figura 15 - Curva da banheira –.....	34
Figura 16 - Distribuições exponenciais com $\theta$ variando de 0,5 até 2 .....	39
Figura 17 - Distribuições Lognormal parâmetro de escala $\exp(\mu)=1$ e de forma $\sigma =$ 0,3; 0,5; 0,8 .....	40
Figura 18 - Distribuição de Weibull dois parâmetros com $\eta=1$ e $\beta$ variando. ....	43
Figura 19 - representação gráfica da busca pelo valor da máxima verossimilhança, conseqüentemente o $\eta$ e $\beta$ otimizados.....	44
Figura 20 - Células de Planté.....	47
Figura 21-Motor atual de partida Bosch e seus componentes internos.....	48



Figura 22 - Sistema elétrico de um veículo dos anos 1920.....	49
Figura 23 - Sistema elétrico de um veículo dos anos 1990.....	50
Figura 24 - Crescimento da carga elétrica automotiva ao longo dos anos.....	51
Figura 25 - Alternador Bosch e seus componentes internos.....	54
Figura 26 - Reação de descarga da bateria.....	56
Figura 27 - Reação de carga da bateria.....	57
Figura 28 - Reação de sobrecarga.....	58
Figura 29 - Bateria Desmembrada.....	59
Figura 30 - Disposição das células dentro da caixa da bateria.....	61
Figura 31 - Grades fundidas à esquerda e grade expandida à direita.....	62
Figura 32 - Placa negativa.....	62
Figura 33 - Placa Positiva.....	62
Figura 34 - Separador de polietileno.....	63
Figura 35 - Critério de falha.....	65
Figura 36 - Gráfico de confiabilidade, baterias Tipo I.....	69
Figura 37 - Função distribuição acumulada, baterias Tipo I.....	69
Figura 38 - Função Densidade de Probabilidade, baterias Tipo I.....	70
Figura 39 - Função da Taxa de Falha, baterias Tipo I.....	71
Figura 40 – Gráfico de confiabilidade, baterias Tipo II.....	73
Figura 41 – Função da distribuição acumulada, baterias Tipo II.....	73
Figura 42 - Função Densidade de Probabilidade, baterias Tipo II.....	74
Figura 43 - Taxa de Falha, baterias Tipo II.....	75
Figura 44 - Gráfico de confiabilidade, comparativo de baterias Tipo I.....	77
Figura 45 - Função distribuição acumulada, comparativo de baterias Tipo I.....	77
Figura 46 - Função da Taxa de Falha, comparativo de baterias Tipo I.....	78
Figura 47 - Função Densidade de Probabilidade, comparativo de baterias Tipo I.....	79
Figura 48 - Gráfico de confiabilidade, comparativo de baterias Tipo II.....	80
Figura 49 - Função distribuição acumulada, comparativo de baterias Tipo II.....	80
Figura 50 - Função da Taxa de Falha, baterias Tipo II.....	81
Figura 51 - Função Densidade de Probabilidade, baterias Tipo II.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Mercado de baterias de Chumbo-ácido para veículos de passageiros e pequenos utilitários em milhares de unidades.....	15
Tabela 2 - Mercado de baterias de Chumbo-ácido para veículos de passageiros e pequenos utilitários em milhares de Euros.....	16
Tabela 3- Formas mais comuns da curva da banheira .....	36
Tabela 4- Cargas elétricas .....	52
Tabela 5- Consumo máximo de corrente parasita por componente.....	53
Tabela 6 – Resumo dos valores de $\beta$ e $\eta$ para as análises realizadas.....	83

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGREE - Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment

BCI – Battery Council International

CCA – Cold Crank Ampere

RADC - Rome Air Development Corporation

RRE - Royal Radar Establishment

SLI – Start Light and Ignition

UKAEA - United Kingdom Atomic Energy Authority

USA – United States of America

VDI - Verein Deutscher Ingenieure

VRLA – Valve Regulated sealed Lead Acid

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f(t)$  – Função densidade de probabilidade de falha em função do tempo

f.d.p. – Função densidade de probabilidade

$F(t)$  – Função de probabilidade acumulada de falha em função do tempo

$R(t)$  – Função de confiabilidade em função do tempo

$\lambda(t)$  – Taxa de falhas em função do tempo

$\eta$  – Constante de escala na distribuição de Weibull

$\beta$  – Constante de forma na distribuição de Weibull

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Ácido Sulfúrico

PbO<sub>2</sub> – Dióxido de Chumbo

Pb - Chumbo

H<sub>2</sub>O - Água

PbCa – Liga de chumbo cálcio

PbCaAg – Liga de chumbo cálcio prata

Ah – Amper hora

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b> .....	15
<b>1.1 Objetivos: geral e específicos</b> .....	17
<b>2 Confiabilidade</b> .....	18
<b>2.1 História da Confiabilidade</b> .....	18
<b>2.2 Definição de Confiabilidade</b> .....	21
<b>2.2.1 Função densidade de probabilidade (fdp) e Histograma</b> .....	22
<b>2.2.2 Função de Probabilidade de Falha ou Probabilidade Acumulada</b> .....	27
<b>2.2.3 Função de Probabilidade de Sobrevivência ou Confiabilidade</b> .....	29
<b>2.2.4 Curva da banheira ou Taxa de falha</b> .....	32
<b>2.2.5 Dados Censurados</b> .....	36
<b>2.2.6 Análise Paramétrica</b> .....	37
<b>2.2.6.1 Distribuição Exponencial</b> .....	38
<b>2.2.6.2 Distribuição Lognormal</b> .....	40
<b>2.2.6.3 Distribuição de Weibull</b> .....	41
<b>3 Descrição Técnica do Produto</b> .....	45
<b>3.1 História da bateria automotiva</b> .....	45
<b>3.2 Sistema elétrico automotivo</b> .....	50
<b>3.3 Bateria automotiva</b> .....	55
<b>3.4 Partes da bateria</b> .....	59
<b>4. Análise de Confiabilidade de Baterias</b> .....	64
<b>4.1 Critério de falha da bateria</b> .....	64
<b>4.2 Universo das amostras</b> .....	66
<b>4.3 Análise de confiabilidade</b> .....	67
<b>4.4 Análises de amostras de baterias do Tipo I</b> .....	68
<b>4.5 Análises das amostras do Tipo II</b> .....	72
<b>4.6 Avaliação do Impacto do Tempo de Pátio</b> .....	76
<b>4.6.1 Análise em relação ao tempo de pátio das baterias do Tipo I</b> .....	76

<b>4.6.2 Análise em relação ao tempo de pátio das baterias do Tipo II.....</b>	<b>79</b>
<b>4.7 <i>Relação entre as análises de confiabilidade e a física da bateria</i> .....</b>	<b>83</b>
<b>5. Conclusão .....</b>	<b>86</b>
<b>5.1 <i>Recomendação para trabalhos futuros</i>.....</b>	<b>89</b>
<b>6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>90</b>
<b>Anexo I .....</b>	<b>93</b>

## 1. Introdução

Um dos maiores índices de reclamação de clientes proprietários de veículos automotivos é a confiabilidade da bateria instalada no veículo. Se forem analisados os principais índices de qualidade das maiores montadoras nacionais, a bateria estará sempre entre os maiores índices de retorno de peças em garantia, gerando elevados custos.

Pelo estudo realizado por Beecham (2009), é possível verificar que o mercado de baterias automotivas movimenta um grande volume de peças e euros. Os números estão ilustrados nas Tabela 1 e Tabela 2, onde os valores de 2009 em diante são estimados em função da projeção do volume de produção de veículos.

Tabela 1- Mercado de baterias de Chumbo-ácido para veículos de passageiros e pequenos utilitários em milhares de unidades.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Europe	16,163	16,165	16,268	16,325	16,485	16,964
North America	19,544	19,710	19,312	19,234	19,394	19,558
Japan	5,725	5,730	5,613	5,576	5,704	5,772
China	4,831	5,390	6,814	7,862	8,944	10,102
<b>Total</b>	<b>46,263</b>	<b>46,995</b>	<b>48,007</b>	<b>48,997</b>	<b>50,526</b>	<b>52,397</b>

	2010	2011	2012	2013	2014
Europe	17,561	18,039	18,399	18,767	19,143
North America	19,797	20,040	20,241	20,443	20,647
Japan	5,826	5,865	5,894	5,923	5,953
China	11,339	12,603	13,863	15,249	16,774
<b>Total</b>	<b>54,523</b>	<b>56,546</b>	<b>58,397</b>	<b>60,383</b>	<b>62,517</b>

(Global Market Review of Automotive Batteries – Forecasts to 2016, 2009)

Tabela 2 - Mercado de baterias de Chumbo-ácido para veículos de passageiros e pequenos utilitários em milhares de Euros.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Europe	300,995	298,020	296,911	294,978	294,884	300,412
North America	344,798	344,240	333,917	329,247	328,656	328,130
Japan	112,215	111,197	107,827	106,052	107,409	107,606
China	79,704	88,049	110,198	125,863	141,753	158,520
<b>Total</b>	<b>837,711</b>	<b>841,506</b>	<b>848,854</b>	<b>856,139</b>	<b>872,701</b>	<b>894,668</b>

	2010	2011	2012	2013	2014
Europe	307,889	313,092	316,160	319,259	322,387
North America	328,812	329,527	329,494	329,461	329,428
Japan	107,524	107,149	106,608	106,070	105,534
China	176,141	193,816	211,066	229,851	250,307
<b>Total</b>	<b>920,366</b>	<b>943,584</b>	<b>963,328</b>	<b>984,640</b>	<b>1,007,657</b>

(Global Market Review of Automotive Batteries – Forecasts to 2016, 2009)

Devido a este fato, é de grande interesse de todas as empresas envolvidas que se realize um estudo da confiabilidade desse componente, verificando fatores que podem influenciar na confiabilidade da bateria.

A bateria é um componente eletroquímico que é responsável por acumular energia elétrica no sistema do veículo. Pode-se fazer a analogia de uma bateria instalada no veículo com uma caixa d'água instalada em uma residência. Quando a bóia da caixa d'água em uma residência desce, automaticamente o mecanismo faz com que a água da rua, que vem com pressão, entre na caixa d'água até que ela esteja totalmente cheia. O mesmo ocorre com a bateria quando o motor está ligado. O alternador faz com que a energia mecânica do motor seja transformada em energia elétrica e seja acumulada na bateria. Na residência existem as tubulações por onde sai a água da caixa d'água para as torneiras. O mesmo ocorre no veículo com os componentes elétricos e eletrônicos que são responsáveis por drenar essa energia da bateria quando o motor está desligado.

A utilização do veículo não é igual para todos os proprietários. Algumas aplicações exigem mais da bateria, pois a utilização ideal da bateria seria não permitir que ela varie muito o seu estado de carga (energia acumulada). Portanto



pode-se considerar que o pior caso é a utilização do veículo de uma maneira que a bateria gere vários ciclos profundos de carga e descarga. Mais detalhes sobre o motivo desse procedimento ser prejudicial são mostrados no decorrer do trabalho.

### **1.1 Objetivos: geral e específicos**

Os principais objetivos desse estudo são:

- Determinar o comportamento de baterias em campo;
- Verificar a influência do tempo de pátio nesse comportamento.

Para isso são necessários estudos dos casos de troca de bateria disponíveis para análise. Para essa análise serão utilizados dois grupos específicos de veículos que tiveram a bateria substituída dentro do período de garantia de um ano, pois após esse período, a montadora não é mais responsável pelo custo da peça e conseqüentemente o cliente não necessariamente irá realizar a troca em uma concessionária.

Após a análise das informações de garantia foi realizado um estudo de confiabilidade dessas peças com dados coletados em campo pela fabricante de automóveis. Esse estudo da confiabilidade em conjunto com o estudo técnico do produto irá mostrar a melhor modelagem do comportamento desse componente em campo.

Com a modelagem do comportamento do componente, são obtidas respostas para as seguintes perguntas:

- Qual o comportamento de falha dessas peças?
- Existem modos de falha que explicam esse comportamento?
- Existe mortalidade infantil (falhas no projeto ou processo) do componente?
- Existe influência do tempo de pátio na confiabilidade?

## 2 Confiabilidade

De acordo com Bertsche (2008), a confiabilidade é atualmente um assunto cotidiano principalmente quando se trata da funcionalidade de um produto, considerando que um produto confiável é aquele que realiza todas as suas funções em qualquer tempo e em quaisquer condições de operação, desde que de acordo com as condições pré-especificadas de uso no seu projeto. A figura 1 mostra a importância da confiabilidade do produto no critério de compra de um carro.

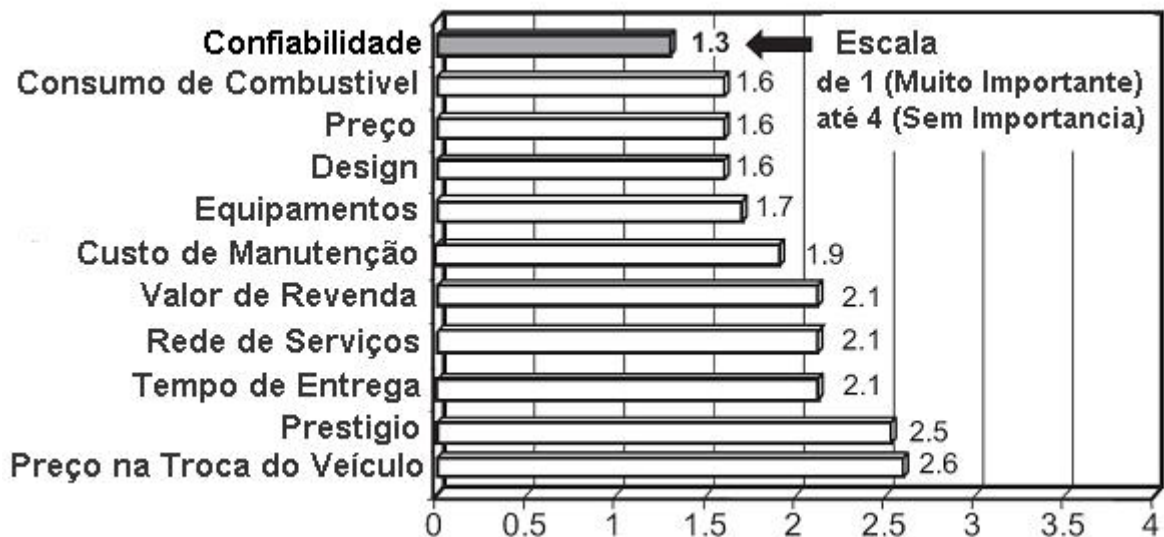


Figura 1 - Critério na compra de um carro (Bertsche, 2008)

### 2.1 História da Confiabilidade

Segundo Fogliatto (2009), o conceito de confiabilidade adquiriu um significado tecnológico somente após o término da I Guerra Mundial, quando foi utilizado para descrever estudos comparativos em aviões com um, dois ou quatro motores, medindo em números a confiabilidade, expressa em termos do número de acidentes por hora de voo. Segundo o mesmo autor sabe-se também do uso das técnicas de

confiabilidade no desenvolvimento dos mísseis alemães V-1, projeto em que trabalhou o matemático alemão Robert Lusser, que propôs a lei de probabilidade de um produto com componentes em série, demonstrando que, um sistema complexo composto por diversos componentes em série tende a abaixar a confiabilidade do sistema como um todo.

O interesse norte-americano motivou avanços na área de confiabilidade com o desenvolvimento de mísseis intercontinentais e na pesquisa espacial. Surgiu em 1963 a primeira associação americana que reunia engenheiros de Confiabilidade e o primeiro periódico para divulgação de trabalhos na área, o IEEE – Transactions on Reliability.

Dhillon (2007) descreve que a história da confiabilidade se inicia no início dos anos 1930 com os princípios sendo aplicados em problemas relacionados à geração de energia nos Estados Unidos, o autor também reforça a informação de Fogliatto (2009) que os alemães aplicaram princípios básicos de confiabilidade nos mísseis V1 e V2. Outro ponto importante trazido por Dhillon (2007) é que durante Segunda Guerra Mundial o departamento de defesa norte americano reconheceu a necessidade de melhorar a confiabilidade de seus equipamentos, portanto foram realizados vários estudos no período de 1945 a 1950 focando em falhas de equipamentos eletrônicos, incluindo o custo de reparo e a periodicidade de manutenção dos equipamentos. Na seqüência estão os resultados de três destes estudos:

- Estudo realizado pelo exército americano mostrou que entre dois terços a três quartos dos equipamentos utilizados pelo exército estava inativo ou em reparo;
- Outro estudo, de cinco anos, realizado pela força aérea americana revelou que o custo de manutenção de seus equipamentos era de aproximadamente dez vezes o custo de aquisição.
- O estudo realizado durante as manobras da marinha americana demonstrou que os equipamentos eletrônicos utilizados eram operacionais em apenas 30% do tempo.

Partindo do resultado de estudos como estes, o departamento americano de defesa criou um comitê temporário de confiabilidade em 1950, que em 1952 tornou-se um comitê permanente chamado “Advisory Group on the

Reliability of Electronic Equipment (AGREE)”. Em 1957 esse comitê editou um relatório responsável pela especificação de confiabilidade em equipamentos eletrônicos militares.

Ainda de acordo com Dhillon (2007), em 1954 o Simpósio Nacional de Confiabilidade e Controle de Qualidade foi realizado pela primeira vez nos Estados Unidos e em 1956 foi publicado no circuito comercial americano o primeiro livro sobre confiabilidade. O primeiro programa de mestrado em engenharia de confiabilidade iniciou-se em 1962 no Instituto Americano de Tecnologia da Aviação (U. S. Air Force).

Ainda como parte do histórico da confiabilidade, Smith (1997) ressalta que antes do desenvolvimento de um procedimento formal de coleta de dados e análise de falhas, o princípio de ‘testar e corrigir’ foi praticado por muito tempo na história da engenharia. Assim, como os outros autores citados anteriormente, Smith também mostra que a baixa confiabilidade dos equipamentos militares utilizados na Segunda Guerra Mundial, em conjunto com o advento da eletrônica gerou uma maior necessidade da busca de confiabilidade nesses equipamentos. Conseqüentemente bancos de dados de falhas foram criados ao longo dos anos 1960, sendo resultado do trabalho de organizações como a UKAEA (UK Atomic Energy Authority), RRE (Royal Radar Establishment, UK) and RADC (Rome Air Development Corporation, USA).

A manipulação desses dados era manual e exigia longas horas para realizar um estudo de confiabilidade. Portanto, com o advento do computador pessoal e pacotes de programas poderosos para os PCs, o tempo do cálculo foi drasticamente diminuído, o que segundo o autor, é um fator determinante para maior eficiência na utilização de estudos de confiabilidade.

## **2.2 Definição de Confiabilidade**

O primeiro passo para compreensão de confiabilidade é explorar a sua definição. Segundo Martha de Souza (2002) existem diferentes definições feitas por diferentes instituições. Na seqüência são mostradas algumas dessas definições de confiabilidade:

- European Organization for Quality Control -1965 : “A medida da capacidade de um produto operar com sucesso, quando solicitado, por um período de tempo pré-determinado, sob condições ambientais específicas. É medida como uma probabilidade”;
- US Military Handbook - 1970: “A probabilidade de um item executar a sua função sob condições pré-definidas de uso e manutenção por um período de tempo específico”;
- BS Institution - 1970 e UK Army - 1976:”A capacidade de um item executar sua função sob determinadas condições específicas, por um período pré-determinado”;
- ABNT NBR 5462/1994:”Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

Bertsche (2008) cita ainda a definição da norma alemã VDI 4001 que afirma que “confiabilidade é a probabilidade de um produto não falhar sob determinadas condições de utilização e ambientais durante um período de tempo definido.”

Apesar de pequenas diferenças nas definições fica claro que a confiabilidade está diretamente relacionada à falha de um produto em um determinado ambiente e período de uso.

Outro ponto importante a ser definido é o significado de falha no contexto de confiabilidade. A norma ABNT (1994) NBR5462/1994 traz no seu item 2.4.1 que falha é o “Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”, seguido por algumas notas:

- Depois da falha, o item tem uma pane.
- A “falha” é um evento; diferente de “pane” que é um estado.
- Este conceito, como definido, não se aplica a itens compostos somente por software.

Segundo a ABNT (1994) NBR5462/1994 pode-se ainda separar as falhas em tipos. Alguns desses tipos de falha estão ilustrados abaixo:

- Falha crítica: Falha que provavelmente resultará em condições perigosas e inseguras para pessoas, danos materiais significativos ou outras conseqüências inaceitáveis;
- Falha aleatória: Qualquer falha cuja causa ou mecanismo faça com que seu instante de ocorrência se torne imprevisível, a não ser no sentido probabilístico ou estatístico;
- Falha por deterioração: Falha que resulta de mecanismos de deterioração inerentes ao item, os quais determinam uma taxa de falha instantânea crescente ao longo do tempo;
- Falha primária: Falha de um item que não é causada direta ou indiretamente pela falha ou pane de outro item;
- Falha secundária: Falha de um item causada direta ou indiretamente pela falha ou pane de outro item.

Após a definição de falha e confiabilidade é importante salientar que o período de uso do produto não é necessariamente medido em tempo, pois em vários produtos o período de “tempo” pode ser dado em ciclos ou em distância, como nos estudos realizados por Anjos (2007) e Murad (2006), nos quais o período de uso é medido em quilômetros, devido às características específicas dos trabalhos, envolvendo produtos montados em automóveis.

Após a apresentação dos conceitos básicos de confiabilidade é possível mostrar as análises que podem ser realizadas utilizando os mesmos.

## **2.2.1 Função densidade de probabilidade (fdp) e Histograma**

Para simplificar o conceito, Bertsche (2009) diz que a função densidade de probabilidade é simplesmente a possibilidade de mostrar graficamente o comportamento das falhas com um histograma da frequência de falhas. O exemplo

da figura 2 mostra os tempos de falha em ciclos de trabalho de um determinado tipo de amostra.

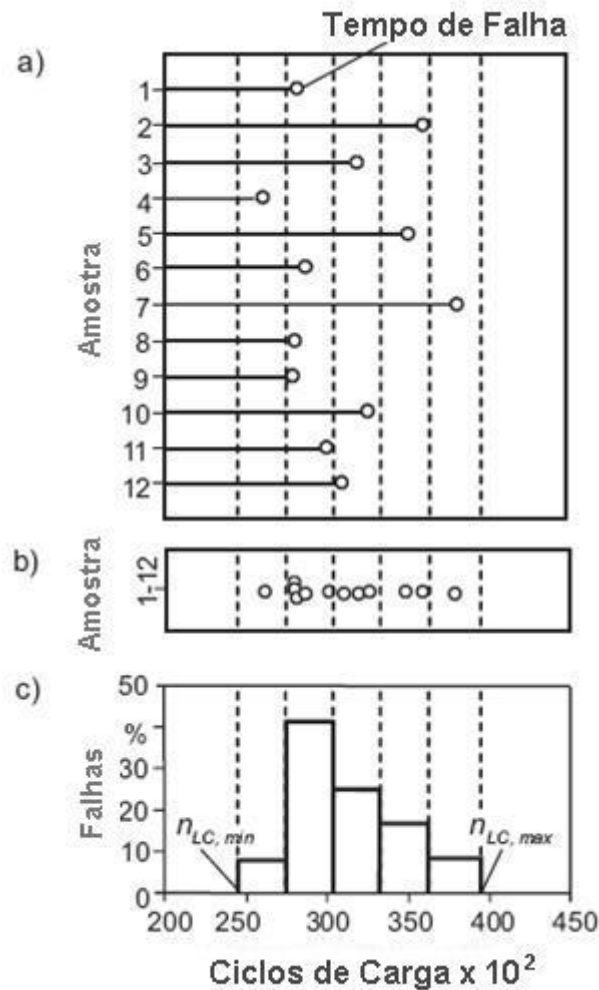


Figura 2 - Histograma de freqüência de falhas - a) dados de falha coletados; b) tempos de falha agrupados; c) histograma de freqüência das falhas com a função densidade de probabilidade empírica (Bertsche, 2009)

Os tempos das falhas mostrados na figura 2.a ocorrem aleatoriamente em certo período de tempo. Na figura 2.b tem-se o resultado após agrupar as falhas para cada tempo específico de falha. A diferença de densidade de pontos na figura 2.b mostra que existem períodos em que as falhas são mais freqüentes e para mostrar isso de uma maneira mais gráfica, foi criado o histograma das freqüências de falhas, que pode ser observado na figura 2.c.

No histograma criado na figura 2.c o eixo x é dividido em intervalos de tempo que são chamados de classes. A quantidade de falhas em cada classe de tempo é interpretada pela altura dos blocos (eixo y) mostrados no gráfico.

Para determinar a altura de cada uma das classes (eixo y) deve-se calcular a quantidade de falhas para cada classe. Nesse caso será utilizada a fórmula (1) que calcula a altura relativa das classes e conseqüentemente, os valores mostrados no eixo y estarão em porcentagem:

$$Altura\_relativa = \frac{Número\_de\_falhas\_na\_classe}{Número\_total\_de\_falhas} * 100 \quad (1)$$

A divisão do eixo do tempo de acordo com o tempo de falhas em classes é chamada de classificação, porém nesse processo existe uma perda de informação, pois algumas falhas são classificadas na média de sua classe independente de seu período exato de falha. Devido a essa perda de informação a escolha do tamanho da classe é de fundamental importância para que não exista muita perda de informação na escolha das classes. Caso o período da classe seja muito grande, muita informação precisa será perdida. Enquanto que se o período da classe for muito pequeno, existirão várias quebras no gráfico, dificultando a visualização gráfica.

