

**Gilberto Jorge Haviaras**

Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frotas de caminhões de longa distância

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

**São Paulo  
2005**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Gilberto Jorge Haviaras**

Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frotas de caminhões de longa distância

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Automotiva (Mestrado Profissionalizante).**

**Área de Concentração: Engenharia Automotiva**

**Orientador: Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza**

**São Paulo  
2005**

Aos meus pais, Icaro e Maria.

## RESUMO

A análise de pneus em frotas de caminhões de longa distância atualmente é realizada apenas para efeito de controle de estoque e determinação de causas de falhas.

A metodologia de análise de confiabilidade apresentada neste trabalho, utilizando dados obtidos de pneus sucitados, sistematiza a mensuração e análise de perda de vida útil causada por cada tipo de falha: as amostras são analisadas, verificando-se qual distribuição de probabilidade que melhor modela as amostras avaliadas quando comparadas às distribuições Weibull, normal, log-normal e exponencial; o modelo sugere uma forma de efetuar análises de confiabilidade das falhas mais frequentes, sendo estas classificadas segundo as perdas de tempo de vida do produto.

A metodologia ora proposta foi aplicada na análise de confiabilidade de pneus 295/80R22.5 empregados em frota de transporte rodoviário. Para tanto foram analisadas sucatas provenientes de 10 frotas, verificando-se que a confiabilidade do pneu é melhor representada por uma distribuição de Weibull.

A aplicação desta metodologia possibilita a identificação das principais causas das falhas mais críticas, permitindo à empresa focar os esforços em medidas preventivas adequadas e definir o tempo de remoção antes da falha para obter o menor custo.

## ABSTRACT

Long distance truck tire analysis is done nowadays only for the purposes of warehouse control and failure cause determination.

The analysis methodology presented in this study, using tire data obtained in scrap tires, systematizes the measurement and analysis of useful tire life time losses caused by each failure type: the samples are analyzed, verifying which probability distribution best fits the evaluated samples when comparing Weibull, normal, log-normal and exponential distributions; the model suggests a way to carry out the reliability analysis of the most common failures classifying them according to product life losses.

The proposed methodology was used to analyze the reliability of 295/80R22.5 tires applied in highway transport fleets. For that purpose scrap tires samples from 10 fleets were analyzed and one can verify tire reliability is better represented by a Weibull distribution.

The application of this methodology makes it possible to identify the main causes of the most critical failures, allowing the fleet to focus efforts on appropriate preventive measures and define replacement time before failure to obtain the lowest cost..

## SUMÁRIO

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	ix
GLOSSÁRIO .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Relevância e justificativa .....	1
1.2. Objetivo do trabalho.....	5
1.3. Desenvolvimento do trabalho .....	6
2. DESCRIÇÃO DO PNEU.....	8
2.1. Estrutura do pneu .....	8
2.2. Tamanhos de pneus e suas principais aplicações.....	10
2.3. Processo de fabricação do pneu .....	12
2.4. Pressão e carga .....	15
2.5. Velocidade e calor.....	18
2.6. Modos de falha do pneu .....	19
2.7. Ensaio do pneu .....	21
3. REVISÃO DE CONFIABILIDADE .....	23
3.1. Conceito de confiabilidade.....	23
3.2. Funções de confiabilidade e taxa de falha.....	24
3.3. Curva da banheira .....	26
3.4. Análises paramétrica e não paramétrica.....	30
3.5. Métodos para estimativa de parâmetros.....	35
3.6. Principais distribuições de probabilidade .....	38
3.6.1. Distribuição normal.....	39
3.6.2. Distribuição exponencial.....	40
3.6.3. Distribuição de Weibull .....	41
3.6.4. Distribuição log-normal .....	42

3.7. Testes de aderência .....	43
3.8. Censura.....	45
4. MÉTODO DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE .....	47
4.1. Metodologia proposta para análise de confiabilidade de pneus em frotas.....	47
4.2. Coleta e classificação dos dados .....	49
4.3. Desenvolvimento da equação para cálculo do percentual de perda.....	50
4.4. Apresentação e exemplo de cálculo de método de análise de sucata trivial .....	51
4.5. Exemplo de cálculo do método de análise pelo percentual de perda.....	53
4.6. Verificação do modelo probabilístico mais adequado aos tempos de falha.....	55
4.7. Método de cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull bi-paramétrica - método CV.....	57
4.7.1. Cálculo do parâmetro de forma da distribuição de Weibull – método CV .....	57
4.7.2. Cálculo do parâmetro de escala da distribuição de Weibull – método CV.....	59
4.8. Distribuição de dados nas frotas e respectivas distribuições de Weibull.....	60
4.9. Principais falhas observadas no exame de sucata .....	61
4.9.1. Falha do reparo.....	61
4.9.2. Quebra por impacto.....	63
4.9.3. Penetrações e avarias em pista .....	64
4.9.4. Levantamento ou separação da cinta.....	64
4.9.5. Separação do recape .....	65
4.9.6. Talões queimados.....	66
4.9.7. Cortes e esmagamentos no flanco .....	66
4.9.8. Separação do reforço/chafer.....	67
4.9.9. Lateral separada causada por avaria.....	68
4.10. Análise dos percentuais de perdas para as principais falhas .....	68
4.11. Correlação entre parâmetro de forma da distribuição de Weibull e o total do percentual de perdas positivas.....	72
4.12. Correlação entre parâmetro de forma das curvas de Weibull e percentuais de perda das principais falhas .....	73
4.13. Substituição de pneus em função do tempo de uso.....	75
4.14. Comparação dos tempos de substituição para custo mínimo das frotas .....	77



5. CONCLUSÕES .....	80
5.1. Conclusões gerais.....	80
5.2. Recomendações para trabalhos futuros.....	82
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
Anexo A – Tabela com falhas mais freqüentes e suas possíveis causas <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	86
Anexo B – Diagrama apresentando as fases da metodologia com suas principais ações, recursos necessários e resultados .....	87
Anexo C – Falhas e tempos de vida da amostra de pneus sucitados da Frota 01.....	88
Anexo D – Análises paramétricas e não paramétricas das amostras de pneus sucitados das frotas.....	89
Anexo E – Curvas de custo por frota .....	109

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Divisão do transporte de carga no Brasil (ANTT, 2005) .....	1
Figura 1.2 - Pesquisa sobre as condições das estradas brasileiras (Hemétrio, 2004) .....	3
Figura 1.3 - Causas de acidentes nas estradas (Carey, 1999) e (DENATRAN, 2002) .....	4
Figura 1.4 - Causas de falhas por tipo de pneus (Carey, 1999) .....	4
Figura 2.1 - Estrutura Diagonal e Radial do Pneu (Ford; Charles, 1988) .....	8
Figura 2.2 - Seção de Pneu Radial de Carga (Ford; Charles, 1988) .....	9
Figura 2.3 - Nomenclatura e Dimensões do Pneu (ALAPA, 2004) .....	11
Figura 2.4 - Processo de Fabricação de Pneu.....	12
Figura 2.5 - Mistura e extrusão da borracha (Browmick; Hall; Benarey,1994) .....	13
Figura 2.6 - Fabricação de talões (Browmick; Hall; Benarey,1994) .....	14
Figura 2.7 - Montagem do conjunto (Browmick; Hall; Benarey, 1994) .....	14
Figura 2.8 - Vulcanização (Browmick; Hall; Benarey,1994) .....	15
Figura 2.9 - Pegada do pneu (TMC, 2003) .....	17
Figura 2.10 - Temperatura de equilíbrio (Ford; Charles, 1988) .....	18
Figura 2.11 - Transformação de energia cinética em calor por partes do pneu (Ford; Charles, 1988) .....	19
Figura 3.1 - Função de probabilidade acumulada $F(t)$ (Martha de Souza, 2003) .....	24
Figura 3.2 - Função de confiabilidade $R(t) = 1 - F(t)$ (Martha de Souza, 2003) .....	25
Figura 3.3 - Curva da banheira (Martha de Souza, 2003) .....	27
Figura 3.4 - Formato das funções de densidade de probabilidade, confiabilidade e taxa de falhas para algumas distribuições utilizadas em confiabilidade (O'Connor, 1991) .....	38
Figura 4.1 - Diagrama apresentando as fases da metodologia de confiabilidade .....	48
Figura 4.2 - Pneus examinados na Frota 01 .....	52
Figura 4.3 - Principais causas de falhas na Frota 01 (exemplo de método proposto) .....	54
Figura 4.4 - Coeficientes de determinação críticos para distribuições de Weibull bi- paramétricas e log-normal (Tarum, 1999a) .....	56
Figura 4.5 - Correlação entre coeficiente de variação e parâmetro de forma da distribuição de Weibull .....	58
Figura 4.6 - Correlação entre parâmetro beta e função gama .....	59

Figura 4.7 - Falha do reparo <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	62
Figura 4.8 - Quebra por impacto <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	63
Figura 4.9 - Penetrações e avarias em pista <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	64
Figura 4.10 - Levantamento ou separação da cinta <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	65
Figura 4.11 - Separação do recape <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	65
Figura 4.12 - Talões queimados <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	66
Figura 4.13 - Cortes e esmagamentos no flanco <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	67
Figura 4.14 - Separação do reforço/chafer <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	67
Figura 4.15 - Lateral separada causada por avaria <sup>(TMC, 2004)</sup> .....	68
Figura 4.16 - Correlação entre parâmetros de forma das distribuições das amostras e a soma dos percentuais de perda positivos das principais falhas .....	73
Figura 4.17 - Correlação entre parâmetros de forma e percentuais de perda das principais falhas .....	74
Figura 4.18 - Variação do custo mensal em função do tempo de uso.....	76
Figura 4.19 - Curvas de custo variando $C_{np}/C_p$ para a Frota 01 .....	78
Figura 4.20 - Relação entre $C_{np}/C_p$ e tempo de substituição para menor custo .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - As 10 maiores causas das paradas de caminhões <sup>(Winsor, 2003)</sup> .....	2
Tabela 1.2 - Causas de acidentes nas estradas <sup>(Carey, 1999) e (DENATRAN, 2002)</sup> .....	3
Tabela 2.1 - Recomendação Pressão x Carga <sup>(ALAPA, 2004)</sup> .....	16
Tabela 2.2 - Índice de carga <sup>(ALAPA, 2004)</sup> .....	16
Tabela 3.1 - Causas de falhas nas etapas da curva da banheira <sup>(Lafraia, 2001)</sup> .....	29
Tabela 4.1 - Falhas e suas causas prováveis (exemplo do método de análise trivial)	52
Tabela 4.2 - Falhas e causas prováveis (exemplo de método proposto) .....	53
Tabela 4.3 - Falhas e causas prováveis (exemplo de método proposto) .....	54
Tabela 4.4 - Parâmetros das distribuições de log-normal e Weibull das amostras de sucatas das 10 frotas analisadas .....	55
Tabela 4.5 - Resumo dos parâmetros das distribuições de Weibull bi-paramétrica para as dez frotas resultantes de três métodos de cálculo .....	60
Tabela 4.6 - Principais tipos de falhas .....	61
Tabela 4.7 - Quantidade das principais falhas por frota.....	69
Tabela 4.8 - Média de tempo de uso por tipo de falha e frota.....	69
Tabela 4.9 - Percentual de perda por tipo de falha e frota .....	69
Tabela 4.10 - Percentual de perda por tipo de falha e frota, linhas e colunas ordenadas pelo soma de percentuais de perda positivos .....	70
Tabela 4.11 - Possíveis razões para as principais falhas .....	70
Tabela 4.12 - Valores dos parâmetros da distribuição de Weibull das amostras e soma dos percentuais de perda positivos das principais falhas.....	72
Tabela 4.13 - Parâmetros de forma para as principais falhas.....	74
Tabela 4.14 - Valores de tempo para substituição (mínimo da curva $C(t)$ ) .....	78
Tabela 4.15 - Relação entre valores de tempo para substituição (mínimo da curva $C(t)$ ) e médias das amostras .....	79

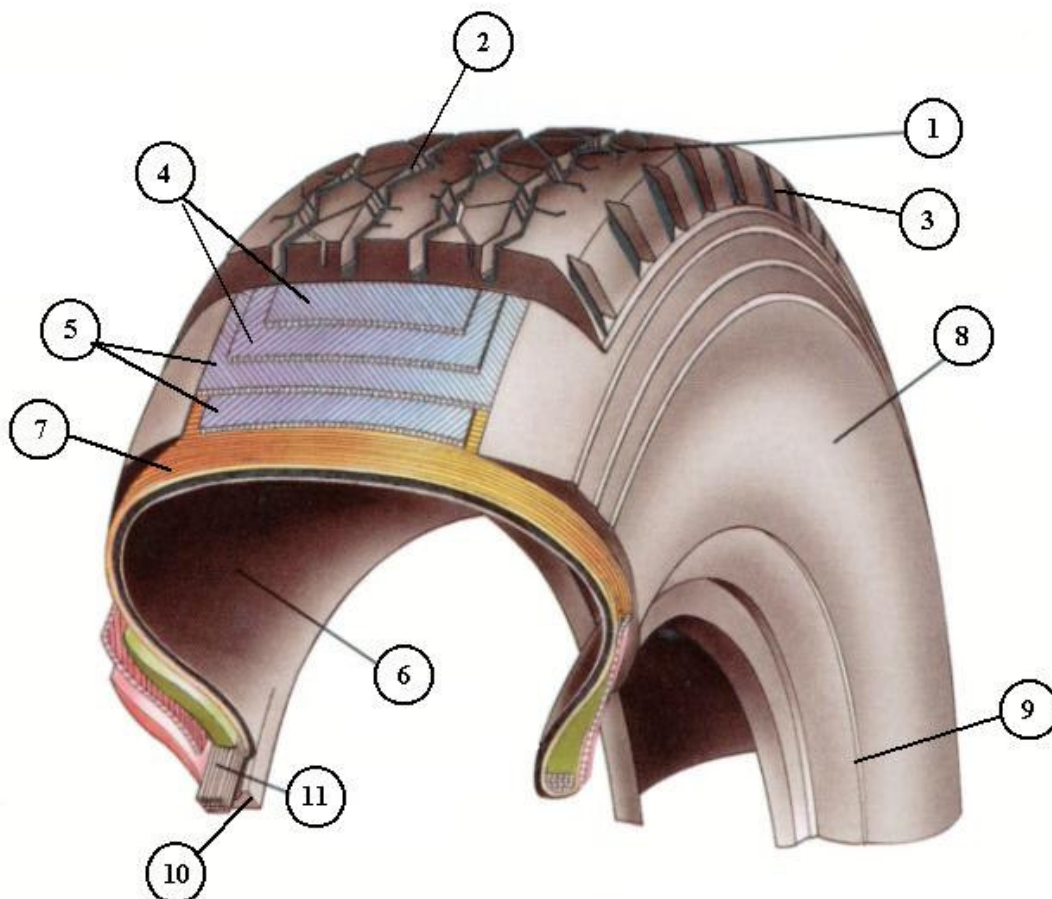
## LISTA DE SÍMBOLOS

$t$	- tempo decorrido
$P(.)$	- função probabilidade
$f(t)$	- função densidade de probabilidade de falha
$F(t)$	- função de probabilidade acumulada
$R(t)$	- função de confiabilidade
$h(t)$	- função taxa de falha
$N$	- número de elementos em análise
$M$	- número de intervalos de tempo onde são verificados os itens sobreviventes
$t_i$	- tempo em que observa-se a falha do $i$ -enésimo elemento da amostra
$n_i$	- número de itens sobreviventes no tempo $t_i$
$f_i$	- número de falhas no tempo $t_i$
$m$	- MTTF ( <i>mean time to failure</i> ) - tempo médio até a falha
$\Phi(.)$	- distribuição acumulada da distribuição normal reduzida
$\sigma$	- desvio padrão
$\sigma^2$	- variância
$\mu$	- média
$CV$	- coeficiente de variação
$\alpha$	- tempo médio de vida – parâmetro da distribuição exponencial
$\beta$	- parâmetro de forma da distribuição de Weibull
$\eta$	- parâmetro de escala da distribuição de Weibull
$\Gamma(.)$	- função gama
$\chi^2$	- função qui quadrado
$R$	- coeficiente de correlação
$R^2$	- coeficiente de determinação
$\% \text{ perda}$	- percentual de perda pela falha em análise
$Mt$	- média do tempo de vida da amostra total
$Mf$	- média do tempo de vida dos pneus retirados pela falha em análise
$Mnf$	- média do tempo de vida por falhas diferentes da analisada
$Nt$	- número total de falhas na amostra analisada
$Nf$	- número de falhas pela causa em análise

$N_{nf}$	- número de falhas dos pneus retirados por falhas diferentes da analisada
$\Sigma t$	- somatória do tempo de vida de todas as amostras
$\Sigma f$	- somatória do tempo de vida dos pneus que falharam pela falha em análise
$\Sigma n_f$	- somatória do tempo de vida de pneus com falha diferente da analisada
$C_p$	- custo de uma substituição planejada
$C_{np}$	- custo de uma substituição não planejada
$C(t)$	- custo unitário da substituição do produto
$T$	- tempo de substituição para custo mínimo

## GLOSSÁRIO

Segundo norma ABNT NBR224 que estabelece a terminologia para pneus <sup>(ABNT, 2000a)</sup> a nomenclatura básica para a estrutura dos pneus radiais é:



Banda de rodagem (1): parte do pneu que entra em contato com o solo.

Sulcos (2): cavidades que recortam a superfície da banda de rodagem longitudinal e/ou transversalmente, definindo o seu desenho.

Ombros (3): partes do pneu entre a banda de rodagem e os flancos.

Lona(s) ou cinta(s) de proteção (4): parte exterior da estrutura resistente do pneu, que tem a finalidade de proteger as lonas/cintas de trabalho.

Lonas ou cintas de trabalho (5): parte exterior da estrutura resistente do pneu radial que tem a finalidade de estabilizar o pneu.

Revestimento interno (6): toda a superfície interna do pneu, constituída de componentes de borracha que tem a função de proteção.

Lona carcaça (7): parte interior da estrutura resistente do pneu cujos cordonéis estendem-se de um talão a outro.

Flancos ou costados (8): partes do pneu compreendidas entre os limites da banda de rodagem e os talões.

Cordão ou filete de centragem (9): linha em relevo próxima da área dos talões que tem a finalidade de indicar visualmente a correta centralização do pneu no aro.

Talões (10): partes do pneu que entram em contato com o aro, garantindo a sua fixação ao mesmo (na Figura o talão da direita é de um pneu sem câmara).

Aro do talão (11): elemento metálico interno do talão.

Carcaça: estrutura resistente formada por um conjunto de lonas e eventuais cintas de proteção ou de trabalho.

Cordonéis: elementos metálicos ou têxteis retorcidos que constituem a carcaça e dão resistência às lonas e/ou cintas.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Relevância e justificativa

Nos veículos modernos, exceto ao que se refere às forças aerodinâmicas, todas as forças atuantes que determinam como o veículo efetua curva, freia e acelera, são gerados pelo contato entre as pequenas áreas de contato entre o solo e os pneus (Gillespie, 1992).

Em mais de 100 anos desde a invenção do pneumático, várias idéias alternativas vêm sendo investigadas, e algumas até mesmo testadas em pista, entretanto não houve aplicação comercial para nenhuma delas, permanecendo o domínio do pneumático de borracha, resultado da combinação de propriedades que permite ao pneu oferecer suporte e controle do veículo com boa durabilidade em diferentes e difíceis condições de uso, sendo altamente adaptável a aplicações específicas (Dixon, 1996).

O mercado brasileiro tem cerca de 60% do total de transporte de carga efetuado pelo modal rodoviário (ANTT, 2005), tal como indicado na Figura 1.1, apresentando uma frota de 1,4 milhão de ônibus e caminhões (SINDIPEÇAS, 2003) que consome 5,2 milhões de pneus anualmente (dos quais, 70% pneus radiais) (ANIP, 2004).

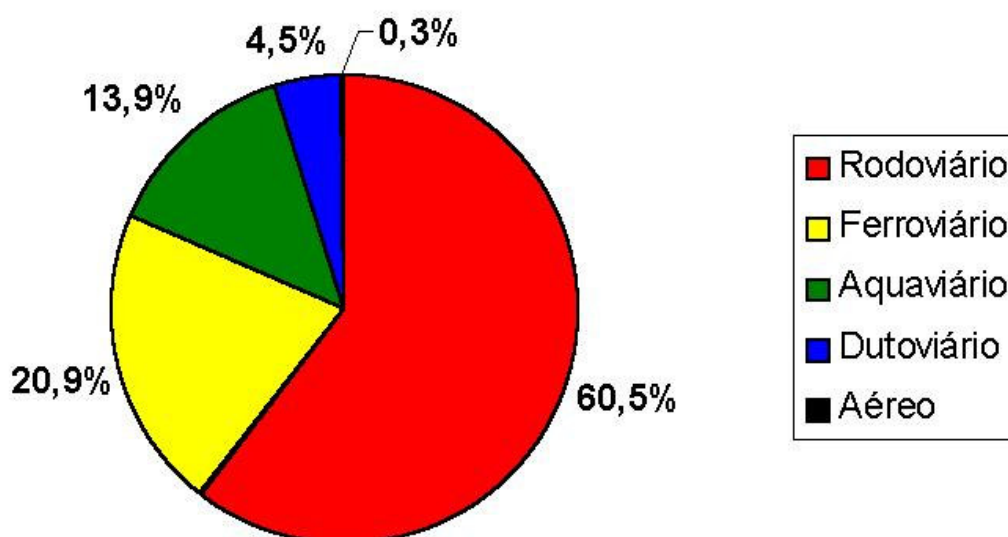


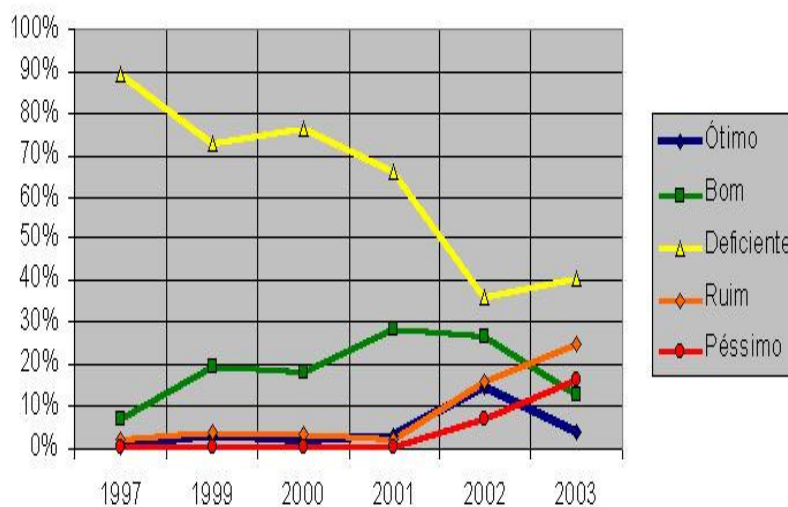
Figura 1.1 - Divisão do transporte de carga no Brasil (ANTT, 2005)

Depois dos custos com combustível e mão de obra, os custos relativos a pneus é o de maior importância nas frotas de veículos de carga <sup>(Aragão Costa, 2000)</sup> e segundo relatório sobre caminhões atendidos nas estradas Norte Americanas, com algum defeito que causa a sua imobilização, apresentado por uma das maiores empresas de auto-socorro <sup>(Winsor, 2003)</sup>, 53,5% das paradas de caminhões em estradas foram causadas por ocorrências relacionadas a pneus, como indicado na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1 – As 10 maiores causas das paradas de caminhões** <sup>(Winsor, 2003)</sup>

<b>10 principais razões para parada de caminhões em operação na estrada - EUA</b>	
<b>Baseado em 26.678 ocorrências em 2001</b>	
1. Pneus	53,5%
2. Reboque	9,2%
3. Conexões	4,2%
4. Alternador	4,0%
5. Cabeamento, soquetes de lâmpadas	3,9%
6. Filtro de combustível e aditivo	3,8%
7. Tambor do freio	3,4%
8. Falta de combustível	1,6%
9. Reparo ou ajuste da tomada de ar	1,4%
10. Troca da mangueira do radiador	1,2%
Outros	13,8%

No Brasil, em função das precárias condições das estradas <sup>(Hemétrio, 2004)</sup>, conforme Figura 1.2, pode-se considerar um índice de causa da imobilização dos caminhões associado à falha em pneus igual ou superior ao americano, visto o pneu ser a parte do veículo que recebe diretamente os impactos causados pelos obstáculos existentes nas vias. Este fato não só acarreta prejuízo associado com o custo do pneu substituído, mas também gera a perda de tempo de viagem, com o conseqüente custo associado a atraso nas entregas, o aumento do risco de acidentes e roubo de cargas, sendo este último uma das principais preocupações dos caminhoneiros brasileiros <sup>(CNT, 2002)</sup>.



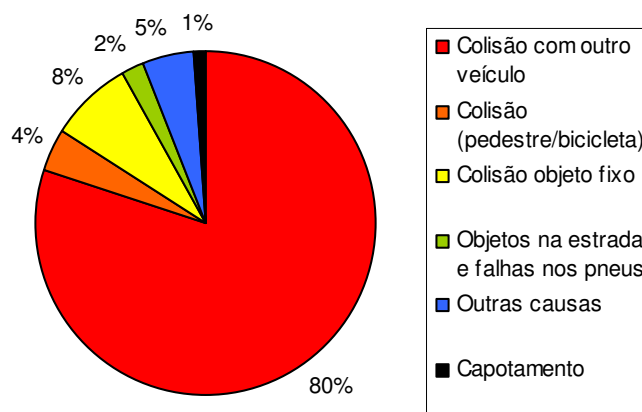
**Figura 1.2 - Pesquisa sobre as condições das estradas brasileiras** (Hemétrio, 2004)

Os acidentes nas estradas brasileiras ferem aproximadamente 320.000 pessoas e causam a morte de outras 20.000 vítimas por ano, sendo que cerca de 9% dos acidentes envolvem caminhões ou carretas. Anualmente registra-se nos acidentes do Brasil 6 vítimas fatais por 10.000 veículos, sendo este índice 2,5 vezes maior do que o Norte Americano (DENATRAN, 2002) e (Bureau of Transportation Statistics, 2004).

Através da Tabela 1.2 e Figura 1.3 podemos verificar que dentre os acidentes que ocorrem nas estradas federais brasileiras cerca de 4% são causados por falhas mecânicas (Hemétrio, 2004) e considerando razões de falhas similares às apresentadas em estradas americanas, os acidentes causados por falha de pneus ou devido a partes de pneus existentes nas vias é de 1% do total (Carey, 1999).