Ao invés de ilustrar graficamente o comportamento das falhas via um histograma, pode ser utilizada uma função de densidade de probabilidade (f.d.p.) empírica, conforme a figura 3:

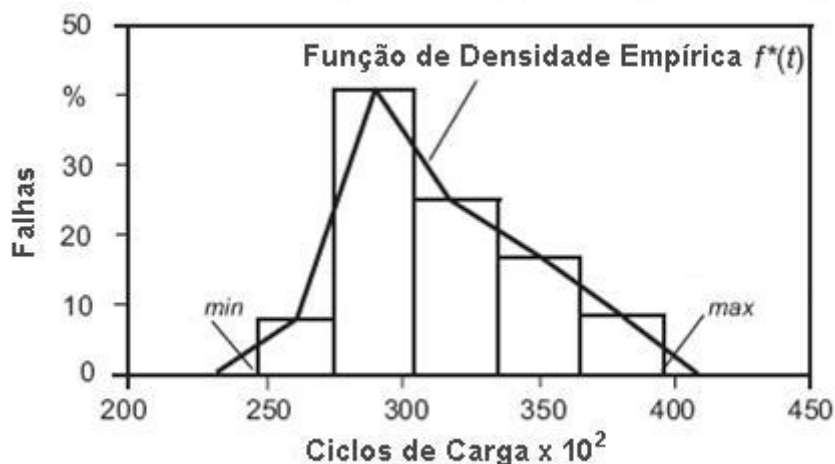


Figura 3 - Histograma de freqüência de falhas e função densidade de probabilidade empírica (Bertsche, 2009)



Na função densidade de probabilidade os pontos médios, na altura dos blocos do histograma, são conectados por linhas. Dessa maneira é representada a função entre o tempo da falha e a frequência das falhas. Essa distribuição é chamada de empírica devido aos dados serem coletados de experimentos com números limitados de falha.

A função densidade de probabilidade ideal é alcançada quanto maior for o número de amostras, pois seria possível diminuir a largura das classes sem afetar o comportamento da porcentagem de falhas. Levando o número de amostras ao limite, tendendo a infinito, o contorno do histograma fica mais suave e com uma curva mais contínua, conforme a figura 4.

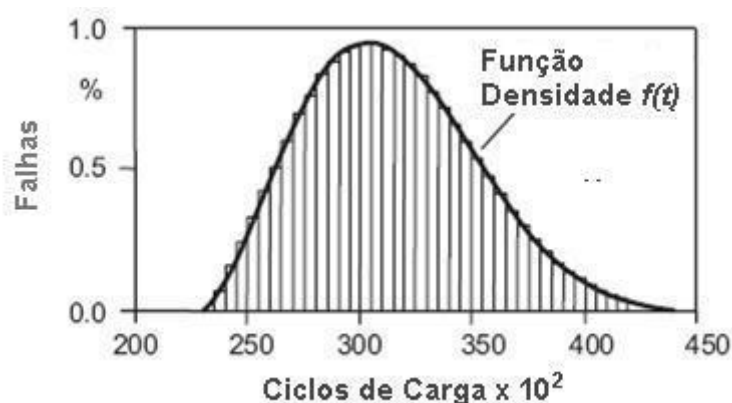


Figura 4 - Histograma de frequência das falhas e função densidade de probabilidade, com o número de amostras tendendo a infinito.  
(Bertsche, 2009)

Nesta figura, devido à diminuição do período de cada classe, foi alterada também a escala do eixo Y, pois, como consequência, existem mais classes com menor percentual de amostras.

Ainda segundo Bertsche (2009) o limite de amostras tendendo à infinito significa que todas as amostras, de uma grande quantidade de amostras, foram testadas e o comportamento das falhas foi determinado. Com esse conceito é possível sair de frequências determinadas experimentalmente para as probabilidades teóricas.

Outras características relevantes são:

- a função densidade de probabilidade empírica mostra grande variação, em relação a função densidade de probabilidade ideal, principalmente ao utilizar pequeno número de amostras;

- a área sob a linha traçada da função densidade de probabilidade é igual a 1 (um).

Analisando os gráficos, fica claro que a função densidade de probabilidade, descreve a quantidade de falhas em função do tempo, mostrando de maneira clara e simples o comportamento de falha. Utilizando essa análise é possível verificar claramente os intervalos onde ocorre o maior número de falhas.

O exemplo da figura 5 ilustra a função densidade de probabilidade. Nesse gráfico o eixo do tempo, dado em anos, é a idade da morte de homens e mulheres, enquanto no eixo Y indica-se a quantidade relativa de mortes para uma determinada idade.

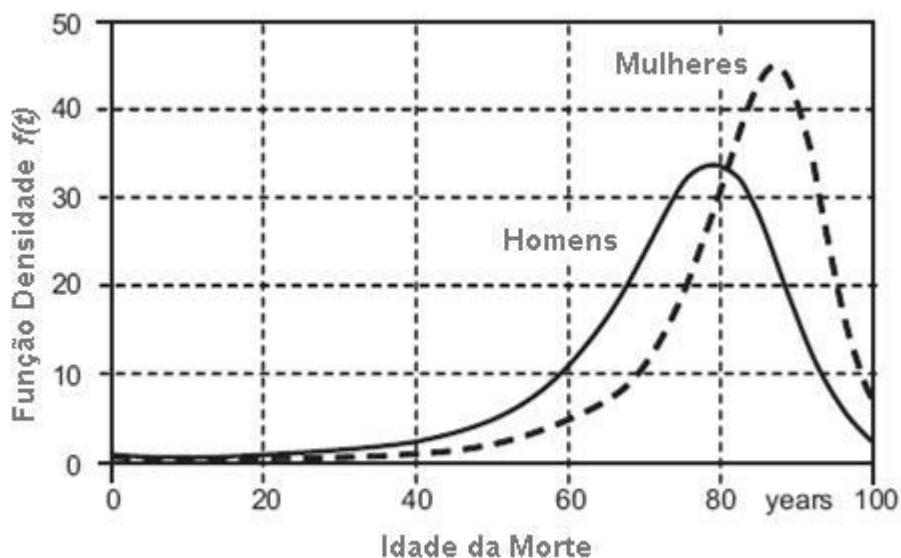


Figura 5 - Função densidade de probabilidade para mortes humanas.  
(Bertsche, 2009)

No início do gráfico verifica-se as mortes infantis, na seqüência uma segunda área com poucas mortes entre 15 e 40 anos de idade, seguida por um crescimento no número de mortes com o crescimento da idade. Mostrando que para os homens a maior parte das mortes ocorre por volta de 80 anos, enquanto para as mulheres ocorre em uma maior idade.

## 2.2.2 Função de Probabilidade de Falha ou Probabilidade Acumulada

Assim como utilizado para a descrição da função densidade de probabilidade, o texto do autor Bertsche (2009) também será utilizado como base para a descrição da função de probabilidade de falha ou  $F(t)$ .

Em alguns casos o número de falhas em um determinado ponto no tempo, como mostrado na função densidade de probabilidade, não é o foco de uma análise e sim o total de amostras que terão falhado até um ponto específico no tempo. Para essas análises deve ser utilizado o histograma de falhas acumuladas. Para realizar esse histograma, são adicionadas progressivamente as falhas para cada classe, conforme ilustra a figura 6.

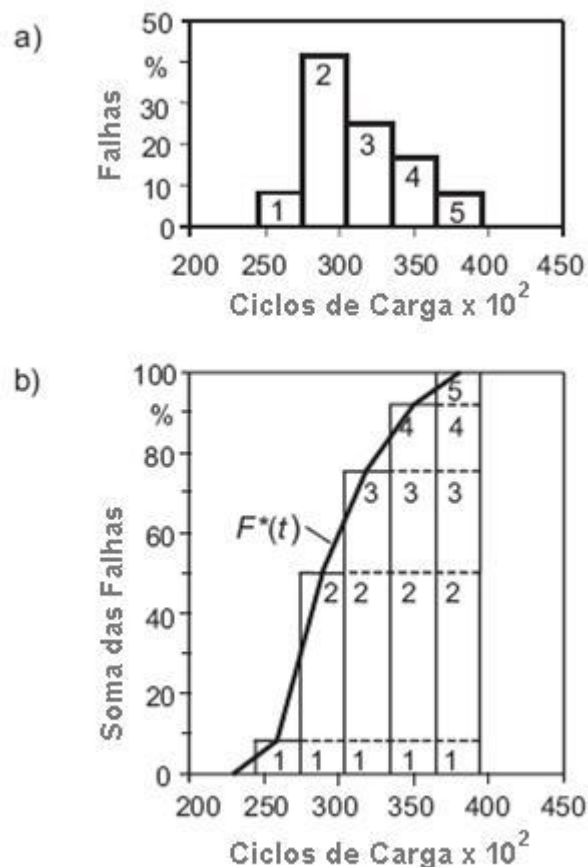


Figura 6 - a) histograma da freqüência de falhas; b) histograma de falhas acumuladas e função empírica de probabilidade de falha acumulada (Bertsche, 2009)

A soma das falhas na figura 6.b representa a função empírica de probabilidade acumulada, pois mostra o valor acumulado de amostras que falharam até aquele ponto do tempo.

Como mostrado, a função de probabilidade acumulada é determinada somando o número das falhas ao longo do tempo, conseqüentemente quando o número de amostras tende à infinito o número de classes pode ser diminuído e o contorno do histograma se torna mais suave, como pode ser visto na figura 7:

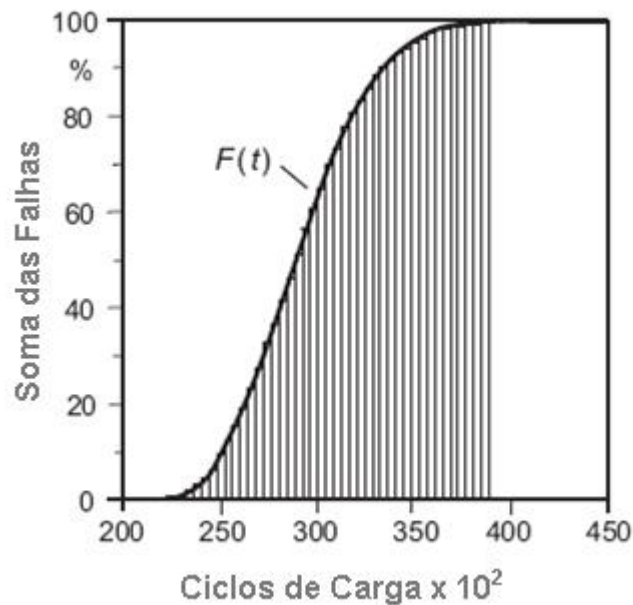


Figura 7 - Histograma e função de probabilidade acumulada com o número de amostras tendendo à infinito  
(Bertsche, 2009)

Como a função é acumulativa, somando o número de falhas que ocorreu até um tempo determinado, essa função sempre tem o seu início em zero e adiciona um valor positivo para cada intervalo de tempo percorrido, de acordo com a frequência das falhas. Conseqüentemente a função sempre termina em 1 (100%) após todas as amostras terem falhado.

Partindo do princípio de que o valor da função de probabilidade acumulada em um tempo específico,  $F(t)$ , é o resultado da soma dos valores da função densidade de probabilidade, de zero até aquele tempo específico, tem-se que:

$$F(t) = \int f(t)dt \quad (2)$$

Conseqüentemente a f.d.p. é a derivada da função de probabilidade acumulada:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3)$$

Pode-se novamente ser utilizada para exemplificar a função de probabilidade acumulada, a idade de morte de seres humanos, conforme ilustrado na figura 8:

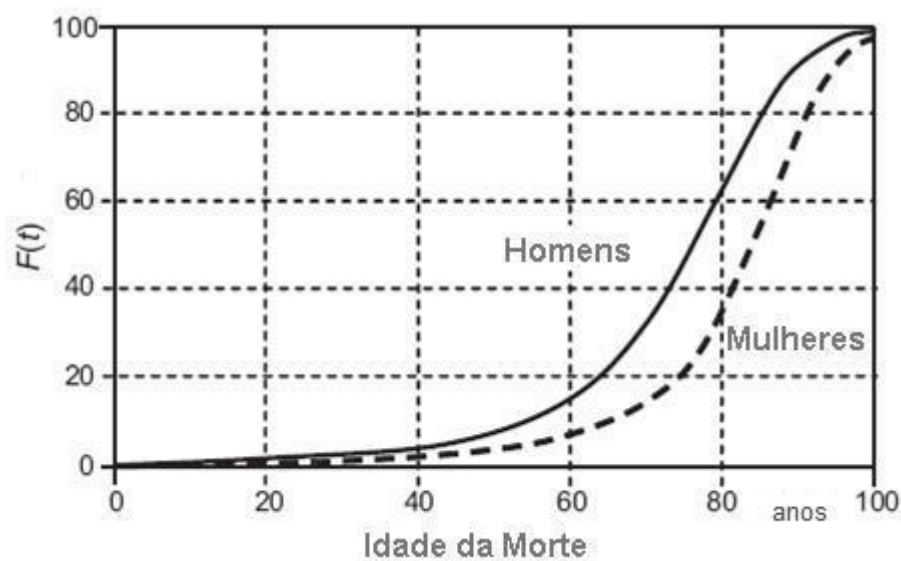


Figura 8 - Função de probabilidade acumulada para morte de seres humanos. (Bertsche, 2009)

Analisando este gráfico pode-se concluir, por exemplo, que pouco menos de 20% dos homens terão morrido antes de completar 60 anos.

### 2.2.3 Função de Probabilidade de Sobrevivência ou Confiabilidade

De acordo com Bertsche (2009) em alguns casos é necessário uma análise que destaque as amostras que “sobreviveram” até um ponto específico no tempo. Portanto a soma das amostras que ainda estão funcionais pode ser organizada em um histograma de sobrevivência conforme ilustrado na figura 9. Nesse histograma

as amostras que falham ao longo do tempo são subtraídas do número total de amostras.

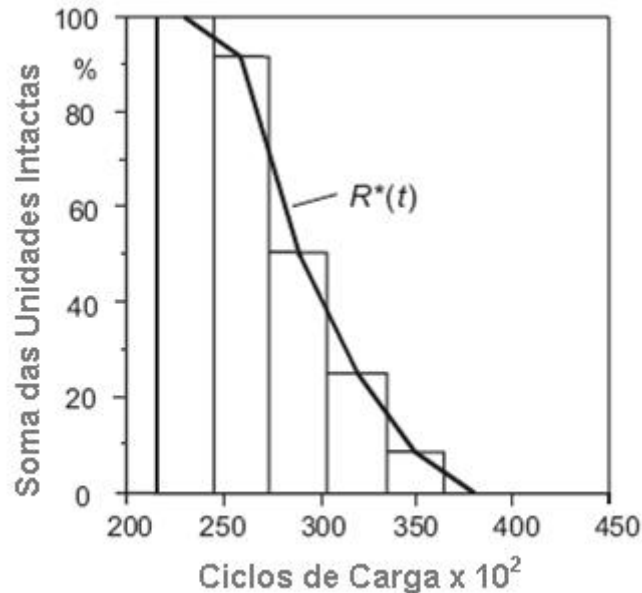


Figura 9 - Histograma de sobrevivência e Função confiabilidade.  
(Bertsche, 2009)

Assim como na  $F(t)$ , a função de confiabilidade,  $R(t)$ , é traçada unindo os pontos médios do histograma. Como a função de confiabilidade é traçada partindo de 100% das amostras, subtraindo-se cada amostra falhada até que a função chegue a 0%, fica claro que a função de confiabilidade  $R(t)$  é o complemento da função de probabilidade acumulada  $F(t)$ , conforme demonstrado na fórmula (4):

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

A função densidade de probabilidade (f.d.p.) mostrada na figura 10, mostra uma interessante visão gráfica da fórmula (4). Como a área sob a f.d.p. é igual a um e a soma de  $R(t)$  e  $F(t)$  também é igual a um, é possível separar a área sob a f.d.p. em amostras que já falharam até o tempo  $t_x$  e amostras que sobreviveram até o tempo  $t_x$ .

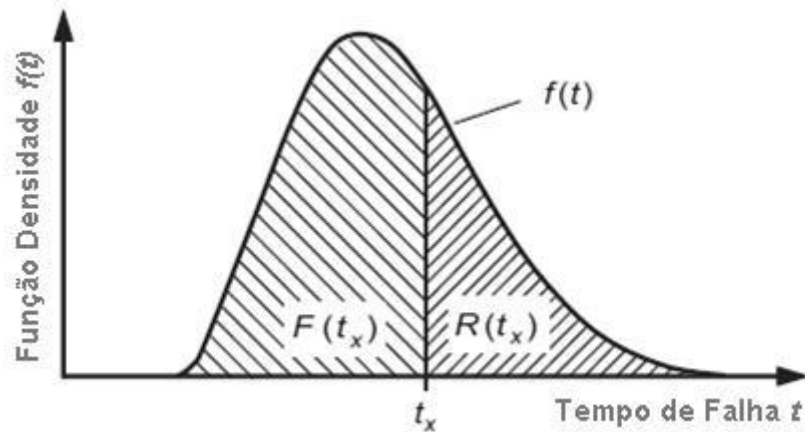


Figura 10 -  $R(t)$  como complemento da  $F(t)$  em uma função de densidade de probabilidade. (Bertsche, 2009)

Como exemplo será utilizado o mesmo dos tópicos anteriores, o gráfico de confiabilidade de humanos, conforme mostrado na figura 11:

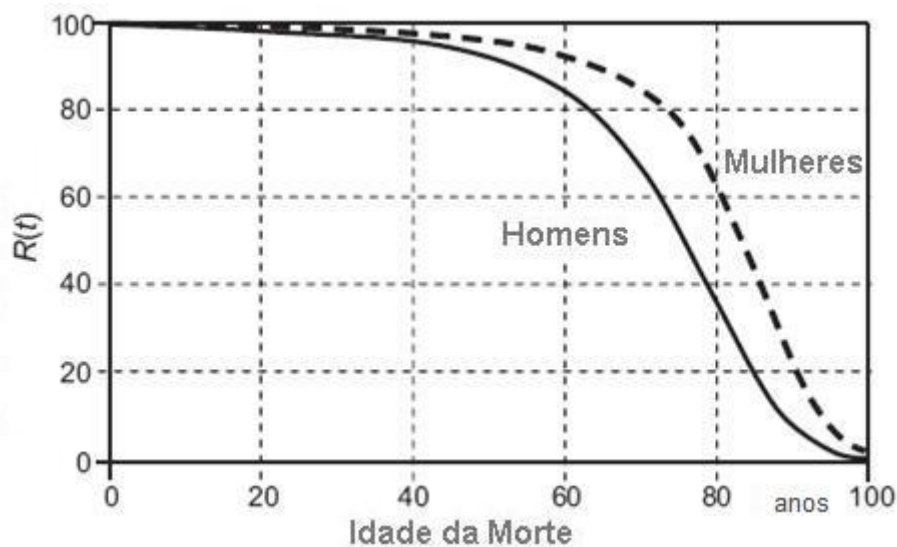


Figura 11 - Função confiabilidade para vida de humanos. (Bertsche, 2009)

Observando a figura verifica-se que é exatamente o complemento da figura apresentada no tópico sobre função de probabilidade acumulada e pode-se, por exemplo, extrair do gráfico a informação de que pouco mais de 80% dos homens irão sobreviver até a idade de 60 anos.

### 2.2.4 Curva da banheira ou Taxa de falha

Nesse t3pico 3e abordada a taxa de falha ou curva da banheira que 3e representada pela letra grega lambda ao longo do tempo,  $\lambda(t)$ . Para o melhor entendimento dessa fun33o s3o utilizados conceitos j3 vistos nos t3picos anteriores, como por exemplo, a fun33o densidade de probabilidade  $f(t)$  e a fun33o confiabilidade  $R(t)$ .

Segundo Bertsche (2009), a taxa de falha pode ser calculada dividindo-se o n3mero de falhas que ocorre num tempo espec3fico (ou por classe), pelo n3mero de amostras que ainda n3o falharam, isso 3e ilustrado na f3rmula (5):

$$\lambda(t) = \frac{\text{n3mero\_de\_falha\_num\_ponto\_espec3fico\_do\_tempo(ou\_classe)}}{\text{soma\_das\_amostras\_que\_ainda\_n3o\_falharam}} \quad (5)$$

A figura 12 mostra o histograma emp3rico da taxa de falhas. Pode-se observar que a medida que o n3mero amostras intactas se aproxima de zero o valor de  $\lambda(t)$  aumenta.

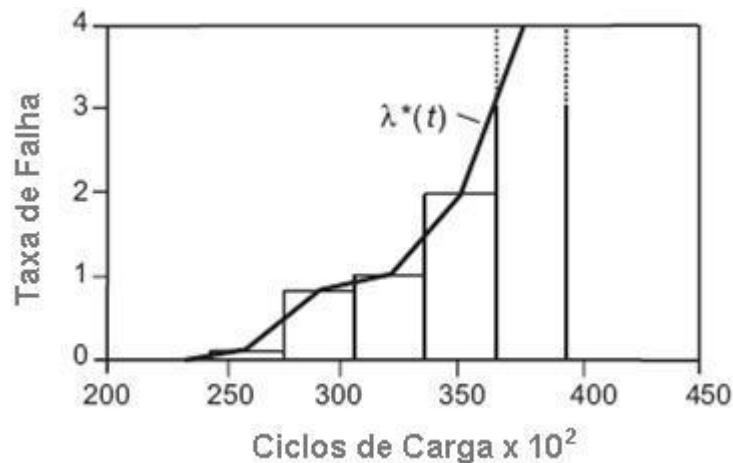


Figura 12 - Histograma emp3rico da taxa de falha.  
(Bertsche, 2009)

Como a  $f(t)$  reflete o n3mero de falhas num determinado tempo e a  $R(t)$  reflete o n3mero de amostras que ainda n3o falharam, pode-se concluir que a taxa de falha pode ser calculada dividindo-se  $f(t)$  pela  $R(t)$ , conforme f3rmula (6):



$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6)$$

Partindo desse princípio segue a figura 13 que ilustra essa formulação, mostrando que para um tempo específico  $t_x$  a taxa de falha é a divisão entre  $f(t_x)$  sobre  $R(t_x)$ :

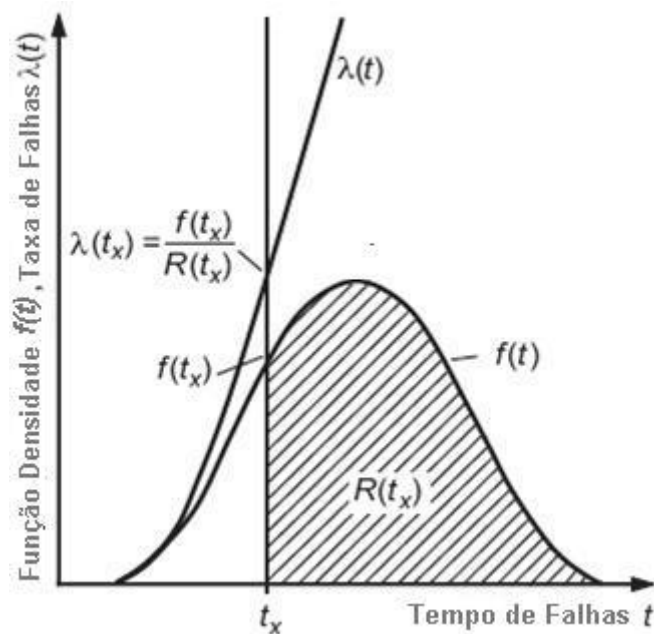


Figura 13 - Taxa de falha baseada na f.d.p. e função confiabilidade.  
(Bertsche, 2009)

Seguindo a linha dos exemplos anteriores, é mostrado o gráfico da taxa de falha para humanos. Na figura 14, pode-se observar uma taxa de falha que mostra uma certa taxa de mortalidade infantil, seguida por um período com menor risco, porém que volta a crescer fortemente a partir dos 40 anos de idade, extrapolando a escala do gráfico.

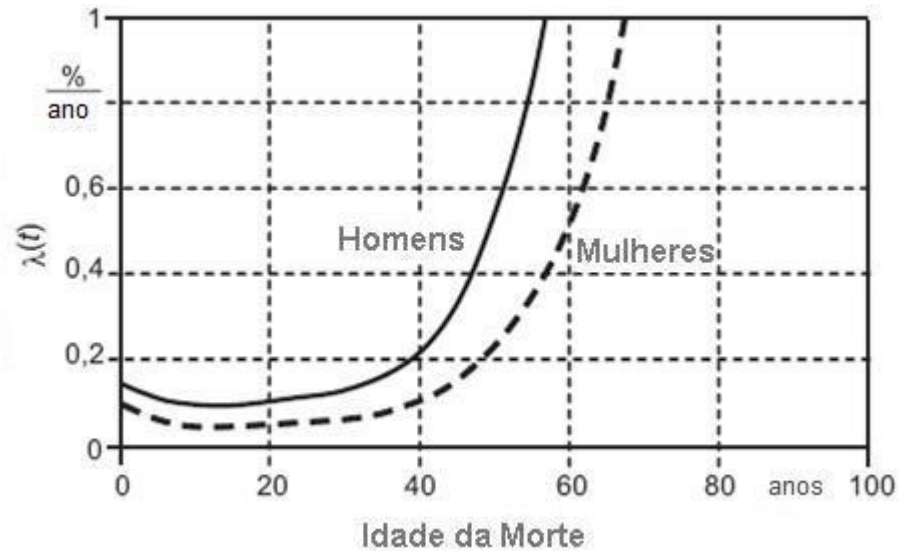


Figura 14 - Taxa de falha para expectativa de vida humana (Bertsche, 2009)

Lewis (1987) também utiliza a taxa de mortalidade humana para auxiliar o entendimento da curva da banheira, o autor cita que vários termos utilizados na leitura da curva da banheira vêm de distribuições de mortalidade humana.

Ainda segundo Lewis (1987) pode-se dividir a curva da banheira em três partes, conforme mostra a figura 15:

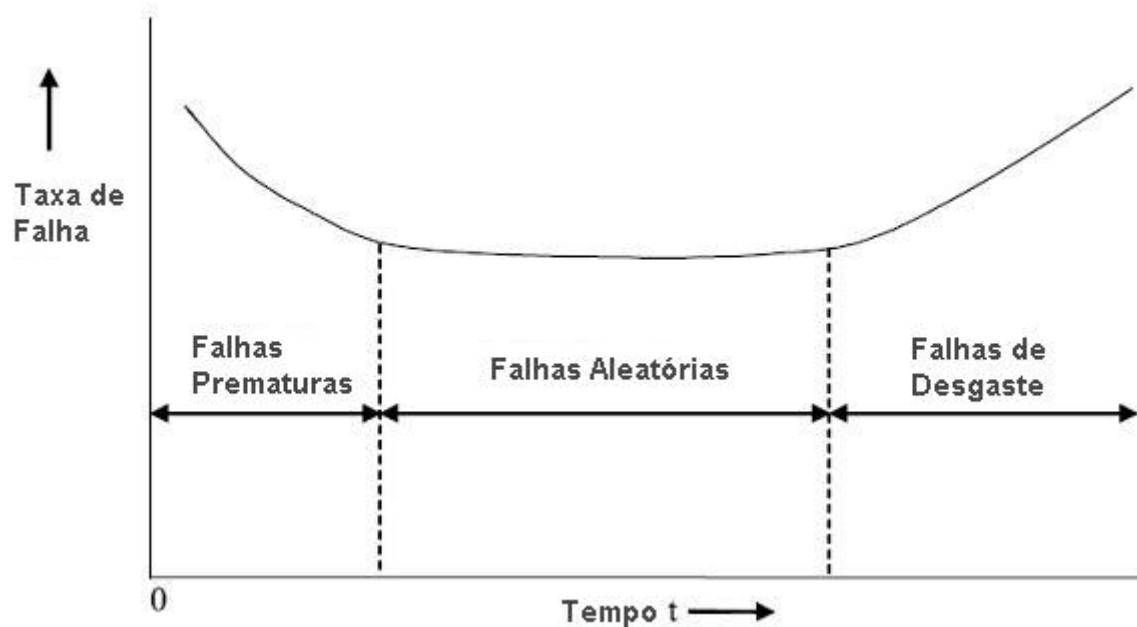


Figura 15 - Curva da banheira – (Dhillon, 2007)

A primeira parte da curva é uma região com alta taxa de falha, porém decrescente, que é o período de falhas prematuras ou, analogamente, o período de mortalidade infantil em populações humanas. Essa mortalidade infantil na população humana é gerada principalmente por defeitos congênitos ou fraquezas, conseqüentemente essa taxa de mortalidade tende a diminuir assim que diminui o número de indivíduos com fraquezas. Pode-se relacionar diretamente esse comportamento com equipamentos e produtos manufaturados, pois quando os produtos não são corretamente produzidos, com peças fora de tolerância ou faltando peças, tem-se como conseqüência, um alto índice de falhas prematuras.

A região do meio da curva da banheira contém a menor e mais constante taxa de falhas, sendo o período preferencial de operação do produto. As falhas nesse período são conhecidas como falhas aleatórias, geradas normalmente por carregamentos inevitáveis e inesperados e menos comumente devido a defeitos inerentes do produto em si. Analogamente com humanos nessa região as mortes normalmente são atribuídas a acidentes e doenças infecciosas.

A região à direita da curva é a região onde existe um crescimento na taxa de falhas. Nessa região falhas por desgaste são as mais comuns, normalmente geradas por corrosão ou fadiga de material, assim como acontece o envelhecimento do ser humano. A forma dessa região ajuda a determinar a vida útil do produto.

A tabela 3, extraída de Bertsche (2009), ilustra as formas mais comumente encontradas para a curva da banheira e exemplos de produtos para cada uma das formas.

Tabela 3- Formas mais comuns da curva da banheira

	Curva		Características	Exemplos
Falhas por desgaste	A		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curva anormal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motores à vapor do século 18</li> </ul>
	B		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivos simples</li> <li>• Máquinas complexas mau projetadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bomba de água veicular</li> <li>• Cadarço de tênis</li> </ul>
	C		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estruturas</li> <li>• Elementos de desgaste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carroceria</li> <li>• Pneus</li> </ul>
Falhas Aleatórias	D		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas complexas com rotinas de estresse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Válvulas de alívio de pressão</li> </ul>
	E		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas complexas bem projetadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Girobússola</li> </ul>
	F		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes eletrônicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Placa mãe de computador</li> </ul>

(Bertsche, 2009)

Na tabela 3 se pode considerar que o comportamento da curva “A” é uma típica curva da banheira com as três regiões bem definidas, na curva “B” a taxa de falhas permanece constante até que falhas por desgaste ocorrem na região 3, a curva “C” é caracterizada por um crescimento contínuo da taxa de falha. O comportamento da curva “D” mostra uma baixa taxa de falha no início da vida seguido de um abrupto crescimento da taxa de falha até uma estabilização. A curva “E” demonstra um período constante de taxa de falha em todo o período, sendo claramente identificadas como falhas aleatórias. Por fim a curva “F” é marcada por uma alta taxa de falhas no início da vida útil seguida por uma baixa significativa estabilizando em uma taxa até o fim da vida.

### 2.2.5 Dados Censurados

Em boa parte das análises de confiabilidade, não é possível esperar a falha de 100% das amostras, seja por não ter tempo disponível para a conclusão da análise, seja por falta de recursos necessários para o acompanhamento das

amostras por um longo período. Para estes casos deve-se realizar uma análise com dados censurados.

Podem-se dividir os dados censurados em algumas categorias:

- Censurado à direita: segundo Fogliatto (2009) são os dados em que apenas se conhece um limite inferior para o tempo até a falha. Pode-se ainda dividir os dados censurados à direita em Tipos I e II:
  - Tipo I: Lewis (1987) diz que nesse caso o teste é terminado após um período fixo de tempo;
  - Tipo II: Ainda de acordo com Lewis (1987) na censura do Tipo II o teste é encerrado após um número fixo de falhas.
- Censurado à esquerda: Os casos de censura à esquerda são mais raros que os dados censurados à direita. Para ilustrar esse tipo de censura, Fogliatto (2009) traz o exemplo de um antropólogo que pretende verificar com qual idade crianças de uma determinada localidade aprendem a realizar uma determinada tarefa. Nesse caso a falha será o aprendizado da tarefa. Como ao chegar à localidade, algumas crianças já tinham aprendido a realizar a tarefa, serão dados com censura à esquerda, assim como as crianças que ainda não aprenderam a realizar a tarefa até a partida do antropólogo serão os dados censurados à direita.

### **2.2.6 Análise Paramétrica**

Martha de Souza (2002) cita que o principal objetivo de uma análise paramétrica é estimar os parâmetros de uma função distribuição de probabilidade que supõe-se modelar a confiabilidade do componente ou do sistema em análise. Ressalta-se que estes parâmetros estão associados com o comportamento da população em estudo, sendo, portanto valores fixos para uma população específica.

De acordo com Lewis (1987) é desejável que essa parametrização se encaixe em algumas distribuições específicas que serão explicadas na seqüência deste texto.

### 2.2.6.1 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial normalmente é a primeira a ser utilizada, pois tem apenas um parâmetro para ser estimado, sendo, portanto um bom ponto de partida para uma análise, conforme Lewis (1987). A função de probabilidade acumulada da distribuição exponencial tem como parâmetro de escala “ $\theta$ ”, conforme mostrado na equação (7), para  $t > 0$ :

$$F(t; \theta) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (7)$$

De acordo com Juran (1999), uma importante característica da distribuição exponencial é a formulação de sua taxa de falha :

$$\lambda(t) = \frac{1}{\theta} \quad (8)$$

a qual é invariável ao longo do tempo, pois o único argumento na formulação é o parâmetro de escala “ $\theta$ ”. A figura 16 ilustra o comportamento das distribuições exponenciais com diferentes parâmetros de escala:

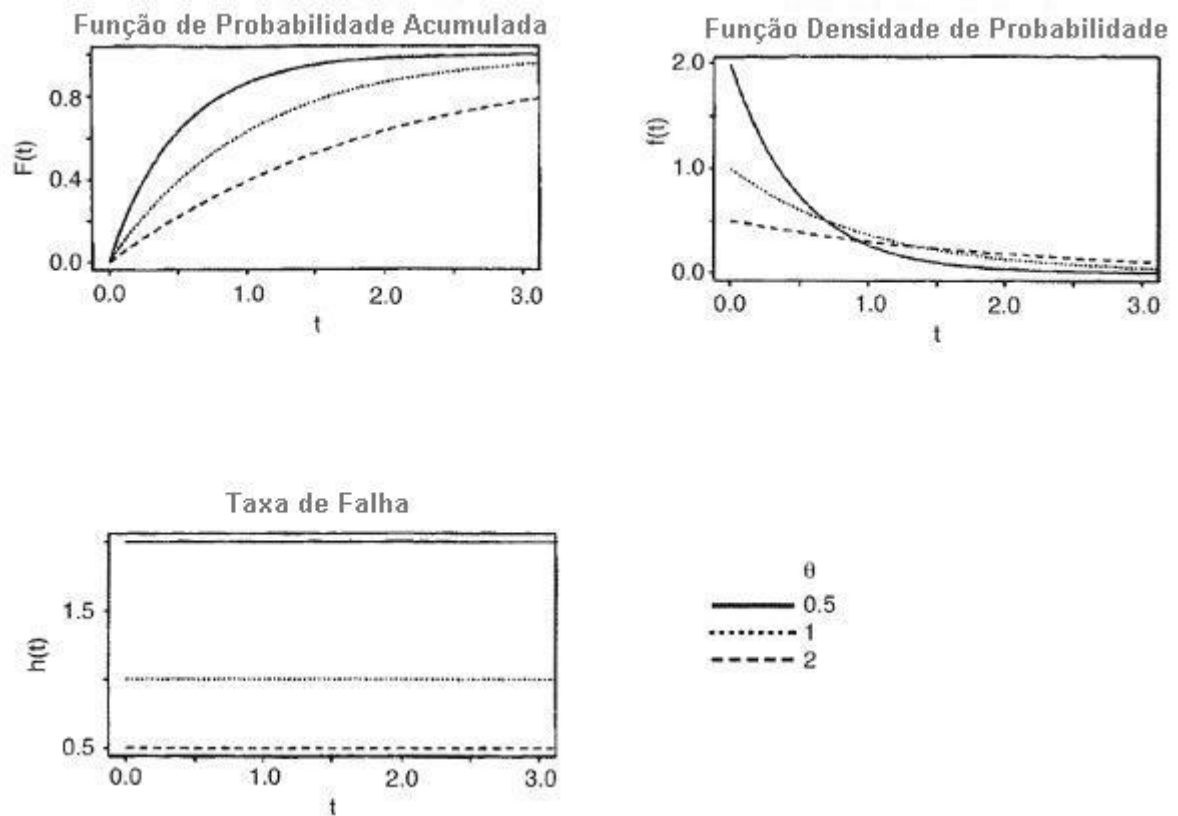


Figura 16 - Distribuições exponenciais com  $\theta$  variando de 0,5 até 2 (Juran, 1999)

A taxa de falha constante indica que a probabilidade de uma amostra falhar no próximo intervalo de tempo é independente do tempo de uso da amostra. Fisicamente isso significa que as amostras não estão sujeitas a falhas prematuras ou desgaste, sendo portanto esse modelo apropriado para amostras que falham por fenômenos externos, que são independentes do tempo de vida das amostras. Juran (1999), para ilustrar esse comportamento, traz o exemplo da confiabilidade de pratos em um restaurante, onde a falha geralmente é o resultado da quebra do prato, independente do tempo de uso do mesmo.

### 2.2.6.2 Distribuição Lognormal

Não será apresentada nesse trabalho a distribuição normal, pois segundo Juran (1999) apesar da distribuição normal apresentar papel fundamental em outras aplicações estatísticas, essa distribuição não é largamente utilizada para modelos de tempo de falha. Porém, a distribuição Lognormal é largamente utilizada e a função distribuição acumulada pode ser descrita pela formula (9) extraída de Salvendy (2001) e Juran (1999):

$$F(t; \mu, \sigma) = \Phi \left[ \frac{\log(t) - \mu}{\sigma} \right], \text{ onde } t > 0 \quad (9)$$

Assim como na distribuição normal, o símbolo  $\Phi$  representa a distribuição acumulada da distribuição normal reduzida,  $\exp(\mu)$  é o parâmetro de escala e  $\sigma > 0$  é o parâmetro de forma. Segundo Juran (1999) a distribuição Lognormal é utilizada principalmente para descrever falhas devido à fadiga. A figura 17 mostra algumas distribuições lognormais:

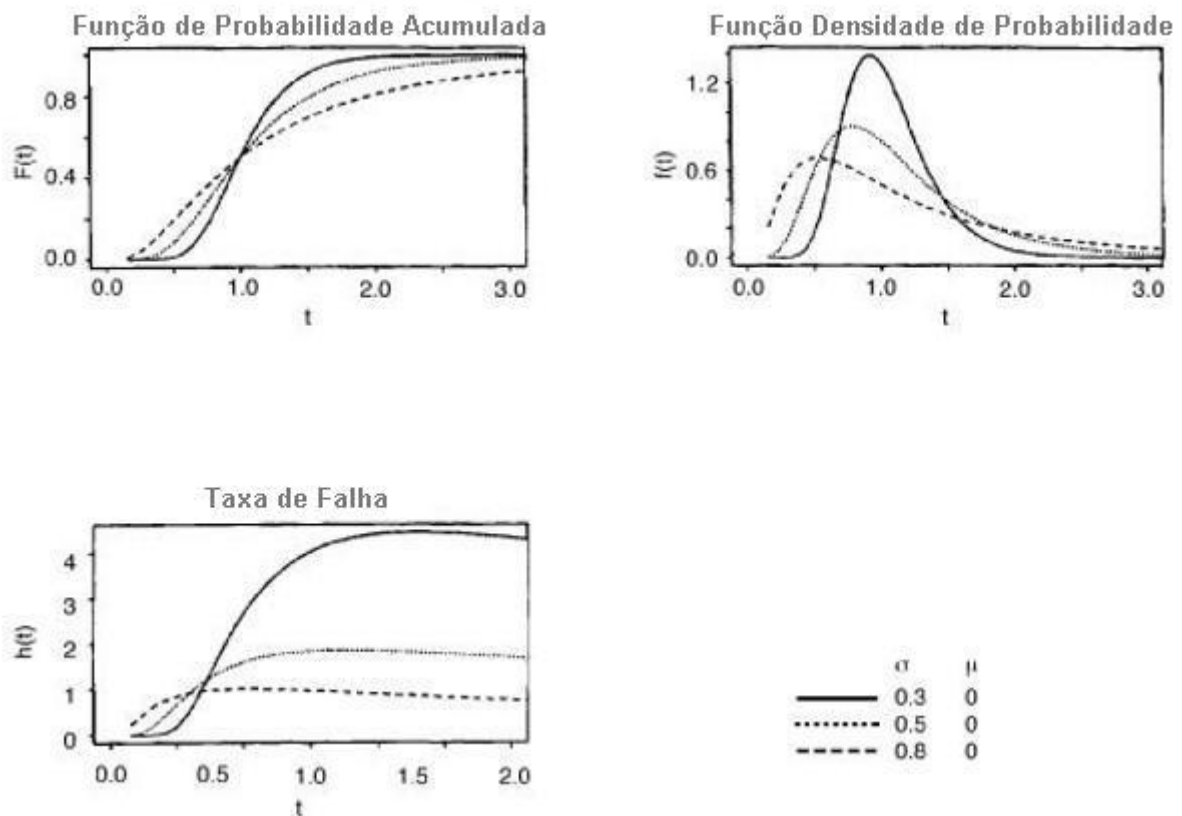


Figura 17 - Distribuições Lognormal parâmetro de escala  $\exp(\mu)=1$  e de forma  $\sigma = 0,3; 0,5; 0,8$  (Juran, 1999)



### 2.2.6.3 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é atualmente a mais utilizada para análise de dados de confiabilidade. Segundo Abernethy (2006), esta a distribuição foi proposta pelo sueco Waloddi Weibull em 1937 e o “paper” americano deste assunto foi publicado em 1951, assumindo que essa distribuição se aplica a diversos tipos de problemas, citando como exemplos desde o estudo da resistência do aço até a análise da distribuição da altura de cidadãos do Reino Unido.

Esse “paper” foi recebido de forma cética pela comunidade acadêmica, porém pioneiros do assunto como Dorian Sainin e Leonard Johnson aplicaram e aprimoraram a técnica. Na seqüência a força aérea americana reconheceu os méritos de Weibull e financiou seu estudo até 1975. Tornando-se então, segundo Abernethy (2006), o método mais utilizado para análise de confiabilidade.

A função de probabilidade acumulada de Weibull é descrita pela equação (10):

$$F(t; \eta, \beta, t_0) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right), \text{ onde } t > t_0 \quad (10)$$

Pode-se, nos casos onde a função tem origem em zero, simplificar a equação fazendo  $t_0 = 0$ , diminuindo, portanto a equação de três para dois parâmetros, conforme mostrado (11):

$$F(t; \eta, \beta) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right), \text{ onde } t > 0 \quad (11)$$

Nesta equação tem-se dois parâmetros importantes,  $\beta$  e  $\eta$ :

- $\eta$  (ETA) : Constante de escala, que define o espalhamento da distribuição no eixo x. Sempre maior que zero.
- $\beta$  (BETA): Constante de forma que mostra a tipo de falha que está sendo estudado, como por exemplo, falha prematura, aleatória ou por desgaste. Sempre maior que zero.

Pode-se ainda destacar as outras equações de confiabilidade e f.d.p. da distribuição de Weibull, extraídas de Abertnethy (2006) :

$$R(t; \eta, \beta) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (12)$$

$$f(t; \eta, \beta) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) * \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} * \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (13)$$

A partir das fórmulas (12) e (13) se pode concluir uma característica específica sobre o valor de  $\eta$ . Substituindo ( $t = \eta$ ), tem-se que  $F(t)$  é aproximadamente 63,2% para qualquer  $\beta$ , conforme demonstrado na equação (14). Conseqüentemente  $R(t)$  é o complemento desse valor.

$$F(t = \eta; \eta, \beta) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\eta}{\eta}\right)^\beta\right) = 1 - \exp(-1) = 0,632 \quad (14)$$

Com isso conclui-se que o valor de  $\eta$  na distribuição de Weibull, corresponde ao tempo estimado em que 63,2% das amostras irão falhar, independente do valor de  $\beta$ .

A figura 18 ilustra a distribuição de Weibull com  $\beta$  variando e  $\eta = 1$ :

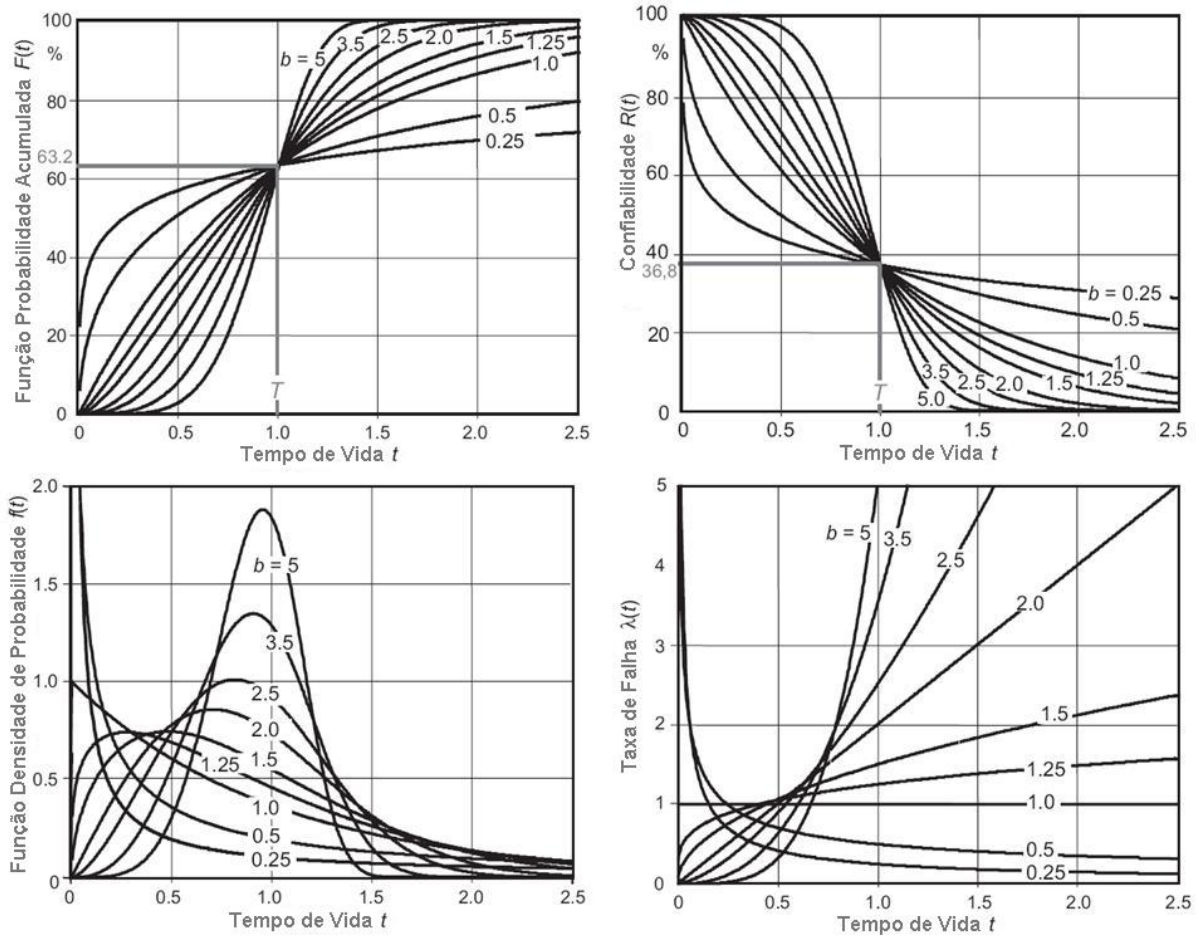


Figura 18 - Distribuição de Weibull dois parâmetros com  $\eta=1$  e  $\beta$  variando.  
(Bertsche, 2008)

Segundo Abernethy (2006) pode-se classificar a distribuição de Weibull conforme o valor do parâmetro de forma  $\beta$ :

- O valor de  $\beta < 1,0$  implica falha prematura, portanto o número de falhas tende a diminuir ao longo da vida do produto. Como exemplo para esse comportamento pode-se citar falhas de controle no processo de produção.
- Para valores de  $\beta = 1,0$ , a distribuição de Weibull assemelha-se a distribuição exponencial, portanto assumindo as mesmas características de falhas aleatórias, inclusive a taxa de falha constante.
- Para distribuições onde  $\beta > 1,0$  é característico o comportamento de desgaste. Como exemplos dessas distribuições destacam-se itens que falham por desgaste ou corrosão.

- Para valores de  $\beta = 3,44$  a distribuição de Weibull se aproxima da distribuição normal.

Para parametrização de uma distribuição de Weibull existem diversos métodos e segundo Juran (1999) o método preferencial para dados censurados é o Método da Máxima Verossimilhança principalmente com a popularização dos microcomputadores e softwares específicos para problemas de confiabilidade. A expressão (15), extraída de Martha de Souza (2002), ilustra a função de Verossimilhança, considerando a existência de dados censurados:

$$\ln(L) = \sum_{i=1}^k \ln \left( \frac{\beta}{\eta} * \left( \frac{t_i}{\eta} \right)^{\beta-1} * e^{-\left( \frac{t_i}{\eta} \right)^\beta} \right) - \sum_{i=1}^j \left( \frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \quad (15)$$

Onde:

$t_i$  : instantes de tempo onde ocorreram as falhas

$t'_i$ : instantes de tempo onde ocorreram suspensões

$k$ : número de falhas

$j$ : número de dados censurados

Para calcular a máxima verossimilhança pode-se derivar a equação em função dos valores procurados ou realizar várias iterações computacionais buscando o valor máximo, conforme mostrado na figura 19:

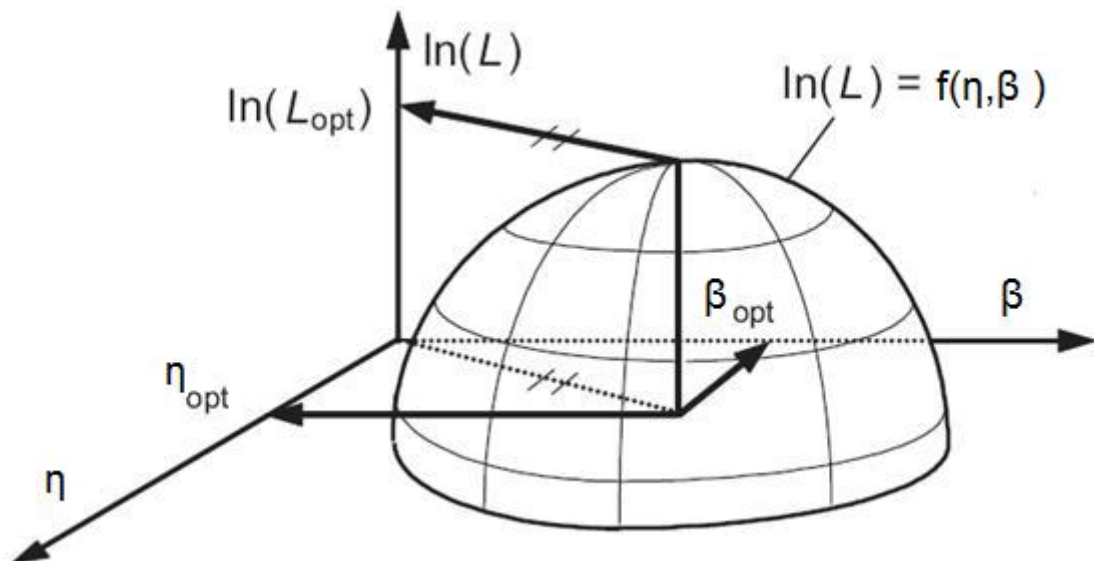


Figura 19 - representação gráfica da busca pelo valor da máxima verossimilhança, conseqüentemente o  $\eta$  e  $\beta$  otimizados (Bertsche, 2008)

### **3 Descrição Técnica do Produto**

Pode-se dizer que um dos pilares tecnológicos que sustentam o modo de vida da sociedade atual é a capacidade de gerar, armazenar, transmitir e utilizar a energia elétrica. Fica um pouco difícil imaginar o mundo hoje sem a utilização de equipamentos elétricos. No automóvel a utilização de energia elétrica também vem crescendo ao longo dos anos, tornando cada vez maior a participação da eletricidade nos sistemas dos veículos.