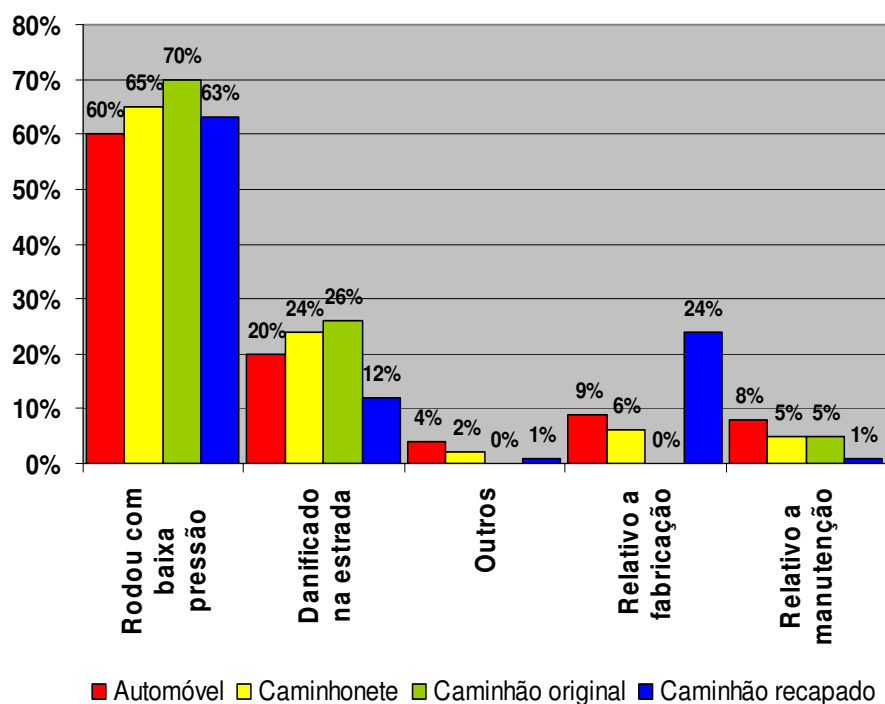
**Tabela 1.2 – Causas de acidentes nas estradas** (Carey, 1999) e (DENATRAN, 2002)

Causas presumíveis	2.001	2.002	2.003
Velocidade incompatível	12.236	11.895	12.546
Ultrapassagem indevida	4.568	4.426	4.172
Ingestão de álcool	564	474	735
Desobediência à sinalização	5.741	6.331	6.406
Defeito mecânico do veículo	4.037	3.711	3.903
Defeito na via	2.010	2.542	3.387
Falta de atenção	35.999	38.320	35.284
Sono ao volante	1.787	1.719	2.020
Outras causas	35.664	39.463	37.404
Total	102.606	108.881	105.857



**Figura 1.3 - Causas de acidentes nas estradas** (Carey, 1999) e (DENATRAN, 2002)

Considerando que 70% das falhas de pneus de carga detectadas no Brasil estão relacionadas à manutenção e pressão utilizadas inadequadas, numa analogia à pesquisa realizada pelo Departamento de Transporte de Arizona, ilustrada na Figura 1.4 (Carey, 1999), e fazendo a proporção entre os dados de acidentes e suas razões de falha pode-se estimar, de forma rudimentar, que aproximadamente 200 pessoas/ano deixariam de ser vitimadas por acidentes se a manutenção e o controle de pressão dos pneus fossem feitas de forma adequada nos veículos de carga.



**Figura 1.4 - Causas de falhas por tipo de pneus** (Carey, 1999)

Outro aspecto a ser ressaltado é o ambiental. A partir de 1º de janeiro de 2002 os fabricantes e importadores de pneus no Brasil estão recolhendo e dando destinação ambientalmente sustentável a pneus inservíveis proporcionalmente à quantidade produzida ou importada, obedecendo à resolução CONAMA Nº 258 de 26/08/99 (CONAMA, 1999). A norma tem por objetivo retirar do ambiente um resíduo que sequer tem estimativa de tempo de decomposição na natureza, evitando o impacto ambiental causado por este material. Ao aumentar o tempo de vida do produto através de melhor manutenção pode-se reduzir o impacto ambiental causado por este resíduo.

Atualmente, a análise de pneus sucitados em frotas de caminhões e ônibus é realizada para efeito de controle de estoque e determinação de causas de falhas, carecendo no entanto, de um estudo efetivo e cuidadoso dos dados coletados. Da forma como vem sendo desenvolvida, não existe um método de análise de falhas, com a avaliação das suas causas e comparação com padrões de mercado, o que não permite a adoção de práticas sistemáticas que evitem a falha do produto e até mesmo a detecção de quando este deve ser retirado de uso, acarretando perdas de ordem econômica, prejudicando a segurança das pessoas, cargas e veículos e abreviando a vida útil do produto.

Os fatos até aqui citados, demonstram que o melhor entendimento da tipologia de falhas de pneus de carga e a prevenção das mesmas, além de minimizar os riscos de acidentes e impacto ambiental, é aspecto essencial no controle de custos das empresas de transporte, com grande relevância no cenário sócio-econômico brasileiro.

## **1.2. Objetivo do trabalho**

Este trabalho tem por objetivo estabelecer uma metodologia para avaliação do desempenho, no tocante à vida útil, de pneus radiais utilizados em frotas de veículos de carga, utilizando dados de campo referentes a tipologia de falhas de retirada de serviço e tempo de serviço do produto, quando da ocorrência dessas falhas.

Da análise efetuada dos pneus sucitados nas diversas frotas é possível verificar a tipologia de falha que colocou cada produto fora de serviço. Este tipo de avaliação é

realizada tendo-se o conhecimento da estrutura do produto, mecanismos de falhas típicos e evidências observadas durante a inspeção do produto.

Identificados os dados de tipologia de falha e tempo de serviço das amostras efetua-se a análise de confiabilidade dos pneus, considerando a distribuição de probabilidade dos tempos até a falha de uma amostra de pneus. Executa-se análise não paramétrica e paramétrica, nesta última verificando-se a adequação às distribuições de Weibull, Log-normal, Normal e Exponencial.

A análise das curvas e parâmetros obtidos permite quantificar e comparar quais falhas apresentam maior incidência e respectivas taxas de falhas durante a vida do produto, permitindo estabelecer uma metodologia de análise e comparação para este tipo de avaliação.

Ordenando as causas mais freqüentes e comparando com uma amostragem geral do mercado, é possível priorizar medidas corretivas que apresentem resultados mais significativos em menor prazo e custo, bem como comparar o desempenho de uma frota específica com parâmetros padrão do mercado.

Utilizando os dados obtidos em campo (sucata das frotas) são isolados os dados referentes a uma das medidas de pneu de maior uso (295/80R22.5) para uma aplicação específica (transporte rodoviário de carga). Para este tipo de pneu aplica-se a metodologia acima citada, verificando-se as falhas críticas do mesmo sob o ponto de vista de perda de confiabilidade do produto.

### **1.3. Desenvolvimento do trabalho**

O capítulo 1 apresenta informações sobre a importância do pneu de carga no panorama do transporte de carga no Brasil e alguns comparativos com o mercado norte americano. Fazendo referência a dados estatísticos de várias fontes, são abordados itens relativos a sua importância dentro da economia brasileira, impacto nos custos da frota, segurança nas estradas, preocupação ambiental e destinação de pneus inservíveis. Ainda neste capítulo é delineado o objetivo deste trabalho, que é desenvolver uma nova metodologia para análise de confiabilidade e redução de custos de pneus radiais utilizados em frotas de veículos de carga, identificando as

principais falhas a serem reduzidas e obtendo o tempo de remoção de uso para menor custo.

No capítulo 2 são apresentadas as funções principais dos pneus, nomenclatura, estrutura e processos de fabricação, frisando-se a ação e importância da pressão de inflação dos pneus utilizada sobre o funcionamento e modos de falha do produto, a relação entre carga e pressão assim como os efeitos da velocidade e correspondente transformação de energia cinética em calor na estrutura do pneumático. Dando seguimento a este capítulo são apresentados os principais modos de falha estruturais e suas causas mais prováveis e também os principais ensaios a que são submetidos os produtos.

O capítulo 3 aborda temas fundamentais de confiabilidade tais como, análises não paramétrica e paramétrica, curva da banheira, principais distribuições utilizadas no estudo de confiabilidade e sua aplicação, testes de aderência e censura.

No capítulo 4 apresenta-se uma metodologia para análise de confiabilidade de pneus em função da análise de tempo de operação até a remoção dos mesmos. Esta análise permite, em função da classificação das falhas observadas nos elementos da amostra, determinar quais modos de falha causam a maior perda de vida do produto. A metodologia é aplicada na análise de pneus sucitados 295/80R22.5 empregados em frotas de transporte rodoviário.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações deste trabalho.

## 2. DESCRIÇÃO DO PNEU

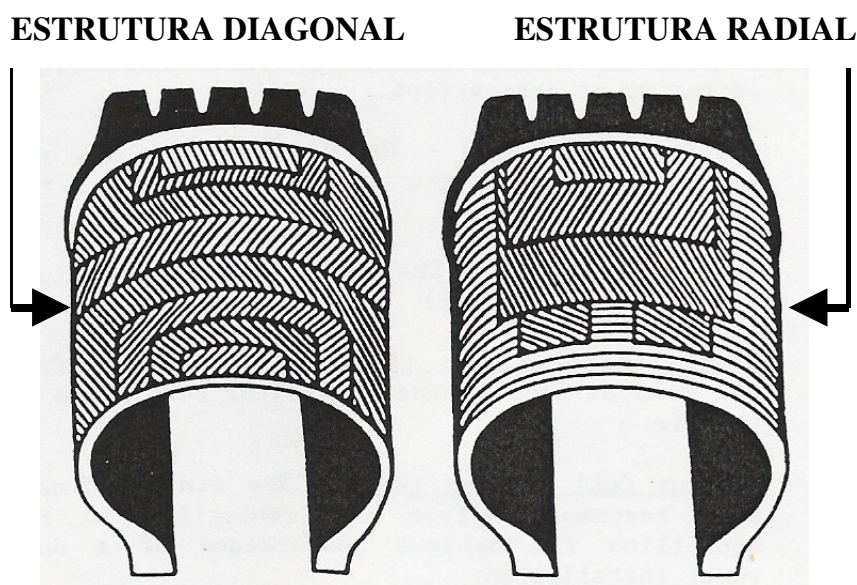
### 2.1. Estrutura do pneu

Pode-se definir o pneu como uma estrutura mecânica que trabalha sobre tensão, provocada pela ação da pressão interna de um fluido, sendo o mais comum deles o ar atmosférico.

Os materiais utilizados no projeto e manufatura de pneus de veículos de carga podem ser classificados em duas categorias: materiais de reforço e compostos.

Os materiais de reforço são basicamente os cordões utilizados na carcaça e cintas e os arames de aço utilizados nos frisos dos talões.

A carcaça é o componente principal do pneu, sendo constituída por uma ou mais camadas de cordões emborrachados, cada uma chamada de lona, sendo comum atualmente o uso de nylon para pneus diagonais e aço para pneus radiais de carga, tal como indicado na Figura 2.1.



**Figura 2.1 – Estrutura Diagonal e Radial do Pneu** (Ford; Charles, 1988)

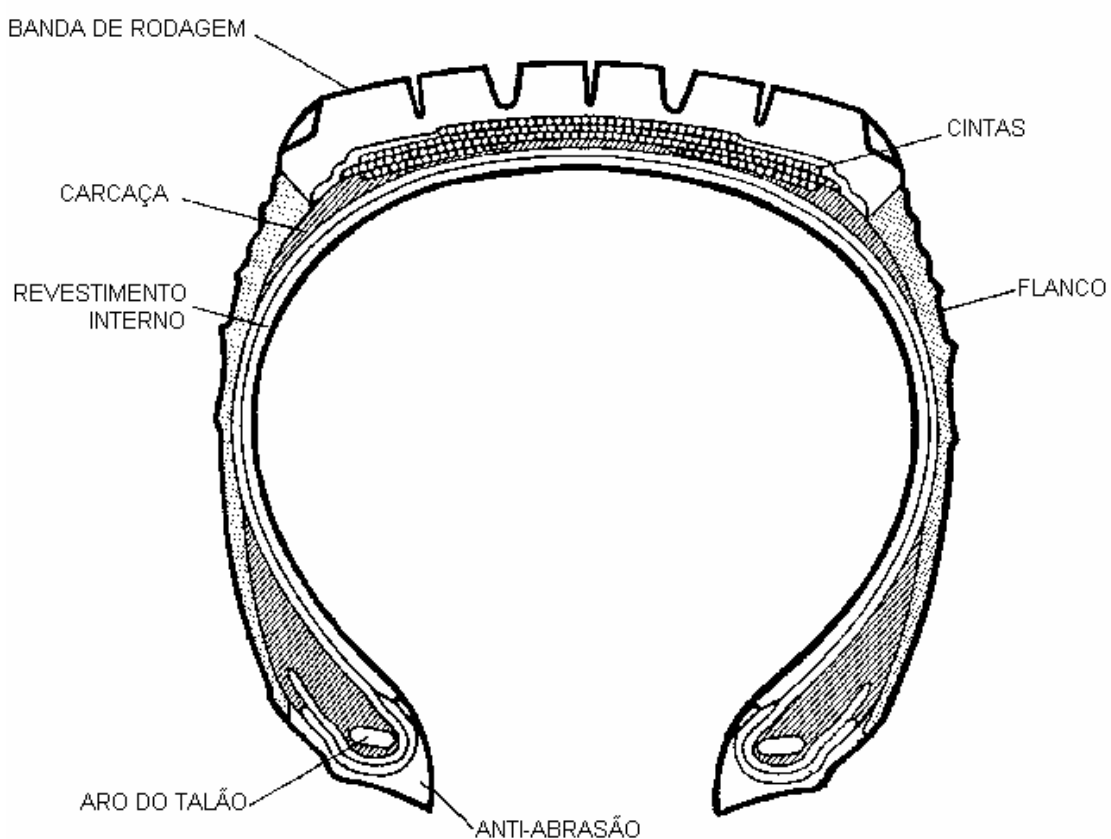
Nos pneus diagonais as lonas cruzam o pneu de talão a talão com ângulo diagonal dos cordões em relação à linha de centro do pneu (usualmente ângulos de  $25^\circ$  a  $40^\circ$ ) (Ford; Charles, 1988) em direções opostas para cada lona, resultando em uma estrutura de cordões cruzados.



Nos pneus radiais a carcaça está posicionada perpendicularmente aos aros dos talões, a banda de rodagem é reforçada em sua circunferência por cintas de aço, que reduzem deformações da mesma na área de contato com o solo e permitem maior proteção contra perfurações, tal como indicado na Figura 2.2.

A carcaça é ancorada pelos aros do talão, que são arames metálicos dispostos circunferencialmente na região dos talões, que são as partes do pneu que entram em contato com o aro.

O talão tem montagem com interferência no aro permitindo a ancoragem da carcaça ao mesmo, evitando o movimento entre o aro e pneu e mantendo a pressão de ar dentro dos pneus tipo sem câmara.



**Figura 2.2 - Seção de Pneu Radial de Carga** (Ford; Charles, 1988)

Os principais componentes elastoméricos do pneu radial são banda de rodagem, flanco, anti-abrasão do talão e revestimento interno, construídos com tipos distintos de borracha com funções específicas na estrutura do pneu.

A banda de rodagem é o composto de borracha onde são estampados os sulcos que formam os desenhos característicos dos pneus, os quais servem para proporcionar tração, principalmente no piso molhado.

A banda de rodagem deve atender a diferentes requisitos, como aderência no seco e molhado, conforto, bom rendimento quilométrico, resistência a abrasão e a laceração (Aragão Costa, 2000).

Os flancos protegem a carcaça na lateral do pneu, sendo o composto que se submete à flexões mais severas, tendo ainda como principais características a boa resistência ao envelhecimento por intempéries e à oxidação.

O composto anti-abrasão que reveste o talão possui como principais características a resistência ao aquecimento causada pela dissipação de calor dos freios e a resistência a abrasão com o aro.

Ao inflar o pneu a pressão é contida pela câmara de ar, ou nos pneus tipo sem câmara a mesma função é exercida pelo revestimento interno (ou “liner”) que é o composto de borracha que compõe a camada mais interna do pneu.

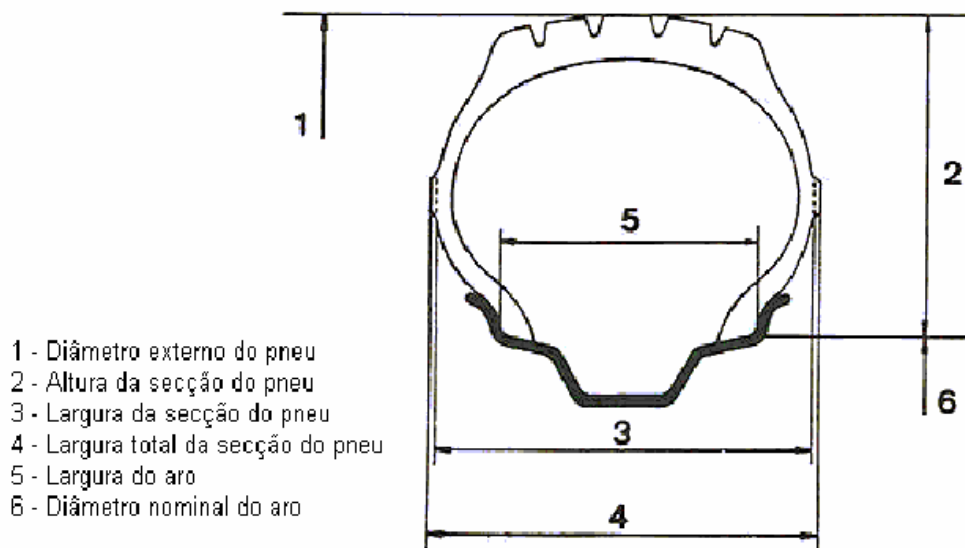
O projeto estrutural e a seleção dos materiais do pneu é um balanço delicado, e embora seja conhecida a maneira de melhorar cada propriedade de um pneu, o dilema consiste em obter a melhora de uma propriedade sem um grande sacrifício de outra (Dixon, 1966).

A nomenclatura para as partes do pneu adotada neste trabalho está em conformidade com a norma ABNT NBR224, que estabelece a terminologia para pneus (ABNT, 2000a), parcialmente reproduzida no glossário deste trabalho.

## **2.2. Tamanhos de pneus e suas principais aplicações**

O tamanho do pneu é o conjunto de medidas composto pela largura nominal do pneu, seguido ou não da indicação de sua série, do tipo de construção (radial ou diagonal) e da medida do seu aro de montagem, sendo a série a relação entre a altura de seção (distância entre o assentamento do pneu com o aro e a rodagem) e a largura de seção (distância entre os flancos dos pneus).

A nomenclatura das principais dimensões do pneu pode ser vista na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Nomenclatura e Dimensões do Pneu** (ALAPA, 2004)

Alguns exemplos de tamanhos utilizados para pneus de carga são:

295/80R22.5 ou 11.00-22 ou 12R22.5

Onde:

- 295 ou 11.00 ou 12

Indicam as larguras nominais da seção dos pneus, em milímetros ou polegadas.

- 80

Indica a série ou relação nominal de aspecto. É 100 vezes a razão entre altura e largura da seção do pneu novo, neste caso, a série (altura) corresponde a 80% da largura (295 mm). Quanto menor for esse número (60, 50,45), mas baixo será o perfil do pneu e ele terá uma aparência mais larga.

- R

Indica que o pneu é de construção radial. Quando não existe a letra, significa que o pneu é de construção diagonal (como por exemplo a medida 11.00-22)

- 22.5 ou 22

Indicam o diâmetro em polegadas do aro em que o pneu é montado.

Existem três tipos básicos de designações de medidas de pneus usadas para pneus de carga (ABNT, 2000a):

- tamanhos convencionais usados em aros de centro plano, por exemplo: 10.00-20 e 11.00R22.
- tamanhos convencionais usados em aros de 15° , por exemplo: 11R22,5 e 12R22,5.

- tamanhos métricos usados em aros de 15°, por exemplo: 275/80R22,5 e 295/80R22,5.

No mercado Brasileiro os tamanhos mais utilizados para pneus de caminhões e ônibus variam dependendo do tipo de aplicação.

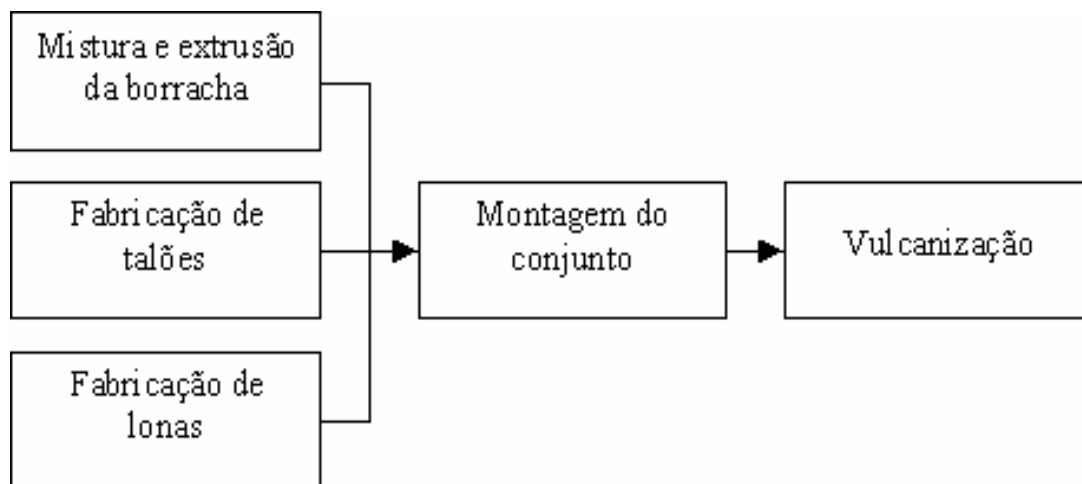
Para uso urbano, equipando caminhões de percurso urbano ou de curta distância e ônibus urbanos, houve uma evolução das medidas 9.00R20 para 10.00R20 em função do maior peso dos veículos utilizados nesta atividade e atualmente estão sendo adotadas as medidas 275/80R22.5 em busca das vantagens do uso de pneus sem câmara e em alguns nichos também encontramos o uso da medida 295/80R22.5.

Para uso rodoviário, equipando ônibus interurbanos e caminhões de percurso longo usualmente com reboques, está ocorrendo a evolução da medida 11.00R22 para 295/80R22.5 em função das vantagens do uso do pneu sem câmara.

Embora veículos novos apresentem a tendência em sua grande maioria a adotar pneus métricos, o mercado de reposição ainda é grande consumidor das medidas 10.00R20 e 11.00R22 devido à grande frota existente.

### 2.3. Processo de fabricação do pneu

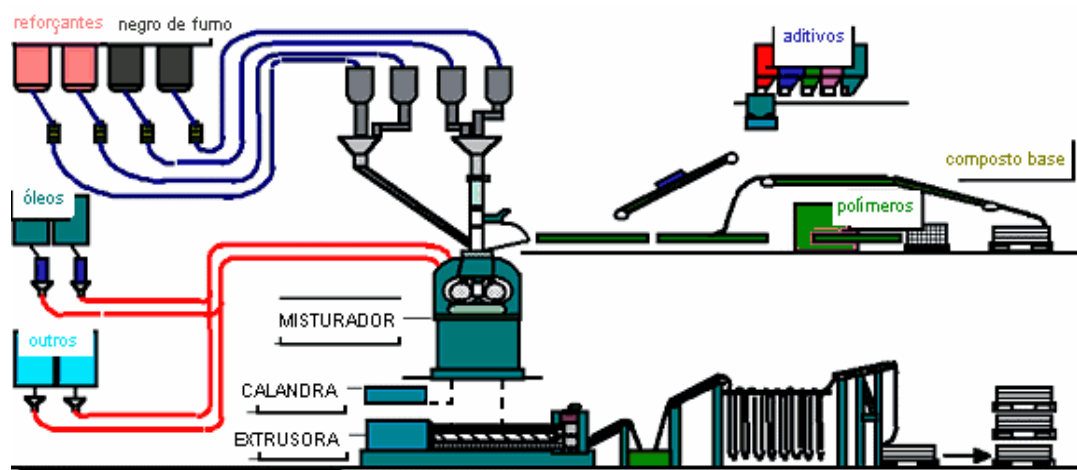
A etapa preliminar de manufatura de um pneu pode ser dividida em três processos: mistura e extrusão de borracha, fabricação de talões e fabricação de lonas. Após estes processos ocorre a montagem do conjunto e sua vulcanização. A ordem dos processos é ilustrada na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Processo de Fabricação de Pneu**

As várias matérias primas formadoras dos compostos de borracha, tais como antioxidantes, antiozonantes, agentes de cura, elastômeros, enxofre, agentes reforçantes, cobalto, óxido de magnésio, carbonato de cálcio, óxido de zinco, negros de fumo, materiais de processamento e outros produtos químicos (segundo as aplicações a que são destinados os compostos) são misturados mecanicamente em misturadores internos, sendo esta mescla tornada mais homogênea em moinhos, quando então a borracha resultante é enviada em tiras para as extrusoras e calandras (Figura 2.5).

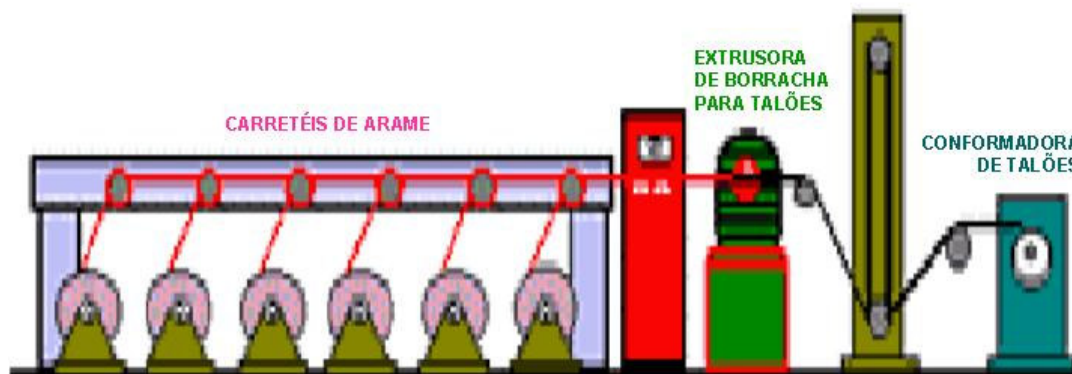
As extrusoras tem usualmente forma tubular, sendo a borracha crua alimentada para dentro do tubo e empurrada por um mecanismo de parafuso e forçada através de um orifício com formato similar ao requerido para o componente. Após a extrusão o material é cortado no comprimento adequado para a construção do pneu.



**Figura 2.5 - Mistura e extrusão da borracha** (Browmick; Hall; Benarey,1994)

As borracha para banda de rodagem, laterais e enchimentos são conformadas por extrusão e cortadas no tamanho adequado para cada pneu, já o revestimento interno é conformado por calandragem.

Os cordonéis de aço revestidos de latão são recebidos de fabricantes externos em carretéis. Vários cordonéis, tendo seu distanciamento controlado, passam pela calandra onde são revestidos por borracha em ambos os lados. A tela revestida de borracha é então cortada na largura e emendada para formar a lona de corpo e cintas nos tamanhos e ângulos adequados, sendo então enroladas em carretéis e enviadas ao processo de montagem do pneu.