A bateria é um elemento chave na utilização da energia elétrica em veículos, sendo responsável por armazenar a energia e distribuí-la em situações específicas. Nesse tópico será descrito o histórico e funcionamento dessa importante peça do sistema veicular.

#### ***3.1 História da bateria automotiva***

De acordo com Kiehne (2003) existem indícios que as primeiras técnicas de utilização de baterias datam de mais de quatro mil anos atrás, época em que já existiam vasos de cobre que eram banhados a ouro por efeitos eletroquímicos. Em 1936, numa região próxima a Bagdá, foi realizada uma grande descoberta arqueológica ao ser desenterrado, após praticamente 2000 anos intacto, um vaso de argila cheio de um ácido orgânico e que continha um bastão de ferro isolado por uma camada de asfalto. Esse conjunto gerava uma tensão de 5 Volts e muito provavelmente foi utilizado devido a suas propriedades elétricas, mostrando que nossos ancestrais chegaram a manipular a energia elétrica. Porém por mais de 2000 anos esses conhecimentos ancestrais foram perdidos.

A história moderna da eletricidade se inicia num fato citado por Buchmann (2001), que em 1791, Luigi Galvani, trabalhando na Universidade de Bologna, reparou que o músculo de um sapo se contraía quando tocado por um objeto metálico, fenômeno na época conhecido erroneamente como eletricidade animal.

Instigado por esse fenômeno, o italiano Alessandro Volta, iniciou uma série de experimentos buscando elementos que pudessem reagir e realmente gerar energia.

Porém somente em 1800 Volta descobriu que utilizando certos fluídos como condutores (eletrólito), um fluxo contínuo de corrente elétrica era gerado entre os dois eletrodos metálicos. Isso o levou à invenção da primeira célula voltaica. Se aprofundando nas experiências, Volta descobriu que a tensão elétrica subia quando células voltaicas eram colocadas em série, formando uma bateria elétrica.

No mesmo ano, Volta registrou sua descoberta de uma fonte de eletricidade contínua no “Royal Society of London”. Com essa descoberta iniciou-se uma nova era onde os efeitos conhecidos da eletricidade não eram mais limitados a faíscas que duravam por um pequeno intervalo de tempo, e sim a fontes contínuas de eletricidade.

Outros inventores seguiram os passos de Volta, conforme mostrado por Reasbeck (1997). Em 1802 Gautherot descobriu, por exemplo, que fios de platina banhados por uma solução salina geravam uma tensão remanescente. Outros materiais foram utilizados nos experimentos da época, podendo-se destacar experimentos realizados com o chumbo. Estes experimentos levaram à descoberta da bateria de chumbo-ácido que é creditada ao eletroquímico Gaston Planté, que trabalhava para uma empresa parisiense fabricante de telégrafos.

Para divulgar sua descoberta, em março de 1860, Planté apresentou uma bateria com várias células para a Academia Francesa, sendo que cada célula era composta por duas folhas espirais de chumbo, separadas por um tecido poroso e imerso em ácido sulfúrico, conforme figura 20:

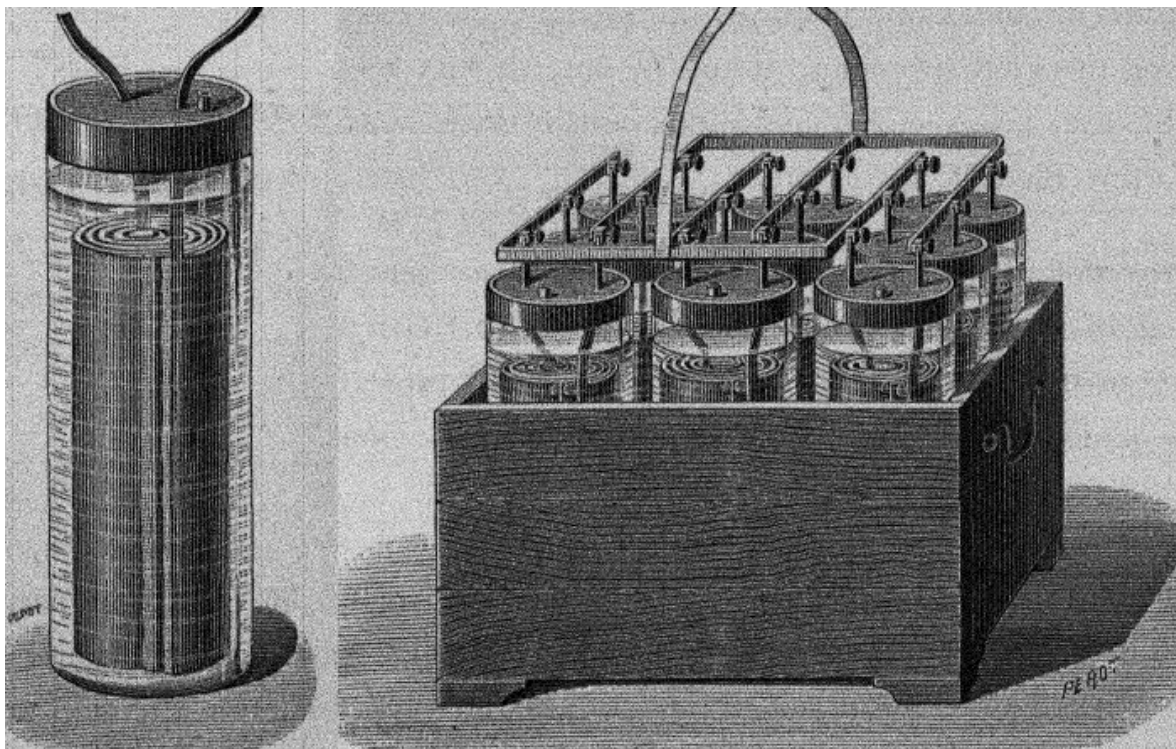


Figura 20 - Células de Planté  
(Planté, 1879)

O fato que mais chamou a atenção na apresentação das células era a alta capacidade de descarga, muito maior que das células primárias da época, além da possibilidade de recarga dessas células. Um episódio interessante da época foi um comentário de Kirchhoff, sugerindo que a bateria de Planté poderia ser utilizada para suavizar a saída de dínamos, antecipando parcialmente o modelo que seria utilizado no sistema de carga automotivo.

Porém, os primeiros sistemas automotivos que utilizavam eletricidade, segundo Reasbeck (1997), foram conjuntos de iluminação, alimentados por baterias primárias (não recarregáveis) ou baterias secundárias (recarregáveis), ainda sem um sistema de carga ligado ao motor. Esse sistema de lâmpadas elétricas, cabos, interruptor e bateria, substituiu as lamparinas a óleo que eram utilizadas na época, gerando o que foi o embrião do sistema elétrico atual.

Outra utilização importante da energia elétrica, além da inclusão do dínamo foi o motor de partida, ilustrado na figura 21. O motor de partida foi inicialmente utilizado quando a Cadillac, em 1910, anunciou o “carro sem manivela”. Esse veículo

inovador já tinha um sistema de iluminação composto por baterias de seis volts, porém para alimentar o motor de partida foi necessário colocar quatro baterias em série gerando vinte e quatro volts.

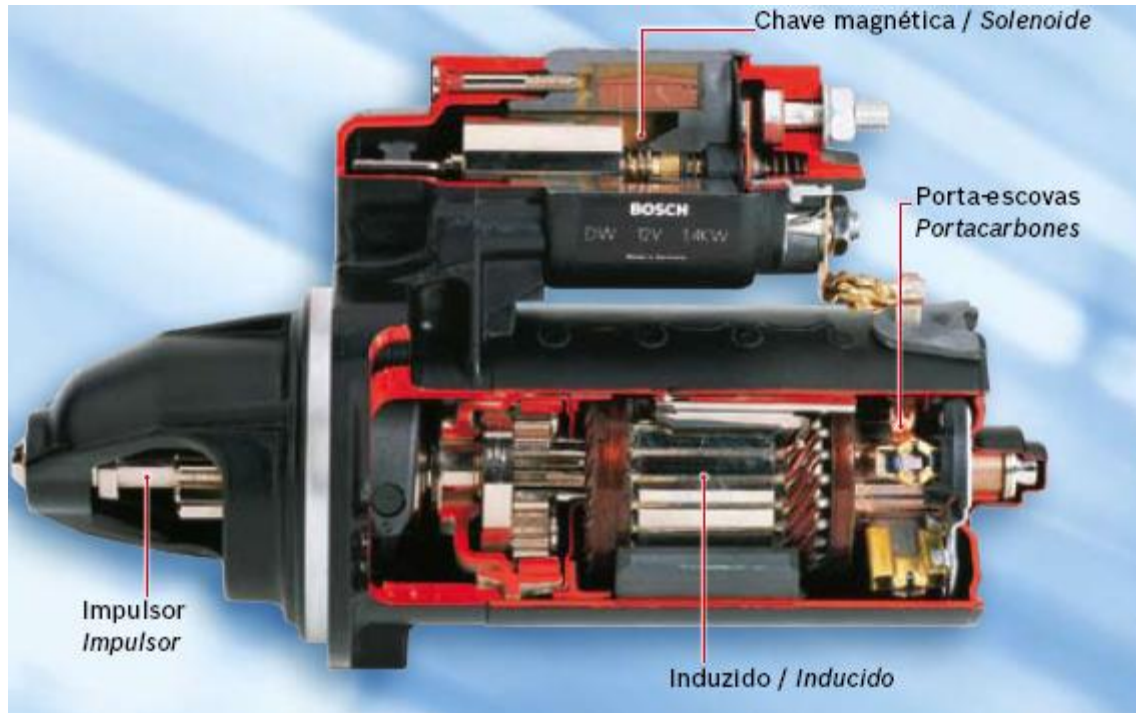


Figura 21-Motor atual de partida Bosch e seus componentes internos.  
(Robert Bosch Ltda, 2007a)

Como o consumo do motor de partida é bem maior que o do sistema de iluminação, ficou claro que era necessário um tipo especial de bateria para veículos automotores. Além disso, como o motor de partida é utilizado com o motor parado, a preocupação da bateria estar sempre carregada e funcional era cada vez maior. A figura 22 ilustra o diagrama elétrico de um carro dos anos 1920.



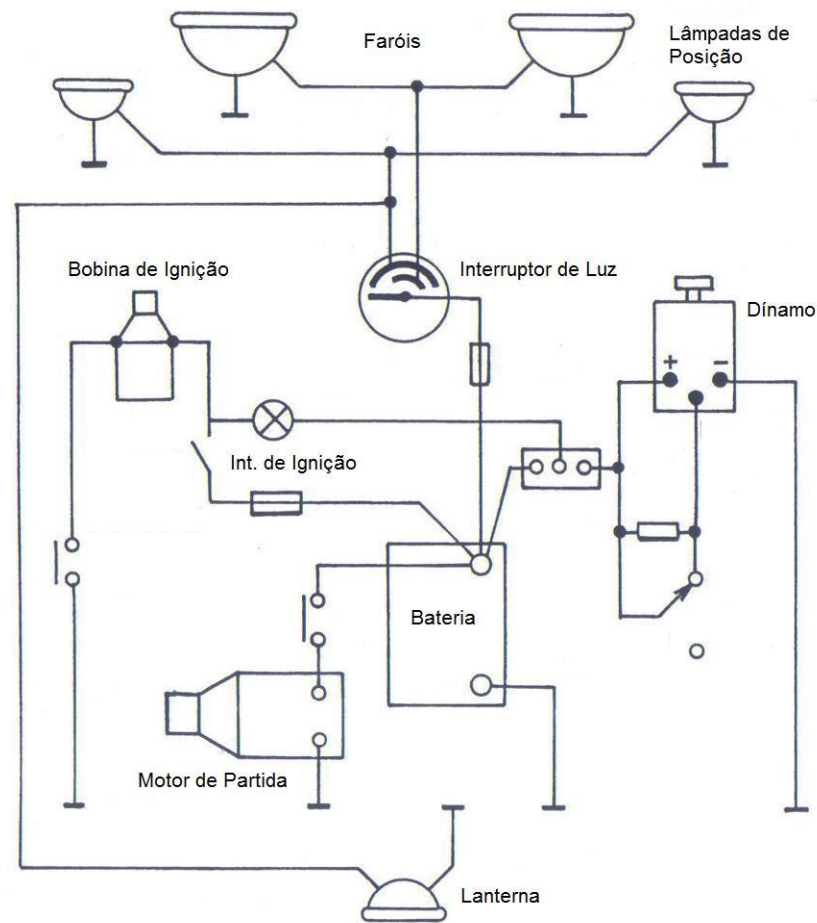


Figura 22 - Sistema elétrico de um veículo dos anos 1920.  
(Reasbeck, 1997)

Nas décadas seguintes foram adicionados diversos itens elétricos nos veículos, principalmente relacionados ao conforto dos motoristas. Como exemplos podem ser listados o limpador de pára-brisas elétrico, os ventiladores, aquecedores e as lâmpadas que foram adicionadas ao longo do tempo. Outro importante avanço veio com o advento dos semicondutores que podiam operar em temperaturas encontradas no cofre do motor. Uma das conseqüências mais marcantes trazida pelos semicondutores foi a utilização de diodos retificadores de potência, a qual possibilitou a substituição do dínamo pelo alternador, que é mais eficiente.

Além da viabilização do uso do alternador, os semicondutores viabilizaram também a utilização de diversos outros equipamentos nos veículos, demandando cada vez mais a confiabilidade da bateria para o bom funcionamento desses equipamentos. A figura 23 ilustra os componentes do sistema elétricos de um carro dos anos 1990:

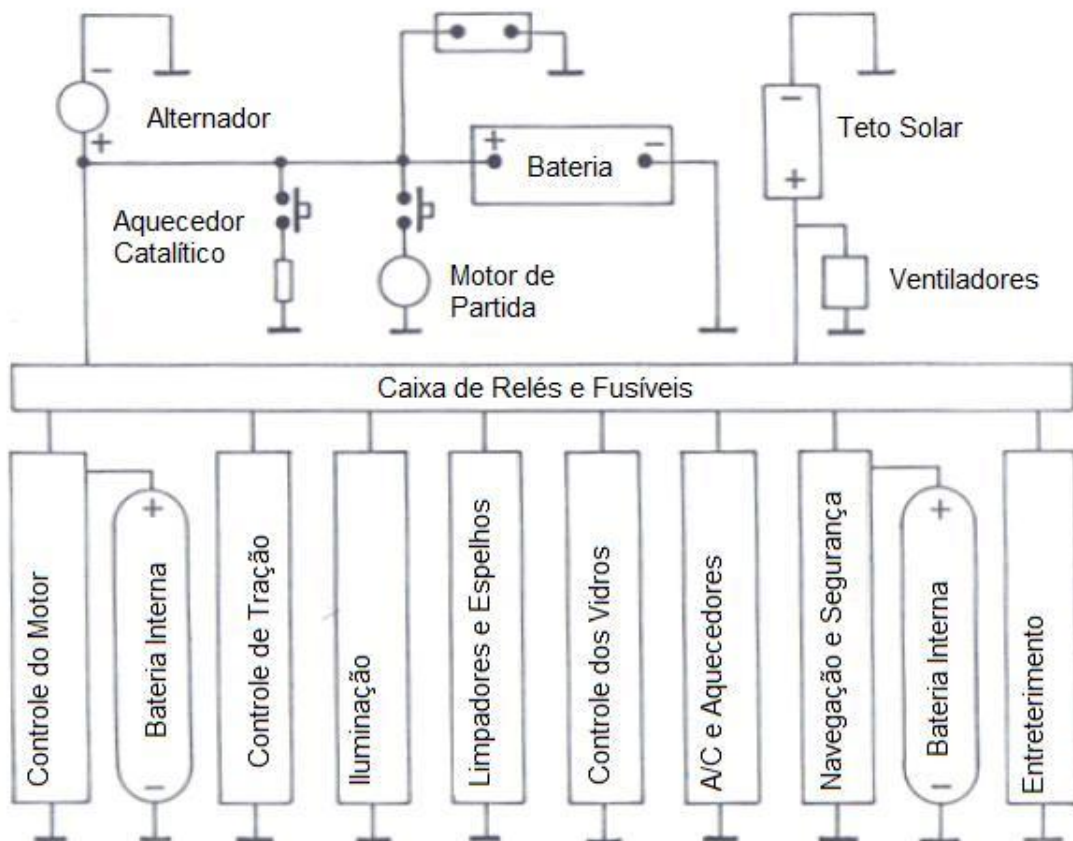


Figura 23 - Sistema elétrico de um veículo dos anos 1990.  
(Reasbeck, 1997)

Esta figura em comparação com a figura anterior mostra o aumento de equipamentos elétricos utilizados em veículos ao longo dos anos, pois como mostrado anteriormente, um veículo dos anos 1920 tinha apenas poucos equipamentos que eram ligados na bateria, enquanto os veículos dos anos 1990 têm diversos equipamentos elétricos conectados à bateria, gerando conseqüentemente uma maior dependência da eletricidade nos veículos modernos.

### 3.2 Sistema elétrico automotivo

O sistema elétrico de um veículo é composto por gerador, um acumulador, um regulador de voltagem e as cargas elétricas.

Nos veículos de passeio a potência das cargas elétricas vem aumentando ao longo do tempo, conforme pode ser visualizado na figura 24:

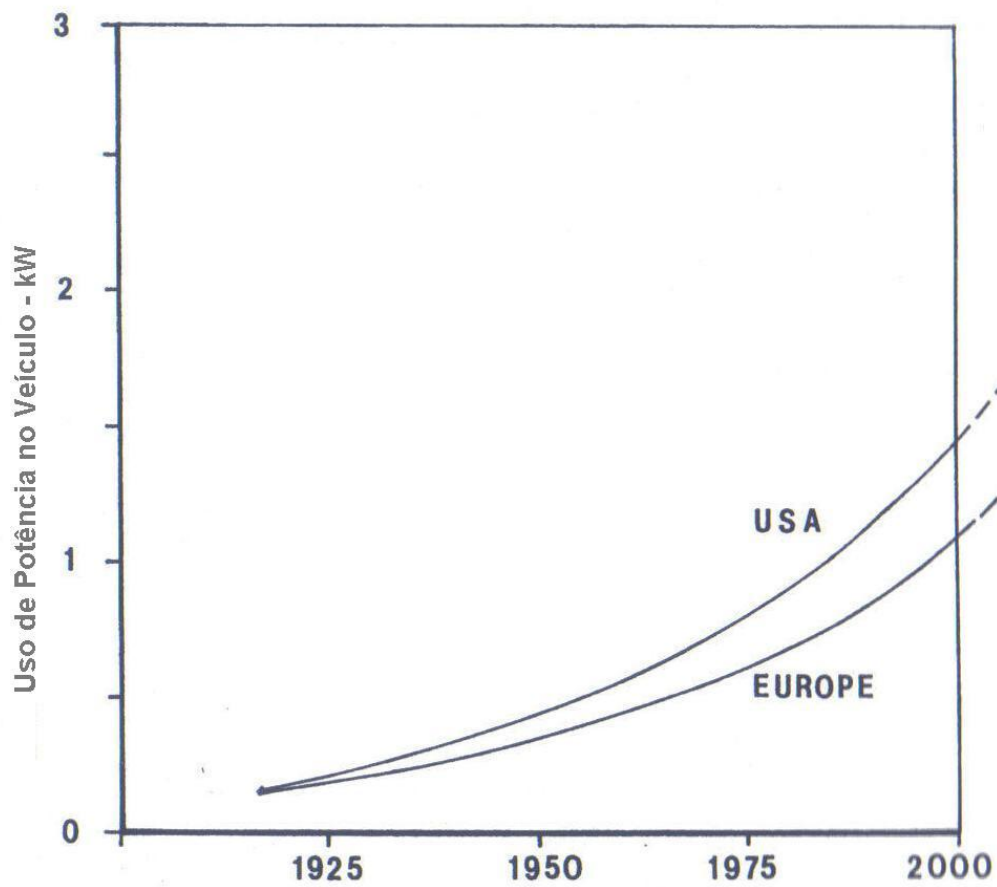


Figura 24 - Crescimento da carga elétrica automotiva ao longo dos anos.  
(Reasbeck, 1997)

Pode-se atribuir o aumento da potência que é solicitada pelas cargas elétricas ao aumento da variedade de cargas encontradas em veículos modernos. A tabela 4 mostra algumas destas cargas, sua potência e corrente média.

Tabela 4- Cargas elétricas  
(Reasbeck, 1997)

Carga	Potência (W)	Corrente (A)
Motor de Partida	1000-5000	200-1000
Faróis	100-200	10-20
Lâmpadas laterais	50	4
Lâmpadas de seta	50	4
Instrumentos	23-30	2
Farol de neblina	200	15
Limpadores de pára-brisas	100	8
Lavadores de pára-brisas	20	2
Vidros Elétricos	100-200	10-30
Banco Elétrico	100-200	10-30
Aquecedor	20-100	2-10
Ar Condicionado	500-1000	40-80
Buzinas	200	15
Rádio	20-100	2-10
Desembaçador traseiro	180	15
Desembaçador dianteiro	500	40
Controles do Motor	12-60	1-5
Injetores de combustível	200	15

As cargas relacionadas na tabela 4 se referem a potência e corrente consumida quando os equipamentos estão em uso, o que normalmente ocorre quando o motor também está ligado. Porém existe outro tipo de consumo de energia elétrica dessas cargas, que ocorre quando as mesmas estão desligadas, chamado de corrente de fuga ou corrente parasita. Essa corrente que normalmente é desconhecida pelos usuários, afeta diretamente o bom funcionamento do veículo, pois como esse consumo é realizado com o veículo em repouso e conseqüentemente com o motor desligado, toda a energia necessária para suprir essa corrente parasita é provida pela bateria e, portanto quando maior for a corrente parasita, mais rápida será a descarga total da bateria.

Quando a bateria é profundamente descarregada, a energia necessária para que o motor parta não estará mais disponível, tornando o veículo inoperante até que essa energia mínima seja repostada. Essa descarga pode até acelerar o processo de

desgaste da bateria. Na tabela 5, extraída do material da Robert Bosch Ltda (2007b), são ilustrados alguns desses componentes que contribuem para o aumento da corrente parasita do veículo, chamada também de corrente em vazio.

Tabela 5- Consumo máximo de corrente parasita por componente.  
(Robert Bosch Ltda, 2007b)

<b>Consumidor</b>	<b>Corrente em vazio máxima (mA)</b>
Computador de bordo	5
Alarme	10
Mecanismos de abertura de janela	5
Sistema de ignição	5
Sistema de injeção	5
Relógio digital	3
Rádio com sistema de códigos	3
Relógio analógico	7

Como citado no início desse tópico, outro componente de suma importância do sistema elétrico veicular é o alternador, que é ilustrado na figura 25, junto com os seus componentes internos.

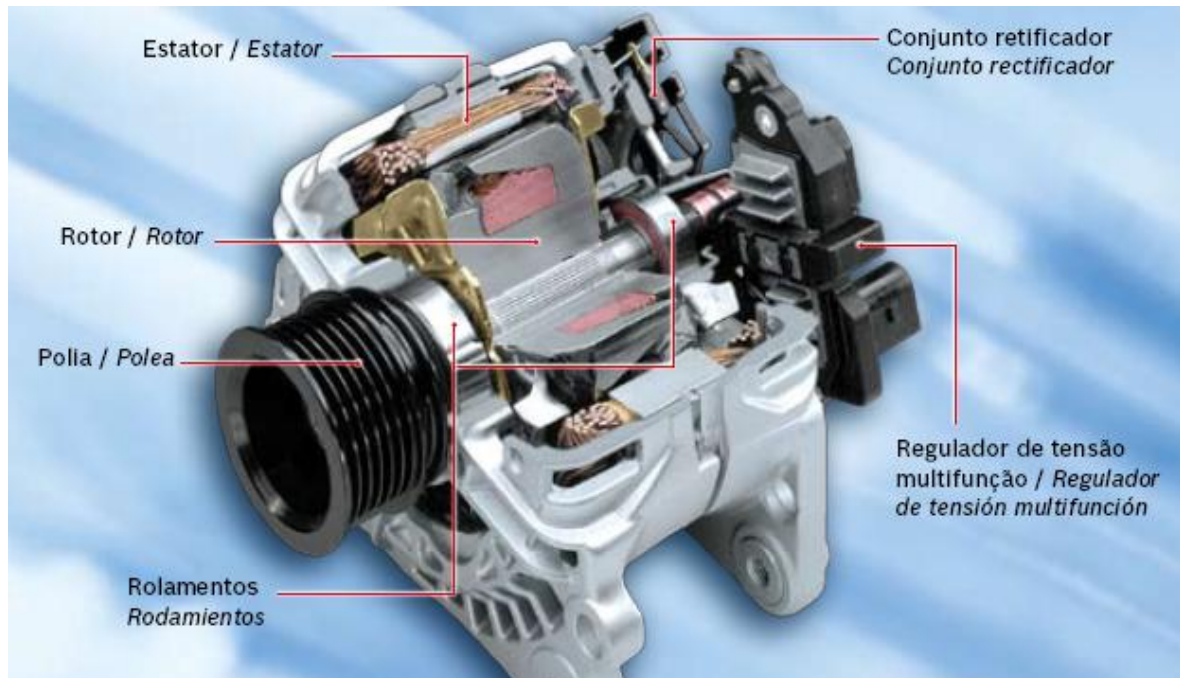


Figura 25 - Alternador Bosch e seus componentes internos  
(Robert Bosch Ltda, 2007a)

O alternador é o dispositivo que transforma energia mecânica em energia elétrica. Portanto ele fornece energia elétrica ao sistema quando o motor está ligado e carrega a bateria quando a energia gerada é maior que a solicitada pelas cargas. De acordo com o material da Robert Bosch Ltda. (2007b), o alternador é responsável pelo equilíbrio elétrico do veículo, ressaltando até que, no desenvolvimento do veículo, o fabricante escolhe o alternador que melhor consiga atender a demanda dos equipamentos originais.