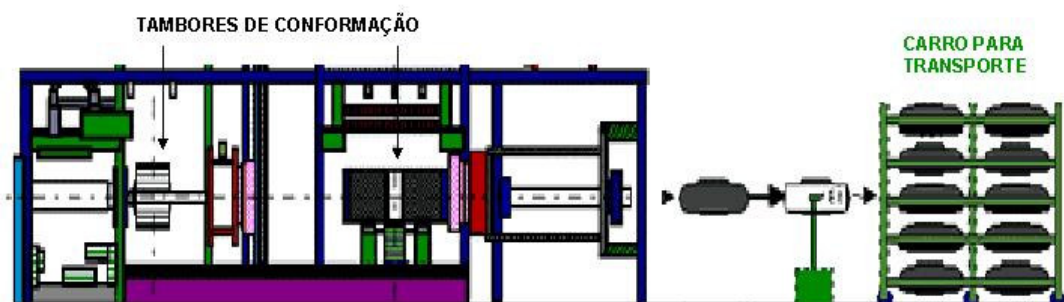


**Figura 2.6 - Fabricação de talões** (Browmick; Hall; Benarey, 1994)

No processo de fabricação dos talões, arames de aço de alta resistência são revestidos de borracha e enrolados, formando os frisos dos talões, tal como indicado na Figura 2.6. A borracha é usualmente prensada dentro e em volta dos frisos enquanto estes são passados em uma extrusora. Depois de reunidos aos revestimentos e enchimentos de talão são enviados ao processo de montagem do pneu.

No processo de construção, a carcaça e talões são reunidos em um tambor rotativo de conformação, sendo também nesta operação adicionados os outros componentes do pneu como os enchimentos e rodagem, tal como indicado na Figura 2.7. A união entre os componentes é promovida por roletagem e por sua aderência.

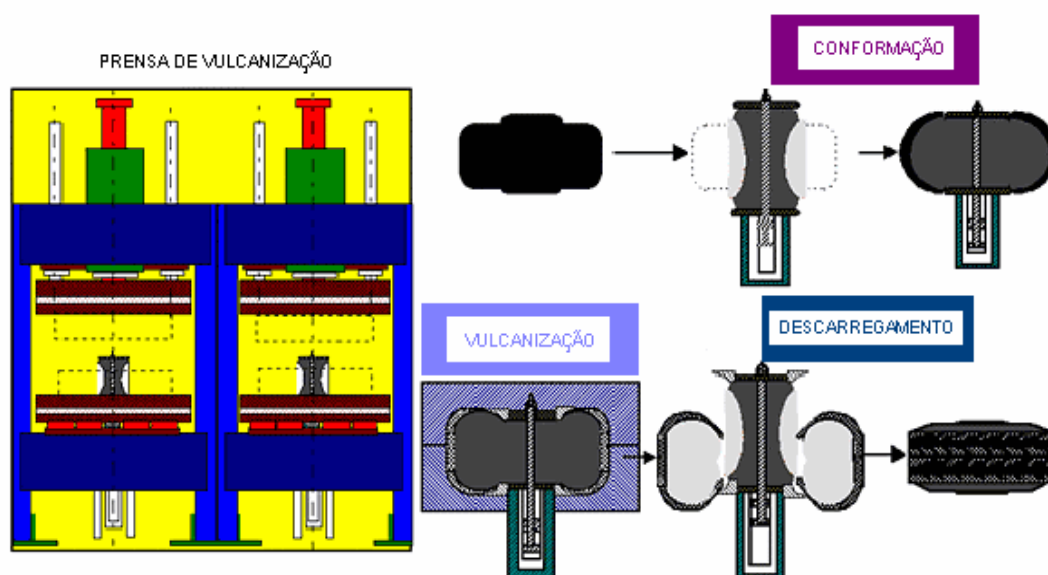
O processo de construção de pneus radiais é basicamente igual ao de pneus diagonais, entretanto a carcaça, talões e a banda de rodagem dos diagonais são feitos em um único tambor de conformação com diâmetro similar ao dos talões enquanto que para pneus radiais as cintas e rodagem são conformados em um tambor de diâmetro similar ao diâmetro final do pneu evitando-se grandes deformações das cintas no processo de conformação da estrutura final do pneu (Bridgestone; Browmick; Hall; Benarey, 1994)



**Figura 2.7 - Montagem do conjunto** (Browmick; Hall; Benarey, 1994)

Após o processo de construção, o pneu é inserido no molde de vulcanização, onde é colocado no pneu uma bexiga inflável de borracha. Esta bexiga força o pneu contra o molde, conformando os desenhos de rodagem e laterais, tal como indicado na Figura 2.8.

Os componentes de borracha são vulcanizados por calor transferido do vapor ou água quente dentro da bexiga, processando a moldagem. Este calor resulta em modificações químicas e físicas nos compostos de borracha, quando os componentes são transformados da consistência plástica para a consistência elástica encontrada no pneu acabado. Assim, o processo de vulcanização liga quimicamente e fisicamente os vários componentes do pneu (Kaster, 2004).



**Figura 2.8 – Vulcanização** (Browmick; Hall; Benarey,1994)

#### 2.4. Pressão e carga

A pressão correta para um determinado tamanho de pneu e carga é crítica para manter uma distribuição adequada de tensões no pneu, pois reduz o flexionamento e o aumento de temperatura gerado pela fricção dos componentes do pneu (histerese), que iria desperdiçar combustível e diminuir a vida da carcaça.

Tabelas com os limites de carga para várias pressões de inflação a frio para várias medidas de pneus são disponibilizados pelos fabricantes de pneus ou organizações

normativas como a TRA (*Tire and Rim Association*), ETRTO (*European Tyre and Rim Technical Organization*) ou ALAPA (Associação Latino Americana de Pneus e Aros). Usando tabelas como o exemplo apresentado na Tabela 2.1, pode-se determinar a pressão a frio mais adequada para uma carga utilizando pneus montados em rodas simples ou duplas (ALAPA, 2004).

**Tabela 2.1 – Recomendação Pressão x Carga** (ALAPA, 2004)

USO NORMAL EM RODOVIAS - RODAS DUPLAS (D) E SIMPLES (S)

Tamanho	Índice de Carga	Pressão de Inflação - (bar) lb/pol. <sup>2</sup>										
		75 (5.2)	80 (5.5)	85 (5.8)	90 (6.2)	95 (6.5)	100 (6.9)	105 (7.3)	110 (7.6)	115 (8.0)	120 (8.3)	125 (8.5)
		Carga por pneu em Kg										
275/80R22.5	D	1.990	2.095	2.200	2.305	2.405	2.505	2.605	2.705	2.805	2.900	-
	S	2.165	2.275	2.390	2.500	2.615	2.720	2.830	2.940	3.045	3.150	-
275/80R22.5	D	1.995	2.100	2.205	2.305	2.410	2.510	2.610	2.710	2.805	2.905	3.000
	S	2.160	2.275	2.385	2.500	2.610	2.720	2.825	2.935	3.040	3.145	3.250
295/80R22.5	D	2.185	2.300	2.415	2.525	2.640	2.750	2.860	2.970	3.075	-	-
	S	2.380	2.505	2.630	2.755	2.875	2.995	3.115	3.235	3.350	-	-
295/80R22.5	D	2.095	2.205	2.315	2.420	2.530	2.635	2.740	2.845	2.945	3.050	3.150
	S	2.360	2.485	2.610	2.730	2.850	2.970	3.090	3.205	3.320	3.435	3.550
295/80R24.5	D	2.320	2.440	2.565	2.685	2.800	2.920	3.035	3.150	-	-	-
	S	2.465	2.595	2.725	2.855	2.980	3.105	3.230	3.350	-	-	-
315/80R22.5	D	2.300	2.420	2.540	2.660	2.780	2.895	3.010	3.125	3.240	3.350	-
	S	2.575	2.710	2.845	2.980	3.110	3.240	3.370	3.500	3.625	3.750	-

A máxima carga suportada pelo pneu é indicado pelo seu índice de carga (Tabela 2.2), o qual faz parte da sua nomenclatura.

**Tabela 2.2 - Índice de carga** (ALAPA, 2004)

Índice	Carga do pneu (kg)	Índice	Carga do Pneu (kg)	Índice	Carga do pneu (kg)	Índice	Carga do Pneu (kg)
99	775	114	1.180	129	1.850	144	2.800
100	800	115	1.215	130	1.900	145	2.900
101	825	116	1.250	131	1.950	146	3.000
102	850	117	1.285	132	2.000	147	3.075
103	875	118	1.320	133	2.060	148	3.150
104	900	119	1.360	134	2.120	149	3.250
105	925	120	1.400	135	2.180	150	3.350
106	950	121	1.450	136	2.240	151	3.450
107	975	122	1.500	137	2.300	152	3.550
108	1.000	123	1.550	138	2.360	153	3.650
109	1.030	124	1.600	139	2.430	154	3.750
110	1.060	125	1.650	140	2.500	155	3.875
111	1.090	126	1.700	141	2.575	156	4.000
112	1.120	127	1.750	142	2.650		
113	1.150	128	1.800	143	2.725		

Obs.: Quando encontra-se em um pneu a identificação 151/148 para índice de carga, significa que ele suporta no máximo 3.450 kg por pneu em montagem simples e 3.150 kg por pneu em montagem dupla.



A menor carga admissível para pneus em rodas duplas visa compensar a transferência de carga que normalmente ocorre entre pneus geminados devido à inclinação de pista, diferença de pressão entre pneus, e pequenas diferenças de diâmetro entre outras.

Segundo determinado pela TRA <sup>(TRA, 2003)</sup>, a carga admissível para pneu geminado é 94% para carga máxima até 2.180 kg ou 91% para carga máxima acima de 2.180 kg, considerando carga máxima para pneu em montagem simples.

Determinar a pressão de ar correta para o pneu é crítico para a operação de pneus de carga, pois a utilização de pressão inadequada acarreta graves conseqüências aos componentes do pneu.

A sub-inflação aumenta a amplitude de flexão do pneu causando aumento de calor nos componentes do pneu por histerese, o que deteriora os compostos de borracha e fadiga os cordões de aço da carcaça e cintas.

Pneus super-inflados são mais vulneráveis a cortes na superfície da rodagem, quebras por impacto, perfurações e danos por choque.

Além disso, tanto a sub quanto a super-inflação, modificam a pegada do pneu, que é a área em contato com a pista, resultando uma abrasão desigual da rodagem contra o pavimento <sup>(TMC, 2003)</sup>, conforme Figura 2.9.

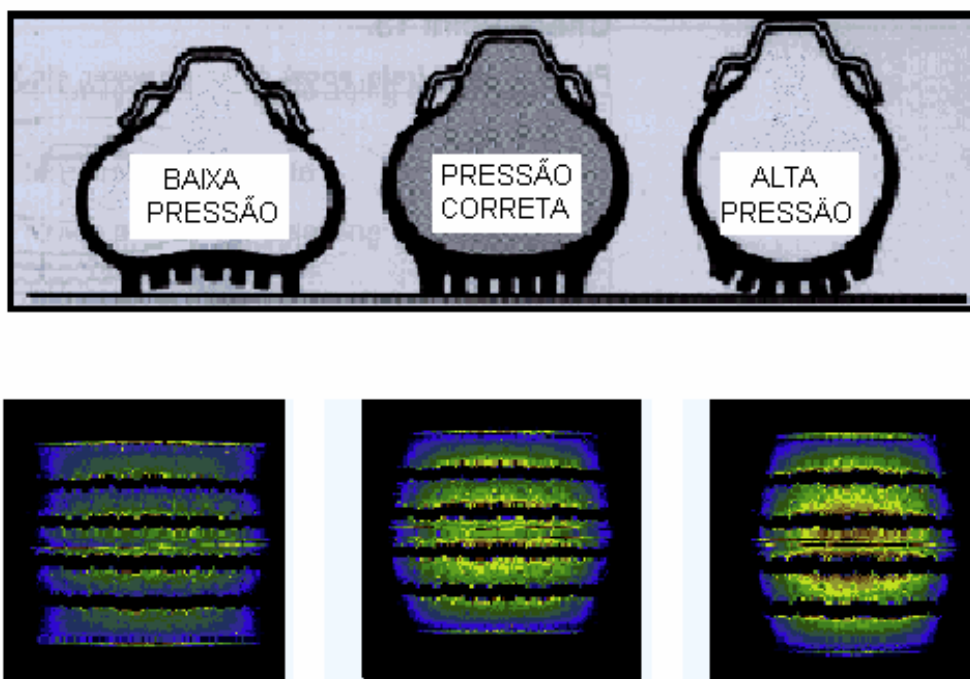
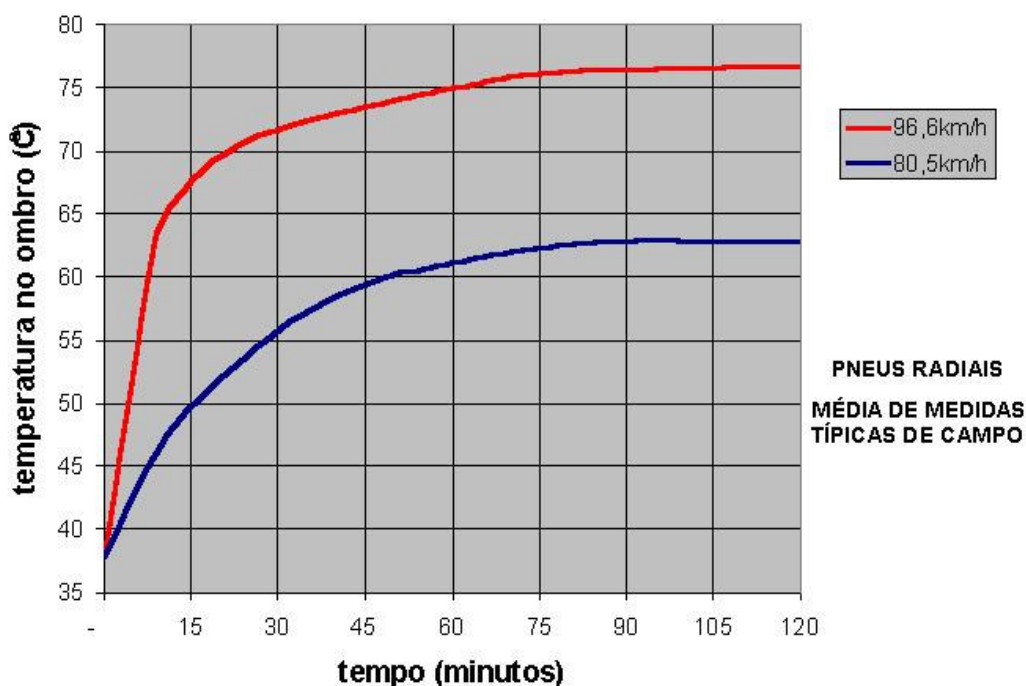


Figura 2.9 - Pegada do pneu <sup>(TMC, 2003)</sup>

## 2.5. Velocidade e calor

Os pneus são desenvolvidos para manter sua temperatura de equilíbrio, no caso de pneus radiais de carga, a um máximo de 90°C. Exceder esta temperatura por curtos períodos de tempo não é um problema, mas excedê-la por longos períodos acaba por causar a perda da resistência dos materiais componentes e eventualmente pode ocorrer separações na estrutura do pneu (Ford; Charles, 1988).

A temperatura de equilíbrio é desenvolvida durante a operação contínua do pneu de carga sendo basicamente função da pressão, carga e velocidade, às quais o pneu está sendo sujeito. A temperatura sobe rápido inicialmente e depois gradualmente até um valor de equilíbrio como no exemplo da Figura 2.10. Na temperatura de equilíbrio, o calor dentro da estrutura do pneu é igual à dissipada pelas suas superfícies externas.

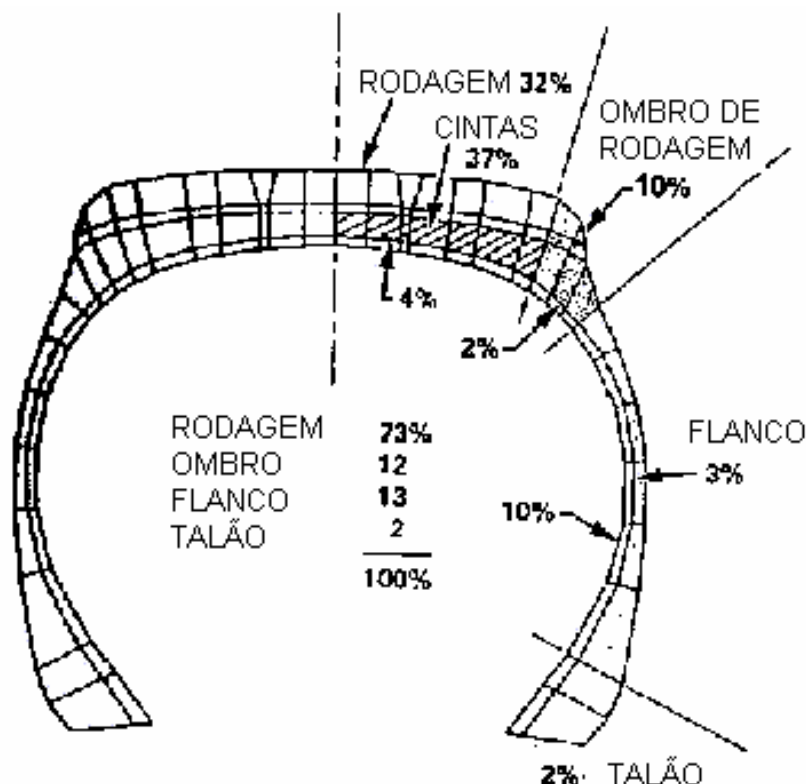


**Figura 2.10 - Temperatura de equilíbrio** (Ford; Charles, 1988)

A principal razão para o aumento da temperatura no pneu é a transformação de energia cinética em calor, devido à alta histerese dos compostos de borracha. Quanto maiores forem as deformações sofridas pela borracha (maior deflexão do pneu) e maior a quantidade de ciclos no tempo (maior velocidade), maior será a transformação de energia em calor e portanto maior será a temperatura de equilíbrio.

Sobrecarga e sub-inflação causam a deflexão, que é um dos fatores no desenvolvimento de calor em um pneu de carga (Ford; Charles, 1988).

As partes do pneu que mais convertem energia cinética em calor são aquelas com maior massa de borracha e com maior movimentação. Isto ocorre principalmente na área da rodagem do pneu, sendo esta região responsável por cerca de 85% desta transformação de energia (Ford; Charles, 1988) como pode-se verificar na Figura 2.11.



**Figura 2.11 - Transformação de energia cinética em calor por partes do pneu** (Ford; Charles, 1988)

## 2.6. Modos de falha do pneu

Para pneus radiais de carga as falhas típicas, devido às solicitações de carga e velocidade impostas, são causadas pela falência ou eminência de falha dos materiais de reforço. Para veículos onde a velocidade é a maior solicitação, as cintas estão mais propensas à falha por solicitação mecânica e calor; quando as solicitações preponderantes são a carga e altas frequências de acelerações e paradas, a maior incidência de falhas ocorre nas extremidades da lona de corpo no talão do pneu.

O uso de pressão inadequada para a carga é a condição de manutenção que provoca os maiores danos à estrutura do pneumático, visto que o uso de pressão baixa cria maior flexão da estrutura provocando maior deformação em áreas críticas, concentrando tensões e aumentando a possibilidade de separações entre metal e borracha nas extremidades dos cordonéis metálicos, já o uso de pressão acima da adequada, eleva à possibilidade de falhas por impacto por aumentar a rigidez da estrutura.

Perfurações e cortes atingindo cintas e lona de corpo comprometem a estrutura, sendo fonte de contaminação por umidade e resíduos que oxidam os cordonéis metálicos e deterioram a adesão entre metal e borracha. Mesmo após reparadas, avarias que atingem os materiais de reforço irão reduzir a resistência mecânica da estrutura e aumentar o risco de falha por impacto, fadiga ou separação entre componentes.

O modo de falha estrutural mais comum em pneus radiais com cintas metálicas é a separação entre os componentes das cintas de aço. Esta área é sujeita a altas tensões durante o uso pesado e esta é também a área com potencial de menor adesão devido à dificuldade de aderência entre metal e borracha.

A adesão pode ser prejudicada por algumas ocorrências na fabricação incluindo, mas não limitado, a vulcanização insuficiente, contaminação, estocagem e manuseio impróprio dos componentes do pneu. Por exemplo, se qualquer umidade é acumulada no fio de aço da cinta ou entre cintas de aço, a degradação dos componentes do fio de aço ou pontos de separação podem ocorrer. Da mesma forma, pequenos pontos de ar entre as cintas de aço podem resultar na quebra da adesão.

Visto que a borracha não adere diretamente ao aço, os fios das cordas das cintas de aço são recobertos com uma camada fina de latão, assim a adesão do composto de borracha é promovida pela reação do zinco e cobre existentes na camada de latão com o enxofre existente na borracha (Ishikawa; Hotaka, 2002).

Os fios de aço recobertos de latão, que são usualmente adquiridos de fornecedores externos e enviados para ao fabricante de pneus em embalagens seladas para prevenir a contaminação por umidade, quando recebidos pelo fabricante de pneus devem ser estocados em um ambiente de temperatura e umidade controladas até que sejam recobertos com borracha. É muito importante que os fios das cintas não sejam

expostos à umidade, o que poderia provocar a corrosão do aço ou latão durante o processo de manufatura, com risco de prejudicar a adesão entre os cordões e a borracha <sup>(Kaster, 2004)</sup> .

## 2.7. Ensaio do pneu

Existem vários tipos de testes de durabilidade do pneu, que podem ser classificados em três tipos básicos: testes em laboratório, testes em pista de testes e testes em frotas ou estrada.

Testes acelerados de durabilidade são efetuados em laboratório e podem ser conduzidos sobrecarregando o pneu com cargas ou velocidades progressivamente maiores após determinado número de ciclos. Estes testes de durabilidade podem ser feitos em dinamômetros (tambores), onde o raio do tambor influencia a distância até falha devido à severidade extra induzida pela curvatura do tambor, a qual muda o carregamento sobre o pneu. Nestes testes a velocidade ou carregamento são a intervalos de tempo até a falha do pneu, ou até que uma velocidade específica seja atingida, ocorrendo aí a censura do teste.

Em relação a falha em testes de laboratório sob carregamentos severos (carga ou velocidade) mantém correlação em relação às condições normais usualmente baseada em dados empíricos ou em curvas de fadiga relacionando nível de tensão-deformação com o número de ciclos até a falha, tomando em consideração os efeitos da temperatura. Para efeito de validação do produto junto a órgãos governamentais ou de certificação são estabelecidos níveis mínimos de carregamentos e número de ciclos que cada família de produtos deve atingir.

O teste de *Plunger* e de explosão são outros testes típicos de laboratório e são utilizados respectivamente para medir a resistência a perfurações na rodagem e para avaliar a pressão à qual o pneu explodirá, por razões de segurança água pressurizada é usada neste último tipo de teste <sup>(Browmick; Hall; Benarey,1994)</sup> .

Testes efetuados em pistas de teste normalmente avaliam o comportamento dinâmico do produto tais como aderência em curvas e no molhado, sonorização e conforto em tipos distintos de piso, resistência a impactos e perfurações e seu efeito na dirigibilidade.

Testes em frotas ou de estrada são realizados equipando veículos com pneus de teste e efetuando inspeções periódicas com o objetivo de medir o desgaste e vida percorrida até a falha. A falha do pneu também pode ser acelerada em testes de estrada sob condições mais severas, como sobre pista de pedras ou com veículos sobrecarregados.

Em todos os tipos de teste, para efeito de desenvolvimento de produto, são avaliados produtos competidores ou de comportamento conhecido.

### 3. REVISÃO DE CONFIABILIDADE

#### 3.1. Conceito de confiabilidade

De uma forma genérica, a confiabilidade pode ser definida como a possibilidade de um componente, equipamento, ou sistema executar a sua função, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo específico, sem apresentar falhas. Desta forma, a confiabilidade está associada com a operação de um produto com sucesso, ou seja, que este execute as funções para o qual foi projetado, preferencialmente com ausência de paradas para manutenção ou de falhas.

Usualmente a confiabilidade é representada em termos de uma probabilidade, e de acordo com suas características podem ser utilizadas algumas distribuições para representar a probabilidade de falha, obedecendo critérios de falhas bem definidos, possibilitando determinar a partir de que momento o produto sob análise é considerado com desempenho abaixo daquele apontado como aceitável, e portanto considerado com a ocorrência de falha.

Apresenta-se abaixo três definições básicas para caracterização da confiabilidade (Martha de Souza, 2003).

Da European Organization for Quality Control (1965):

“A medida da habilidade de um produto operar com sucesso, quando solicitado, por um período de tempo pré-determinado, sob condições ambientais específicas. É medida como uma probabilidade”.

Do 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”.

Do BS Institution (1970) e UK Army (1976):

“A habilidade de um item executar a sua função sob determinadas condições específicas, por um período pré-determinado”.

É importante destacar alguns elementos importantes, comuns e necessários, entre as definições de confiabilidade (Lafraia, 2001):

definição das funções para as quais o produto foi projetado;

definição do que se entende por um desempenho satisfatório (especificação de desempenho, definição de falha);

definição das condições de operação (temperatura, vibração, altitude, etc.);

definição do período de tempo durante o qual o produto deve funcionar bem (isto é, número de horas, ciclos, etc.). Este período também é chamado comumente de tempo de missão.

### 3.2. Funções de confiabilidade e taxa de falha

Outra forma de conceituar confiabilidade é: “a probabilidade de que um sistema ou equipamento sobreviva por um período de tempo específico”.

Expressando esta conceituação em termos da variável aleatória  $t$ , o tempo até ocorrer a falha, e da correspondente função densidade de probabilidade (fdp) de ocorrência de falha  $f(t)$ , tem-se que a probabilidade de falha, em um intervalo de tempo específico, pode ser definida pela relação (3.1):

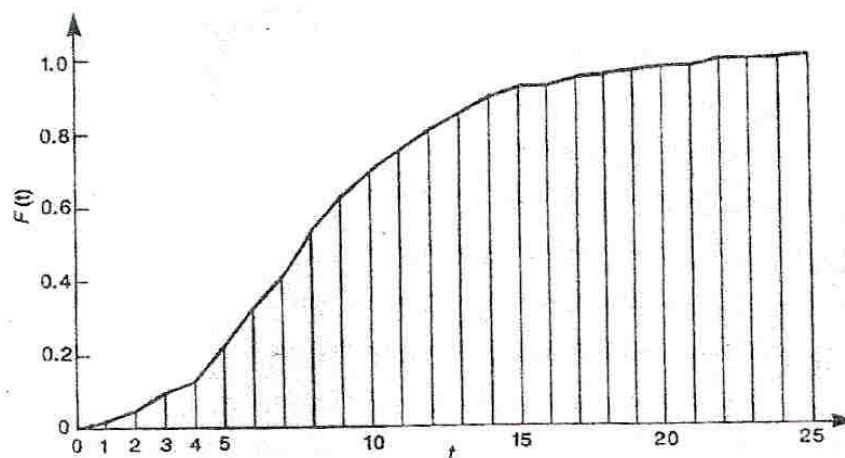
$$f(t) \Delta t = P \{ t < t < t + \Delta t \} \quad (3.1)$$

Sendo  $F(t)$  a função de probabilidade acumulada, vem:

$$F(t) = P \{ t < t \} \quad (3.2)$$

$F(t)$  expressa a probabilidade de ocorrer falha até um tempo  $t$ .

Esta função  $F(t)$  é crescente com o tempo, atingindo um valor unitário quando  $t$  tende a  $\infty$ , tal como indicado na Figura 3.1:



**Figura 3.1 - Função de probabilidade acumulada  $F(t)$**  (Martha de Souza, 2003)



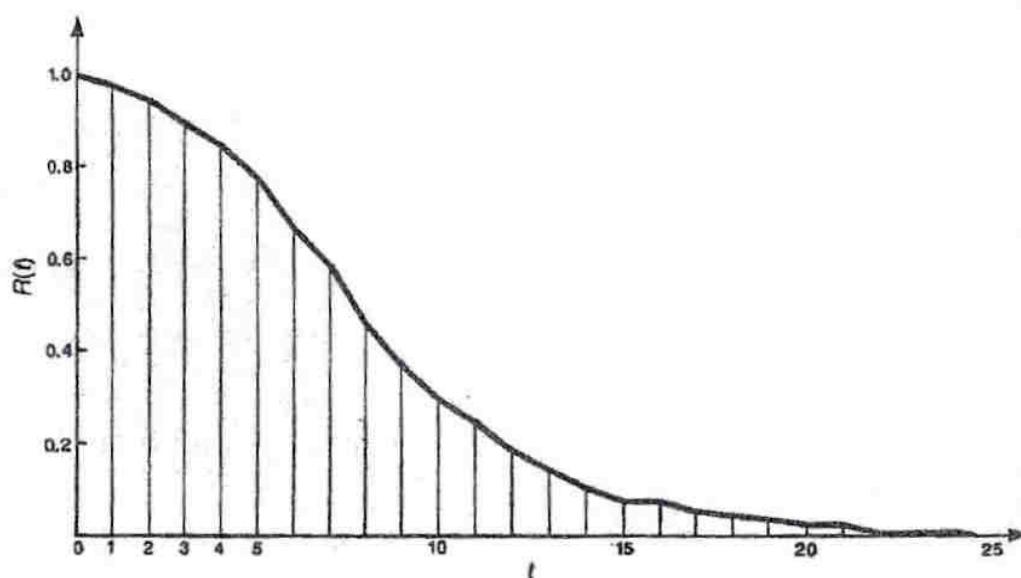
Como, sob o ponto de vista da lógica de sua operação, um componente ou equipamento ou está operando adequadamente, conforme previsto no projeto, ou está no estado de falha, portanto eventos mutuamente excludentes, a confiabilidade pode ser, probabilisticamente, expressa pela relação (3.3):

$$R(t) = P \{ t > t \} \quad (3.3)$$

ou seja,

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.4)$$

A função de confiabilidade está mostrada na Figura 3.2:



**Figura 3.2 - Função de confiabilidade  $R(t) = 1 - F(t)$**  (Martha de Souza, 2003)

Como decorrência da própria definição da função distribuição acumulada, tem-se:

$$R(t = 0) = 1$$

$$R(t = \infty) = 0$$

Verifica-se, portanto, que a confiabilidade de um produto ou sistema apenas decai ao longo do tempo, ou seja, quanto maior o tempo de operação do mesmo, maior será a probabilidade de apresentar falha. Portanto, apenas no instante em que o equipamento é colocado em operação, sua confiabilidade é de 100%.

Adicionalmente, pode-se afirmar que a confiabilidade não é restaurada, ou seja, não dá saltos ao longo da vida operacional.

Assim, sob o ponto de vista do projeto baseado em confiabilidade, a vida operacional do equipamento é definida quando o mesmo atinge um certo valor de confiabilidade.

Este valor é selecionado pelo próprio projetista, em função da responsabilidade do sistema, ou seja, quanto maiores os prejuízos associados à falha, maior é a confiabilidade exigida para o equipamento.

O comportamento de determinado produto com relação à falha é melhor compreendido pelo exame do comportamento de sua taxa de falha.

Esta taxa de falha, representada por  $h(t)$ , pode ser definida em termos da própria confiabilidade, como segue:

Sendo  $h(t) \Delta t$  a probabilidade de que o sistema falhará em um tempo  $t < t + \Delta t$ , dado que ainda não falhou até o tempo  $t = t$ , tem-se que  $h(t)\Delta t$  é a probabilidade condicional:

$$h(t) \Delta t = P ( t < t + \Delta t / t > t ) \quad (3.5)$$

Para dois eventos quaisquer A e B, sendo  $P(B) > 0$ , define-se a probabilidade condicional de A, dado B, como sendo:

$$P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (3.6)$$

Onde interseção de A e B ocorre quando os eventos ocorrem simultaneamente.

Assim, com base na definição de probabilidade condicional, tem-se:

$$P ( t < t + \Delta t / t > t ) = P\{(t > t) \cap (t < t + \Delta t)\} / P (t > t) \quad (3.7)$$

Como o numerador da equação é a própria  $f(t) \Delta t$  e o denominador é a  $R(t)$ , vem:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.8)$$

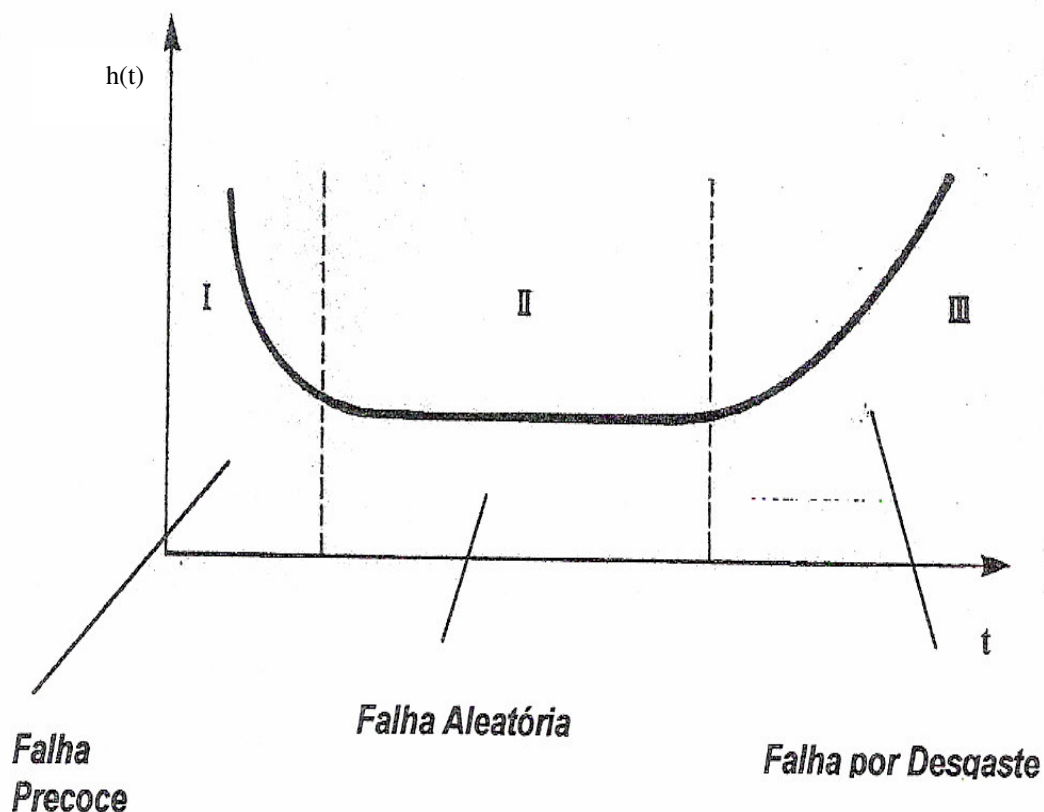
ou seja,  $h(t)$  expressa a taxa de falha instantânea, com:

$f(t)$  = função densidade de probabilidade de falha;

$R(t)$  = função de confiabilidade.

### 3.3. Curva da banheira

O comportamento da taxa de falha  $h(t)$  em relação ao tempo  $t$  é indicador das causas de falha. A curva da banheira representa graficamente esta relação para um sistema sem redundância ou um componente específico.



**Figura 3.3 - Curva da banheira** (Martha de Souza, 2003)

Na curva da banheira, apresentada na Figura 3.3, pode-se perceber que um componente apresenta três períodos da vida característicos, a saber: mortalidade infantil (ou falha precoce), período de vida útil (ou falha aleatória) e período de desgaste (ou falha por desgaste).

O relativamente curto intervalo de tempo indicado por I na Figura 3.3, é uma região de altas taxas de falha, que decrescem a partir de  $t = 0$ . Esta região é conhecida como falha precoce ou ainda em analogia com seres humanos, de mortalidade infantil. Sob este parâmetro de comparação, as mortes neste período, são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas, e portanto a taxa de mortalidade decresce com o tempo. Normalmente, as falhas precoces ou prematuras estão relacionadas com problemas de fabricação, de montagem ou mesmo com o material empregado na fabricação do componente.

Muitas vezes a falha precoce é contornada através da especificação de um período de tempo durante o qual o equipamento realiza um pré teste. Durante este tempo o

carregamento e utilização do produto são controlados de tal maneira que problemas são detectados e componentes são reparados.

Estes problemas de falha precoce são não usuais, ou seja, ocorrem esporadicamente, muitas vezes por alguma razão não específica. No caso de montagem é bastante comum a falha estar relacionada a algum erro humano do montador.

O intervalo de tempo intermediário da curva da banheira, indicado por II na Figura 3.3, é caracterizado por constantes e menores taxas de falhas. É o período de vida útil, de operação do produto, e as falhas que ocorrem nesta fase são denominadas falhas aleatórias, normalmente originárias de carregamento inevitáveis e inesperados, sendo pouco freqüente as falhas devido a defeitos inerentes ao equipamento em si.

Fazendo-se uma analogia com a população humana, as mortes nesta parte da curva da banheira são decorrentes de acidentes ou doenças infecciosas. Nos equipamentos podem-se citar como exemplos de causa de falha aleatória impactos mecânicos, flutuações de temperatura e de umidade.

No período de desgaste, indicado por III na Figura 3.3, observa-se que a taxa de falha é crescente, cuja origem é o próprio desgaste do equipamento, na fase final de sua vida útil. Nesta fase, as falhas tendem a ter defeitos cumulativos tais como desgaste por atrito, trincas de fadiga, corrosão, dentre outros. O aumento muito rápido da taxa de falha, normalmente fundamenta o critério de quando peças devem ser substituídas e também determina a vida útil do produto ou sistema.

A curva da banheira pode ser considerada genérica, pois nem todos os tipos de componentes ou sistemas apresentam sempre todos os períodos, uma vez que cada um deles apresenta uma curva característica.

Para equipamentos eletro-eletrônicos, por exemplo, a curva da banheira apresenta tipicamente as regiões I e II, ou seja, há a presença da falha precoce e durante a vida operacional os mesmos apresentam falhas aleatórias, sem as características de desgaste. Já para componentes mecânicos, pode-se afirmar que a curva da variação temporal da taxa de falha apresenta as regiões I e III, onde a falha precoce está associada a problemas de fabricação, montagem ou de materiais, que induzem a falha no início da vida operacional. Durante o uso, os equipamentos mecânicos falham, normalmente, por desgaste, corrosão ou fadiga, que são mecanismos de falha nos quais o dano é cumulativo ao longo do tempo de operação, até que atinja um valor

crítico, precipitando a falha. Deste modo, a probabilidade de falha do equipamento é crescente ao longo do tempo e, associada a esta, tem-se um aumento da taxa de falha representando um envelhecimento ou desgaste do produto.

Possíveis causas de falhas para cada fase da curva da banheira podem ser vistas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Causas de falhas nas etapas da curva da banheira** (Lafraia, 2001)

FALHAS PRECOCES	FALHAS ALEATÓRIAS	FALHAS POR DESGASTE
Processos de fabricação deficientes	Interferência indevida tensão/resistência	Envelhecimento
Controle de qualidade deficiente	Fator de segurança insuficiente	Desgaste / abrasão
Mão-de-obra desqualificada	Cargas aleatórias maiores que as esperadas	Degradação de resistência
Amaciamento insuficiente	Resistência menor que a esperada	Fadiga
Pré-teste insuficiente	Defeitos abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios	Fluência
<i>Debugging</i> insuficiente	Erros humanos durante uso	Corrosão
Materiais fora de especificação	Aplicação indevida	Deterioração mecânica, elétrica, química ou hidráulica
Componentes não especificados	Abusos	Manutenção insuficiente ou deficiente
Componentes não testados	Falhas não detectáveis pelo melhor programa de manutenção preventiva	Vida de projeto muito curta
Componentes que falharam devido estocagem / transporte indevido	Falhas não detectáveis durante o melhor <i>debugging</i>	
Sobrecarga no primeiro teste	Causas inexplicáveis	
Contaminação	Fenômenos naturais imprevisíveis	
Erro humano		
Instalação imprópria		

### 3.4. Análises paramétrica e não paramétrica

A análise de confiabilidade possibilita, através de estimativa, caracterizar os comportamentos da confiabilidade, da probabilidade de falha e da taxa de falha em relação ao tempo de um componente, equipamento ou sistema, e podem, basicamente, ser classificadas em duas categorias: paramétricas e não-paramétricas.

Independente de qual método de análise de dados for o eleito, o estudo deve ser realizado a partir da coleta experimental dos dados do fenômeno estudado. Se prosseguir com a análise utilizando métodos estatísticos que permitam ajustar a distribuição que melhor apresenta a função da densidade de probabilidade dos tempos de falha  $f(t)$  e conseqüentemente, determinar a melhor representação estatística das funções de confiabilidade  $R(t)$  e de taxa de falha  $h(t)$ , o método denomina-se paramétrico. Porém, quando as funções citadas são estimadas, mas sem a utilização de técnicas estatísticas de ajuste de uma distribuição específica ao fenômeno de interesse e a respectiva determinação de seus parâmetros, a análise é denominada não-paramétrica.

Diversos fatores podem influenciar na escolha de qual tipo de análise utilizar para estimativa da confiabilidade  $R(t)$  e demais funções pertinentes em relação ao tempo, mas é recomendado iniciar o experimento realizando a análise não-paramétrica, visto que a paramétrica demanda, normalmente, maior disponibilidade de tempo e de recursos para sua realização, e a não-paramétrica dará uma estimativa relativamente rápida e de menor custo para as funções de interesse, com resultados bastante significativos e muitas vezes suficientes para o objetivo que se deseja atingir.

Quando um produto encontra-se em desenvolvimento, usualmente inclui o uso de protótipos e permanece por um período em fase de testes. Seguindo as considerações acima, convém a aplicação de análises não-paramétricas <sup>(O'Connor, 1991)</sup>.

Em análises buscando a melhoria da qualidade de um produto já em produção, bem como a fixação de período de garantia ou reposição de componentes defeituosos, é possível obter uma quantidade de elementos suficiente para compor uma amostra para ensaio de falhas, atendendo as exigências de critérios estatísticos. Se houver disponibilidade de recursos financeiros, de laboratório, de pessoal além de tempo para realização de todo o estudo, é recomendável que se utilize análise paramétrica

para ajuste de uma distribuição específica visando à caracterizar o fenômeno estudado.

Nos experimentos realizados com um número de elementos da amostra, denominado  $N$ , tanto no estudo de confiabilidade paramétrico como no não-paramétrico, deve-se reproduzir como condição de ensaio, a mesma condição de uso do produto que induz a ocorrência de um modo de falha específico, objeto do estudo.

Para garantir a validade do experimento, as amostras ou protótipos devem ser fabricados em conformidade com o projeto do produto, empregando a mesma seqüência de fabricação e evitando-se ao máximo o uso de oficinas de protótipos ou ferramentaria para sua execução, pois a alteração do processo de fabricação pode causar influência sobre o modo de falha em estudo. Também é necessário que as amostras sejam submetidas ao mesmo tipo de solicitação externa, englobando condições ambientais, condições de carregamento e mesmo condições de manutenção, caso seja previsto seu uso durante o ensaio, sendo que estas solicitações podem retratar uma condição normal de operação do produto, ou uma condição de operação mais severa, objetivando precipitar a ocorrência de falha.

Caso o objetivo do experimento seja definir a variação temporal da confiabilidade de um componente, equipamento ou produto ao longo de sua vida, recomenda-se obter o máximo de informações sobre o comportamento das unidades que compõem a amostra, e para tanto é necessária a execução do ensaio até o instante em que ocorre a falha de todas as unidades empregadas no experimento.

As análises não-paramétricas podem ser realizadas considerando-se duas formas de coleta de dados: agrupada ou não-agrupada.

Considera-se, até o momento, que estão sendo realizados testes completos de confiabilidade, onde todas as unidades falharam para que o experimento seja concluído.

No caso de dados agrupados, as quantidades de elementos que falharam estão agrupadas em intervalos de tempo correspondentes e não há informação do exato instante em que ocorreu a falha de um elemento específico, visto o teste considerar intervalos de tempo de falha nos quais são registradas as quantidades respectivas de elementos que falharam em cada um desses períodos.

Já nos testes utilizando dados não-agrupados, a partir da observação da seqüência de falha dos elementos da amostra são obtidos os tempos de falha para cada um dos seus componentes.

Sendo:

$N$  = número total de itens analisados;

$F(t)$  : estimativa da função distribuição acumulada;

$t_i$  : tempo em que observa-se a falha do  $i$ -enésimo elemento da amostra.

Calcula-se para  $t_i$  uma estimativa para o valor da função distribuição acumulada associada ao instante de falha:

$$F(t_i) = \frac{i}{N+1} \quad (3.9)$$

Esta estimativa representa o denominado “rank” médio da função distribuição acumulada.

Assim, a estimativa da confiabilidade  $R(t)$  é dada por:

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) \quad (3.10)$$

ou

$$R(t_i) = \frac{N+1-i}{N+1} \quad (3.11)$$

Para a função densidade de probabilidade  $f(t)$ , utiliza-se a seguinte estimativa:

$$f(t) = -\frac{R(t_{i+1}) - R(t_i)}{(t_{i+1} - t_i)}, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (3.12)$$

a qual é feita com base na definição de  $f(t)$ , ou seja,

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3.13)$$

apenas que, no caso em estudo, esta é definida em intervalos discretos de tempo.

Substituindo a equação (3.11) em (3.12), tem-se:

$$f(t) = -\frac{\left(\frac{N+1-(i+1)}{N+1}\right) - \left(\frac{N+1-i}{N+1}\right)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad (3.14)$$

ou

$$f(t) = -\frac{-1}{(N+1)(t_{i+1} - t_i)} \quad (3.15)$$



ou

$$f(t) = + \frac{1}{(t_{i+1} - t_i)(N+1)} \quad , \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (3.16)$$

A taxa de falha  $h(t)$  é estimada como segue:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad , \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (3.17)$$

Substituindo-se as equações (3.11) e (3.16) em (3.17), tem-se:

$$h(t) = \frac{1}{(t_{i+1} - t_i)(N+1)} \left( \frac{N+1-i}{N+1} \right) \quad (3.18)$$

Para o caso de dados não-agrupados, a estimativa do tempo médio até a falha (*mean time to failure* – MTTF) é dado por:

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (3.19)$$

ou seja, a própria média aritmética da amostra, a qual é o melhor estimador para a média da população.

A estimativa da variância do processo em estudo é dada por:

$$\sigma_x^2 = \frac{N}{N-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^2 - m_x^2 \right] \quad (3.20)$$

ou seja, emprega-se o melhor estimador para a variância da população a partir da análise de dados amostrais.

Para dados agrupados, sendo:

$N$  : número de elementos em análise;

$t_i$  : tempo onde é verificado o número de itens sobreviventes;

$n_i$  : número de itens sobreviventes no tempo  $t_i$ .

Para cada  $t_i$ , calcula-se:

$$R(t) = \frac{n_i}{N} \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (3.21)$$

onde  $M$  : número de intervalos de tempo onde são verificados os itens sobreviventes.

Da equação (3.21), verifica-se que a confiabilidade é a relação entre os números de itens sobreviventes até um determinado instante de tempo e o número de itens considerados inicialmente na análise.

A estimativa da função densidade de probabilidade  $f(t)$  é feita empregando-se os mesmos conceitos utilizados no desenvolvimento das formulações associadas à análise de dados não agrupados, ou seja:

$$f(t) = -\frac{R(t_{i+1}) - R(t_i)}{(t_{i+1} - t_i)}, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (3.22)$$

ou

$$f(t) = -\frac{\frac{n_{i+1}}{N} - \frac{n_i}{N}}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.23)$$

ou

$$f(t) = -\frac{n_i - n_{i+1}}{N(t_{i+1} - t_i)}, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (3.24)$$

Para a taxa de falha  $h(t)$ , estima-se:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (3.25)$$

ou

$$h(t) = \frac{\frac{n_i - n_{i+1}}{N(t_{i+1} - t_i)}}{\frac{n_i}{N}} \quad (3.26)$$

ou

$$h(t) = -\frac{n_i - n_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)n_i}, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (3.27)$$

A estimativa do MTTF é feita, para o caso de dados agrupados, como segue:

$$m_x = \sum_{i=1}^M t_i f_i \Delta_i \quad (3.28)$$

onde:

$\dot{t}_i = \frac{t_{i+1} + t_i}{2}$ , representa o valor médio do tempo associado ao  $i$ -ésimo intervalo de

observação de dados;

$\Delta_i = t_{i+1} - t_i$  , indica o i-ésimo intervalo temporal de observação dos dados;  
 $f_i$  é a estimativa da função densidade de probabilidade dos tempos de falha correspondente ao i-ésimo intervalo de tempo.

A variância é estimada:

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^M t_i^{-2} f_i \Delta_i - m_x^2 \quad (3.29)$$

### 3.5. Métodos para estimativa de parâmetros

Quando a análise paramétrica é a escolhida, o estudo visa estimar os parâmetros de uma função distribuição de probabilidade que supõe-se modelar o fenômeno em estudo, ou seja, a confiabilidade do componente ou sistema em análise.

Para execução da estimativa dos parâmetros de uma distribuição de probabilidade, pode-se optar por três métodos: método dos momentos, método da máxima verossimilhança e método gráfico.

Sendo que os parâmetros em questão são propriedades de uma distribuição de probabilidade, a qual rege o comportamento de uma dada população, ou seja, estes estão associados com o comportamento da população, e portanto fixos para uma população específica, deve-se considerar que dificilmente tem-se acesso a todos os elementos de uma população, e portanto deve-se obter estimativas dos parâmetros da distribuição a partir da análise dos dados de amostras retiradas de uma população.

Assim, a estimativa dos parâmetros da população é obtida em função da amostra retirada da população, e para cálculo da estimativa deve-se empregar uma formulação, a qual é denominada estimador.

No método dos momentos, a partir dos dados obtidos, com o estudo de uma amostra e com a utilização de formulações específicas, definem-se os momentos amostrais, que representam as estimativas dos momentos da população. A partir da formulação da distribuição de probabilidade que pretende-se empregar para representar a confiabilidade do produto em estudo, pode-se determinar os momentos da mesma, os quais são representados por fórmulas, dependentes dos parâmetros que norteiam a distribuição em estudo. Conhecendo-se o valor numérico dos momentos amostrais, pode-se igualá-los aos momentos da distribuição, ou seja, há uma igualdade entre os

valores numéricos e suas correspondentes formulações, obtidas da análise da distribuição. Dessa forma, tem-se um sistema de equações, cujas variáveis são os parâmetros da distribuição de probabilidade, sendo que a solução do sistema de equações fornece a estimativa dos parâmetros da distribuição que rege o comportamento da população da qual a amostra faz parte. Portanto, o sistema de equações acima citado deve ser composto por um número de equações igual ao número de parâmetros que caracterizam a função densidade de probabilidade em estudo.

O método dos momentos é bastante simples de ser aplicado, havendo a necessidade do cálculo dos momentos da amostra e dos correspondentes momentos da distribuição, formando um sistema de equações cuja solução fornece os parâmetros da distribuição. A maior dificuldade reside na solução do sistema de equações, que pode vir a ser bastante complexo, em função das formulações que permitem o cálculo dos momentos da distribuição.

Já o método da máxima verossimilhança permite a determinação de uma formulação denominada estimador, a qual permite o cálculo da estimativa de um parâmetro da população a partir dos valores de tempo até a falha definidos nos ensaios com as amostras, ou seja, a partir das características amostrais.

O método da máxima verossimilhança considera a existência de uma amostra de  $N$  elementos  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , extraída de uma população, cuja distribuição de probabilidade é regida por um parâmetro  $\theta$ , representada pela função densidade de probabilidade  $f(x/\theta)$ .

Considerando-se que o sorteio de cada um dos elementos da amostra representa um evento independente, ou seja, o sorteio de um dado valor amostral não influencia a probabilidade de ser sorteado o valor do componente seguinte, pode-se construir a função de verossimilhança,  $L(X_1, X_2, \dots, X_n/\theta)$ , como abaixo indicado:

$$L(X_1, X_2, \dots, X_n / \theta) = f(X_1 / \theta) \cdot f(X_2 / \theta) \dots f(X_n / \theta) = \prod_{i=1}^N f(X_i / \theta) \quad (3.30)$$

onde  $f(X_i/\theta)$  é a função densidade de probabilidade  $f(x/\theta)$  calculada no ponto  $X_i$ .

A função de verossimilhança representa a probabilidade da amostra ter sido extraída da população, cuja função densidade de probabilidade é regida pelo parâmetro  $\theta$ . O estimador para o parâmetro  $\theta$ , denominado  $\hat{\theta}$ , é aquele que maximiza a função de

verossimilhança, ou seja, maximizaria a probabilidade da amostra ter sido retirada de uma população com um parâmetro  $\theta$ , cujo estimador é  $\hat{\theta}$ .

Como a função de verossimilhança é dependente de  $\theta$ , para definir o ponto de máximo da mesma deve-se calcular a sua derivada parcial em relação a  $\theta$ , e igualando-a a zero, define-se as raízes da função, que são os possíveis pontos de máximo ou mínimo de uma função. Através da aplicação de conceitos de cálculo, define-se o ponto de máximo, o qual é representado por uma formulação, que representa o estimador de  $\theta$ , ou seja  $\hat{\theta}$ . Uma vez sorteada a amostra, define-se os valores numéricos de  $X_i$ , obtendo-se a estimativa de  $\hat{\theta}$ , ou seja, seu valor numérico, simplesmente com a aplicação da fórmula do estimador.

O terceiro método que pode ser empregado na estimação de parâmetros de uma distribuição de probabilidade é o denominado método gráfico. A essência deste método envolve a transformação da equação da função distribuição acumulada em uma equação de reta, do tipo:

$$Y = AX^* + B \quad (3.31)$$

Sendo que o parâmetro  $Y$  está relacionado com o valor numérico da função distribuição acumulada calculada em um ponto  $x_i$ , onde  $x_i$  é um possível valor da variável aleatória  $X$ . Já os coeficientes  $A$  e  $B$  estão relacionados com os parâmetros da distribuição de probabilidade em estudo. A variável  $X^*$  está diretamente relacionada com a variável  $X$ .

Portanto, neste método é necessário a transformação da função densidade de probabilidade, permitindo o cálculo dos valores  $X^*$  e  $Y$  e de posse dos pares  $(X^*, Y)$  pode-se aplicar o método dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes  $A$  e  $B$  e o próprio coeficiente de correlação. Caso o ajuste da reta seja considerado satisfatório, a partir dos coeficientes  $A$  e  $B$  define-se os parâmetros da distribuição de probabilidade que representa o fenômeno em estudo.