No caso de instalação de acessórios não originais, o alternador pode não conseguir atender mais a demanda das cargas instaladas, podendo gerar falhas do sistema elétrico. Um dos componentes internos do alternador que merece destaque nesse trabalho é o regulador de tensão, que é responsável por regular a tensão elétrica gerada pelo alternador. Essa será a tensão de alimentação da bateria e de todas as cargas elétricas. Se a saída do regulador de tensão estiver desregulada, irá gerar um desequilíbrio da tensão do sistema elétrico, podendo trazer danos permanentes e inoperância da bateria e/ou dos equipamentos instalados.

Com as informações passadas nesse tópico fica claro que existem alguns componentes que são diretamente responsáveis pelo bom funcionamento do sistema elétrico de um veículo. Sendo que alterações, ou falhas, em componentes

como o alternador ou nas cargas podem gerar a falha de todo sistema elétrico, afetando até a bateria, que será melhor explorada nos tópicos seguintes.

### **3.3 Bateria automotiva**

A bateria automotiva é chamada também por diversos autores como Linden e Reddy (2002) de bateria SLI (Start Light and Ignition) devido as suas principais funções de ignição, partida e iluminação nos veículos.

A bateria automotiva é um acumulador elétrico que armazena energia sob a forma química e libera energia elétrica de acordo com a demanda necessária. Tem como principais funções no sistema elétrico do veículo:

- Fornecer energia elétrica para o motor de partida e sistema de ignição no momento da partida;
- Alimentar sistema elétrico do veículo quando o motor estiver desligado e conseqüentemente sem funcionamento do alternador.
- Estabilizar e filtrar a tensão elétrica do sistema;
- Prover energia quando a provida pelo alternador não for suficiente.

Como mostrado anteriormente, todas estas funções citadas são imprescindíveis para o funcionamento do veículo. Quando uma dessas funções não é atendida, o funcionamento do veículo é profundamente comprometido, podendo gerar falhas que inviabilizam o funcionamento do mesmo, pois, por exemplo, sem a energia da bateria não é possível dar partida ao motor do veículo.

A bateria mais utilizada em veículos é a bateria de 12 Volts de ácido-chumbo que é composta por 6 células de 2 Volts em série.

Como mostrado anteriormente as células de ácido-chumbo foram inicialmente desenvolvidas por Gaston Planté utilizando como elementos básicos: folhas de chumbo, tecido poroso e ácido sulfúrico, criando uma longa eletrolise.

A bateria atual é composta por dióxido de chumbo no eletrodo positivo e chumbo no eletrodo negativo. O ácido sulfúrico nesse caso é adicionado como



terceiro elemento com o papel de eletrólito que gera a condução de elétrons entre os dois eletrodos.

Larminie e Lowry (2003) descrevem várias das reações eletroquímicas que ocorrem numa célula de ácido-chumbo, iniciando pela reação básica na qual o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) encontrado no eletrólito se combina com o chumbo (Pb) e o dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) para produzir sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ) e água ( $H_2O$ ), sendo que é gerada energia elétrica. A fórmula (16) mostra esse processo:



A figura 26 ilustra a reação de descarga da bateria. Nesse caso o eletrodo positivo é transformado de chumbo para sulfato de chumbo, enquanto o eletrodo negativo é transformado de peróxido de chumbo para sulfato de chumbo. Nota-se também que, além do fluxo de elétrons que provê a energia elétrica para o veículo, existe a perda de ácido sulfúrico e ganho de água na solução.

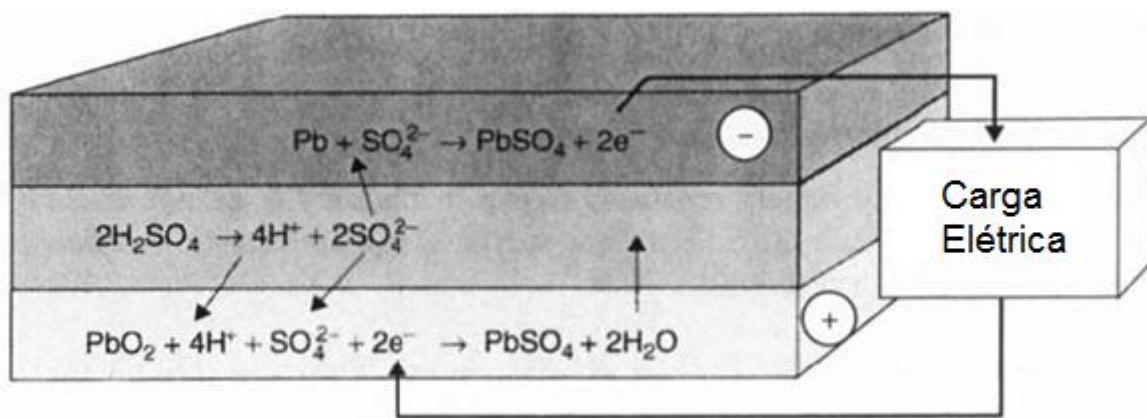


Figura 26 - Reação de descarga da bateria  
(Larminie, 2003)

Complementando a reação mostrada na figura 26, a figura 27 ilustra a reação de carga da bateria, onde o sulfato de chumbo do eletrodo negativo volta a ser chumbo, enquanto o eletrodo positivo sofre a transformação de sulfato de chumbo para peróxido de chumbo. Nota-se também, que além da movimentação de elétrons carregando a bateria, a concentração de ácido sulfúrico aumenta ao longo da carga.



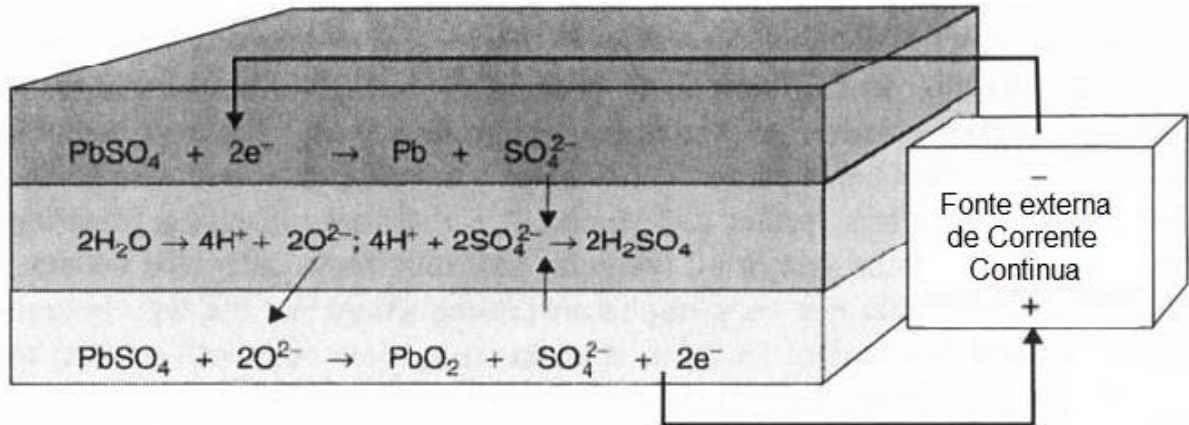


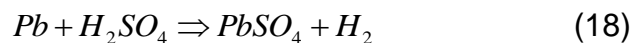
Figura 27 - Reação de carga da bateria  
(Larminie, 2003)

Infelizmente as reações mostradas acima não são as únicas reações que ocorrem numa célula de ácido-chumbo. Como o chumbo e o dióxido de chumbo não são estáveis em ácido sulfúrico, essas substâncias, ainda que lentamente, se decompõe pelas seguintes reações (17) e (18):

Eletrodo positivo:



Eletrodo negativo:



O resultado dessa decomposição é a auto-descarga da bateria. A taxa dessa auto-descarga depende da temperatura das células da bateria, além da pureza dos componentes utilizados e das ligas utilizadas para a construção dos eletrodos.

Essa reação indesejável, que gera os gases oxigênio e hidrogênio, ocorre também quando a bateria é descarregada. Vale ressaltar que a “velocidade” da reação depende diretamente da “velocidade” da descarga. Em descargas rápidas essa perda de carga ocorre mais rapidamente nas células, devido a baixa tensão, alta temperatura e alta atividade nos eletrodos quando essa descarga é abrupta.

Outro problema encontrado é geralmente resultado da reação de auto-descarga não ocorrer de forma idêntica em todas as células da bateria, fazendo com que algumas das células fiquem mais descarregadas que as outras, gerando um novo efeito colateral. Esse efeito colateral acontece porque ao término de uma carga da bateria, o ideal é que todas as células estejam carregadas, isto significa

que algumas células sofrerão uma sobrecarga para ter certeza que todas as células estão carregadas. A figura 28 ilustra a reação de sobrecarga em uma célula de ácido-chumbo:

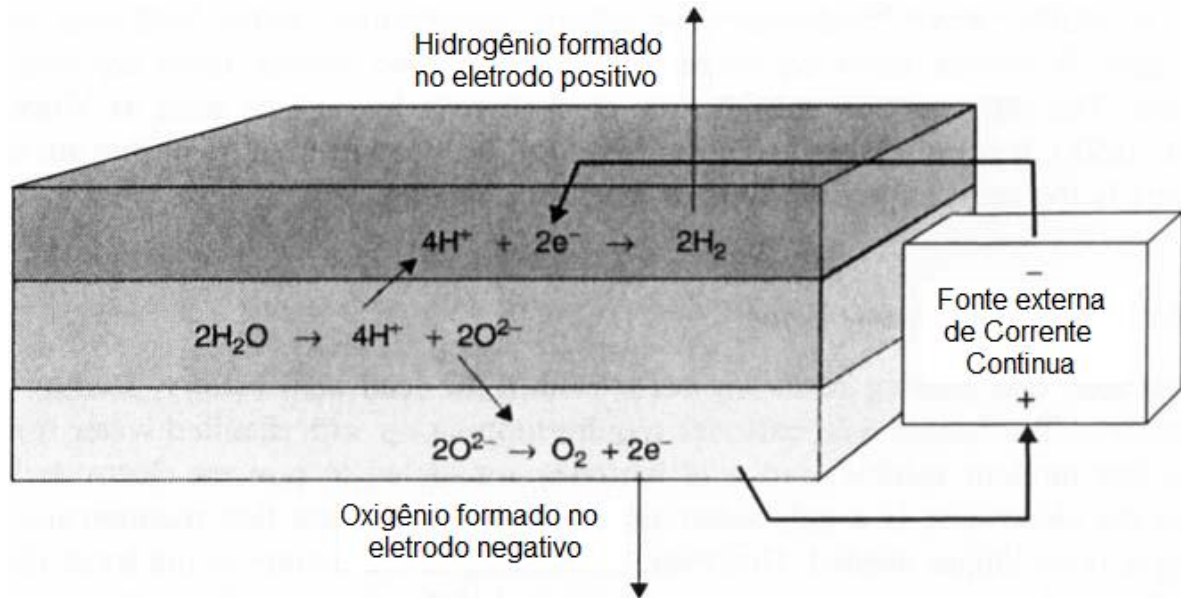


Figura 28 - Reação de sobrecarga.  
(Larminie, 2003)

A reação de sobrecarga que gera a liberação desses gases ocorre quando não existe mais sulfato de chumbo nos eletrodos para aceitar ou entregar elétrons. Situação na qual a bateria está totalmente ou quase totalmente carregada.

O efeito percebido nas reações de auto-descarga e de sobrecarga é a perda de água que se transforma em oxigênio e hidrogênio. Nas baterias antigas esses gases eram perdidos e o eletrólito tinha que ser repostado regularmente adicionando água. Nas baterias modernas os gases são presos dentro da bateria e se recombinam a uma taxa limitada gerando água. Porém, a vedação nessas baterias não é total, pois existe uma válvula que, a determinada pressão, elimina os gases gerando uma perda permanente de água. Essas baterias são chamadas de VRLA (Valve Regulated sealed Lead Acid) e em teoria são as baterias livres de manutenção.

Além da perda de água existe ainda outro fator que pode influenciar no desempenho da bateria, chamado sulfatação. Isso ocorre quando a bateria é deixada por um longo período (mais de duas semanas) descarregada. Nessa

situação o sulfato de chumbo nos eletrodos se agrupa em cristais, que dificultam sua conversão para chumbo ou dióxido de chumbo, formando uma capa isolante na superfície dos eletrodos. Algumas vezes isso pode ser revertido realizando carga lenta na bateria, porém nem sempre isso é possível. Com o uso da bateria esses cristais vão se tornando cada vez maiores e com o efeito de vibração esses cristais tendem a descolar do eletrodo diminuindo a eficiência da bateria.

### 3.4 Partes da bateria

Após as explicações sobre os conceitos eletroquímicos da bateria, nesse tópico a bateria será dividida em partes que serão explicadas separadamente. A figura 29 mostra algumas dessas partes que serão detalhadas nesse tópico.



Figura 29 - Bateria Desmembrada

No material da Robert Bosch (2007b) são detalhados os principais componentes, conforme a seqüência:

- **Massa Ativa:** Armazena a energia na bateria, é uma das partes que se altera quimicamente quando a corrente flui nos processos de carga e descarga. Como a massa é porosa, sua área em contato com o eletrólito é grande. Quanto maior a quantidade e área de massa, maior a quantidade de energia que a bateria pode acumular.

- **Solução Eletrolítica:** O eletrólito permeia os poros das placas e dos separadores e preenche o espaço vazio das células. Portanto, o óxido e as partículas de chumbo da massa estão sempre em contato com o eletrólito. Quando o ácido é diluído em água, as moléculas do ácido se dividem em íons de hidrogênio carregados positivamente ( $H^+$ ) e em íons carregados negativamente ( $SO_4^-$ ). Essa divisão é necessária para tornar o eletrólito condutivo e para possibilitar a reação eletroquímica durante o processo de carga e descarga.
- **Bloco de placas:** Os blocos de placas contêm placas positivas, negativas e os separadores. A quantidade e área de superfície dessas placas são o fator essencial que define a capacidade em Ah da célula. As placas são compostas por grades de chumbo e pela massa ativa que é colocada nestas grades. A massa ativa que é porosa fornece uma grande área de superfície. No bloco das placas, todas as placas positivas são soldadas em uma mesma conexão, e o mesmo ocorre com as placas negativas. Essas conexões além de permitir o fluxo dos elétrons, reforçam a estrutura mecânica das placas.
- **Caixa:** A caixa deve ser feita de material isolante e resistente a ácido sulfúrico. Dentro da caixa existem paredes de separação que dividem o interior em células. Cada uma destas células contém blocos de placas com as placas positivas, placas negativas e os separadores. Estas células são conectadas em série, por conexões que se encaixam nos orifícios encontrados nas paredes de divisão. A disposição das células pode variar de fabricante para fabricante. A figura 30 mostra as disposições mais encontradas:

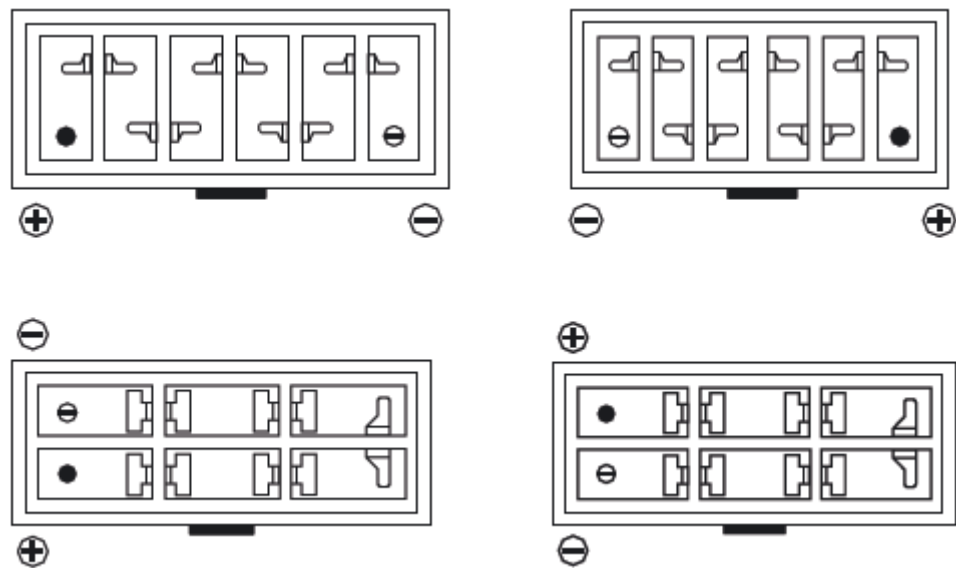


Figura 30 - Disposição das células dentro da caixa da bateria.  
(Robert Bosch Ltda, 2007b)

- Tampa: As células são seladas pela tampa da bateria em conjunto com a caixa. Nas baterias VRLA a tampa tem um canal central de desgasificação no qual são conectadas todas as células. Nas baterias mais modernas existe ainda um labirinto para auxiliar essa circulação e reação dos gases.
- Pólos: são o canal de comunicação das células com o “mundo exterior”. As placas positivas da primeira célula são conectadas ao pólo positivo, enquanto que as placas negativas da última célula são conectadas ao pólo negativo. Os pólos são formados de uma liga de chumbo e tem a forma cônica para causar uma baixa resistência de contato com as conexões dos cabos. Ainda é importante salientar que o pólo positivo possui um diâmetro maior que o diâmetro exterior do pólo negativo, para facilitar a sua identificação.
- Grade: A principal função da grade é viabilizar a condução elétrica e providenciar o suporte da massa ativa. As grades são feitas de chumbo ligado a diferentes elementos químicos. As ligas mais conhecida são chumbo-antimônio (PbSb), chumbo-cálcio (PbCa) e chumbo-cálcio-prata (PbCaAg). A geometria das grades pode variar com o processo de produção adotado pelo fabricante da bateria, as placas podem ser fundidas ou expandidas. A figura 31 mostra duas grades fundidas a esquerda e uma placa expandida na direita:

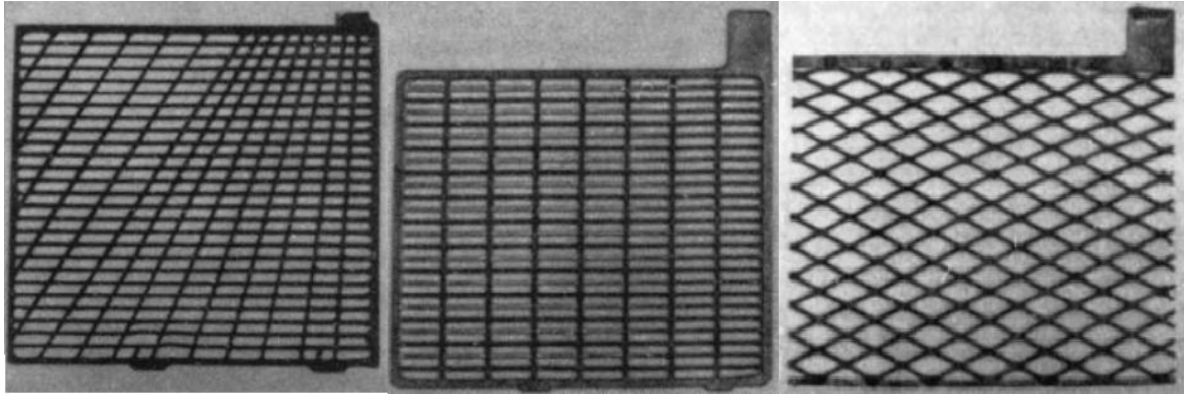


Figura 31 - Grades fundidas à esquerda e grade expandida à direita.  
(Linden, 2002)

- Placa Negativa: Conjunto composto pela grade mais a massa ativa de chumbo (Pb) quando a bateria está carregada.



Figura 32 - Placa negativa.  
(Heliar, 2010)

- Placa Positiva: Conjunto composto pela grade mais a massa ativa de dióxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>), quando a bateria está carregada. Devido às propriedades do dióxido de chumbo a grade da placa positiva está mais sujeita a corrosão.

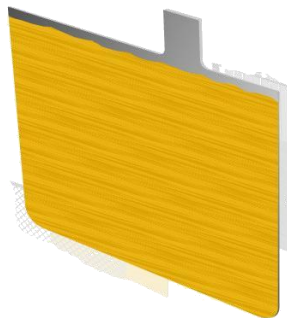


Figura 33 - Placa Positiva.  
(Heliar, 2010)

- Separador: a principal função do separador é isolar eletricamente as placas positivas das placas negativas. Como a busca por baterias menores é uma contante, cada vez mais, as placas positivas e negativas estão próximas uma das outras e caso elas se encostem é provocado um curto na bateria inutilizando-a. Os isoladores são colocados entre as placas para evitar esses curto-circuitos, porém o isolador deve também ser poroso para possibilitar a migração do eletrólito e conseqüentemente os íons nele encontrados. O isolador mais utilizado atualmente é fabricado em polietileno, que não oxida e é resistente ao ácido. Esse isolador na forma de bolso envolve as placas positivas e negativas. A figura 34 ilustra um destes separadores.

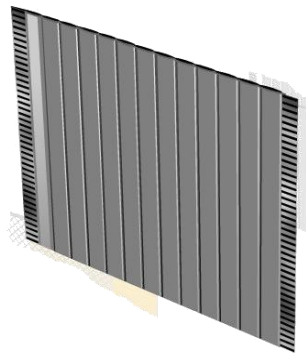


Figura 34 - Separador de polietileno.  
(Heliar, 2010)

Como mostrado durante esse tópico a bateria automotiva VRLA é formada por 6 células independentes de chumbo-ácido que são conectadas em série dentro da bateria para gerar uma tensão de saída na ordem de 12 Volts. Na seqüência serão resumidos os processos de carga e descarga, baseados nos tópicos desse capítulo.

Para o processo de carga, pode-se dizer que quando o motor está ligado, o alternador gera uma diferença de potencial entre os pólos da bateria. Os pólos, que estão ligados em série com as células, transmitem essa diferença de potencial para as células. Pela grade de cada placa da célula essa diferença de potencial é passada para as massas ativas que em conjunto com o eletrólito inicia a reação de carga, acumulando a energia elétrica em forma de energia química.

Para o processo de descarga ocorre o oposto, onde a diferença de tensão é gerada pelas células e conseqüentemente transmitida para os pólos da bateria, fazendo com a energia química da bateria seja transformada em energia elétrica.

## **4. Análise de Confiabilidade de Baterias**

Como mostrado nos capítulos anteriores, a bateria é um componente de grande importância nos automóveis e essa importância vem crescendo ao longo dos anos devido a diversos equipamentos elétricos automotivos que são lançados a cada ano. O aumento significativo de módulos eletrônicos, como por exemplo, Air-bag e ABS, que são cada vez mais comuns nos veículos nacionais, reforçam essa importância.

Devido a essa dependência do veículo moderno frente à bateria, surgiu a necessidade de analisar de maneira científica o comportamento desse componente quando instalado nos veículos de passeio. Partindo dessa necessidade foi iniciado esse trabalho de análise de confiabilidade das baterias.

A fonte para a análise são os dados de falhas de baterias em veículos com até um ano de uso. Esse período foi escolhido devido a grande maioria dessas trocas serem realizadas nas concessionárias em garantia e, portanto são registradas nos sistemas de garantia. Esses registros fornecem os dados para a avaliação da confiabilidade.

### **4.1 Critério de falha da bateria**

Conforme mencionado anteriormente, a norma ABNT (1994) NBR5462/1994 traz no seu item 2.4.1 que falha é o “Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.” Portanto, para iniciar o estudo, precisa-se inicialmente definir o que é a função requerida da bateria.

Como mostrado no capítulo 3 a função da bateria é acumular energia elétrica na forma de energia química e quando solicitada converter novamente essa energia química em energia elétrica para alimentar os componentes elétricos do veículo. Portanto se, por exemplo, um veículo não gira o motor de partida devido à bateria estar apenas descarregada isso não pode ser considerado como falha da bateria, pois a função principal da bateria não é ligar o veículo e sim armazenar energia e fornecer essa energia armazenada.



Após definido que a falha da bateria ocorre somente quando ela perde a capacidade de armazenar energia na forma química, tem-se outro conceito que precisa ser definido para realização da análise: Em que situação pode-se concluir que a bateria perdeu sua capacidade de armazenar energia? O critério utilizado nesse trabalho é o critério do Conselho Internacional de Baterias (BCI- Battery Council International).

Esse critério é largamente utilizado em equipamentos comerciais que testam a bateria pelo processo de descarga, que apesar de ser um pouco complexo, é o sistema que melhor simula a utilização da bateria nos veículos. A figura 35 mostra uma simplificação do procedimento de teste recomendado pela Battery Council International (1995):

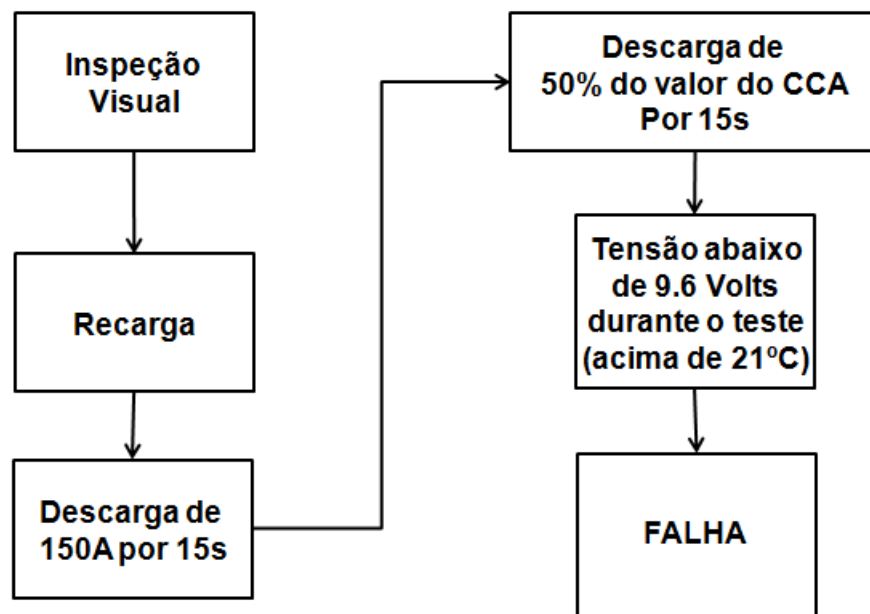


Figura 35 - Critério de falha.  
(Battery Council International, 1995)

Nesse teste inicialmente se realiza uma inspeção visual da bateria, procurando por danos como rachaduras na caixa ou bornes danificados, após essa verificação visual a bateria é carregada até que atinja a sua carga plena. Após a recarga da bateria, a mesma é sujeita a uma descarga de 150 A por 15 segundos para eliminar a tensão superficial da bateria. Após eliminada a tensão superficial a bateria é descarregada com uma corrente equivalente à 50% dos seu valor de CCA por 15 segundos. Caso a tensão da bateria apresente valores abaixo de 9,6 Volts (temperatura acima de 21°C), pode-se considerar que a bateria está falhada.