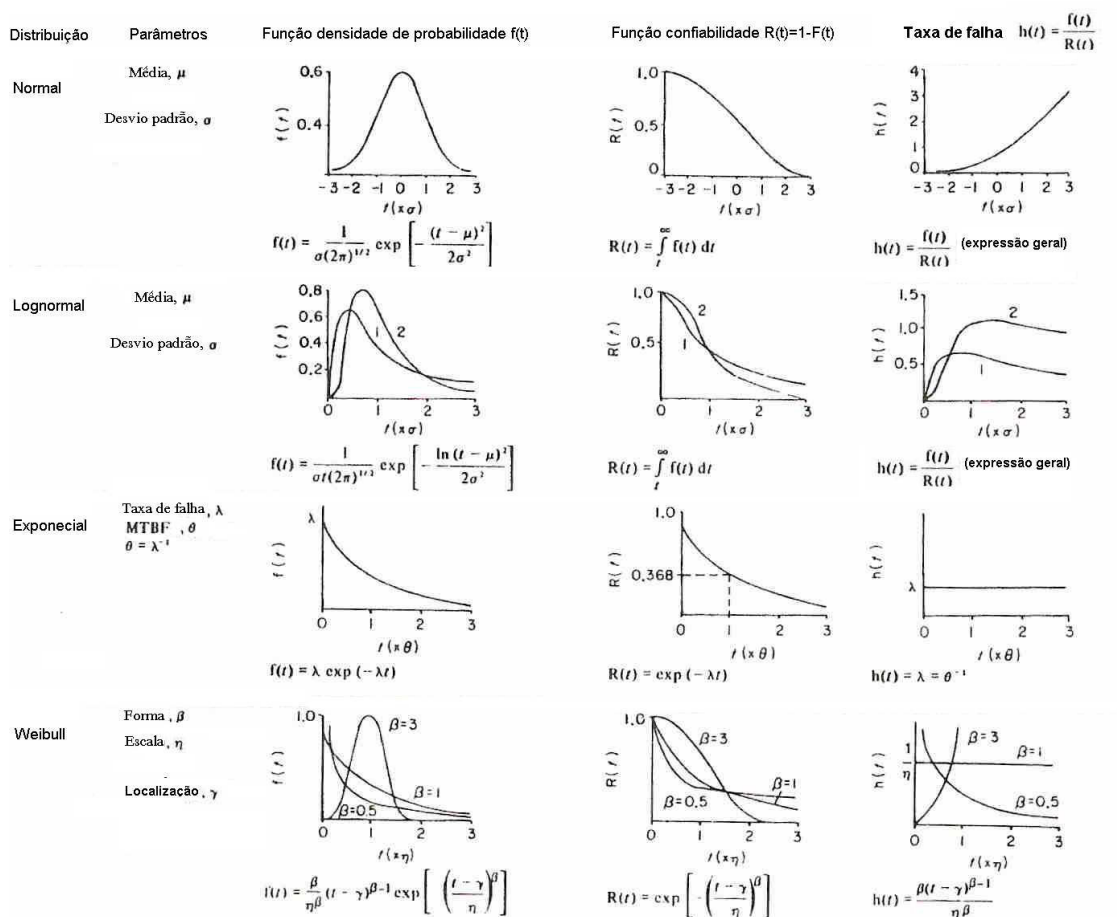
Visando facilitar a avaliação dos parâmetros de uma distribuição a partir dos métodos gráficos podem ser empregados os denominados papéis de probabilidade, os quais estão elaborados de forma a permitir ao usuário traçar de uma forma bastante simples a reta que representa o processo em análise. Existem papéis representando distribuições de probabilidade específicas.

As principais vantagens do método gráfico são a facilidade de seu emprego, que não demanda técnicas analítico-estatísticas mais complexas e, sobretudo, a possibilidade de visualizar o comportamento da série de dados no tocante a representatividade da distribuição assumida por hipótese e aumentar a compreensão do fenômeno estudado.

### 3.6. Principais distribuições de probabilidade

Para conduzir análises de confiabilidade sob o enfoque paramétrico, os principais modelos de distribuições de probabilidade utilizados, sendo adequadas a várias situações práticas, são: normal, exponencial, Weibull e log-normal.

A Figura 3.4 mostra a forma típica de representação destas distribuições.



**Figura 3.4 - Formato das funções de densidade de probabilidade, confiabilidade e taxa de falhas para algumas distribuições utilizadas em confiabilidade (O'Connor, 1991)**

### 3.6.1. Distribuição normal

Na distribuição normal, a função densidade de probabilidade (fdp) é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t - m_t}{\sigma_t} \right)^2 \right], -\infty \leq t \leq +\infty \quad (3.32)$$

sendo  $t$  a variável aleatória.

A distribuição normal é caracterizada por dois parâmetros: a média da população ( $m_t$ ) e o desvio padrão da população ( $\sigma_t$ ), considerando parâmetros os elementos que devem ser conhecidos para obter-se a completa definição de uma função densidade de probabilidade.

A função distribuição acumulada da distribuição normal é obtida pela execução da seguinte operação de integração:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t - m_t}{\sigma_t} \right)^2 \right] dt \quad (3.33)$$

Considerando as dificuldades envolvidas na integração da função densidade de probabilidade da distribuição normal, a função distribuição acumulada é dada em forma de tabela. Buscando à padronização desta tabela, apresenta-se a função distribuição acumulada a partir da denominada distribuição normal reduzida, para a qual tem-se: ( $m_t$ )= 0 e ( $\sigma_t$ )= 1.

O cálculo de probabilidade e da função distribuição acumulada baseado na utilização da distribuição normal reduzida é efetuado com o emprego das seguintes relações:

$$P(t < t_0) = F(t_0) = \Phi \left( \frac{t_0 - m_t}{\sigma_t} \right) \quad (3.34)$$

onde:

$\Phi$  = distribuição acumulada da distribuição normal reduzida;

$m_t$  = média da população;

$\sigma_t$  = desvio padrão da população.

A mudança de variável para expressar a distribuição normal reduzida, caracterizada por ( $m_t$ ) = 0; ( $\sigma_t$ ) = 1, é dada por:

$$u = \frac{t_0 - m_t}{\sigma_t} \quad (3.35)$$

A distribuição normal reduzida é encontrada em tabelas de publicações diversas, relacionadas à conceitos de probabilidade, estatística, controle de qualidade e confiabilidade, embora possa haver alguma variação na forma de apresentação dos dados.

O valor esperado ou média da distribuição é determinado utilizando a equação abaixo:

$$E[t] = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt = m_t \quad (3.36)$$

A variância é definida por:

$$Var[t] = E[t^2] - E^2[t] = \sigma_t^2 \quad (3.37)$$

Através deste resultado percebe-se que a distribuição normal é totalmente caracterizada pelos parâmetros média e variância.

A distribuição normal é simétrica, centrada na própria média da população, sendo coincidentes os valores da moda, mediana e média. Desta forma, tem-se que 50% da distribuição encontram-se à direita da média e os restantes 50% à esquerda desse parâmetro. Outrossim, as caudas da distribuição são abertas em ambas as extremidades, ou seja, para as situações em que a região de interesse para a análise de confiabilidade localiza-se próximo às caudas, qualquer variação nas condições dos dados experimentais implica em alterações sensíveis de probabilidade, o que influencia sobremaneira a análise de confiabilidade.

O achatamento da função distribuição de probabilidade é determinado pela variância, sendo que quanto maior este valor, maior será a dispersão da distribuição e mais achatada será a curva da função densidade de probabilidade.

Utiliza-se a distribuição normal, tipicamente, para representar erros de medição, variabilidade dimensional e propriedades mecânicas de materiais.

### 3.6.2. Distribuição exponencial

A distribuição exponencial se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante, e é a única com esta propriedade. É uma das mais simples em termos matemáticos e extensivamente utilizada como modelo para tempo de vida de produtos eletrônicos.



Empregada em casos onde as falhas ocorrem de forma aleatória com uma taxa fixa e sem um considerável mecanismo de desgaste, a função de densidade para o tempo de falha  $t$  com distribuição exponencial é dada por:

$$f(t) = (1/\alpha)e^{-t/\alpha}, t \geq 0 \quad (3.38)$$

onde  $\alpha \geq 0$  é o tempo médio de vida, ressaltando-se que o parâmetro  $\alpha$  tem a mesma unidade do tempo de falha  $t$ , ou seja, se  $t$  é medido em horas,  $\alpha$  também será medido em horas.

A função de confiabilidade  $R(t)$ , que é a probabilidade de o produto persistir além do tempo  $t$ , é dada para a distribuição exponencial por:

$$R(t) = e^{-t/\alpha} \quad (3.39)$$

Sendo a função de taxa de falha associada à distribuição exponencial constante e igual a  $1/\alpha$ , ou seja, uma unidade da amostra velha, que ainda não falhou, tem a mesma probabilidade de falhar em um intervalo futuro que uma unidade nova. Esta propriedade é chamada de falta de memória da distribuição exponencial.

### 3.6.3. Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente pelo pesquisador sueco Waloddi Weibull (1939) em estudos referentes ao tempo de falha devido a fadiga de metais e exposta posteriormente em outro estudo (1951) denominado “*A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*”, onde o modelo foi aplicado para tipos distintos de amostras, tais como: resistência a deformação e fadiga de aços, comprimento de fibras de algodão, estatura de homens adultos, entre outras (Weibull, 1951).

O modelo de Weibull é amplamente utilizado para descrever o tempo de vida de sistemas formados por vários componentes cuja falha ocorre quando um primeiro componente falhar, ou ainda como “uma corrente que falha como um todo se um de seus elos falhar” (Weibull, 1951).

Outro motivo pela preferência por este modelo em aplicações práticas, é o fato da distribuição de Weibull ser bastante flexível na descrição de processos aleatórios e permitir grande variedade de formas, sendo que todas apresentam uma propriedade básica, que é a função de taxa de falha monotônica, podendo ser decrescente,

constante ou crescente, sendo a única distribuição de probabilidade, dentre as analisadas, que pode ser utilizada na descrição de processos que correspondem aos três períodos da curva da banheira.

A função de densidade da distribuição de Weibull é dada por:

$$f(t) = (\beta/\eta^\beta)t^{\beta-1} \exp[-(t/\eta)^\beta] \quad , t \geq 0 \quad (3.40)$$

Tanto o parâmetro de forma  $\beta$  como o de escala  $\eta$  são positivos, contudo  $\eta$  apresenta a mesma unidade de  $t$ , enquanto o  $\beta$  não tem unidade.

Observa-se na representação gráfica da distribuição Weibull, que:

para valores de  $\beta < 1$  a função densidade de probabilidade é decrescente para um aumento de magnitude de  $t$ ;

para valores de  $\beta = 1$  a distribuição de Weibull é a própria distribuição exponencial;

para valores de  $\beta > 1$  a curva da função densidade de probabilidade apresenta picos bem definidos;

para valores de  $\beta = 3,44$  a distribuição de Weibull aproxima-se da distribuição normal (mediana=média).

A função de confiabilidade é dada por:

$$R(t) = \exp[-(t/\alpha)^\beta] \quad (3.41)$$

#### 3.6.4. Distribuição log-normal

A distribuição log-normal, bem como a distribuição de Weibull, também é utilizada para caracterizar tempo de vida de produtos e materiais, e é a que melhor descreve os mecanismos de falha por fadiga em materiais.

É bastante empregada em casos onde há um aumento do distanciamento entre os valores dos dados experimentais à medida que a magnitude dos mesmos aumenta.

A função de densidade de probabilidade para uma distribuição log-normal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}t\sigma} \exp\left\{-\frac{[\ln(t) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad , t \geq 0 \quad (3.42)$$

onde  $\mu$  é a média do logaritmo do tempo de falha, assim como o  $\sigma$  é o desvio-padrão no domínio logarítmico.

A relação entre as distribuições log-normal e normal facilita a apresentação e análise de dados provenientes da distribuição. Como o nome indica, o logaritmo natural de uma variável com distribuição log-normal com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  tem uma distribuição normal com média  $\mu$  e desvio-padrão  $\sigma$ . Esta relação significa que dados provenientes de uma distribuição log-normal podem ser analisados através da distribuição normal se utilizarmos o logaritmo natural dos dados ao invés de seus valores originais.

A confiabilidade de uma variável log-normal é dada por:

$$R(t) = \Phi\{-[\ln(t) - \mu]/\sigma\} \quad (3.43)$$

onde  $\Phi(\cdot)$  é a função da distribuição acumulada de uma distribuição normal padrão, ou seja, de uma normal com média igual a zero e desvio-padrão igual a um.

A escolha de um modelo, que descreva a distribuição do tempo de falha de um determinado componente, sistema ou produto, deve ser realizada com cautela, pois a utilização de forma inadequada de um modelo levará a conclusões errôneas nas estimativas de quantidades.

Portanto, é aconselhável que se determine, considerando as características de cada uma das distribuições, qual apresenta melhor aderência ao experimento, ou seja, fazendo a comparação das curvas de distribuição verifica-se qual modelo é assumido pela curva real encontrada.

### 3.7. Testes de aderência

A aderência pode ser testada estatisticamente através de três métodos: qui quadrado ( $\chi^2$ ), Kolmogorov-Smirnov (K-S) e coeficiente de correlação ( $R$ ).

O qui quadrado, ou  $\chi^2$ , é um teste de aderência muito versátil e utilizado para dados agrupados. Para maior credibilidade, é desejável que possua pelo menos três classes, sendo cada uma delas formada por pelo menos cinco dados da amostra, entretanto, pode ser dividida em  $n$  classes, de acordo com a necessidade que os valores impõem, para que se possa assumir uma correta distribuição (O'Connor, 1991).

A fórmula para cálculo para  $\chi^2$  é:

$$\chi^2 = \sum_i^n \frac{(x_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3.44)$$

onde:

$x_i$  = classificação do valor acumulado;

$E_i$  = classificação do valor estimado acumulado para a distribuição assumida.

A definição de elevado valor para  $\chi^2$ , tende a resultar em hipótese duvidosa, que é rejeitada quando o valor de  $\chi^2$  apresenta grau de confiança inferior ao desejado. Se  $\chi^2$  for inferior a este valor, a informação é insuficiente para rejeitar a hipótese de uma suposta distribuição de dados.

Outro teste de aderência, é o Kolmogorov-Smirnov, também conhecido como K-S. Sua utilização é tão simples quanto o teste  $\chi^2$ , e pode trazer melhores resultados com menor quantidade de informações.

É adequado no uso em conjunto com curvas probabilísticas, desde que baseado em uma classificação acumulada das informações, procedendo da seguinte forma:

- tabular a classificação dos intervalos de dados (calculando os valores de  $|x_i - E_i|$ ;
- determinar o valor máximo;
- comparar o valor com o valor apropriado de K-S.

O método dos mínimos quadrados é utilizado para medir a correlação linear da informação com a equação da reta com melhor aderência aos dados inseridos. A linha mais próxima a distribuição apresentada pelos dados é chamada de linha de retorno, e a aderência obtida pelo método dos mínimos quadrados, chamado de coeficiente de correlação.

O coeficiente de correlação é:

$$R = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (3.45)$$

onde

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.46)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.47)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.48)$$

sendo  $x_i, y_i$  são coordenadas de inserção de dados.

A linha de retorno de inserção de dados é dada por:

$$(y - \bar{y}) = \frac{S_{xy}}{S_x^2} (x - \bar{x}) \quad (3.49)$$

Se  $R$  for positivo, indicará uma correlação de dados positiva com reta de retorno crescente; subentende-se que se  $R$  for negativo, indicará uma correlação negativa com reta de retorno decrescente; se  $R$  for igual um, indicará uma perfeita correlação, com todos os pontos inseridos na linha de retorno; se  $R$  for igual a zero, as variáveis não serão correlacionadas linearmente.

O coeficiente de determinação  $R^2$ , é freqüentemente usado em substituição ao  $R$  para indicar a correlação, apresentando uma indicação mais precisa, particularmente na inserção probabilística de dados. Este valor determina o quanto a variação do fenômeno em estudo é explicada pelo modelo linear, ou seja, por uma equação de reta.

A regressão linear pode ser usada para informações de correlações não lineares se  $x$  for transformado para tornar linear a equação. Portanto, o método pode ser utilizado para estimar a aderência dos dados inseridos em papéis de probabilidade.

### 3.8. Censura

A censura à direita, em referência ao fato de que o tempo normalmente é indicado no eixo horizontal em representações gráficas <sup>(Lewis, 1994)</sup>, ocorre quando em análises de confiabilidade deseja-se que o teste seja encerrado antes da falha de todos os elementos, ou então necessita-se de análises intermediárias do teste.

A censura aleatória ocorre quando algum elemento da amostra é removido antes da ocorrência da falha ou quando a falha ocorre por um mecanismo não relevante para o análise que está sendo efetuada.

Um método amplamente utilizado para tratamento de dados com censura aleatória, principalmente na área médica, é o baseado no trabalho de E. Kaplan e P. Meier publicado em 1958 denominado “*Nonparametric Estimation From Incomplete Observations*” (apud Luko, 1999).

O procedimento sugerido por Kaplan-Meier (K-M) estima a probabilidade de sobrevivência ou a confiabilidade a cada tempo de falha na amostra, utilizando uma análise básica de probabilidade. Uma vez calculada, a confiabilidade estimada pode ser utilizada para determinar os parâmetros de um modelo de distribuição, por exemplo, utilizando o método de regressão linear.

O método K-M é uma adaptação da função de confiabilidade empírica, que na ausência de censura, é definida como:

$$R(t) = \frac{\text{n}^\circ \text{ de itens em operação até o tempo } t}{\text{n}^\circ \text{ de itens sob teste}} \quad (3.50)$$

Sendo que  $R(t)$  é uma função escada com degraus nos tempos observados de falha.

O método K-M mantém a mesma forma da função de confiabilidade da equação (3.50) onde todas as censuras ocorrem no final do acompanhamento.

O estimador de Kaplan-Meier da função de confiabilidade  $R(t)$  é definido como:

$$R(t \geq t_n) = \prod_{i=1}^n ((n_i - f_i) / n_i) \quad (3.51)$$

Onde:

$f_i$  = número de falhas no tempo  $t_i$

$n_i$  = número de elementos sob risco (não falhou e não foi censurado) em  $t_i$  (exclusive)

Ocorrendo censuras e falhas simultâneas, convencionou-se que os tempos de censura ocorrem imediatamente após os tempos de falha.

Abaixo apresenta-se um exemplo de aplicação do estimador K-M <sup>(Albernethy, 2000)</sup> para uma amostra:

Supondo que oito elementos são colocados em teste, sendo que a tipologia de falha pesquisada ocorre nos tempos de 100, 300, 400, 500 e 600 horas. Dois elementos são retirados sem falhas para exame com 200 e 400 horas. O oitavo elemento continua em teste com tempo acima de 600 horas.

Obtem-se as estimativas de:

$$R(t > 100) = (7/8) = 0,875$$

$$R(t > 300) = (7/8) \times (5/6) = 0,729$$

$$R(t > 400) = (7/8) \times (5/6) \times (4/5) = 0,583$$

$$R(t > 500) = (7/8) \times (5/6) \times (4/5) \times (2/3) = 0,389$$

## 4. MÉTODO DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

### 4.1. Metodologia proposta para análise de confiabilidade de pneus em frotas

Esta metodologia foi desenvolvida para a análise de confiabilidade de pneus radiais em frotas de transporte de carga rodoviário, embora esta possa ser empregada no estudo da confiabilidade de pneus empregados em outros tipos de veículos.

O procedimento de análise de confiabilidade ora proposto, baseia-se em quatro etapas básicas, as quais são: coleta de dados, análise dos percentuais de perdas das falhas da amostra, identificação das causas prováveis e cálculo do tempo para menor custo de substituição. As atividades envolvidas em cada uma destas fases são descritas abaixo.

Coleta de dados:

- Obter os dados de tempo de exposição ou uso do produto até o momento que for constatada a falha: a data de fabricação do pneu pode ser identificada pela indicação da semana de fabricação existente na série DOT (*Department of Transportation*) gravada no flanco do pneu, sendo a diferença entre a data de remoção e data de fabricação considerada como o tempo de uso do produto. O pneu deve ser excluído da amostra se não for de fabricação nacional ou tiver sido utilizado como estepe.
- Analisar e classificar as falhas segundo um padrão claramente definido: a classificação adotada é a apresentada pela Associação TMC –*Technology & Maintenance Council* no *Recommended Maintenance Practices Manual 2004-2005* (TMC, 2004).
- Utilizar amostras com mais de 40 falhas. A quantidade mínima de 20 falhas em uma amostra é a recomendada na literatura pesquisada (O'Connor, 1991) e (Abernethy, 2000) para uma análise adequada utilizando o modelo de distribuição de Weibull, no entanto, neste estudo obteve-se melhores coeficientes de determinação com amostras maiores do que 40 falhas.

Análise dos percentuais de perda das falhas da amostra:

- Calcular o percentual de perda para cada tipo de falha, utilizando a fórmula (4.7)

- Identificar as falhas que apresentam os maiores percentuais de falha positivos, pois são as que causam as maiores perdas econômicas para a frota.

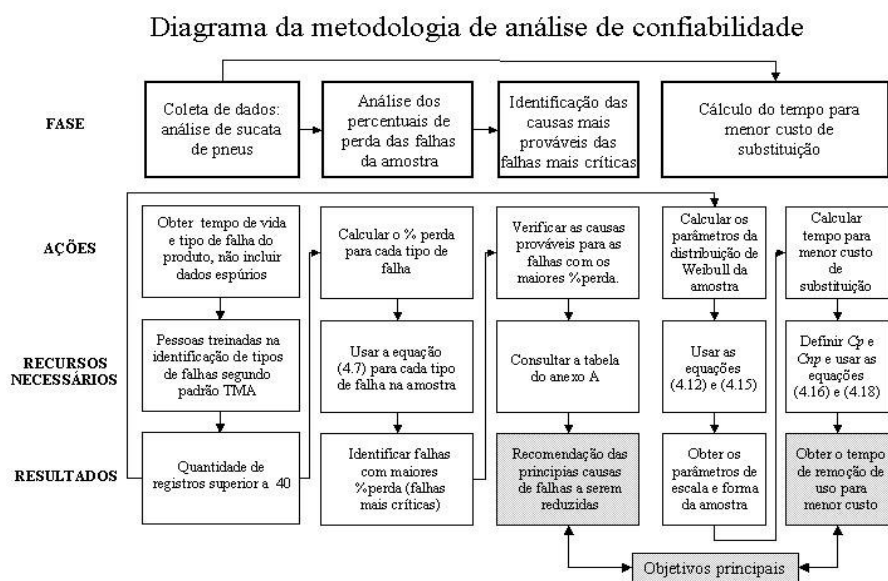
Identificação das causas prováveis:

- Verificar no Anexo A quais as causas prováveis para as falhas com os maiores percentuais de falha positivos. Recomenda-se a redução destas causas por medidas implementadas pela frota (treinamento, plano de manutenção preventiva, compra ou revisão de equipamentos, novas rotas, entre outras).

Cálculo do tempo para menor custo de substituição:

- Calcular os parâmetros de forma ( $\beta$ ) e escala ( $\eta$ ) da distribuição de Weibull bi-paramétrica para os dados da amostra. Para facilidade de cálculo em campo recomenda-se o uso das expressões (4.12) e (4.15), que são válidas para valores de  $1 \leq \beta \leq 10$ .
- Definir o tempo para menor custo/tempo de substituição do produto. Para tanto, deve-se minimizar  $C(t)$  definido na equação (4.16). Recomenda-se obter graficamente o valor do tempo para valor mínimo de  $C(t)$ . A equação (4.18) (Lafraia, 2001) pode também ser utilizada para estimativa do tempo de substituição ( $T$ ) para custo mínimo.

A Figura 4.1 (reproduzida no anexo B) apresenta um diagrama da metodologia indicando as fases da análise e suas principais ações, recursos necessários, resultados e objetivos principais.



**Figura 4.1 – Diagrama apresentando as fases da metodologia de confiabilidade**



## 4.2. Coleta e classificação dos dados

No exame dos pneus retirados de uso não são encontrados produtos que falharam precocemente por causas decorrentes de defeitos de fabricação, visto que tais pneus, quando detectados pela frota, são reclamados aos fabricantes e, sendo analisados e aceitos como defeito de fábrica, são enviados aos mesmos como parte das ações do processo de garantia do produto.

A classificação dos tipos de falha segue a recomendação do *Recommended Maintenance Practices Manual* <sup>(TMC, 2004)</sup>, devendo os pneus ser analisados por equipe capacitada na identificação dos diversos tipos de falha.

O tempo de uso de cada pneu inspecionado é considerado como a diferença de tempo em meses entre a data de fabricação do pneu (indicada na forma de semana e ano de produção na série DOT) e a data de inspeção, esta última coincide com o mês de retirada do produto de uso devido à sua falha.

O tempo de prateleira do produto é desprezado, visto que as empresas de transporte e seus fornecedores mantêm pequeno estoque destes pneus. Esta hipótese deve ser avaliada em função do tipo de pneu e uso considerado no estudo.

Ainda com o objetivo de evitar superdimensionar o tempo de exposição, foram analisados somente de pneus de fabricação nacional, evitando o uso de tempos de exposição maiores devido ao acréscimo do tempo de transporte e desembaraço alfandegário para o mercado nacional.

A utilização do tempo de exposição em lugar da quilometragem percorrida foi adotada pela melhor precisão e facilidade na obtenção deste dado, visto que muitas empresas não possuem um controle preciso da quilometragem percorrida por cada pneu durante sua vida útil, principalmente em frotas de caminhões e semi-reboques para transporte rodoviário de carga, nas quais parte da vida dos pneus pode ser utilizada em semi-reboques que não possuem um dispositivo independente para monitoração da quilometragem percorrida.

Ressalta-se que, em função do caso exemplo deste trabalho, ou seja, a análise de pneus radiais empregados em frotas de transporte de carga rodoviária, serão utilizados registros relativos a pneus de medida 295/80R22.5.

### 4.3. Desenvolvimento da equação para cálculo do percentual de perda

Na proposta de metodologia não paramétrica, para cada tipo de falha é calculada uma perda percentual causada por cada categoria de falha em relação à média de tempo de serviço da amostra total.

Para definir a perda percentual, considera-se qual a média de vida que a amostra apresenta quando a falha em análise é totalmente erradicada, considerando então a variação percentual entre esta e a média de vida da amostra antes da eliminação da falha.