Portanto, utilizando o critério ilustrado na figura 35, é possível medir de uma maneira científica se a bateria analisada está falhada ou não.

Este teste simula uma das condições mais severas da aplicação da bateria nos veículos, pois simula algo como uma partida do motor de aproximadamente 15 segundos, sendo que a partida do motor é o momento onde a carga da bateria é drenada de forma mais brusca.

Nesse estudo todas as baterias foram testadas de acordo com o critério da BCI. As baterias que não estavam falhadas de acordo com esse critério foram retiradas da lista de dados válidos, para evitar dados incorretos que poderiam atrapalhar a análise.

Nesse trabalho as baterias não foram dissecadas de maneira que se pudesse definir com exatidão a causa da falha. Essa análise fica como proposta para as próximas análises desse assunto.

#### **4.2 Universo das amostras.**

Como relacionado acima, foram coletados dados de veículos durante o período de garantia, por ser o período no qual as informações sobre os registros de falhas são mais precisas. Para essa análise, as baterias foram separadas em dois grupos diferentes, de acordo com a aplicação dessas baterias em campo. Esses dois grupos serão classificados em grupo TIPO I e TIPO II, conforme classificação abaixo:

- TIPO I : Bateria utilizada em veículos sub-compactos de entrada, de um mesmo ano modelo e tipo de carroceria, além de utilizarem o mesmo tipo de alternador, motor e combustível.
- TIPO II : Bateria utilizada em veículos compactos de um mesmo ano modelo e tipo de carroceria, além de utilizarem o mesmo tipo de alternador, motor e combustível.

Pode-se considerar que veículos sub-compactos de entrada são veículos básicos e de baixo custo que têm poucos equipamentos instalados de fábrica, enquanto que veículos compactos são veículos que já tem um grupo maior de

componentes eletrônicos instalados além de uma maior variedade de opcionais. No site J.D.Power (2010) tem-se alguns exemplos de plataformas sub-compactas de entrada (Pontiac Matriz, Nissan Tsuru e Dodge Atos) e de plataformas compactas (Mazda 3, Mitsubishi Lancer e Volkswagen Bora).

Uma característica importante das baterias analisadas, é que todas foram fabricadas no mesmo lugar e manufaturadas utilizando as mesmas técnicas e tecnologia de fabricação. A única diferença é a capacidade da bateria, pois a bateria do Tipo II tem capacidade maior que a do Tipo I.

### **4.3 Análise de confiabilidade**

Após a definição de falha no contexto desse trabalho e das informações que definem o universo investigado, nesse tópico será mostrado o método utilizado para a análise de confiabilidade dessas peças.

O primeiro ponto dessa análise vem do fato que, de todo o universo de amostras analisadas, somente parte desse todo apresentou falha no período de um ano após a fabricação do veículo. Dessa maneira, para viabilizar o estudo, os dados foram censurados a direita conforme definição mostrada no capítulo 2. Como nesse caso a censura foi realizada por um tempo limite de exposição, essa censura é classificada como censura à direita do Tipo I. Nesse trabalho a escala de tempo utilizada será de dias, contados a partir da data de produção do veículo.

Com o intuito de buscar uma distribuição que melhor pudesse representar o comportamento de falhas em campo dessas baterias, foi realizada uma análise paramétrica dos dados encontrados em campo. Entre as distribuições que já foram abordadas nesse trabalho, foi escolhida a distribuição de Weibull de dois parâmetros, que além de ser, de acordo com Bertsche (2008), considerada a distribuição mais utilizada na análise de confiabilidade, essa distribuição contempla a maior gama de comportamentos encontrados nos estudos de confiabilidade, incluindo a distribuição normal e exponencial.

Nessa análise paramétrica os dados foram coletados individualmente e todas amostras submetidas ao testes de falha de acordo com o parâmetro da BCI, as amostras que não estavam realmente com falha foram retiradas da análise. Como foi possível definir a data exata da falha em relação à fabricação do veículo, não foi necessário agrupar os dados, tornando essa uma análise não agrupada.

O método adotado para a estimativa dos parâmetros da distribuição, foi o método da máxima verossimilhança, que conforme descrito no capítulo 2 do trabalho, é o método preferencial para análise de dados censurados na distribuição de Weibull, sendo, portanto, o método escolhido no software Minitab para realizar as análises desse trabalho.

#### ***4.4 Análises de amostras de baterias do Tipo I***

O primeiro estudo realizado é a análise das baterias do Tipo I que, lembrando, são as baterias que equipam veículos sub-compactos.

Para o melhor aproveitamento dessa análise foram colhidos os dados de uma plataforma específica e utilizados dados de veículos sub-compactos que utilizam o mesmo motor, combustível, carroceria e alternador, além de pertencerem ao mesmo ano modelo.

Com as informações de tempo de uso até a falha coletadas e somados às amostras censuradas foram realizadas as análises com auxílio do software Minitab para encontrar os parâmetros da distribuição de Weibull que representa o comportamento da taxa de falha das baterias destes veículos.

As figuras de 36 a 39 mostram os gráficos da confiabilidade, função distribuição acumulada, função densidade de probabilidade e função da taxa de falhas, respectivamente, como resultado da análise desta amostras do Tipo I. No gráfico da figura 36, os dias após a fabricação estão em escala logarítmica.

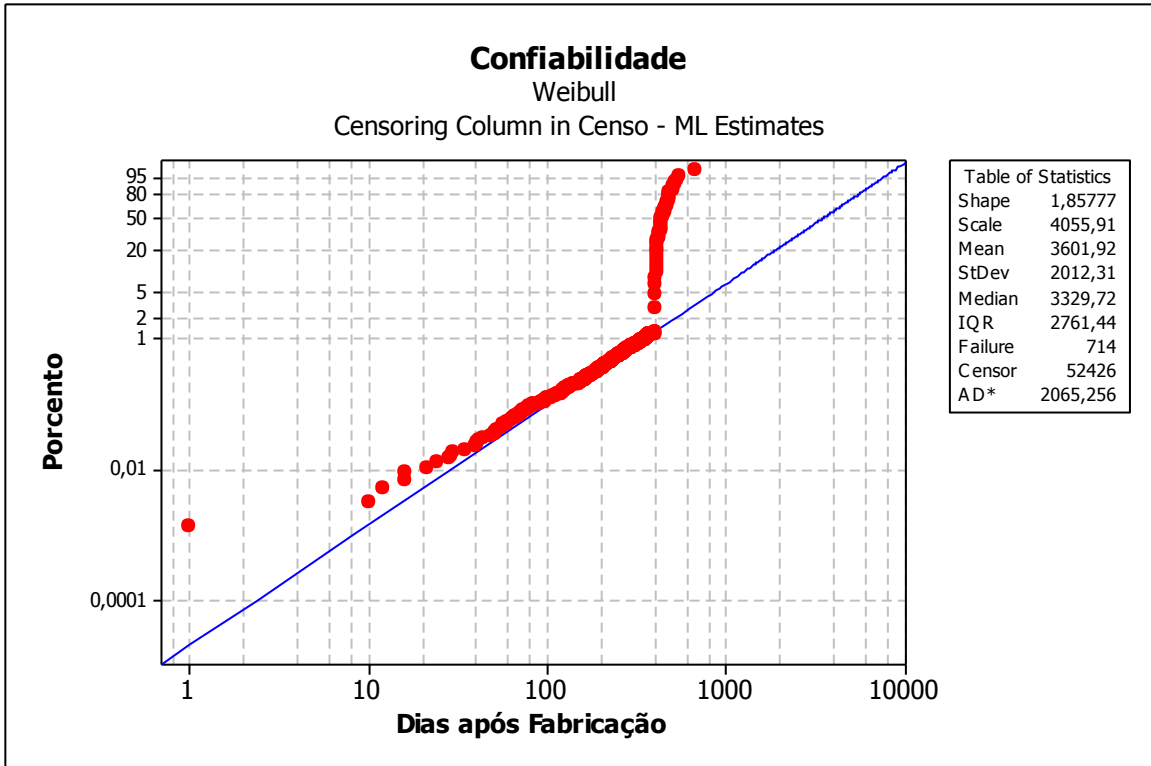


Figura 36 - Gráfico de confiabilidade, baterias Tipo I

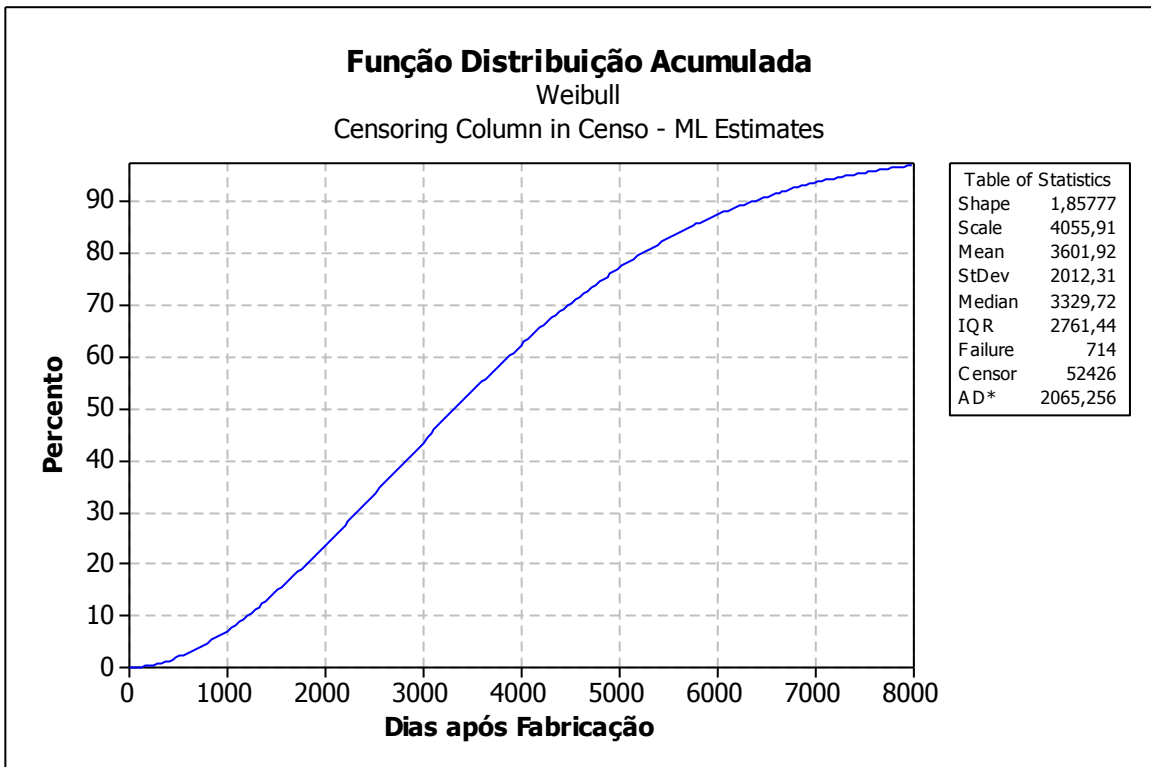


Figura 37 - Função distribuição acumulada, baterias Tipo I

Os gráficos mostrados fornecem os valores de  $\beta$  (Constante de forma) e  $\eta$  (Constante de escala) que caracterizam a distribuição de Weibull de dois parâmetros.

Analisando o valor de  $\beta=1,85777$ , conforme os parâmetros mostrados em Abernethy (2006), tem-se que a distribuição encontrada revela que as baterias avaliadas tem um comportamento de falha por desgaste.

Partindo dos valores de  $\beta$  e  $\eta$  encontrados na análise dos dados, foi possível desenhar uma função de densidade de probabilidade que representasse a densidade de probabilidade de falhas das baterias analisadas.

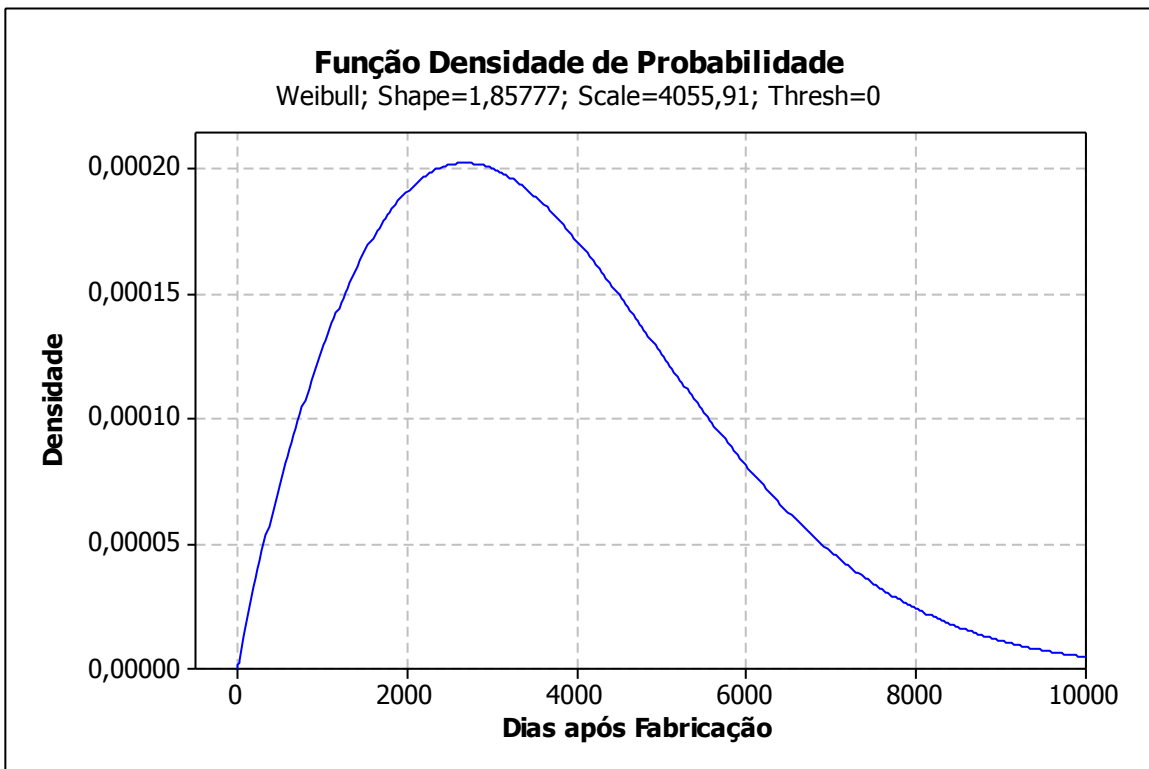


Figura 38 - Função Densidade de Probabilidade, baterias Tipo I

O pico do gráfico da função densidade de probabilidade, representa o período onde deve haver a maior probabilidade da ocorrência de falhas, representando a região de maior inclinação do gráfico da confiabilidade. Nesse caso observa-se que existe um crescimento na densidade de falha até que atinge um pico e começa a diminuir a densidade, provavelmente devido à diminuição do número absoluto de falhas, conforme mostrado no capítulo 2.

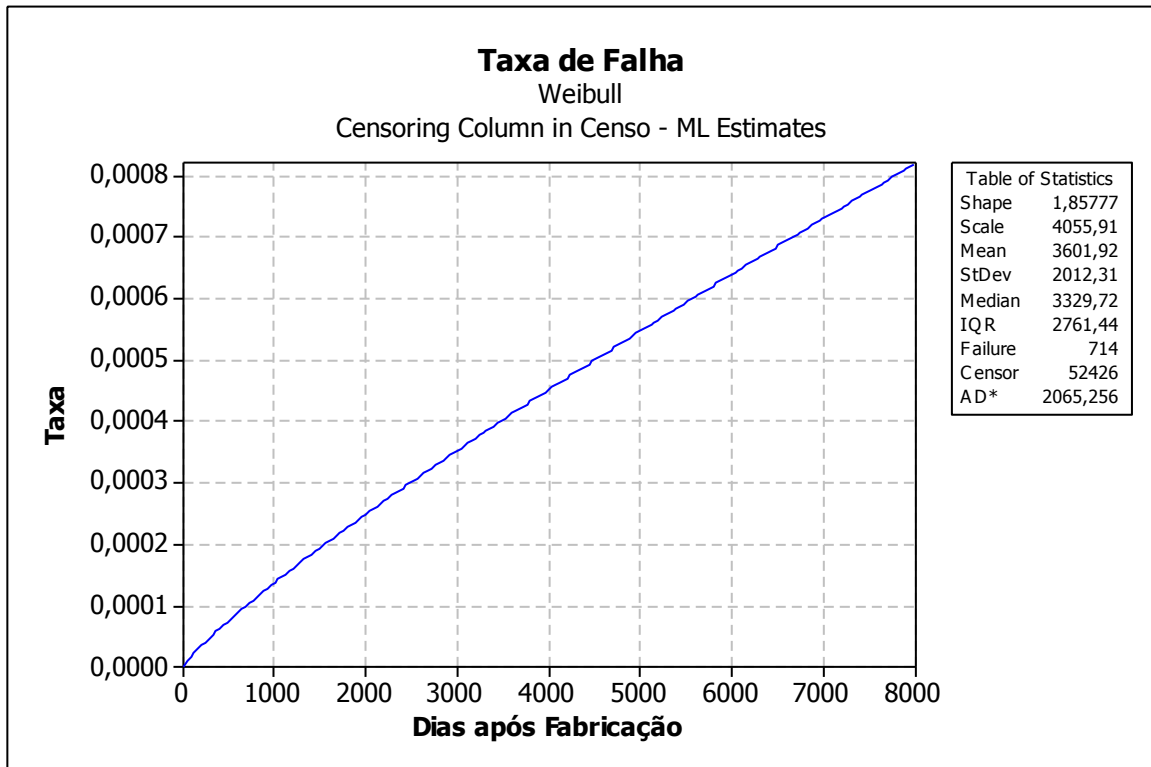


Figura 39 - Função da Taxa de Falha, baterias Tipo I

O diagrama da taxa de falha extraído também da análise mostrou-se crescente com o tempo, comprovando que o item falha devido a desgaste, conforme já abordado anteriormente. A forma dessa curva reforça a teoria de o decréscimo da densidade de falha na segunda parte do gráfico da f.d.p. é causado pela diminuição do número de amostras ainda em atividade.

A baixa taxa de falha no início da vida da bateria também mostra que existem poucas falhas causadas por falhas no processo de produção.

#### ***4.5 Análises das amostras do Tipo II***

Na segunda parte do estudo é realizada a análise das baterias do Tipo II que relembrando, são as que equipam veículos compactos.

Assim como no estudo realizado para baterias do Tipo I, os dados foram colhidos de uma plataforma específica e utilizados dados de veículos compactos que utilizam o mesmo motor, combustível, carroceria e alternador, além de pertencerem ao mesmo ano modelo.

Seguindo o mesmo procedimento utilizado nas análises do Tipo I, as informações coletadas sobre o tempo de uso até a falha foram organizadas e de posse desses valores e do tempo de operação das amostra censuradas foram realizados os procedimentos para encontrar a melhor distribuição de Weibull que representa o seu comportamento de falha.

As figuras 40 a 43 mostram os gráficos da confiabilidade, função distribuição acumulada, função densidade de probabilidade e função da taxa de falhas, respectivamente, como resultado da análise destas amostras do Tipo II, sendo que no gráfico 40, os dias após a fabricação estão em escala logarítmica.



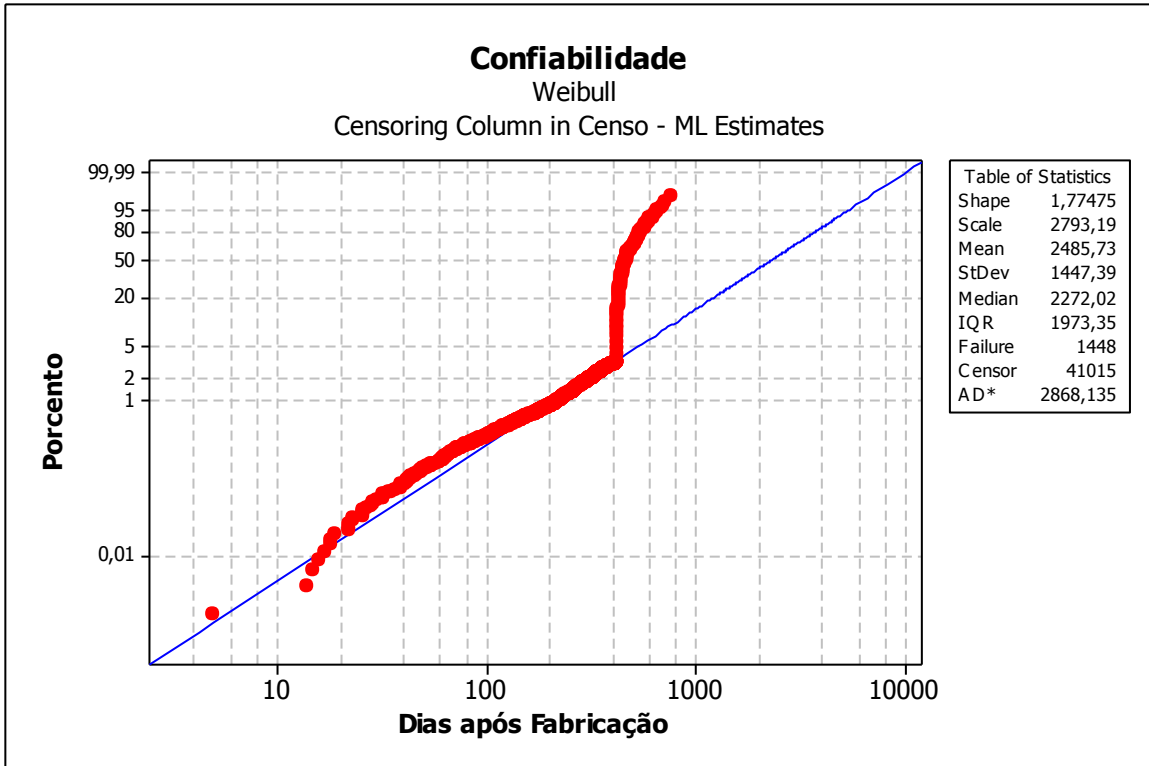


Figura 40 – Gráfico de confiabilidade, baterias Tipo II

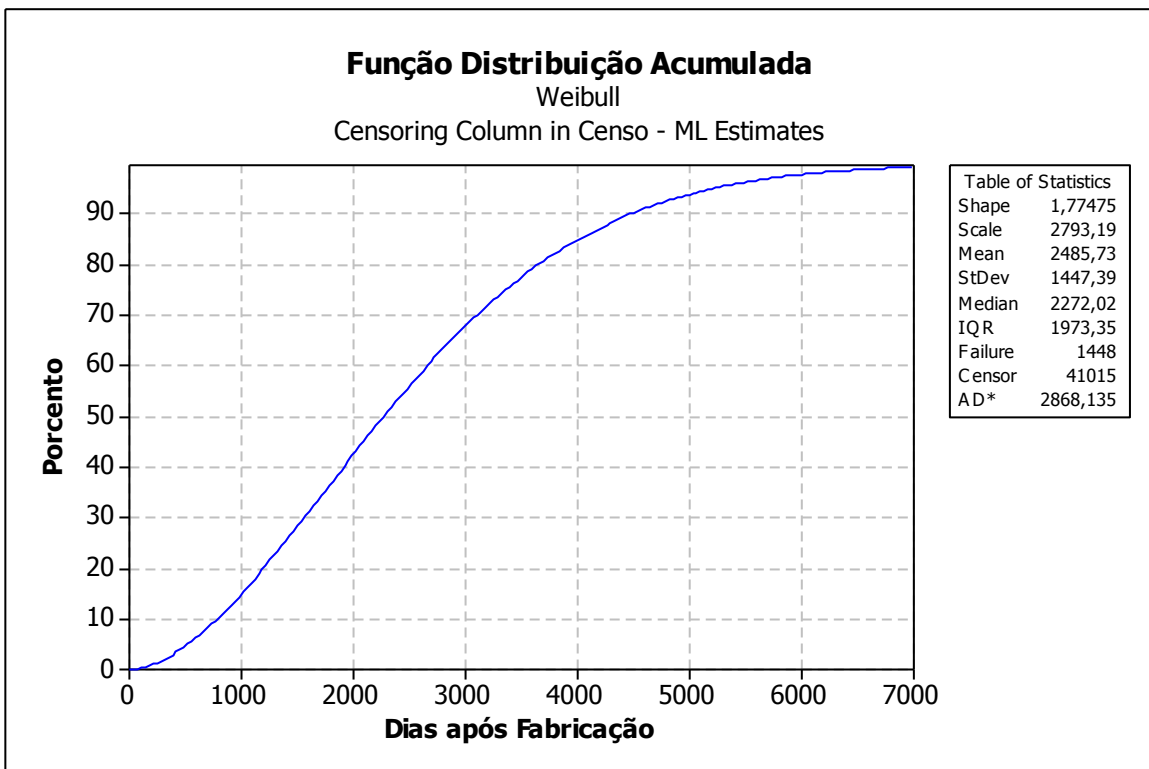


Figura 41 – Função da distribuição acumulada, baterias Tipo II

Assim como os gráficos obtidos para a bateria do Tipo I têm-se também nos gráficos acima os valores de  $\beta$  (Constante de forma) e  $\eta$  (Constante de escala).

Analisando o valor de  $\beta=1,77475$ , tem-se que este é próximo do valor encontrado na distribuição do estudo das baterias Tipo I ( $\beta=1,85777$ ). Essa distribuição também mostra que as baterias têm um comportamento de falha por desgaste.

Assim como na análise anterior, partindo dos valores de  $\beta$  e  $\eta$  encontrados na análise dos dados, foi possível desenhar uma função de densidade de probabilidade que representasse a densidade de probabilidade de falhas das baterias analisadas, indicada na figura 42.

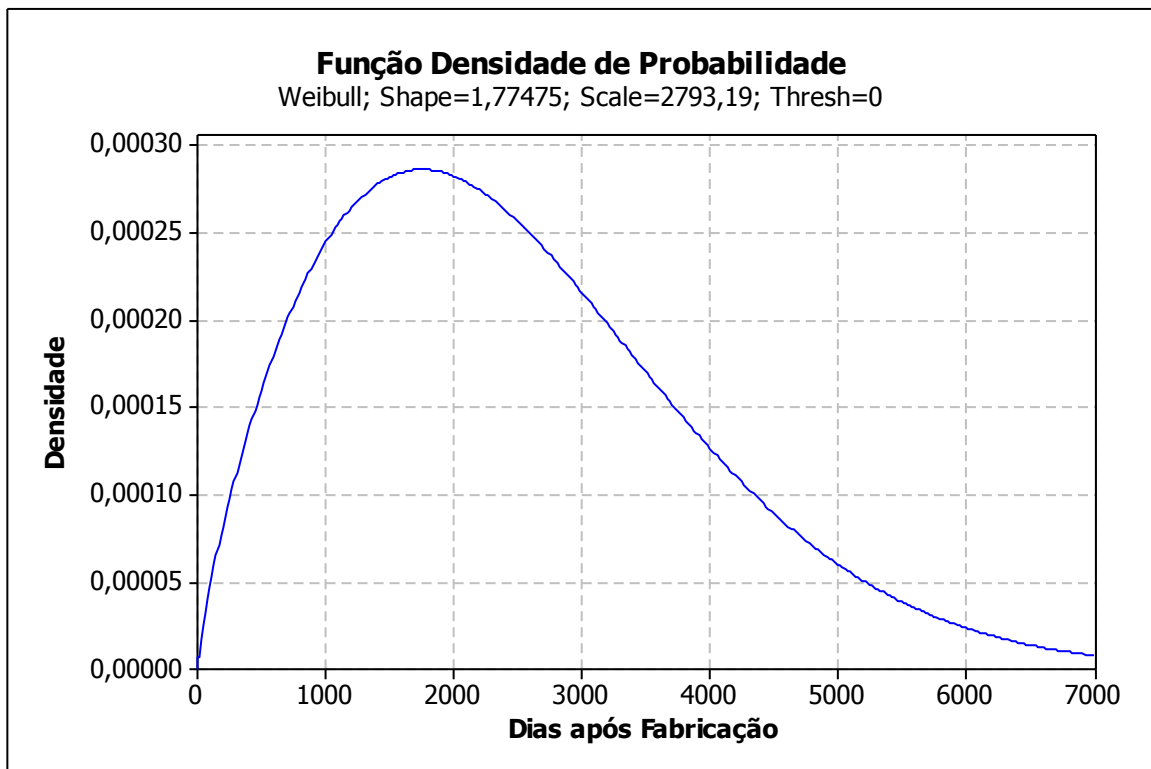


Figura 42 - Função Densidade de Probabilidade, baterias Tipo II

Nesse caso, observa-se que a forma da f.d.p. tem um comportamento muito semelhante à distribuição obtida para a bateria do Tipo I, existindo um crescimento na densidade de falha até que atinge um pico e a partir deste ponto começa a decrescer, muito provavelmente devido à diminuição do número absoluto de falhas, conforme reforçado no gráfico da taxa de falhas, indicada na figura 43.

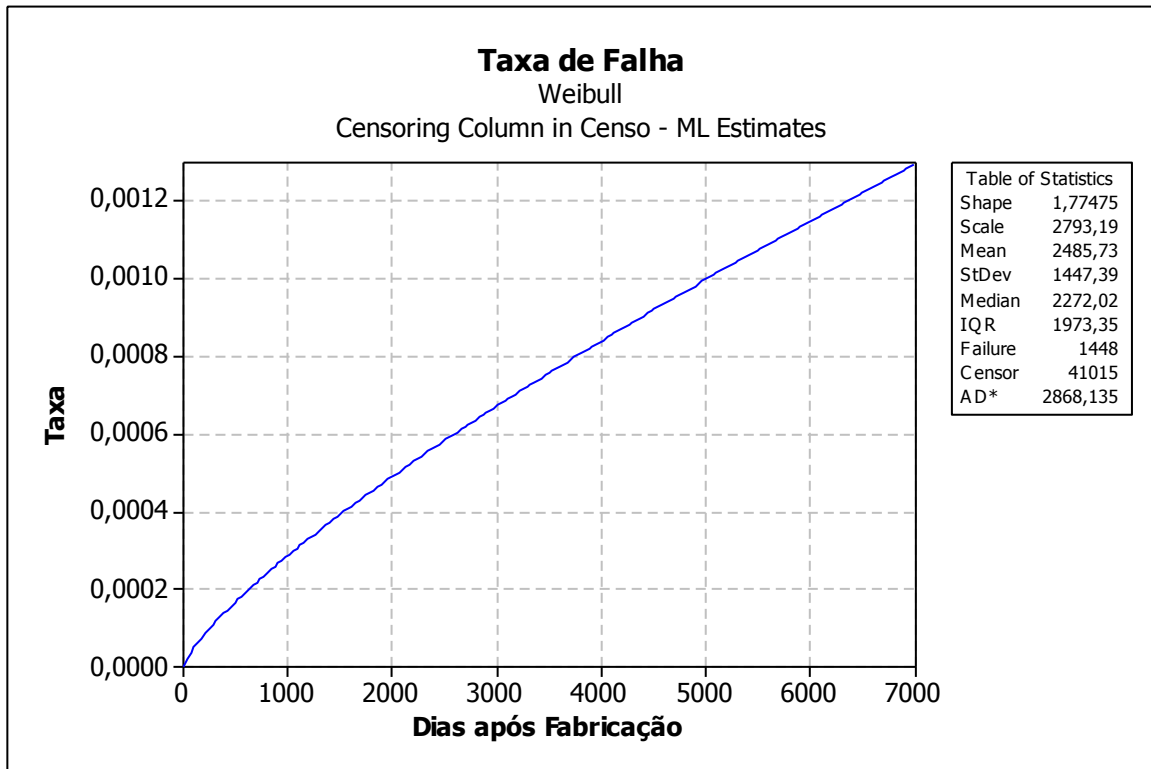


Figura 43 - Taxa de Falha, baterias Tipo II

Pelo diagrama da taxa de falha concluí-se que o comportamento dos dois tipos de bateria é muito semelhante. Esse comportamento pode ser caracterizado por uma baixa taxa de falha no início da vida da bateria e o aumento dessa taxa ao longo do tempo, demonstrando que a peça falha por desgaste.

## **4.6 Avaliação do Impacto do Tempo de Pátio**

Nesse tópico será realizada a análise da influência do tempo de pátio na confiabilidade da bateria.

Para realizar essa análise os dados de campos foram separados de acordo com o tempo que cada um dos veículos ficou armazenado antes de ser vendido. Com esses valores, foi possível separar para cada uma das análises, dois grupos de veículos de acordo com o tempo de pátio.

O levantamento dos parâmetros da distribuição foi realizado da mesma maneira apresentada nas análises anteriores.

### **4.6.1 Análise em relação ao tempo de pátio das baterias do Tipo I**

Para o estudo das baterias do Tipo I foram comparados os gráficos de veículos que ficaram até 15 dias no pátio, contra veículos que ficaram entre 16 e 30 dias no pátio. As figuras 44 a 47 mostram os gráficos da confiabilidade, função distribuição acumulada, função da taxa de falhas e função densidade de probabilidade, respectivamente. No gráfico 44, os dias após a fabricação estão em escala logarítmica.

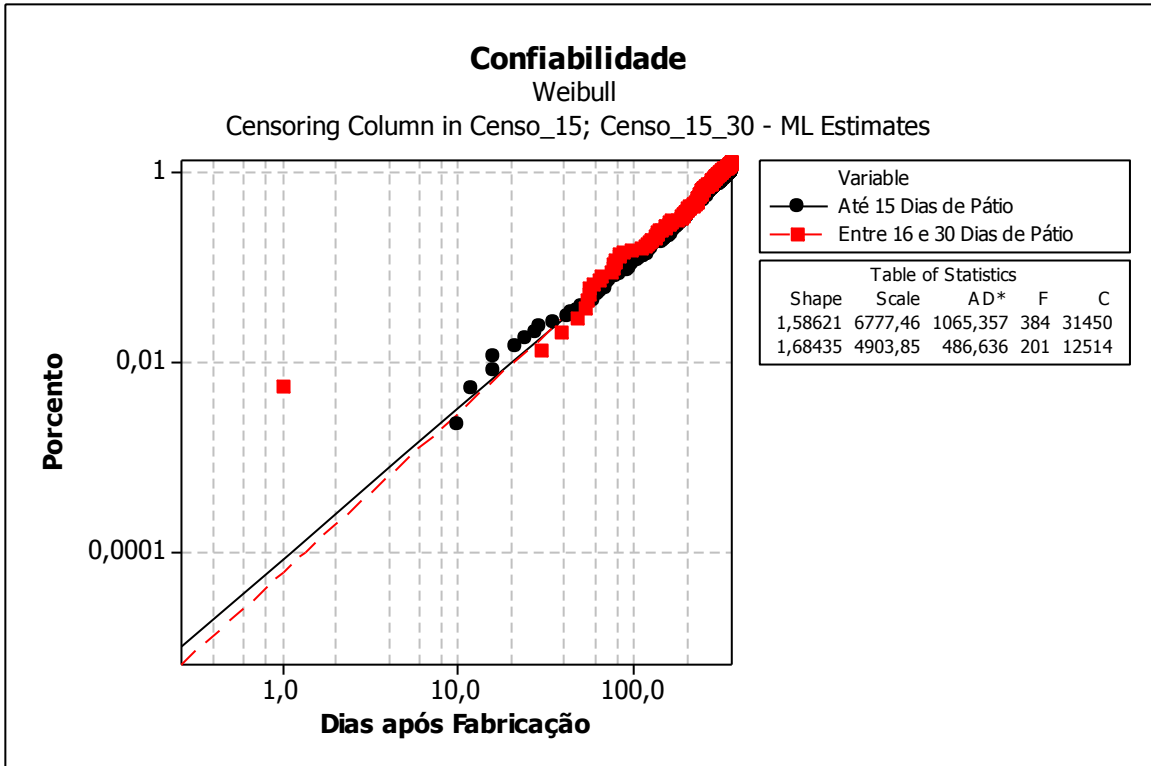


Figura 44 - Gráfico de confiabilidade, comparativo de baterias Tipo I

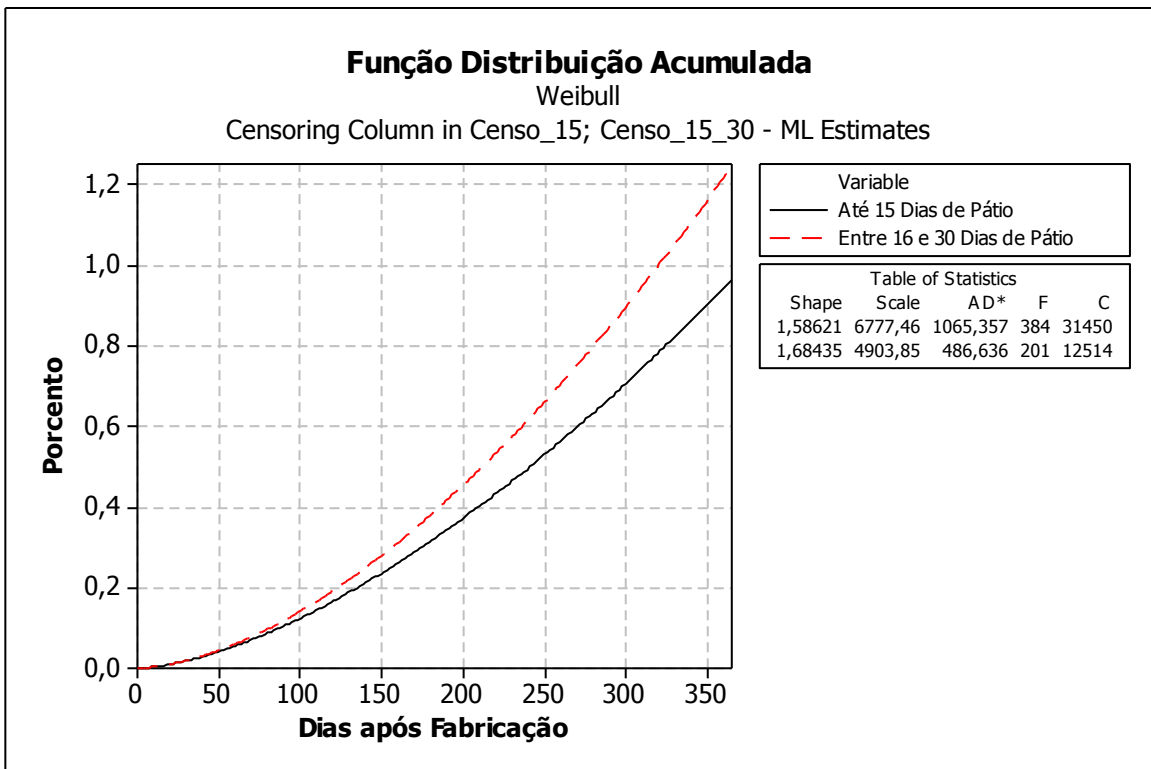


Figura 45 - Função distribuição acumulada, comparativo de baterias Tipo I

Pelos gráficos de probabilidade pode-se concluir que no período compreendido pelo primeiro ano do veículo após a produção, a confiabilidade, das peças que ficaram menos tempo no pátio, é maior em relação às peças que ficaram mais tempo no pátio.

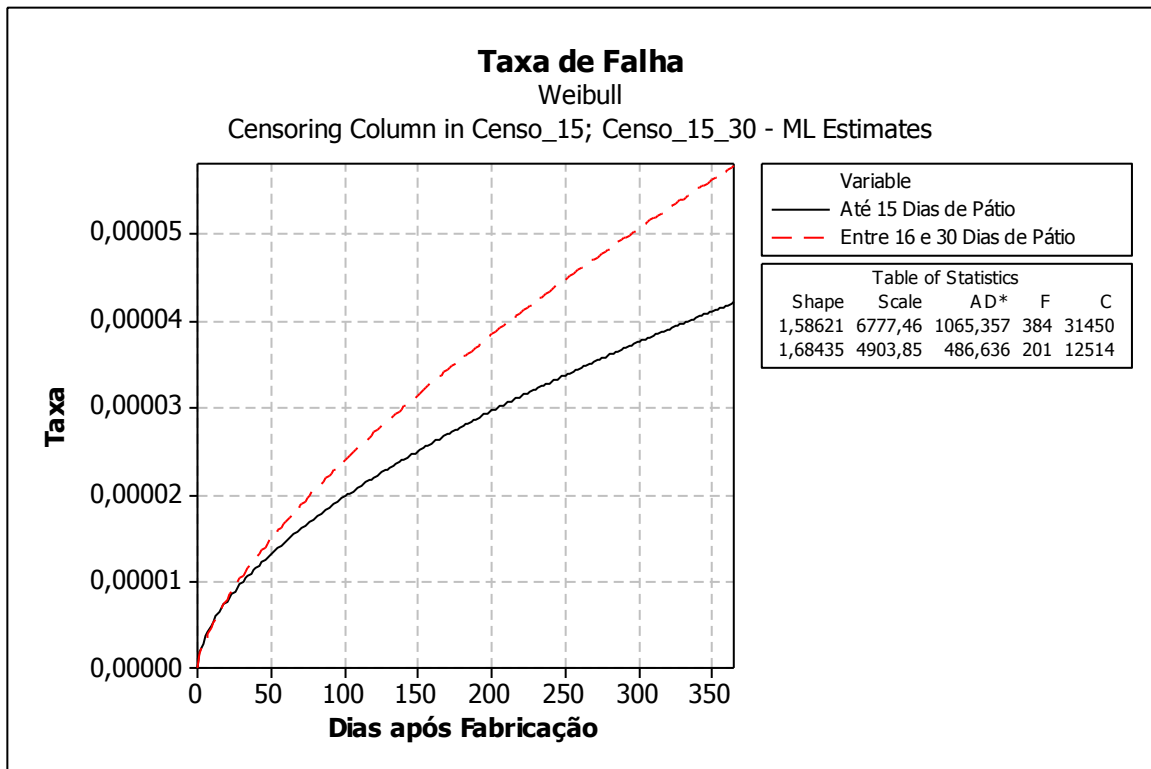


Figura 46 - Função da Taxa de Falha, comparativo de baterias Tipo I

Pelo diagrama da taxa de falha tem-se que quando maior é o tempo de pátio maior é a taxa de falha nesse período.

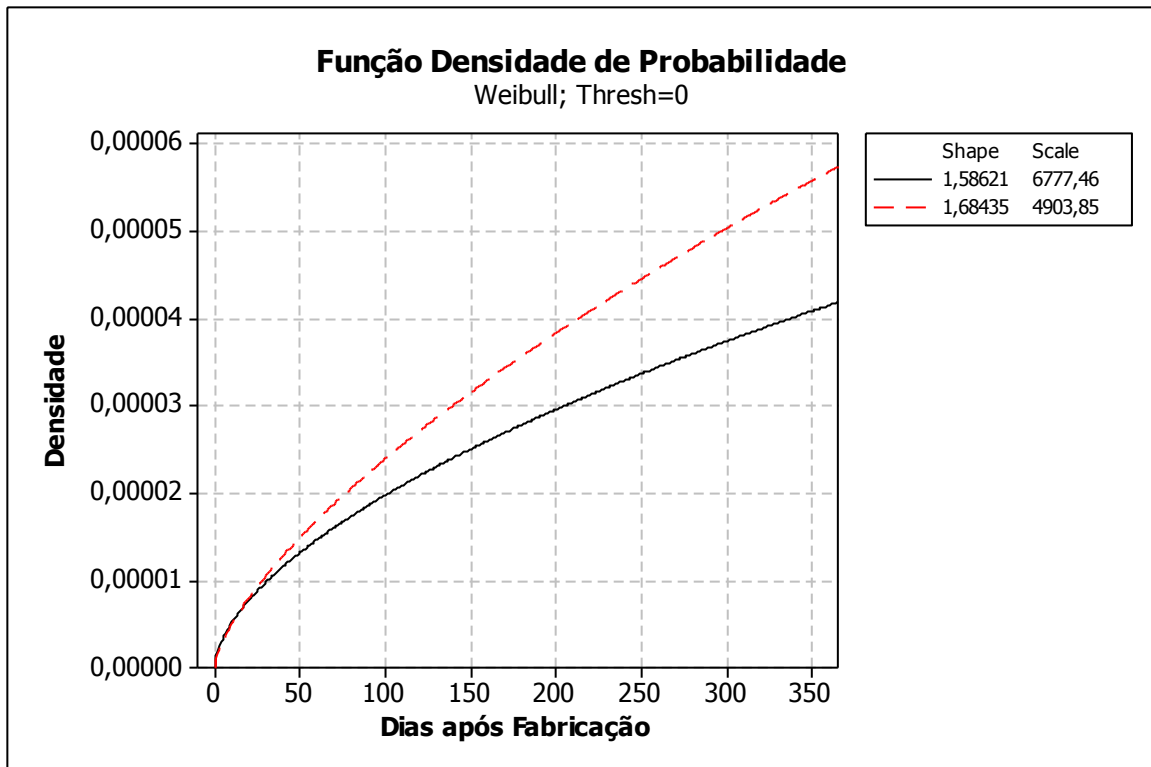


Figura 47 - Função Densidade de Probabilidade, comparativo de baterias Tipo I

O gráfico da função densidade de probabilidade (f.d.p.) também mostra maior densidade de probabilidade de falha para baterias com maior tempo de pátio.

#### 4.6.2 Análise em relação ao tempo de pátio das baterias do Tipo II

Para o estudo das baterias do Tipo II foram comparados os gráficos de veículos que ficaram até 10 dias no pátio, contra veículos que ficaram entre 11 e 20 dias no pátio.

Esses valores foram escolhidos devido aos veículos que utilizam a bateria do Tipo II conter um maior número de equipamentos de série instalados, em relação com os veículos que utilizam a bateria do Tipo I. As figuras 48 a 51 mostram os gráficos da confiabilidade, função distribuição acumulada, função da taxa de falhas e função densidade de probabilidade, respectivamente. No gráfico 48, os dias após a fabricação estão em escala logarítmica.

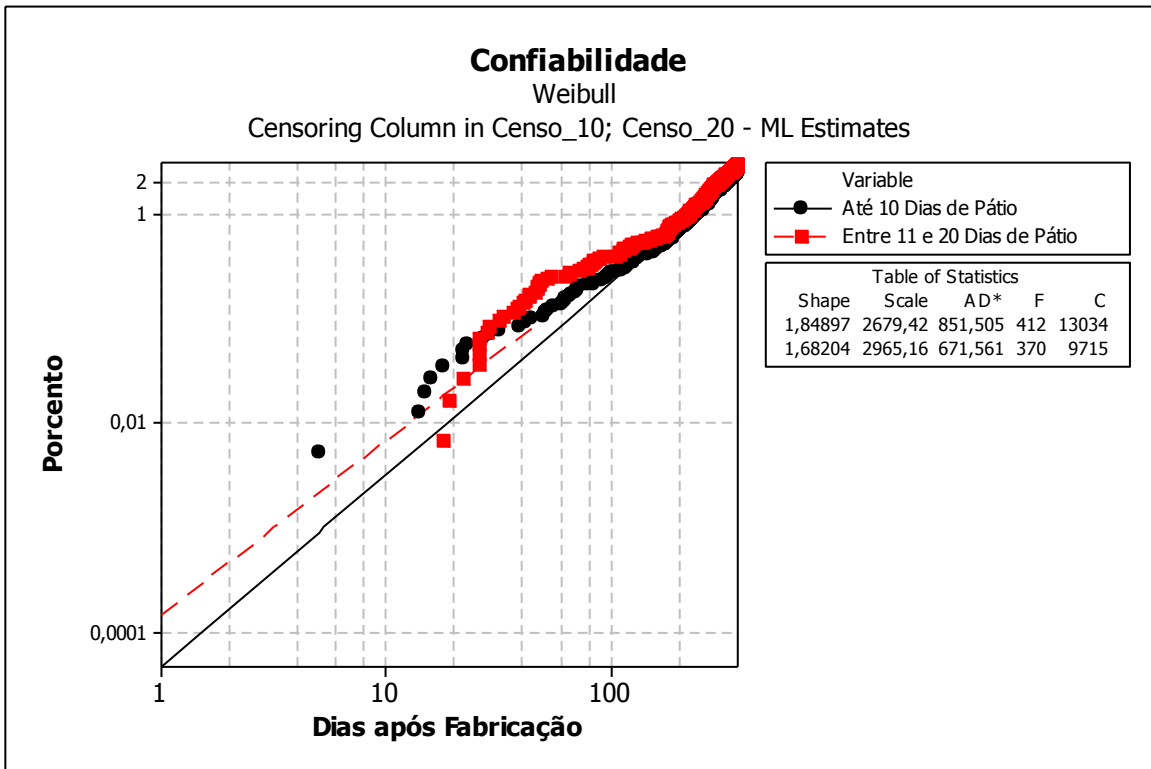


Figura 48 - Gráfico de confiabilidade, comparativo de baterias Tipo II

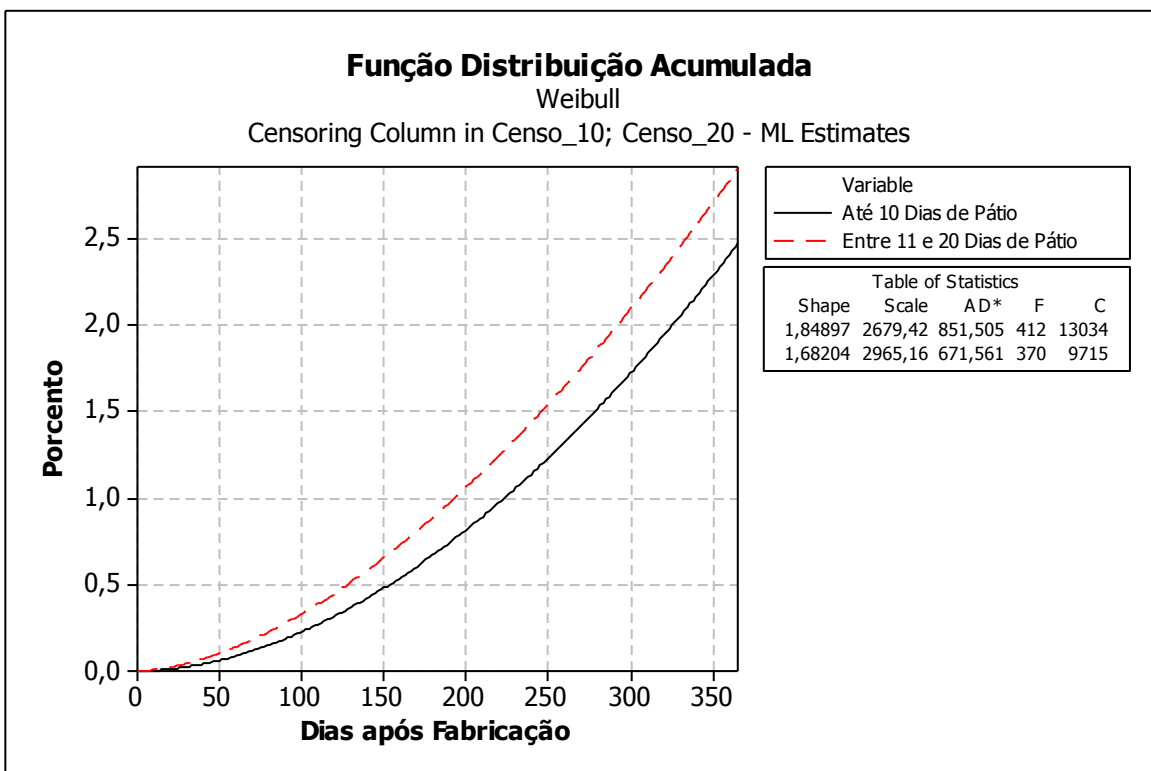


Figura 49 - Função distribuição acumulada, comparativo de baterias Tipo II



Assim como encontrado para as baterias do Tipo I, a comparação das duas curvas de probabilidade mostra que quanto maior o tempo de pátio, menor a confiabilidade da bateria.