A equação para cálculo do percentual de perda pela falha em análise é demonstrada abaixo:

$\% \text{ perda}$  = percentual de perda pela falha em análise

$Mt$  = média do tempo de vida da amostra total

$Mf$  = média do tempo de vida dos pneus retirados pela falha em análise

$Mnf$  = média do tempo de vida dos pneus retirados por falhas diferentes da analisada

$Nt$  = número total de falhas na amostra analisada

$Nf$  = número de falhas pela causa em análise

$Nnf$  = número de falhas dos pneus retirados por falhas diferentes da analisada

$\Sigma t$  = somatória do tempo de vida de todas as amostras

$\Sigma f$  = somatória do tempo de vida dos pneus que falharam pela falha em análise

$\Sigma nf$  = somatória do tempo de vida dos pneus que não falharam pela falha em análise

Tem-se que:

$$\Sigma t = \Sigma f + \Sigma nf \quad (4.1)$$

$$Nt = Nf + Nnf \quad (4.2)$$

$$Mt \times Nt = Mf \times Nf + Mnf \times Nnf \quad (4.3)$$

Portanto a média de vida dos pneus retirados por falhas diferentes da analisada, que será a média da amostra supondo a erradicação da falha em análise, é calculada por:

$$Mnf = \frac{Mt \times Nt - Mf \times Nf}{Nt - Nf} \quad (4.4)$$

A variação percentual da média de vida da amostra anterior e posterior à erradicação da falha em análise será dada por:

$$\% \text{ perda} = \frac{Mnf - Mt}{Mt} \quad (4.5)$$

Substituindo-se (4.4) em (4.5):

$$\% \text{ perda} = \frac{\frac{Mt \times Nt - Mf \times Nf}{Nt - Nf} - Mt}{Mt} \quad (4.6)$$

Simplificando tem-se:

$$\% \text{ perda} = \frac{(Mt - Mf) \times Nf}{Mt \times (Nt - Nf)} \quad (4.7)$$

Percentuais de perda positivos indicam falhas que apresentam vida média inferior à média geral e portanto reduzem a média geral antes da erradicação da falha.

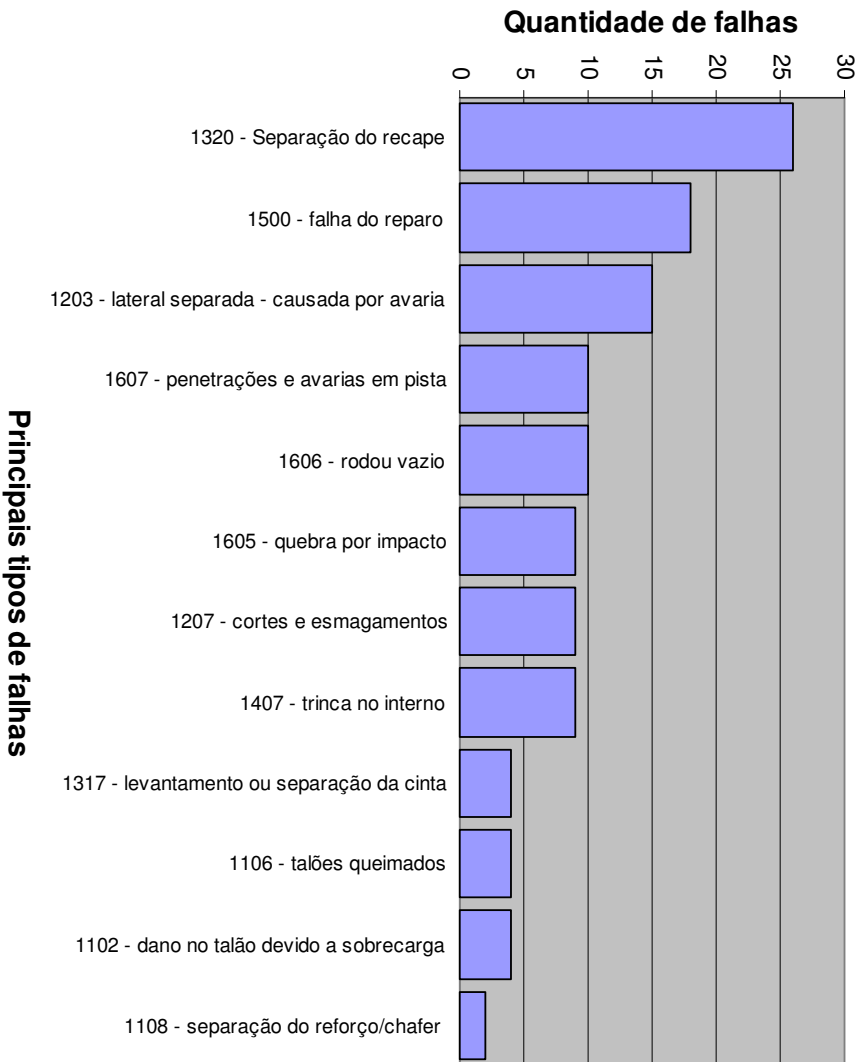
Quanto maior o percentual de perda, maior a necessidade de contra-medidas para a redução desta falha e conseqüentemente maiores possibilidades de redução de custo com pneus devido ao aumento de sua vida útil.

#### 4.4. Apresentação e exemplo de cálculo de método de análise de sucata trivial

Atualmente a análise de sucata de pneus é efetuada em frotas por pessoal próprio ou de terceiros, tais como representantes de reformadores, fabricantes ou vendedores de pneus, sendo usualmente elaborado um relatório onde são apresentadas as quantidades de pneus que falharam por cada tipo de falha, e apresentadas algumas medidas corretivas para as falhas de maior incidência.

Um exemplo deste método não paramétrico é descrito abaixo:

Foram analisados 127 pneus na Frota 01 (valores de tempo e tipos de falha listados no Anexo C), sendo que a distribuição das principais falhas é apresentada no gráfico de Pareto da Figura 4.2. Observa-se no gráfico que cinco tipos de falhas foram responsáveis pela retirada de uso de 79% da amostra. As principais causas de falhas, e portanto sujeitas a contra-medidas, estão indicadas na Tabela 4.1 (extraída do Anexo A).



**Figura 4.2 - Pneus examinados na Frota 01**

**Tabela 4.1 - Falhas e suas causas prováveis  
(exemplo do método de análise trivial)**

código	descrição	pressão baixa	sobrecarga	impacto	penetrações ou cortes	corte no talão ou interior	migração de ar	reparo ou escareação inadequado	falha do recape
1320	separação do recape						X	X	X
1500	falha do reparo							X	
1203	separação no flanco causada por avaria			X	X	X			
1607	penetrações e avarias em pista				X				
1606	rodou vazio	X	X						

As principais deficiências deste tipo de tratamento dos dados e apresentação dos resultados da análise de sucata são:

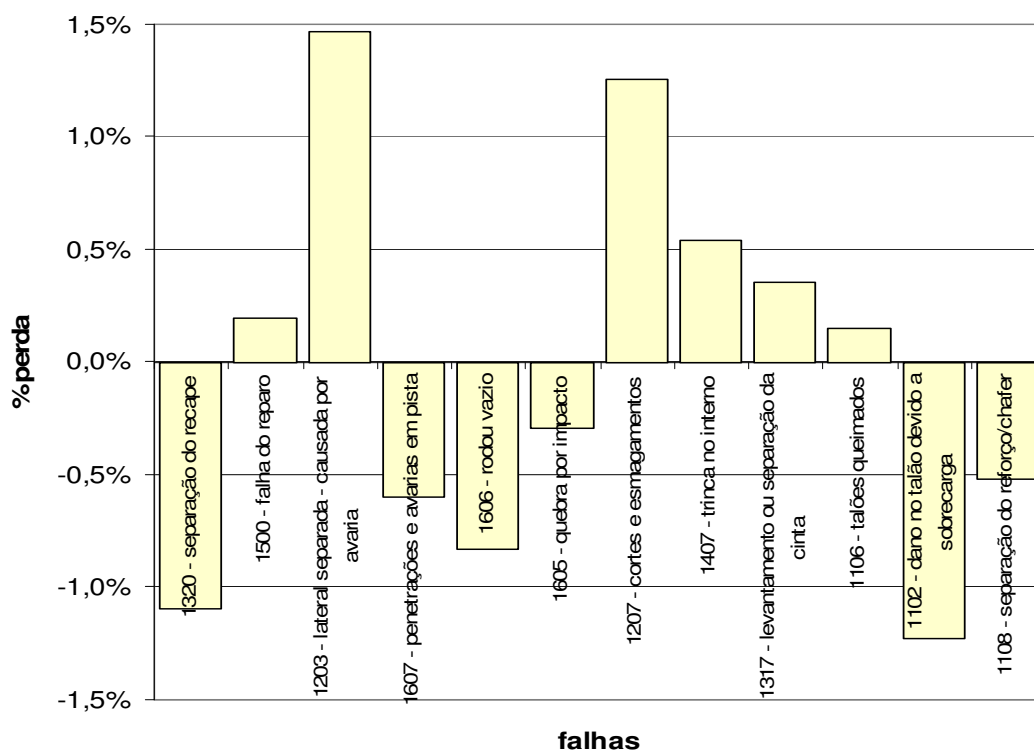
- Não classificar as falhas de acordo com o tempo de serviço que o produto ofereceu até sua remoção, sendo que uma falha prematura pode se apresentar em menor proporção mas acarretar perdas econômicas maiores à empresa do que aquela que ocorre quando o produto já apresenta longo tempo de serviço. Ao indicar como mais grave uma falha que não é a que leva a maiores perdas, serão adotadas contra-medidas não focadas em reduzir as perdas econômicas devido às falhas mais precoces.
- Não quantificar e comparar perdas econômicas causadas por cada tipo de falha.

#### 4.5. Exemplo de cálculo do método de análise pelo percentual de perda

Calculando o percentual de perda para as tipologias de falha da amostra de pneus sucata da Frota 01, tem-se os índices indicados na Tabela 4.2 e representados na Figura 4.3.

**Tabela 4.2 - Falhas e causas prováveis (exemplo de método proposto)**

amostra	no. de falhas	média de vida (meses)	% perda
TOTAL	127	30,79	
1320 - separação do recape	26	32,11	-1,1%
1500 - falha do reparo	18	30,43	0,2%
1203 - lateral separada - causada por avaria	15	27,42	1,5%
1607 - penetrações e avarias em pista	10	32,95	-0,6%
1606 - rodou vazio	10	33,78	-0,8%
1605 - quebra por impacto	9	31,97	-0,3%
1207 - cortes e esmagamentos	9	25,72	1,3%
1407 - trinca no interno	9	28,61	0,5%
1317 - levantamento ou separação da cinta	4	27,44	0,4%
1106 - talões queimados	4	29,38	0,1%
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	4	42,44	-1,2%
1108 - separação do reforço/chafer	2	40,75	-0,5%



**Figura 4.3 - Principais causas de falhas na Frota 01  
(exemplo de método proposto)**

Verifica-se que as falhas que apresentam as maiores perdas não necessariamente tem o maior número de ocorrências e portanto induzem a conclusões diferentes das apresentadas pelo método trivial mostrado anteriormente.

Da análise dos percentuais de perda de cada tipo de falha, conclui-se que as principais causas prováveis a serem reduzidas para um maior aumento da vida média total são as relacionadas na Tabela 4.3 (extraída do Anexo A).

**Tabela 4.3 - Falhas e causas prováveis (exemplo de método proposto)**

código	descrição	pressão baixa	sobrecarga	roçamento	impacto	penetrações ou cortes	corte no talão ou interior	vandalismo	operação muito fria	aquecimento excessivo no interior do pneu
1203	separação no flanco causada por avaria				X	X	X			
1207	cortes e esmagamentos no flanco			X		X		X		
1407	trinca no interior	X							X	X
1317	levantamento ou separação da cinta	X	X		X	X				

#### 4.6. Verificação do modelo probabilístico mais adequado aos tempos de falha

Seguindo a metodologia de coleta de dados descrita no item 4.2, são analisadas amostras colhidas em 10 diferentes frotas.

As frotas que geraram as sucatas de pneus analisadas têm suas matrizes localizadas nas regiões sul e sudeste do Brasil, operando no mesmo tipo de atividade, transporte rodoviário de carga utilizando caminhões e semi-reboques, variando no entanto o tipo de carga transportada e região geográfica de atuação.

Segundo O'Connor <sup>(O'Connor, 1991)</sup> um método eficaz para verificar a adequação dos dados a uma distribuição estatística contínua é verificar o valor do parâmetro de forma da distribuição de Weibull.

Sendo o valor próximo do parâmetro de forma (beta) próximo a 3,5, verifica-se a adequação dos dados ao modelo normal, e estando beta entre os valores 2,5 e 3,5 deve-se avaliar a adequação à distribuição log-normal, e sendo beta próximo a 1 a distribuição mais adequada é a exponencial.

Os valores dos parâmetros para os modelos probabilísticos Weibull e log-normal para as amostras de sucata das 10 frotas analisadas são relatados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Parâmetros das distribuições de log-normal e Weibull das amostras de sucatas das 10 frotas analisadas**

Frota	número de falhas	Weibull			Log-normal (parâmetros no domínio logarítmico)		
		R <sup>2</sup>	beta	eta	R <sup>2</sup>	desvio	média
Frota 01	127	0,972	3,7	34,1	0,965	0,3	29,3
Frota 02	122	0,958	2,5	44,1	0,911	0,5	35,2
Frota 03	114	0,972	2	33,2	0,896	0,7	25,1
Frota 04	83	0,966	2,4	50,9	0,881	0,5	40,4
Frota 05	76	0,949	2,6	55,8	0,887	0,5	45,2
Frota 06	62	0,876	3,9	51,1	0,764	0,3	44,4
Frota 07	57	0,84	5,3	43	0,795	0,2	38,8
Frota 08	53	0,938	2,6	31,2	0,956	0,5	25,3
Frota 09	41	0,932	2,5	38,5	0,981	0,5	31,1
Frota 10	22	0,844	3,5	42,2	0,742	0,4	36,4

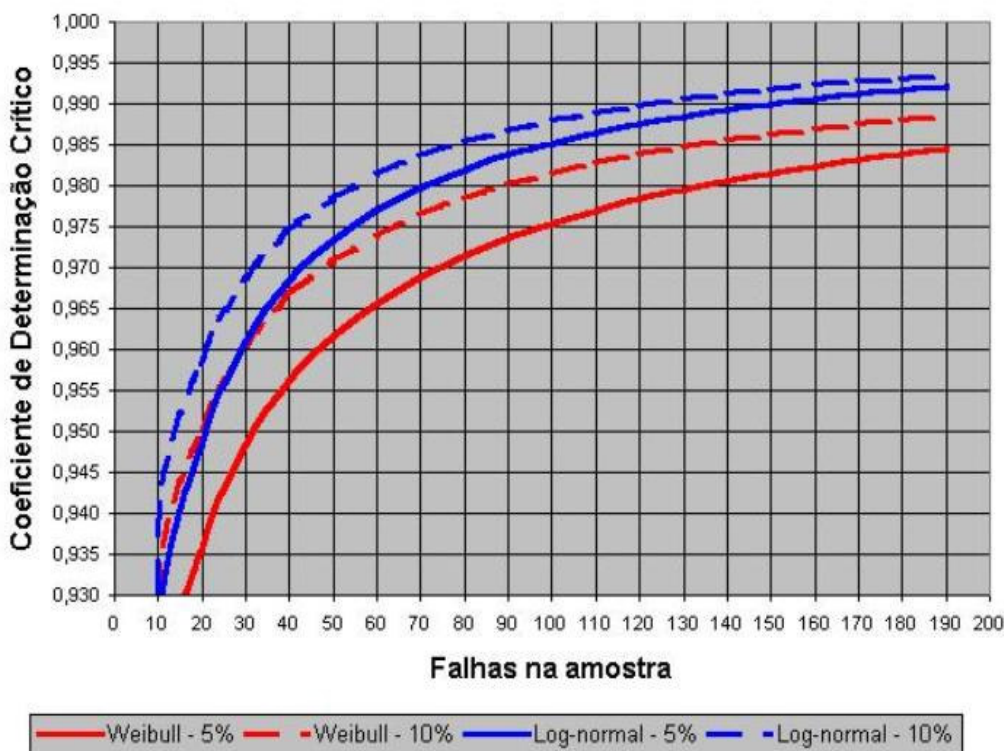
As Frotas 01 e 10 apresentam parâmetro beta próximo a de uma curva normal e as Frotas 08 e 09 apresentam coeficiente de determinação maior do que o apresentado

pela distribuição de Weibull, sendo seus dados melhor representados pela distribuição log-normal.

Quando comparados os valores dos coeficientes de determinação obtidos para as distribuições de Weibull e log-normal, os maiores valores obtidos com a distribuição de Weibull indicam que esta é a mais adequada para representar os dados das distribuições em geral.

Sobre o tema comparação de coeficientes de determinação para distribuições de Weibull e log-normal, o trabalho de Tarum <sup>(Tarum, 1999a)</sup> define objetivamente quão alto o coeficiente de determinação deve ser para garantir a aderência dos dados de uma amostra a um modelo de distribuição. Tarum define os coeficientes mínimos para garantir a aderência aos modelos de Weibull e log-normal nos níveis de significância de 10% e 5% para grupos de amostras geradas pelo método de Monte Carlo para vários tamanhos de amostra (falhas na amostra).

Como o exemplificado na Figura 4.4 os coeficientes de determinação para distribuições de Weibull de dois parâmetros são menores que para distribuições log-normais com o mesmo número de falhas para o mesmo nível de significância.



**Figura 4.4 - Coeficientes de determinação críticos para distribuições de Weibull bi-paramétricas e log-normal** <sup>(Tarum, 1999a)</sup>



#### 4.7. Método de cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull bi-paramétrica - método CV

A verificação dos parâmetros de distribuição de Weibull para as amostras de sucata analisadas, quando efetuada pelo método dos mínimos quadrados ou pelo método da máxima verossimilhança, pode ser efetuada utilizando planilhas eletrônicas ou programas desenvolvidos especificamente para este uso.

Para análises rápidas em campo, muitas vezes sem o auxílio de um computador, o cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull é de difícil execução quando utilizando os métodos acima citados.

Uma alternativa prática para o uso em campo é o uso de papel de probabilidade de Weibull, no entanto esta alternativa também torna-se morosa quando a quantidade de elementos na amostra não é pequena, fato este desejável na análise de pneus sucata.

Com o objetivo de facilitar o cálculo dos parâmetros de forma e posição da distribuição de Weibull bi-paramétrica, é sugerido a seguir um método que utiliza a média e o desvio padrão da amostra afim de calcular os parâmetros da distribuição de Weibull.

##### 4.7.1. Cálculo do parâmetro de forma da distribuição de Weibull – método CV

Temos para a distribuição de Weibull que a média de uma amostra  $\mu$  é dada por:

$$\mu = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4.8)$$

onde  $\beta$  e  $\eta$  são respectivamente os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull e  $\Gamma(x)$  a função gama de  $x$ .

A variância da amostra ( $\sigma^2$ ) por sua vez é definida por:

$$\sigma^2 = \eta^2 \times \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 \right] \quad (4.9)$$

O coeficiente de variação (CV) que é definido como a razão entre o desvio padrão ( $\sigma$ ) e a média da amostra é calculado por:

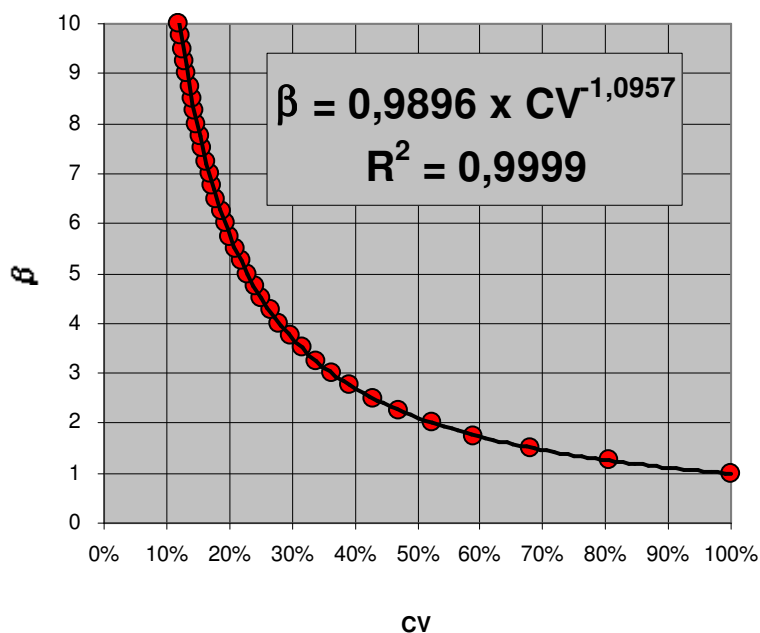
$$CV = \frac{\sqrt{\eta^2 \times \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 \right]}}{\eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4.10)$$

Simplificando tem-se:

$$CV = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4.11)$$

Conclui-se que existe uma função biunívoca entre o coeficiente de variação ( $CV$ ) e o parâmetro de forma da distribuição de Weibull ( $\beta$ ).

O gráfico da Figura 4.5 apresenta pontos definidos entre  $1 \leq \beta \leq 10$  pela equação (4.11). Com o objetivo de definir uma fórmula para cálculo de beta que apresente maior facilidade de cálculo em campo, foi verificada uma função que apresentasse uma boa aderência a aquela representada pelos valores de beta e respectivos coeficientes de variação.



**Figura 4.5 – Correlação entre coeficiente de variação e parâmetro de forma da distribuição de Weibull**

Temos então uma fórmula de conversão de coeficiente de variação da amostra para o parâmetro de forma da distribuição de Weibull para valores de  $1 \leq \beta \leq 10$ , dada por:

$$\beta = 0,9896 \times CV^{-1,0957} \quad (4.12)$$

#### 4.7.2. Cálculo do parâmetro de escala da distribuição de Weibull – método CV

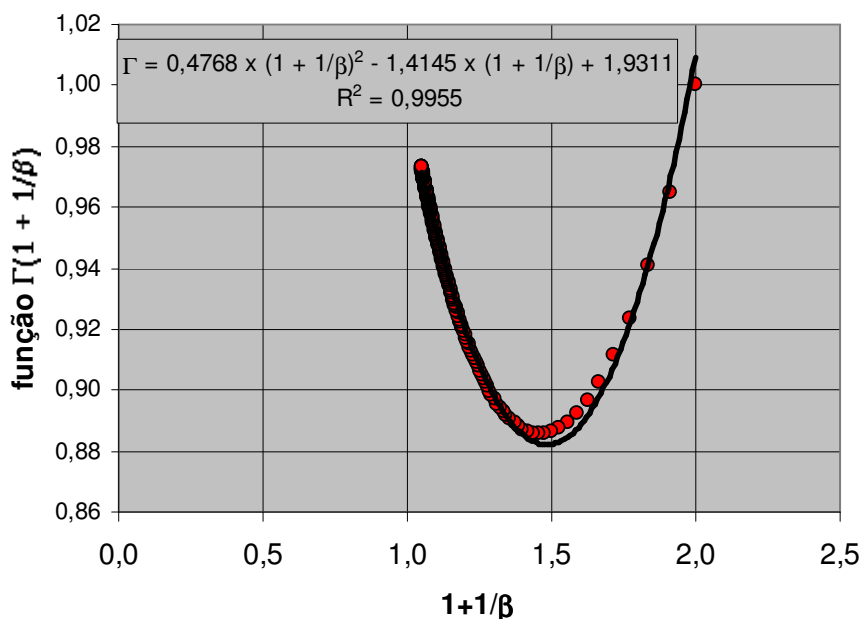
Tem-se para a distribuição de Weibull que a média de uma amostra  $\mu$  é dada por:

$$\mu = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4.13)$$

Portanto:

$$\eta = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4.14)$$

O gráfico da Figura 4.6 apresenta valores de eta e função  $\Gamma(1+1/\beta)$ , utilizando a equação (4.14), definidos entre  $1 \leq \beta \leq 10$ . Com o objetivo de definir uma fórmula para cálculo de eta que facilite o cálculo em campo, foi verificada uma função que apresentasse uma boa aderência a aquela representada pelos valores de eta e respectivos valores da função  $\Gamma(1+1/\beta)$ .



**Figura 4.6 – Correlação entre parâmetro beta e função gama**

Tem-se então uma fórmula para cálculo do parâmetro de escala da distribuição de Weibull para valores de  $1 \leq \beta \leq 10$ , dada por:

$$\eta = \frac{\mu}{0,4768 \times \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 - 1,4145 \times \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + 1,9311} \quad (4.15)$$

#### 4.8. Distribuição de dados nas frotas e respectivas distribuições de Weibull

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos parâmetros das distribuições obtidos por frota, com as respectivas quantidades de pneus analisados, parâmetros de forma (beta) e dispersão (eta) da distribuição de Weibull de dois parâmetros, calculados pelos métodos dos mínimos quadrados, da máxima verossimilhança e pelo método CV (apresentado no item 4.7).

**Tabela 4.5 - Resumo dos parâmetros das distribuições de Weibull bi-paramétrica para as dez frotas resultantes de três métodos de cálculo**

Frota	número de falhas	método dos mínimos quadrados			método da máxima verossimilhança		Método CV	
		beta	eta	R <sup>2</sup>	beta	eta	beta	eta
Frota 01	127	3,7	34,1	0,972	3,4	34,2	3,5	34,2
Frota 02	122	2,5	44,1	0,958	2,8	43,8	2,7	43,8
Frota 03	114	2,0	33,2	0,972	2,2	32,6	2,2	32,7
Frota 04	83	2,4	50,9	0,966	2,8	50,0	2,8	50,1
Frota 05	76	2,6	55,8	0,949	3,0	55,0	3,0	55,0
Frota 06	62	3,9	51,1	0,876	4,9	49,8	5,0	49,9
Frota 07	57	5,3	43,0	0,840	4,8	42,6	6,0	42,5
Frota 08	53	2,6	31,2	0,938	2,7	31,1	2,7	31,1
Frota 09	41	2,5	38,5	0,932	2,3	38,8	2,3	38,7
Frota 10	22	3,5	42,2	0,844	5,7	40,6	5,2	40,7

Nas frotas 06, 07 e 10 observa-se as maiores discrepâncias entre os valores dos parâmetros de forma, calculados pelos três métodos, ocorrendo também para estas amostras os menores coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Os valores de parâmetros obtidos pelo método CV são mais próximos dos calculados pelo método dos mínimos quadrados.

Segundo Abernethy <sup>(Abernethy, 2000)</sup> o método dos mínimos quadrados é o preferido nas aplicações de engenharia por ser de mais simples cálculo que o da verossimilhança e também por permitir uma melhor visualização gráfica da distribuição dos dados.

O método CV é de mais fácil cálculo, no entanto também carece de uma melhor visualização gráfica e não permite a avaliação da adequação do modelo aos dados por meio de um parâmetro como o coeficiente de determinação.

#### 4.9. Principais falhas observadas no exame de sucata

A Tabela 4.6 indicada abaixo, relaciona os principais tipos de falhas verificados nos exames de sucata efetuados em 10 frotas que utilizam caminhões para transporte de longa distância. Em cada exame de sucata foram examinados pelo menos 20 pneus, que é a quantidade mínima de falhas em uma amostra considerada adequada neste estudo (O'Connor, 1991) e (Abernethy, 2000).

**Tabela 4.6 - Principais tipos de falhas**

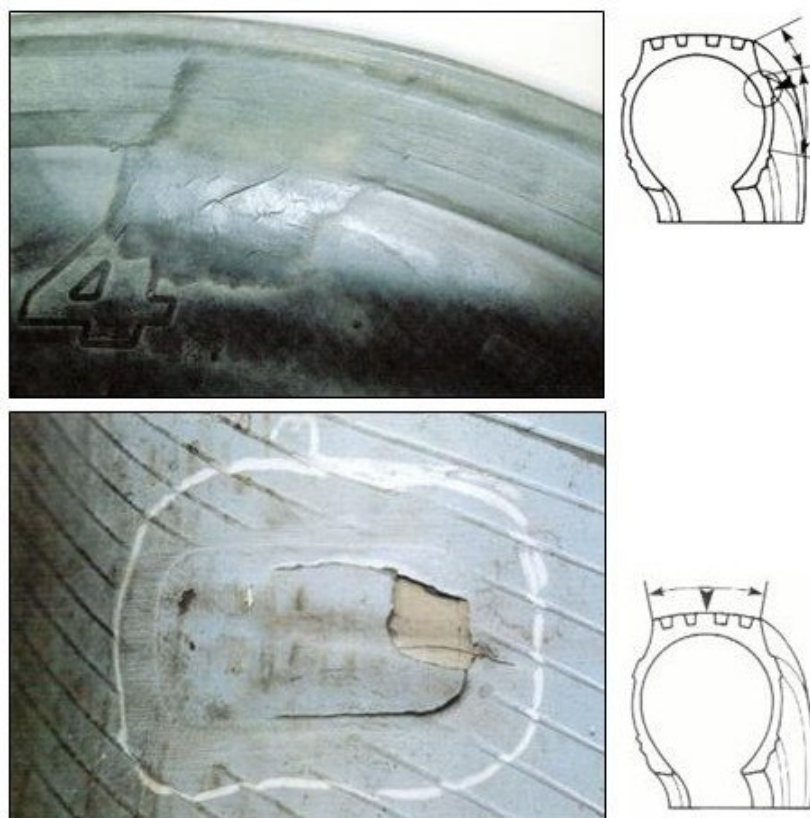
descrição da falha	FROTA 01	FROTA 02	FROTA 03	FROTA 04	FROTA 05	FROTA 06	FROTA 07	FROTA 08	FROTA 09	FROTA 10	Total
1520 - falha do reparo	14%	17%	25%	7%	28%	11%	21%	8%	24%	4%	17%
1605 - quebra por impacto	7%	30%	5%	10%	25%	19%	7%	6%	7%	9%	13%
1607 - penetrações e avarias em pista	8%	20%	7%	8%	4%	10%	9%	17%	12%	13%	11%
1317 - levantamento ou separação da cinta	3%	3%	19%	14%	5%	10%	7%	8%	5%	17%	9%
1320 - separação do recape	20%	6%	1%	0%	4%	19%	9%	0%	7%	9%	8%
1106 - talões queimados	3%	4%	9%	16%	3%	2%	7%	13%	7%	9%	7%
1207 - cortes e esmagamentos	7%	2%	5%	2%	0%	13%	7%	13%	2%	13%	6%
1108 - separação do reforço/chafer	2%	0%	8%	12%	4%	3%	19%	4%	5%	0%	5%
1203 - lateral separada - causada por avaria	12%	2%	1%	5%	4%	2%	9%	4%	2%	9%	5%
Total	76%	84%	80%	75%	76%	87%	93%	72%	73%	83%	80%
Total de pneus examinados	127	122	114	83	76	63	58	53	41	23	760

A classificação de falhas adotada neste estudo é a apresentada pela Associação TMC – *Technology & Maintenance Council no Recommended Maintenance Practices Manual 2004-2005* (TMC, 2004), e para identificação das nove principais falhas relacionadas acima, foi utilizado como critério de corte a porcentagem acumulada de 80% do total de falhas.

Os itens seguintes apresentam as características e possíveis causas para cada falha principal.

##### 4.9.1. Falha do reparo

Neste estudo os tipos mais comuns de falha de conserto observados foram a incapacidade do manchão de reforçar a área danificada do pneu devido à extensão da avaria ou à inadequação do preparo da área que recebeu o reparo (Figura 4.7).



**Figura 4.7 - Falha do reparo** (TMC, 2004)

Com o objetivo de prolongar o tempo de serviço de um pneu avariado, este é reparado. A Norma Brasileira NB NM 225 – Critérios mínimos de seleção de pneus para reforma e reparação – Inspeção e identificação (ABNT, 2000b) enuncia três tipos distintos de reparo:

- Preenchimento da área a reparar com borracha de reparação, que é um composto de elastômeros não vulcanizado destinado à reparação de danos (avarias) que não comprometam a estrutura resistente dos pneus.
- Reparo de borracha: composto de elastômeros, vulcanizado, dotado de uma base plana solidária a uma haste cilíndrica centrada, de tamanhos variados, destinado à reparação de furos no pneu.
- Com uso de manchão, sendo este elemento plano, de tamanhos e formas variadas, composto de lonas revestidas de elastômeros, destinado ao conserto de danos (avarias) que comprometam a estrutura resistente dos pneus.

Antes da aplicação de um conserto, é avaliado o tamanho e posicionamento da avaria, possibilitando tomar a decisão quanto ao do tipo e tamanho de reparo a ser utilizado e até mesmo a viabilidade de reparo, respeitando as dimensões máximas e

posicionamento das avarias passíveis de reparo que são definidas na Norma NB NM 225 (ABNT, 2000b).

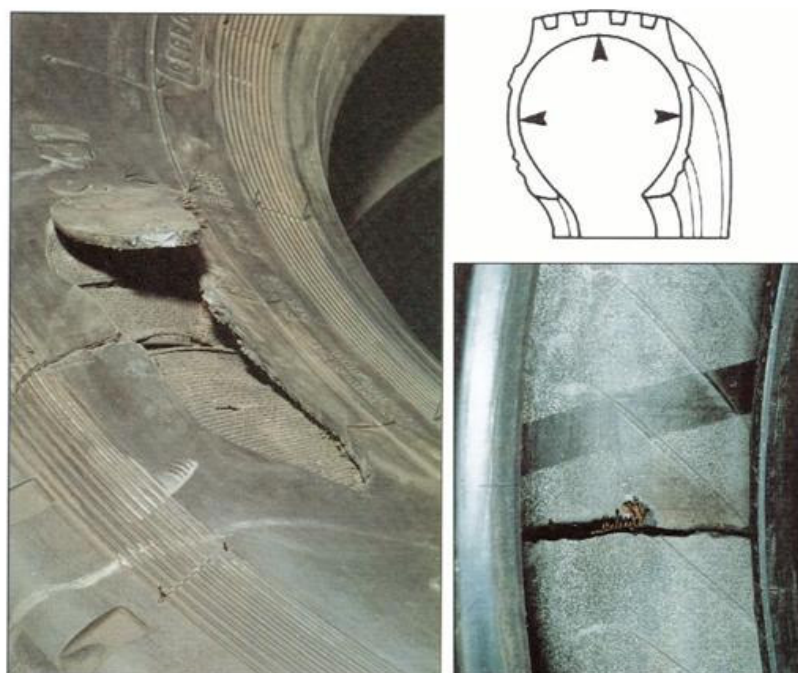
A remoção dos materiais danificados e possíveis contaminações como pó, ferrugem e umidade, assim como a correta preparação das áreas a serem reparadas, é de fundamental importância para a eficácia do reparo.

A classificação adotada nesta dissertação para este tipo de falha, engloba os vários tipos de falhas de conserto (a classificação adotada pela TMC apresenta 15 diferentes tipos e respectivas classificações para falhas de conserto).

#### 4.9.2. Quebra por impacto

A quebra por impacto é evidenciada no flanco ou banda de rodagem, podendo ser resultante de impactos concentrados e severos, causados por objetos ou buracos na via de rolamento. Altas velocidades e pressão alta são condições de serviço que tornam a estrutura do pneu mais susceptível à ocorrência desta avaria.

Cuidado especial na análise desta falha deve ser tomado, verificando-se a existência de reparos próximos à avaria que possam ter falhado. Neste caso a área avariada pode apresentar aspecto similar à quebra por impacto sendo, no entanto, causada por falha do conserto (Figura 4.8).



**Figura 4.8 - Quebra por impacto** (TMC, 2004)

### 4.9.3. Penetrações e avarias em pista

Cortes e penetrações causadas por objetos na pista podem resultar em perda da pressão e separações entre os componentes do pneu. Quando a avaria têm extensão ou posicionamento considerados inadequados para reparo pela NB NM 225, a estrutura resistente do pneu estará muito fragilizada, sendo recomendado o sucateamento do pneu.

Com o objetivo de reduzir a extensão da área afetada, o reparo adequado imediato é recomendado para cortes e perfurações, afim de evitar a contaminação por pó, ferrugem e umidade (Figura 4.9).

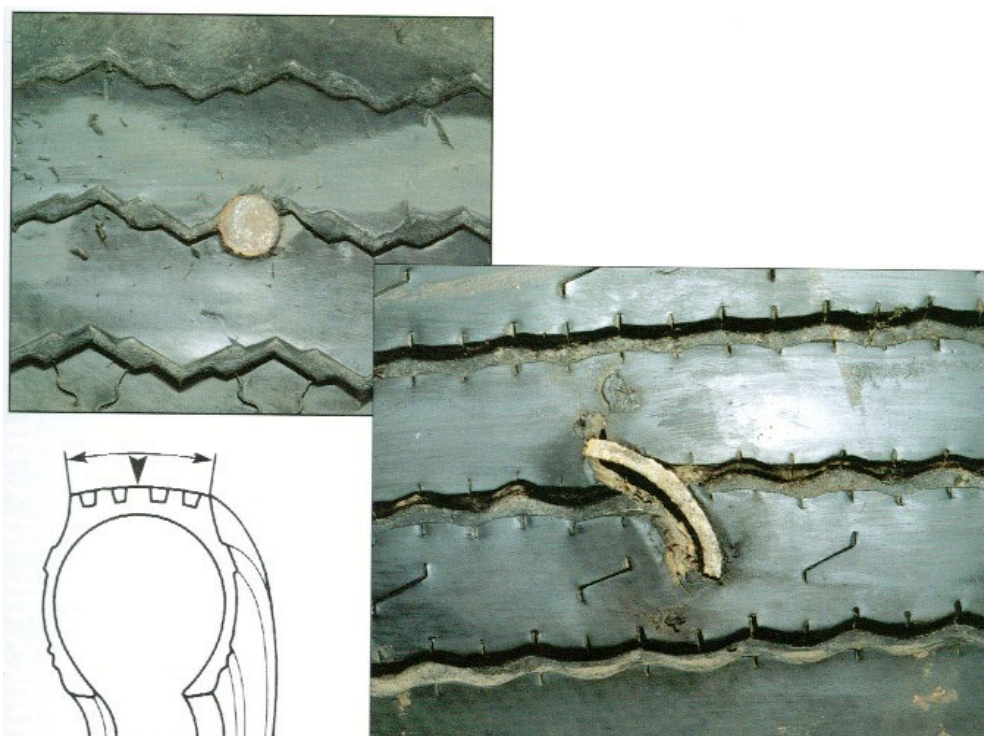


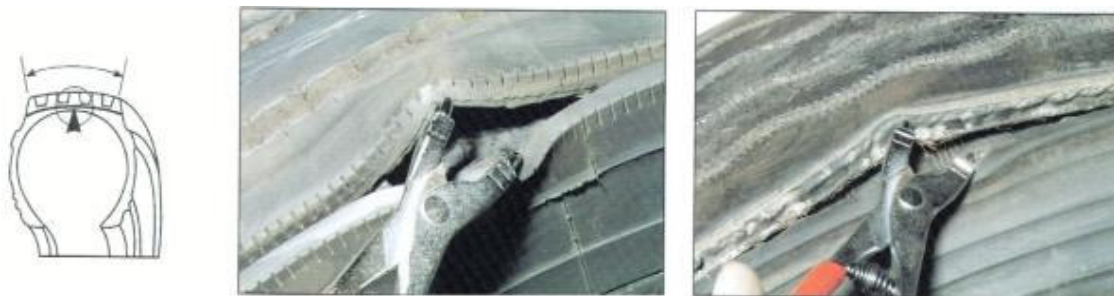
Figura 4.9 - Penetrações e avarias em pista <sup>(TMC, 2004)</sup>

### 4.9.4. Levantamento ou separação da cinta

A perda de adesão entre as cintas ou em suas extremidades pode ser causada por penetrações, impactos, cortes, contaminações, sobrecarga ou pressão baixa. Neste estudo a classificação nesta falha é condicionada a não terem sido identificados



danos ou contaminações que possam ter causado a falha, o que a enquadraria em uma das falhas descritas anteriormente (Figura 4.10).

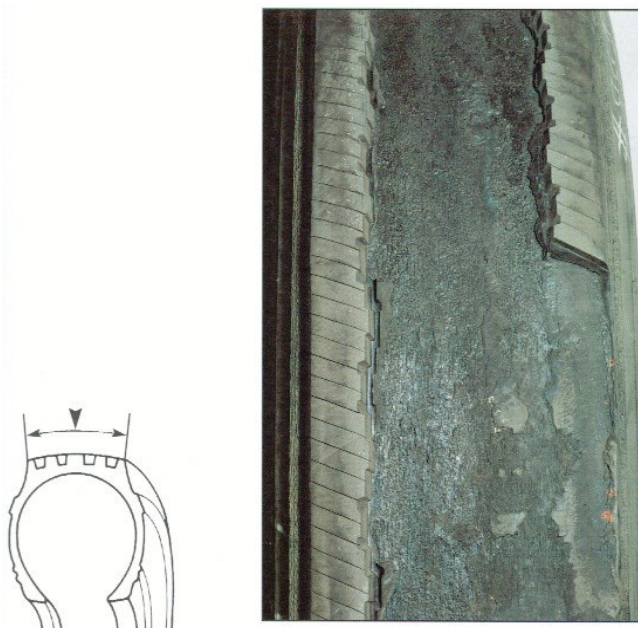


**Figura 4.10 - Levantamento ou separação da cinta** (TMC, 2004)

#### 4.9.5. Separação do recape

Ao ser recapado, o pneu tem sua rodagem gasta removida por raspagem e após a preparação desta superfície raspada, com a remoção de áreas danificadas ou contaminadas, o pneu recebe uma nova banda de rodagem denominada recape.

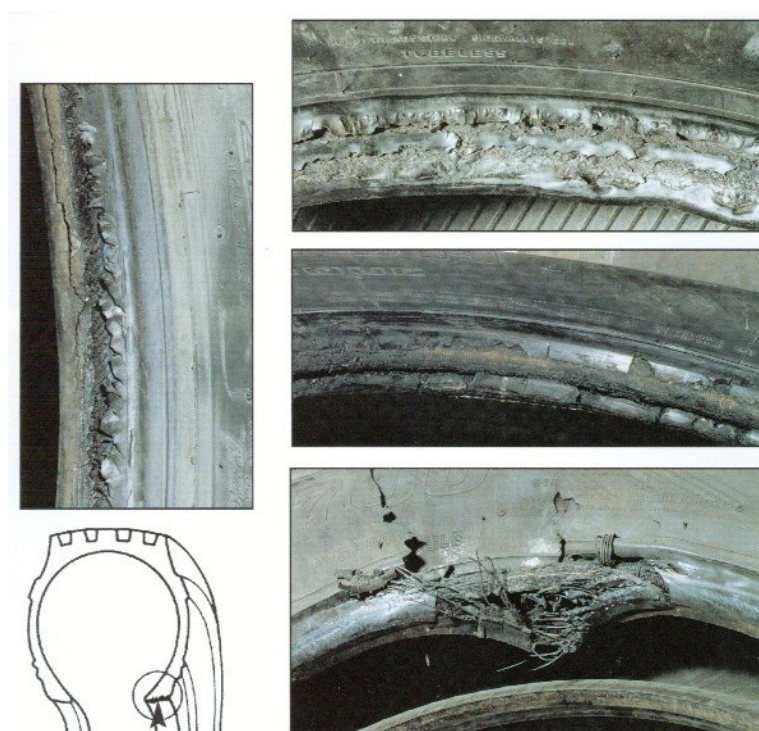
A separação do recape pode ocorrer por falhas na preparação da superfície raspada ou reparada, pela contaminação dos produtos usados ou por inadequação dos processos de vulcanização ou reparação (Figura 4.11).



**Figura 4.11 - Separação do recape** (TMC, 2004)

#### 4.9.6. Talões queimados

A queima dos talões é causada pela exposição ao calor excessivo proporcionado por fatores operacionais ou de manutenção, sendo os principais causadores a frenagem intensa e freqüente, ajuste incorreto dos freios, falhas no sistema de freios ou fluxo insuficiente de ar em torno dos freios (Figura 4.12).

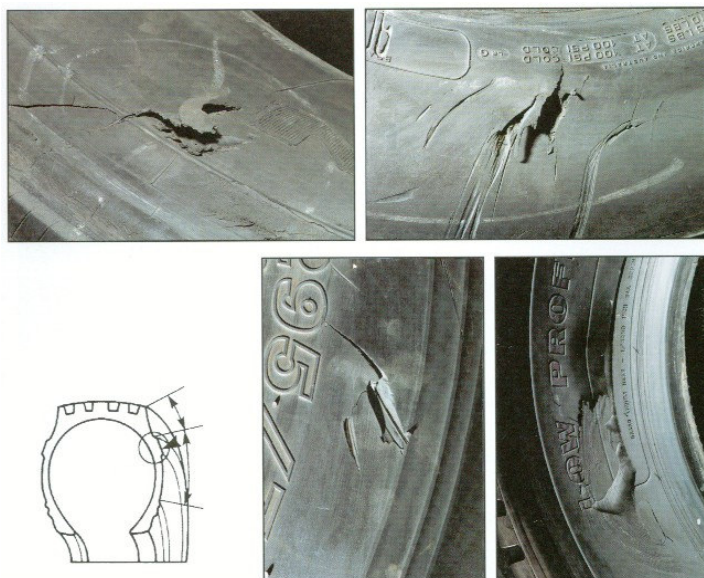


**Figura 4.12 – Talões queimados** (TMC, 2004)

#### 4.9.7. Cortes e esmagamentos no flanco

Cortes e penetrações causadas por objetos na pista ou vandalismo e esmagamentos contra o meio-fio podem acarretar perda de pressão e separações entre os componentes do pneu.

Por estarem os flancos constantemente sendo flexionados não é recomendado reparar danos que afetem estruturalmente os cordonéis da lona carcaça. Danos que afetem somente a borracha do flanco devem ser reparados com brevidade a fim de evitar a contaminação dos cordonéis (Figura 4.13).



**Figura 4.13 - Cortes e esmagamentos no flanco** (TMC, 2004)

#### 4.9.8. Separação do reforço/chafer

Assentamento inadequado na roda, utilização de rodas impróprias, sobrecarga, baixa pressão e impacto são algumas das causas possíveis para ocorrer a separação do reforço.

Esta falha é caracterizada por rachaduras circunferenciais acima do assentamento do pneu com o aro apresentando material metálico exposto (Figura 4.14).

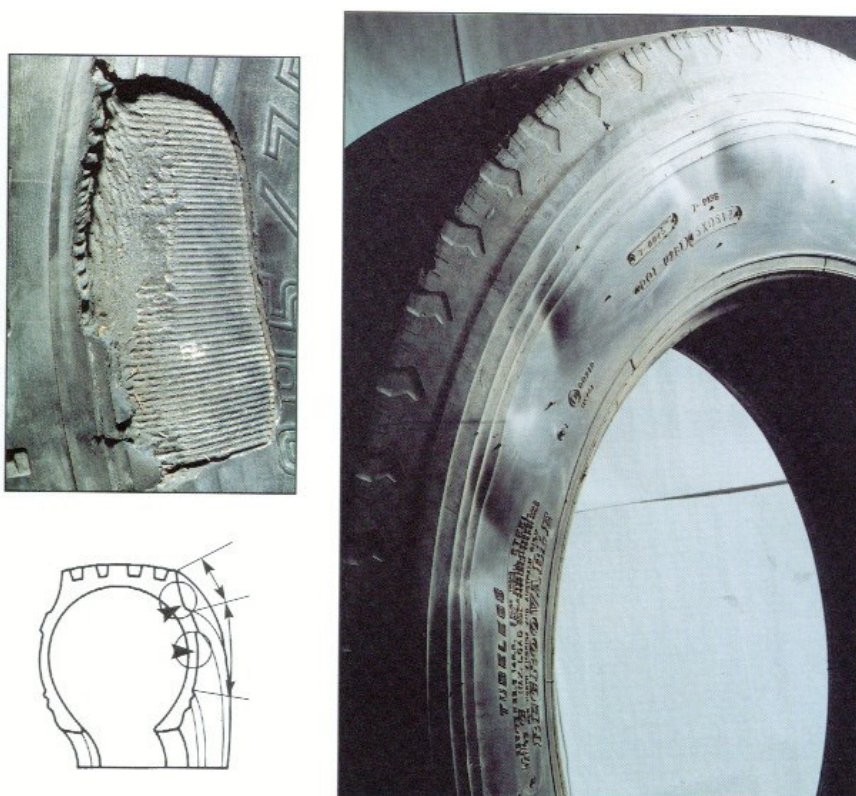


**Figura 4.14 - Separação do reforço/chafer** (TMC, 2004)

#### 4.9.9. Lateral separada causada por avaria

As avarias mais frequentes que separam o flanco são: impactos, quebras no revestimento interno e danos nos talões.

A separação no flanco apresenta a forma de bolsa de formato irregular na região central/superior do flanco, podendo progredir até a completa separação entre a borracha do flanco e a lona carcaça, expondo a extremidade da lona carcaça (Figura 4.15).



**Figura 4.15 - Lateral separada causada por avaria** (TMC, 2004)

#### 4.10. Análise dos percentuais de perdas para as principais falhas

As Tabelas 4.7 e 4.8 indicam respectivamente o número de falhas e médias de tempo de uso em meses total e por falha principal para os pneus sucitados examinados em cada frota.

**Tabela 4.7 – Quantidade das principais falhas por frota**

descrição da falha	FROTA 01	FROTA 02	FROTA 03	FROTA 04	FROTA 05	FROTA 06	FROTA 07	FROTA 08	FROTA 09	FROTA 10
1520 - falha do reparo	18	21	28	6	21	7	12	4	10	1
1605 - quebra por impacto	9	36	6	8	19	12	4	3	3	2
1607 - penetrações e avarias em pista	10	25	8	7	3	6	5	9	5	3
1317 - levantamento ou separação da cinta	4	4	22	12	4	6	4	4	2	4
1320 - separação do recape	26	7	1	-	3	12	5	-	3	2
1106 - talões queimados	4	5	10	13	2	1	4	7	3	2
1207 - cortes e esmagamentos	9	3	6	2	-	8	4	7	1	3
1108 - separação do reforço/chafer	2	-	9	10	3	2	11	2	2	-
1203 - lateral separada - causada por avaria	15	2	1	4	3	1	5	2	1	2
Total	127	122	114	83	76	63	58	53	41	23

**Tabela 4.8 – Média de tempo de uso por tipo de falha e frota**

descrição da falha	FROTA 01	FROTA 02	FROTA 03	FROTA 04	FROTA 05	FROTA 06	FROTA 07	FROTA 08	FROTA 09	FROTA 10
1520 - falha do reparo	30,4	36,0	29,3	46,3	47,7	43,3	39,6	25,4	27,4	38,3
1605 - quebra por impacto	32,0	47,9	35,8	45,5	60,8	43,7	39,4	22,1	39,5	37,5
1607 - penetrações e avarias em pista	33,0	28,2	18,2	27,7	28,1	52,6	37,2	21,5	30,0	40,2
1317 - levantamento ou separação da cinta	27,4	31,1	35,1	44,8	31,9	46,1	41,4	27,0	44,4	41,6
1320 - separação do recape	32,1	41,4	42,8	0,0	65,8	48,0	39,6	0,0	55,9	32,1
1106 - talões queimados	29,4	28,8	18,4	49,6	31,8	38,8	31,9	22,6	29,1	25,0
1207 - cortes e esmagamentos	25,7	22,6	33,6	51,3	0,0	39,4	44,1	23,8	33,8	37,2
1108 - separação do reforço/chafer	40,8	0,0	33,4	57,4	65,5	47,5	37,5	51,0	68,4	0,0
1203 - lateral separada - causada por avaria	27,4	52,8	39,0	55,9	39,8	77,0	40,2	41,1	23,0	43,5
Total	30,8	38,9	28,9	44,6	49,1	45,3	38,9	27,6	34,2	36,0

Utilizando a equação (4.7) e os dados acima, elabora-se a Tabela 4.9, que relaciona os percentuais de perda de cada falha principal por frota.

**Tabela 4.9 – Percentual de perda por tipo de falha e frota**

descrição da falha	FROTA 01	FROTA 02	FROTA 03	FROTA 04	FROTA 05	FROTA 06	FROTA 07	FROTA 08	FROTA 09	FROTA 10
1520 - falha do reparo	0,2%	1,5%	-0,4%	-0,3%	1,1%	0,5%	-0,4%	0,7%	6,4%	-0,3%
1605 - quebra por impacto	-0,3%	-9,7%	-1,3%	-0,2%	-7,9%	0,8%	-0,1%	1,2%	-1,2%	-0,4%
1607 - penetrações e avarias em pista	-0,6%	7,1%	2,8%	3,5%	1,8%	-1,7%	0,4%	4,5%	1,7%	-1,7%
1317 - levantamento ou separação da cinta	0,4%	0,7%	-5,1%	-0,1%	1,9%	-0,2%	-0,5%	0,2%	-1,5%	-3,3%
1320 - separação do recape	-1,1%	-0,4%	-0,4%	0,0%	-1,4%	-1,4%	-0,2%	0,0%	-5,0%	1,0%
1106 - talões queimados	0,1%	1,1%	3,5%	-2,1%	1,0%	0,2%	1,3%	2,8%	1,2%	2,9%
1207 - cortes e esmagamentos	1,3%	1,1%	-0,9%	-0,4%	0,0%	1,9%	-1,0%	2,1%	0,0%	-0,5%
1108 - separação do reforço/chafer	-0,5%	0,0%	-1,3%	-3,9%	-1,4%	-0,2%	0,9%	-3,3%	-5,1%	0,0%
1203 - lateral separada - causada por avaria	1,5%	-0,6%	-0,3%	-1,3%	0,8%	-1,1%	-0,3%	-1,9%	0,8%	-2,0%

Reordenando as colunas e linhas da Tabela 4.9 pelas somatórias dos percentuais de perda positivos das falhas mais frequentes obtém-se a Tabela 4.10.