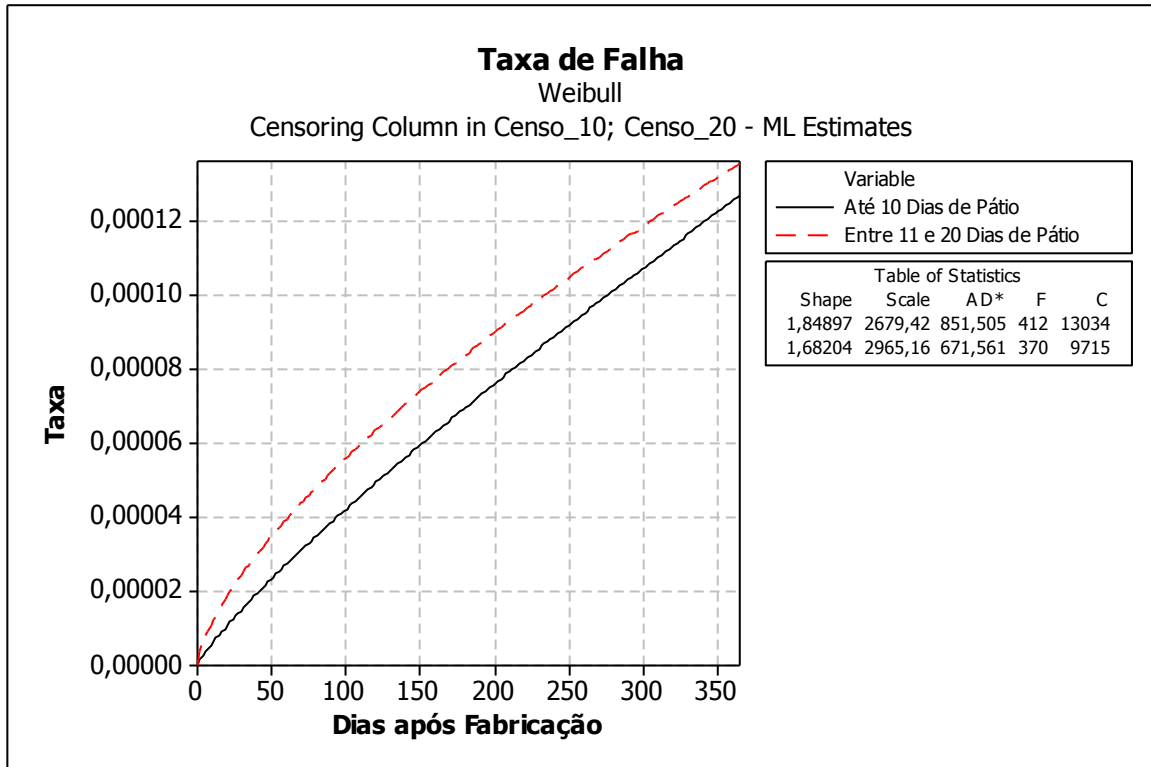


Figura 50 - Função da Taxa de Falha, baterias Tipo II

Pelo diagrama da taxa de falha comprova-se também que quando maior é o tempo de pátio, maior é a taxa de falha nesse período.

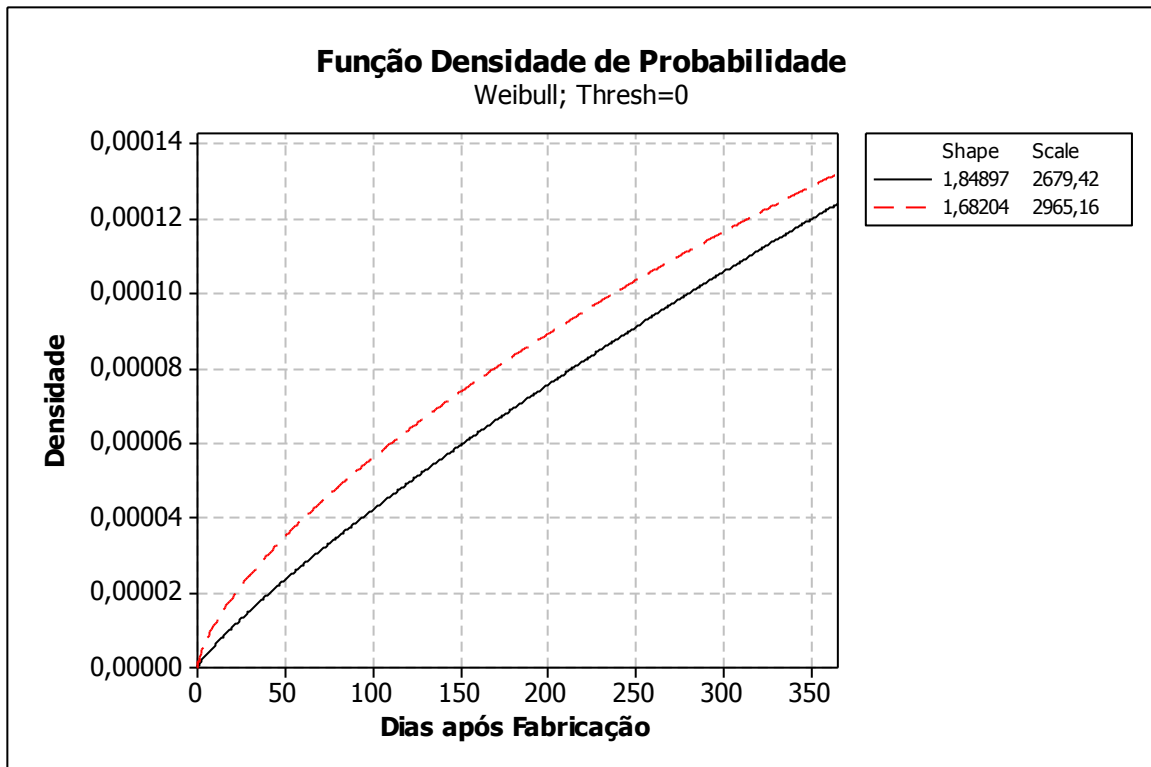


Figura 51 - Função Densidade de Probabilidade, baterias Tipo II

Esse resultado também é acompanhado pelo gráfico da função densidade de probabilidade (f.d.p.) que mostra também a maior densidade de probabilidade de falhas para as baterias com maior tempo de pátio.

Após essas análises é gerada a tabela 6 com todas as constantes de forma ( $\beta$ ) e constantes de escala ( $\eta$ ) resultadas das análises de confiabilidade.

Tabela 6 – Resumo dos valores de  $\beta$  e  $\eta$  para as análises realizadas.

Bateria	Tempo de pátio	$\beta$	$\eta$
Tipo I	Todos	1,85777	4055,91
	0 a 15	1,58621	6777,46
	16 a 30	1,68435	4903,85
Tipo II	Todos	1,77475	2793,19
	0 a 10	1,84897	2679,42
	11 a 20	1,68204	2965,16

Analisando a tabela 6 pode-se concluir que em todas as análises realizadas, independente do tipo de bateria ou do tempo de pátio, que a constante de forma ( $\beta$ ) esteve entre 1,58621 e 1,85777. Esses valores de  $\beta$  mostram que o comportamento da bateria instalada no veículo tem um comportamento de falha por desgaste para todos os tipos de baterias analisadas.

Seguindo esse padrão de constante de forma é possível afirmar que a bateria automotiva instalada em veículos é sujeita a desgaste e tem um padrão para sua distribuição de confiabilidade que se caracteriza por uma distribuição de Weibull a dois parâmetros, com o  $\beta$  entre 1 e 2, indicando tendência de falha por desgaste.

#### **4.7 Relação entre as análises de confiabilidade e a física da bateria**

Nesse tópico, baseado no detalhamento da bateria passado no capítulo 2, são mostrados alguns dos fatores que justificam esse comportamento de desgaste da bateria de ácido-chumbo automotiva. No Anexo I está o FMEA de uma bateria e alguns destes modos de falha são encontrados em Catherino; Feres e Trinidad (2004) e serão analisados na seqüência deste texto.

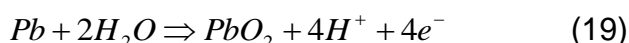
### **Perda de eletrólito:**

Como apresentado no capítulo 3 existem algumas reações eletroquímicas que são indesejáveis no contexto operacional da bateria, porém ocorrem. Uma destas reações é a que gera a perda de água do eletrólito. Essa reação ocorre devido ao chumbo e o dióxido de chumbo não serem estáveis em ácido sulfúrico, reagindo e gerando os gases  $H_2$  e  $O_2$ .

Com essa reação existe a perda da água do eletrólito. Apesar das baterias VRLA serem teoricamente livre de manutenção (adição de água no eletrólito), existe uma perda desses gases em situações específicas que resultam em perda permanente de eletrólito, prejudicando o funcionamento da bateria.

### **Corrosão da grade positiva:**

Kiehne (2003) ressalta que esta corrosão acontece em duas etapas. A primeira gera dióxido de chumbo entre a massa ativa e a grade, conforme fórmula (19):



Na segunda etapa da reação de corrosão, o dióxido de chumbo se recombina com o chumbo da grade gerando óxido de chumbo, conforme fórmula (20):



Com o passar do tempo, o chumbo da grade é corroído a uma taxa baixa, porém constante. Essa corrosão diminui a espessura e gera micro-fissuras na grade positiva aumentando a área de corrosão e isolando eletricamente a grade.

### **Curto-circuito interno:**

Apesar da presença dos separadores, que tem como uma das funções primárias eliminar a possibilidade de curto-circuito entre as placas, no ciclo de vida normal de uma bateria, o volume físico do material ativo varia de acordo com a utilização e condições climáticas. Essa variação no volume das massas ativas vai desgastando e degradando o material dos isoladores, podendo fissurar o material e gerar um curto circuito entre as placas positiva e negativa, inutilizando a célula.

**Sulfatação:**

Esse é o modo de falha mais conhecido e discutido. Conforme mostrado no capítulo 3, esse modo de falha, essencialmente pode ser definido pela formação de cristais de sulfato de chumbo quando a bateria fica descarregada por longos períodos. Quando o sulfato de chumbo se agrupa nestes cristais, impossibilita ou dificulta muito a sua transformação para chumbo ou dióxido de chumbo, portanto essa massa perde sua atividade nas reações eletroquímicas da bateria. Além disso, com o passar do tempo, esses cristais vão se tornando cada vez maiores chegando até a se descolar da massa ativa devido às vibrações do veículo.

**Falha de conexão entre as células:**

Essa falha é causada por problemas na solda das conexões entre as células, fazendo com que ao longo da vida útil da bateria, após variações térmicas de carga e descarga, possa acontecer um desgaste da conexão entre as células causando a falha da bateria.

Pode-se com a análise realizada concluir que os modos de falha: Falha de conexão entre as células, perda de eletrólito, curto-circuito interno e corrosão da grade positiva, são diretamente relacionados com a utilização da bateria ao longo do tempo, seja por influência da dilatação ou contração das partes internas durante os processos de carga e descarga, seja pela corrosão natural dos elementos internos. Esses modos de falha justificam a distribuição de Weibull de dois parâmetros da bateria instalada no veículo ter um  $\beta$  na faixa entre 1 e 2, correspondendo a constata de forma de falha por desgaste. Além disso, o modo de falha de sulfatação mostra que no caso das baterias que ficam instaladas em veículos armazenados por longos períodos, em pátio sem recarga da mesma, inicia-se a formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas internas, reduzindo a confiabilidade destas baterias.

## 5. Conclusão

Partindo dos conceitos de confiabilidade ilustrados no capítulo 2 optou-se por realizar esse trabalho baseado em dados de garantia de veículos, por serem os dados que se tem uma grande fidelidade das falhas de campo, nesse período de garantia.

Com esses dados coletados foi necessário segregá-los por veículos semelhantes, para isso a análise foi dividida em dois tipos de amostras.

Em posse dessas informações, foi possível utilizar as ferramentas de confiabilidade para analisar o comportamento dessas amostras em campo e, como mostrado no capítulo 4, as amostras tiveram um comportamento semelhante independente do tipo da amostra, mostrando que as baterias automotivas têm um comportamento predominante de falha por desgaste. Ainda conforme mostrado no capítulo 2 e 4, alguns fatores como a sulfatação, corrosão da placa positiva e perda de eletrólito explicam esse comportamento encontrado, pois todos esses fatores ocorrem constantemente na bateria, porém a uma taxa baixa.

Alguns fatores relacionados à utilização da bateria podem acelerar esses processos de desgaste, entre eles pode-se citar:

- Excesso de ciclos de carga e descarga da bateria: nessa condição as reações eletroquímicas da bateria ocorrem em uma frequência muito maior, fazendo com os efeitos colaterais das reações também ocorram de uma maneira mais freqüente. Além disso, a cada ciclo o material interno da bateria tem uma variação de volume causada pela variação da temperatura e isso pode após vários ciclos fragilizar algumas partes como os separadores ou conexões entre as placas.
- Condições ambientais: Nesse caso se a bateria for utilizada em lugares que a temperatura ambiente é muito elevada, pode-se ter um aumento na taxa das reações eletro-químicas internas da bateria. Pode-se dizer que algumas reações como a que gera como a auto-descarga e a

cristalização, aumentam quanto maior a temperatura, assim como a geração de gases e conseqüente perda de eletrólito.

- Sobrecarga: A sobrecarga, normalmente gerada por uma falha no alternador do veículo ou por equipamentos inadequados de carga, também pode levar a bateria à falha devido à gasificação, que ao longo do tempo vai diminuindo o volume do eletrólito levando a bateria a falhar. Outro ponto interessante da sobrecarga é que, como mostrado anteriormente, pode acontecer de todo o sistema de carga estar funcionando perfeitamente e se uma das células da bateria estiver com problemas, pode ser que as outras células sejam sobrecarregadas até que essa célula com problema seja carregada inteiramente.
- Corrente parasita incompatível: Conforme mostrado anteriormente cada bateria é dimensionada para certo número de equipamentos e sua corrente parasita. Portanto caso essa corrente seja aumentada, normalmente conseqüência da instalação de acessórios não recomendados pelos fabricantes, a corrente que é drenada da bateria em descanso irá aumentar, fazendo com que cada vez os ciclos de descarga sejam mais profundos. Esses ciclos podem levar a bateria a falhar, além de diminuir o tempo que o veículo pode ficar parado antes que a bateria se descarregue completamente.
- Ciclos profundos de carga e descarga: Esse item está de certa maneira também relacionado ao item da corrente parasita, mas o principal fato desse item é que em algumas situações os ciclos profundos de carga e descarga são muito constantes, como por exemplo, em veículos que ficam com os faróis ou pisca - alerta aceso quando o motor está desligado. Nesse caso os ciclos de descarga são profundos devido à elevada potência desses equipamentos. Fazendo com que as reações ocorram de maneira mais abrupta e conseqüentemente fazendo com que as temperaturas internas da bateria variem de maneira semelhante.

A segunda parte do estudo é uma comparação da confiabilidade de baterias em relação ao tempo que esses veículos ficaram em pátio. Para vários dos componentes instalados nos veículos esse tipo de análise não é apropriado devido a serem componentes totalmente passivos do veículo que não sofrem nenhum tipo de desgaste quando o veículo está parado. Porém no caso das baterias apesar do veículo não estar se movimentando, foi mostrado nos tópicos anteriores que as reações eletroquímicas da bateria continuam a ocorrer.

Nessa análise os dois tipos analisados de baterias foram divididos em subgrupos de acordo com o tempo de pátio dos veículos. Os resultados mostraram nos dois tipos de baterias que quanto maior o tempo de pátio dos veículos, menor é a confiabilidade da bateria. Essa diferença na confiabilidade da peça em razão do tempo de pátio pode ser explicada pela cristalização do sulfato de chumbo encontrado na bateria. Conforme mostrado anteriormente esse processo, que também é chamado de sulfatação, ocorre quando a bateria fica por um período de tempo prolongado com baixa carga. Neste caso estudado supõe-se que devido ao maior tempo que o veículo fica parado existe uma maior formação de cristais, que como explicado anteriormente, dificilmente voltam a realizar reações com os outros reagentes da bateria e que ao longo do tempo vão aumentando de tamanho e diminuindo o tempo de vida da bateria.

Como aplicação desse trabalho deve-se ressaltar dois pontos. O primeiro no que diz respeito a um padrão que deve ser utilizado nas análises que envolvam o comportamento de baterias em campo, seja para estratégias de manutenção, garantia, ou outras relacionadas. O segundo ponto se refere à influência do tempo de pátio na confiabilidade desses componentes, mostrando que ações, como a redução do tempo de pátio, ou ações que possam minimizar os seus efeitos trarão uma melhora na confiabilidade dessas baterias instaladas.



### **5.1 Recomendação para trabalhos futuros**

Partindo desse trabalho, existem alguns estudos que ficam de proposta para trabalhos futuros.

A primeira proposta consiste em realizar um estudo de confiabilidade separando as baterias por modo de falha, para isso seria necessário realizar a dissecação de todas as amostras que seriam utilizadas no trabalho proposto para que fosse possível identificar a causa de cada uma das falhas e agrupá-las.

A segunda proposta é utilizar um universo controlado de baterias instaladas em veículos, onde fosse possível analisar a característica de cada usuário e dessa maneira conseguir separar as amostras por padrão de usuário e analisá-las. Pode-se até, partindo desses dados, criar procedimentos que simulem as utilizações mais críticas.

A terceira proposta é a realização de um estudo onde seja possível avaliar a influência do tempo de prateleira das baterias, sejam baterias instaladas na linha de produção ou baterias de reposição, pois estes estudos podem ser comparados com os resultados encontrados nos estudos do tempo de pátio.

## 6. Referências Bibliográficas

ABERNETHY, R. B.; **The new Weibull Handbook**. R.B. Abernethy, North Palm Beach, 2006.

ABNT.; **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

ANJOS, Joel Soares dos. **Comparativo de confiabilidade de uma plataforma sub-compacta no mercado latino americano e africano**. 2007. 259 p. (Mestrado) - ESCOLA POLITÉCNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BATTERY COUNCIL INTERNATIONAL; Storage battery technical service manual. , 11th Ed., BCI, Chicago, 1995.

BEECHAM, M.; **Global Market Review of Automotive Batteries – Forecasts to 2016**, Just Auto, Bromsgrove, 2009

BERTSCHE, B.; **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**, Springer, Stuttgart, 2008

BUCHMANN, I.; **Batteries in a Portable World**, 2nd Ed., Cadex Eletronics Inc., Richmond, 2001

CATHERINO, H. A.; FERES, F. F.; TRINIDAD, F.; **Sulfation in lead–acid batteries Journal** ,of Power Sources 129 , 2004, p. 113–120

CROMPTON, T. R.; **Battery Reference Book**, 3rd Ed., Reed Elvisier, Woburn, 2000

DHILLON, B.S.; **Applied Reliability and Quality - Fundamentals, Methods and Procedures** , Springer – Verlag, 2007

FOGLIATTO, F. S. ; RIBEIRO, J. L. D.; **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1. ed. São Paulo: Campus-Elsevier, 2009. 288 p.

HELIAR, **Bateria 3d**. Disponível em [http://www.heliar.com.br/bateria3d.php?acao=mostra\\_bateria3d&id\\_bateria3d=1](http://www.heliar.com.br/bateria3d.php?acao=mostra_bateria3d&id_bateria3d=1) >, Acesso realizado em 04 de abril de 2010

J.D. POWER AND ASSOCIATES. **Press Releases**, Disponível em: < <http://businesscenter.jdpower.com/news/pressrelease.aspx?ID=2009203>>. Acesso realizado em 15 de abril de 2010

JURAN, J. M. ; GODFREY, A.B. ; **Juran's Quality Handbook**. 5th Ed, McGraw-Hill, 1999

KIEHNE, H.; **Battery Technology Handbook**. 2nd ed., Marcel Dekker, Inc. , New York, 2003.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. ; **Electric Vehicle Technology Explained**. , John Wiley & Sons, Chichester, 2003

LEWIS, E.E.; **Introduction to reliability engineering**. 1st ed., Ed. J. Wiley, New York, 1987.

LINDEN, D.; REDDY, T.B.; **Handbook of Batteries**. , 3rd Ed. ,McGraw-Hill, New York, 2002.

MARTHA DE SOUZA, G. F. **Confiabilidade de produtos e sistemas**, In: Notas de aula, 2002.

MURAD, Carlos Alberto. **Extensão da garantia de veículos: aplicação para motor e transmissão**. 147 p. (Mestrado) - ESC POLITECNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

PLANTÉ, G. ; **The Storage of electrical energy.** , tradução de Paul Bedford, Universal Library, 1879.

REASBECK, P. ; SMITH, J.G.; **Batteries for automotive use.** , Research Studies Press LTD., Taunton, 1997.

ROBERT BOSCH LTDA.; **Alternadores, Motores de Partida e Principais Componentes.** , Campinas , 2007a

ROBERT BOSCH LTDA.; **Manual de Baterias Bosch.** , Campinas , 2007b

SALVENDY, G.; **Handbook of Industrial Engineering - Technology and Operations Management.** 3rd Ed., John Wiley & Sons, 2001

SMITH, D. J. ; **Reliability, Maintainability and Risk - Practical Methods for Engineers.** 5th Ed., Elsevier,Oxford, 1997

## Anexo I

Item / Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	Classe	Causa potencial da falha	OC	Controles Atuais Prevenção	Controles Atuais Detecção	DET	RPN	Ação Recomendada
Eletrólito / Viabilizar reação química de carga e descarga da bateria	Perda de eletrólito	Diminuição da capacidade e de armazenar energia.	4		Abastecimento insuficiente de eletrólito.	4	Adicionar quantidade correta de eletrólito	Medir volume de eletrólito abastecido	2	32	Nenhuma
Grade Positiva / Viabilizar reação química de carga e descarga da bateria	Corrosão da grade	Isolamento elétrico da grade positiva, gerando queda de tensão.	6		Corrosão natural da grade positiva.	8	Adicionar Cálcio e Prata na liga de chumbo da grade.	Testes de ciclagem da bateria.	2	96	Nenhuma
Células / Gerar tensão de trabalho da bateria	Curto-Circuito	Diminuição da tensão de saída da bateria e redução da capacidade e de carga.	7		Dimensional dos componentes internos gerando interferência.	2	Controlar dimensional dos componentes internos da célula.	Medição dos componentes internos.	4	56	Nenhuma
Células / Gerar tensão de trabalho da bateria	Curto-Circuito	Diminuição da tensão de saída da bateria e redução da capacidade e de carga.	7		Dilatação dos componentes internos da célula.	4	Utilizar materiais menos suscetíveis a variação térmica.	Teste de ciclagem com variação da temperatura.	3	84	Nenhuma
Placas / Viabilizar reação química de carga e descarga da bateria e conduzir energia elétrica.	Sulfatação	Diminuição da capacidade e de armazenar energia.	5		Formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas	5	Estocar bateria carregada.	Medir carga da bateria no estoque.	2	50	Nenhuma
Conexões entre as células / Condução de corrente elétrica entre as células.	Circuito aberto entre as células.	Bateria com baixa tensão de saída e sem capacidade e de carga.	8		Quebra da solda das conexões, devido a dilatação da solda nos processos de carga e descarga.	2	Utilizar materiais menos suscetíveis a variação térmica.	Teste de ciclagem com variação da temperatura.	3	48	Nenhuma

Item / Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	Classe	Causa potencial da falha	OC	Controles Atuais Prevenção	Controles Atuais Detecção	DET	RPN	Ação Recomendada
Separadores / Isolar eletricamente as placas.	Curto-Circuito	Diminuição da tensão de saída da bateria e redução da capacidade e de carga.	7		Rompimento do separador gerando curto-circuito entre as placas.	4	Utilizar separador adequado.	Teste de ciclagem com variação da temperatura.	3	84	Nenhuma
Caixa / Alojamento das células com o eletrólito.	Quebra da caixa.	Diminuição da tensão de saída.	7		Rompimento do material da caixa, possibilitando o vazamento do eletrólito.	1	Utilizar material resistente na caixa.	Teste de impacto na caixa.	2	14	Nenhuma
Bornes / Conduzir energia elétrica.	Alta resistência.	Diminuição da tensão de saída.	5		Aquecimento do borne devido a resistência do material.	2	Utilizar material de baixa resistência elétrica.	Teste de ciclagem com variação da temperatura.	3	30	Nenhuma
Tampa / Selar a bateria.	Vazamento na fixação do borne.	Diminuição da tensão de saída.	5		Perda de eletrólito.	3	Dimensionamento correto do alojamento do borne.	Verificar estanqueidade do sistema.	3	45	Nenhuma
Massa ativa / Viabilizar reação química de carga e descarga da bateria	Perda de massa ativa.	Diminuição da capacidade e de armazenar energia.	5		Massa ativa se desprendendo da grade.	2	Controlar impurezas da massa ativa.	Análise da composição da massa utilizada.	6	60	Nenhuma