**Tabela 4.10 – Percentual de perda por tipo de falha e frota, linhas e colunas ordenadas pelo soma de percentuais de perda positivos**

descrição da falha	FROTA 02	FROTA 08	FROTA 09	FROTA 05	FROTA 03	FROTA 10	FROTA 04	FROTA 06	FROTA 01	FROTA 07	Soma de %perda positivos
1607 - penetrações e avarias em pista	7,1%	4,5%	1,7%	1,8%	2,8%	-1,7%	3,5%	-1,7%	-0,6%	0,4%	21,8%
1106 - talões queimados	1,1%	2,8%	1,2%	1,0%	3,5%	2,9%	-2,1%	0,2%	0,1%	1,3%	14,2%
1520 - falha do reparo	1,5%	0,7%	6,4%	1,1%	-0,4%	-0,3%	-0,3%	0,5%	0,2%	-0,4%	10,4%
1207 - cortes e esmagamentos	1,1%	2,1%	0,0%	0,0%	-0,9%	-0,5%	-0,4%	1,9%	1,3%	-1,0%	6,4%
1317 - levantamento ou separação da cinta	0,7%	0,2%	-1,5%	1,9%	-5,1%	-3,3%	-0,1%	-0,2%	0,4%	-0,5%	3,2%
1203 - lateral separada - causada por avaria	-0,6%	-1,9%	0,8%	0,8%	-0,3%	-2,0%	-1,3%	-1,1%	1,5%	-0,3%	3,1%
1605 - quebra por impacto	-9,7%	1,2%	-1,2%	-7,9%	-1,3%	-0,4%	-0,2%	0,8%	-0,3%	-0,1%	2,0%
1320 - separação do recape	-0,4%	0,0%	-5,0%	-1,4%	-0,4%	1,0%	0,0%	-1,4%	-1,1%	-0,2%	1,0%
1108 - separação do reforço/chafer	0,0%	-3,3%	-5,1%	-1,4%	-1,3%	0,0%	-3,9%	-0,2%	-0,5%	0,9%	0,9%
Soma de %perda positivos	11,5%	11,5%	10,2%	6,6%	6,3%	4,0%	3,5%	3,5%	3,4%	2,6%	

%perda > 3%
  1,5% < %perda < 3%
  0% < %perda < 1,5%

As possíveis razões para as falhas mais comuns são apresentadas abaixo na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11 – Possíveis razões para as principais falhas**

descrição da falha	pressão alta	pressão baixa	sobrecarga	procedimento de montagem/desmontagem	aro enferrujado, deformado ou inadequado	sistema de freios	roçamento	impacto	penetrações ou cortes	corte no talão ou interior	migração de ar	reparo ou escareação inadequado	falha do recape	vandalismo
1607 penetrações e avarias em pista									x					
1106 talões queimados						x								
1500 falha do reparo												x		
1207 cortes e esmagamentos no flanco							x	x						x
1317 levantamento ou separação da cinta		x	x					x	x					
1203 separação no flanco causada por avaria								x	x	x				
1605 quebra por impacto	x							x						
1320 separação do recape											x	x	x	
1108 separação do reforço/chafer		x	x	x	x			x						

Considerando as 4 falhas que apresentam maiores percentuais de perda, observa-se que:

- As falhas *penetrações e avarias em pista e cortes e esmagamentos no flanco* apresentam como principal causa penetrações ou cortes ocorridos em uso, sendo estas as maiores causadoras de perda de vida para os pneus analisados. Não houve evidências de vandalismo em nenhum dos pneus analisados.
- A falha *talões queimados* ocorre devido a falhas de manutenção ou operação dos sistemas de freios dos veículos.
- A falha do *reparo* é causada pela inadequação do reparo ou preparação da área reparada, no entanto, observa-se no mercado a tentativa de estender a vida do pneu efetuando-se reparos em cortes e perfurações que apresentam dimensões ou posicionamento acima do permitido pela norma NB NM 225 <sup>(ABNT, 2000b)</sup>, sendo em última instância a perfuração ou corte a real causa da falha do produto.

Na análise das 5 falhas que apresentaram menores percentuais de perda, observa-se que:

- O *levantamento ou separação de cintas e a separação do reforço/chafer* é resultado da exposição do pneu a esforços ao qual é solicitado durante sua vida útil, ocorrendo eventualmente sobrecarga ou baixa pressão, o que resulta maiores solicitações nas cintas e talões dos pneus, sendo estes efeitos cumulativos.
- Obs: quando houve evidência de cortes, perfurações ou impactos a falha foi classificada como penetrações e avarias em pista.
- As avarias mais frequentes responsáveis pela *separação do flanco* são quebras no revestimento interno e danos nos talões permitindo a migração de ar do interior do pneu até a interface entre o flanco e a lona carcaça, ocorrendo a separação entre estes dois componentes do pneu.
- A falha de *quebra por impacto* ocorre quando a solicitação à qual o pneu é sujeito em um impacto específico supera a resistência de parte de sua estrutura resistente, causando a sua falência. A redução da adesão entre componentes do pneu, bem como a diminuição de resistência mecânica de sua estrutura, são conseqüências naturais do envelhecimento do produto, como também da intensidade das solicitações (carga, velocidade, impactos, etc) a que um pneu é sujeito durante sua vida útil.

- A *separação do recape* é usualmente causada pela perda de aderência entre a banda de rodagem do recape e a superfície raspada ou consertada. A incidência deste tipo de falha é maior em pneus nos quais as superfícies foram raspadas várias vezes, tendo também sido recapados várias vezes, ou que apresentam muitos consertos na área raspada.

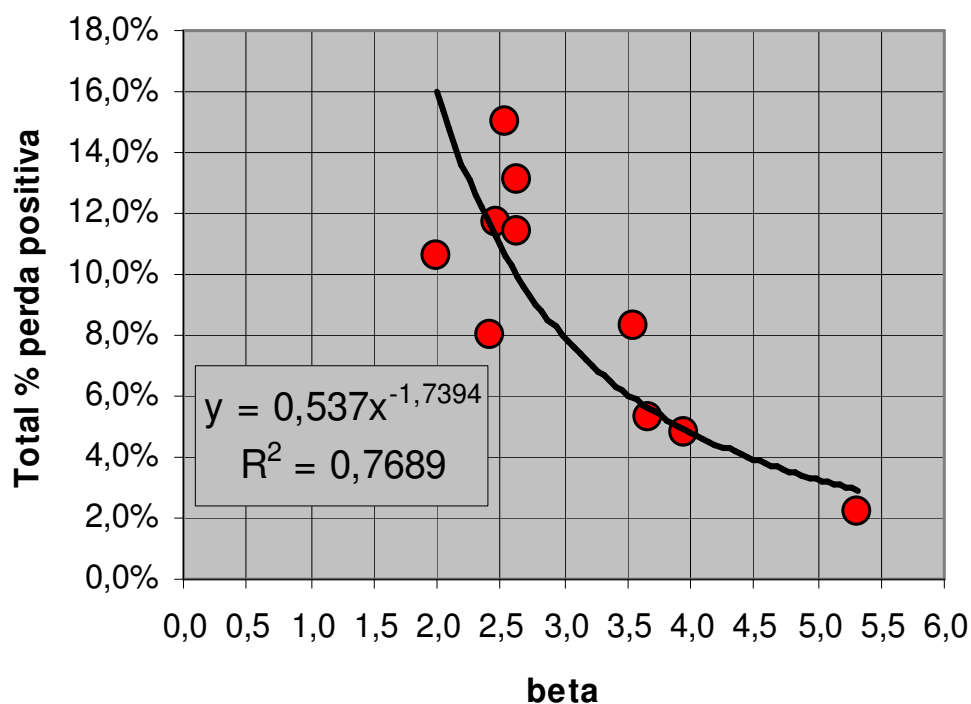
#### 4.11. Correlação entre parâmetro de forma da distribuição de Weibull e o total do percentual de perdas positivas

Nas amostras analisadas existe uma aparente correlação entre valores dos parâmetros de forma (beta) das distribuições das amostras e a soma dos percentuais de perda positivos das suas principais falhas, permitindo uma estimativa grosseira das possíveis reduções de custo, considerando somente os tempos de vida dos pneus sucata, não sendo necessária a análise do tipo de falha, atividade esta que requer mais tempo e pessoal treinado. Na Tabela 4.12 e Figura 4.16 , verifica-se esta correlação.

**Tabela 4.12 - Valores dos parâmetros da distribuição de Weibull das amostras e soma dos percentuais de perda positivos das principais falhas**

Frota	número de falhas	método dos mínimos quadrados			Total % perda positiva
		beta	eta	R <sup>2</sup>	
Frota 01	127	3,7	34,1	0,972	5,3%
Frota 02	122	2,5	44,1	0,958	11,7%
Frota 03	114	2,0	33,2	0,972	10,6%
Frota 04	83	2,4	50,9	0,966	8,0%
Frota 05	76	2,6	55,8	0,949	11,4%
Frota 06	62	3,9	51,1	0,876	4,8%
Frota 07	57	5,3	43,0	0,840	2,2%
Frota 08	53	2,6	31,2	0,938	13,1%
Frota 09	41	2,5	38,5	0,932	15,0%
Frota 10	22	3,5	42,2	0,844	8,3%





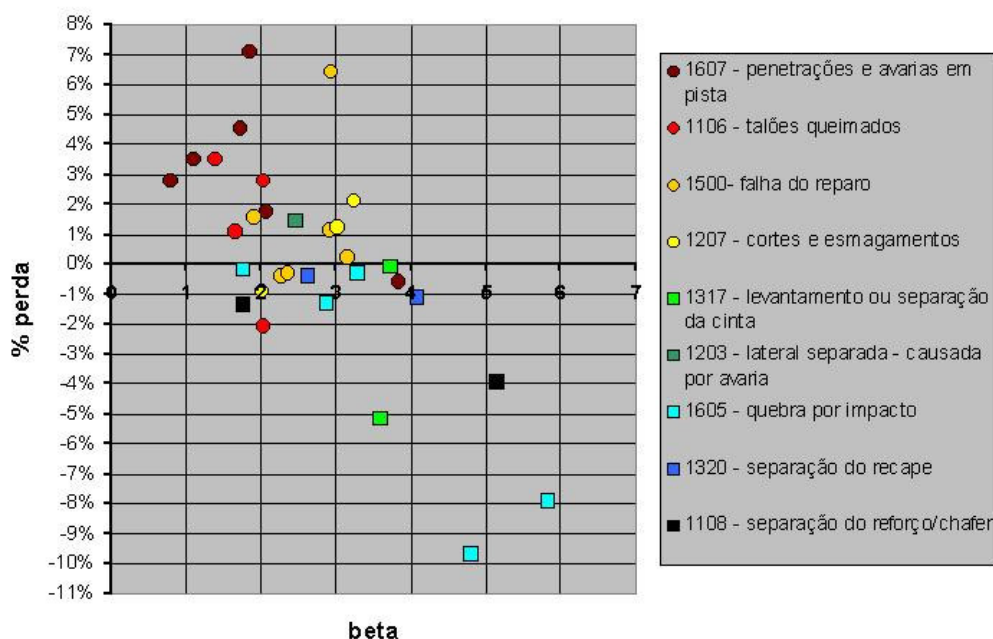
**Figura 4.16 - Correlação entre parâmetros de forma das distribuições das amostras e a soma dos percentuais de perda positivos das principais falhas**

#### **4.12. Correlação entre parâmetro de forma das curvas de Weibull e percentuais de perda das principais falhas**

Utilizando-se planilhas Excel<sup>TM</sup> foram estimados os parâmetros da distribuição de Weibull para as principais falhas abordadas no item anterior, o método gráfico foi utilizado, sendo que existindo censura adotou-se o coeficiente de Kaplan-Meier como estimador não-paramétrico para a função de confiabilidade.

Os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull bi-paramétrica, assim como o coeficiente de determinação, o percentual de perda e número de ocorrências nas amostras para cada frota e falha estão listados no Anexo D.

O gráfico da Figura 4.17 relaciona os parâmetros de forma das curvas de Weibull (beta) e os percentuais de perda para as principais falhas. Não foram considerados os parâmetros resultantes das amostras com menor coeficiente de determinação (Frotas 6, 7 e 10) e com número de falhas do mesmo tipo com quantidades inferiores a 5.



**Figura 4.17 - Correlação entre parâmetros de forma e percentuais de perda das principais falhas**

Observa-se que existe a tendência de falhas com maiores beta apresentarem menores percentuais de falha.

A Tabela 4.13 apresenta as variações típicas e atípicas com respectivas quantidades de ocorrência (n) de beta para cada falha principal. São relacionados dados obtidos de amostras com 5 ou mais falhas e 10 ou mais falhas na amostra.

**Tabela 4.13 - Parâmetros de forma para as principais falhas**

FALHAS PRINCIPAIS COM INCIDÊNCIA MAIOR OU IGUAL A 5 FALHAS POR AMOSTRA	Típico		Atípico	
	n	beta	n	beta
1607 - penetrações e avarias em pista	4	0,8-2,1	1	3,8
1106 - talões queimados	4	1,4-2,0		
1500 - falha do reparo	6	1,9-3,2		
1207 - cortes e esmagamentos	3	2,0-3,2		
1317 - levantamento ou separação da cinta	2	3,6-3,7		
1203 - lateral separada - causada por avaria	1	2,5		
1605 - quebra por impacto	2	4,8-5,8	3	1,8-3,3
1320 - separação do recape	1	4,1	1	2,6
1108 - separação do reforço/chafer	1	5,2	1	1,8

FALHAS PRINCIPAIS COM INCIDÊNCIA MAIOR OU IGUAL A 10 FALHAS POR AMOSTRA	Típico		Atípico	
	n	beta	n	beta
1607 - penetrações e avarias em pista	1	1,9	1	3,8
1106 - talões queimados	2	1,4-2,0		
1500 - falha do reparo	5	1,9-3,2		
1207 - cortes e esmagamentos				
1317 - levantamento ou separação da cinta	2	3,6-3,7		
1203 - lateral separada - causada por avaria	1	2,5		
1605 - quebra por impacto	2	4,8-5,8		
1320 - separação do recape	1	4,1		
1108 - separação do reforço/chafer	1	5,2		

Como critérios para classificação dos valores de beta como sendo típicos ou não para cada falha, foram considerados os agrupamentos dos pontos no gráfico da Figura 4.17 e a incidência de falhas nas amostras.

Por exemplo, a falha “quebra por impacto” apresenta dois agrupamentos de pontos, com valores de beta entre 4,8 a 5,8 e entre 1,8 e 3,3. Considerando-se que as amostras com maior incidência da falha apresentam os valores de beta na faixa de valores maiores, adota-se esta como típica para a falha.

Observa-se que para as falhas consideradas com menores percentuais de perda (como classificado no item 4.10) os valores de beta variam de 0,8 a 3,2.

No entanto para falhas que apresentaram menores percentuais de falha os valores de beta variam de 3,6 a 5,8, exceção feita à falha “lateral separada – causada por avaria” que apresenta beta igual a 2,5 para a única amostragem com quantidade superior a 5 falhas detectadas.

Quando comparam-se os dois grupos de falhas acima, considerando os valores de beta obtidos, conclui-se que o primeiro representa falhas aleatórias enquanto o segundo apresenta predominantemente falhas devido a fadiga ou envelhecimento.

#### **4.13. Substituição de pneus em função do tempo de uso**

Para determinar um tempo de uso ótimo para substituição, definindo o menor custo por tempo de uso do produto, faz-se as seguintes considerações:

O custo de uma falha inclui além do custo do próprio produto e da operação de troca, o custo do tempo perdido por não utilizar o veículo, o custo decorrente da troca fora de local mais adequado, os custos de outros sistemas que possam falhar em consequência da falha do pneu, e outros custos nem sempre fáceis de mensurar principalmente quando envolvendo questões de segurança.

Para definir o menor custo de substituição do produto deve-se minimizar  $C(t)$  apresentado na equação (4.16).

$$C(t) = \frac{F(t) \times Cnp + (1 - F(t)) \times Cp}{t} \quad (4.16)$$

Onde:

$C(t)$  = custo unitário da substituição do produto por unidade de tempo

$C_p$  = custo de uma substituição planejada, o produto é substituído antes de sua falha

$C_{np}$  = custo de uma substituição não planejada, o produto falha e então é substituído

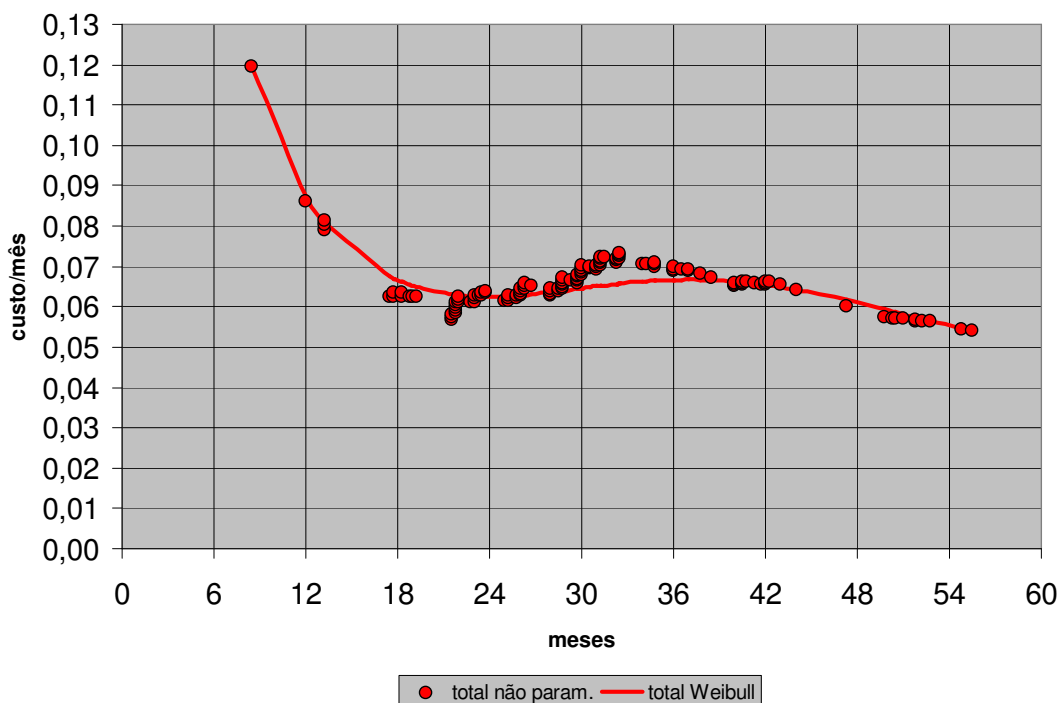
$F(t)$  = função de probabilidade acumulada de falha

$t$  = tempo decorrido da falha

A função acumulada de falha pode ser obtida conhecendo-se os parâmetros de forma e escala da distribuição de falhas.

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^\beta] \quad (4.17)$$

O gráfico da Figura 4.18 apresenta a variação do custo total para os dados da Frota 01 considerando a razão do custo de substituição não planejada sobre o de substituição planejada igual a 3 ( $C_p=1$  e  $C_{np}=3$ ). A linha contínua representa a estimativa utilizando os parâmetros da função de Weibull e os pontos indicam a estimativa não paramétrica considerando os dados da amostra.



**Figura 4.18 – Variação do custo mensal em função do tempo de uso**

Observa-se que para este exemplo o custo mínimo por unidade é obtido em duas partes da curva, um platô entre 18 e 30 meses e a 54 meses de uso do produto. A decisão do tempo máximo para substituição deve ser tomada considerando as diferenças de custo/mês obtidos (da ordem de 10%) e o ganho de segurança obtido removendo o produto com menor uso.

Segundo Abernethy <sup>(Abernethy, 2000)</sup> a razão entre custos de reposição não planejada e planejada para componentes costuma ser da ordem de 1 para 20 e para sistemas mais caros como grandes caminhões e aviões esta razão pode ultrapassar valores de 1 para 100.

Devido ao alto custo dos produtos analisados neste trabalho, uma razão muito alta não é economicamente viável para aplicações que não envolvam alto risco, como por exemplo transporte de produtos perigosos, devido ao alto valor relativo do pneu.

Lafraia <sup>(Lafraia, 2001)</sup> apresenta uma fórmula para estimativa do tempo de substituição ( $T$ ) para custo mínimo dado por:

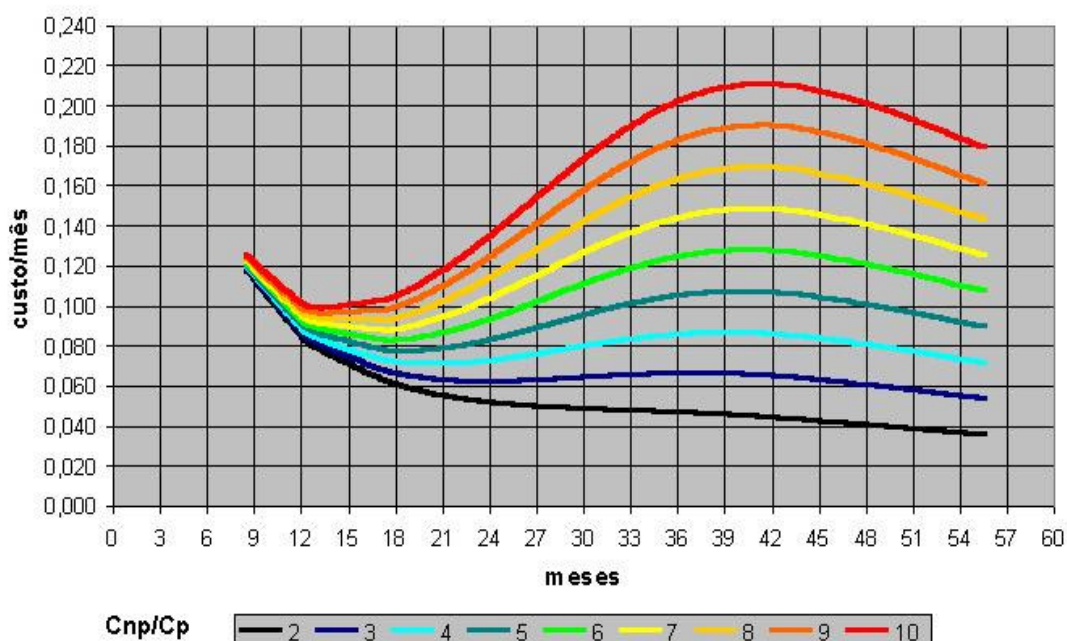
$$T \cong \eta \left[ \frac{1}{\beta - 1} \times \frac{C_p}{C_{np}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.18)$$

Aplicando os valores adotados no exemplo anterior na equação (4.18), o tempo de substituição obtido é da ordem de 19 meses de uso do produto.

#### 4.14. Comparação dos tempos de substituição para custo mínimo das frotas

A Figura 4.19 representa graficamente curvas de custo  $C(t)$ , definidas pela equação (4.17), para relações de custo de substituição planejada sobre custo de substituição não planejada ( $C_{np}/C_p$ ) variando de 2 a 10 para a Frota 01.

Observa-se que para a relação  $C_{np}/C_p=2$  não existe um ponto de mínimo claramente definido e para valor igual ou superior a  $C_{np}/C_p=5$  as curvas apresentam um único ponto de mínimo claramente definido.



**Figura 4.19 – Curvas de custo variando  $C_{np}/C_p$  para a Frota 01**

A Tabela 4.14 apresenta os tempos de substituição para custo mínimo, para as frotas em estudo, obtidos pelo pontos de mínimo em curvas similares às apresentadas acima, representadas no Anexo E.

**Tabela 4.14 – Valores de tempo para substituição (mínimo da curva  $C(t)$ )**

Frota	Beta	relação $C_{np}/C_p$ x tempo em meses para substituição com menor custo								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frota 01	3,5		24	18	17	17	17	16	13	13
Frota 02	2,7			26	21	20	18	18	17	16
Frota 03	2,2				16	15	14	13	12	11
Frota 04	2,8			28	25	23	22	20	18	18
Frota 05	3,0			31	28	26	25	22	22	20
Frota 06	5,0		35	29	26	24	24	24	23	23
Frota 07	6,0		28	28	28	24	20	18	18	17
Frota 08	2,7			17	16	16	15	11	11	11
Frota 09	2,3				21	18	16	16	16	14
Frota 10	5,2		26	26	23	20	18	15	15	14

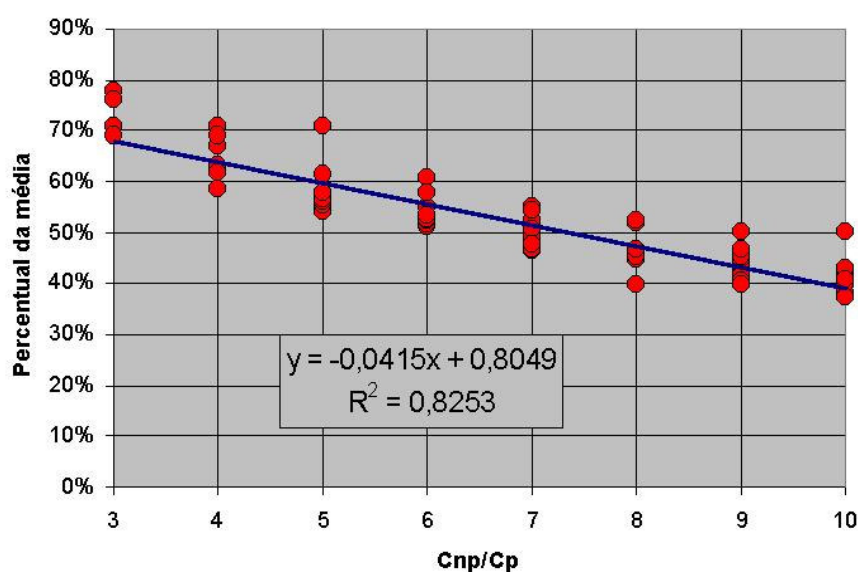
Usualmente para valores da relação entre custo de substituição planejada sobre custo de substituição não planejada ( $C_{np}/C_p$ ) entre 2 e 3 as curvas de custo não apresentam pontos de mínimo nitidamente definidos, não tendo sido indicadas na Tabela 4.14. Pode-se observar que para valores maiores do parâmetro de forma da distribuição de Weibull (beta), pontos de mínimo se tornam evidentes para menores valores da

relação  $C_{np}/C_p$ , tendo-se assim uma estimativa prévia da existência de um ponto de mínimo claramente definido na curva conhecendo-se o parâmetro beta.

A Tabela 4.15 indica os valores das relações entre os tempos de substituição e o tempo médio para cada frota, indicando-se no gráfico da Figura 4.20 os pontos e reta de correlação entre os valores da relação  $C_{np}/C_p$  e percentual entre tempo de substituição para menor custo e média da amostra. A reta de correlação existente permite efetuar uma avaliação rápida, sem necessidade da elaboração de um gráfico do valor da vida para remoção para menor custo tendo-se os valores da relação  $C_{np}/C_p$  e da vida média dos pneus sucata da frota.

**Tabela 4.15 – Relação entre valores de tempo para substituição (mínimo da curva  $C(t)$ ) e médias das amostras**

Frota	média da amostra (meses)	relação $C_{np}/C_p$ e relação entre tempo para custo mínimo de substituição e média da amostra							
		3	4	5	6	7	8	9	10
Frota 01	30,8	78%	58%	55%	55%	55%	52%	42%	42%
Frota 02	38,9		67%	54%	51%	46%	46%	44%	41%
Frota 03	28,9			55%	52%	48%	45%	42%	38%
Frota 04	44,6		63%	56%	52%	49%	45%	40%	40%
Frota 05	49,1		63%	57%	53%	51%	45%	45%	41%
Frota 06	45,9	76%	63%	57%	52%	52%	52%	50%	50%
Frota 07	39,5	71%	71%	71%	61%	51%	46%	46%	43%
Frota 08	27,6		62%	58%	58%	54%	40%	40%	40%
Frota 09	34,2			61%	53%	47%	47%	47%	41%
Frota 10	37,6	69%	69%	61%	53%	48%	40%	40%	37%



**Figura 4.20 – Relação entre  $C_{np}/C_p$  e tempo de substituição para menor custo**

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Conclusões gerais

Falhas que ocorrem em pneus de veículos de transporte de carga no Brasil são de capital importância nos custos das empresas envolvidas no transporte rodoviário, sendo o item pneu responsável pelo terceiro maior custo na operação deste modal de transporte que responde por aproximadamente 60% do total de carga transportada no país.

A metodologia de análise de confiabilidade desenvolvida neste trabalho utiliza-se de amostras de pneus sucata.

A aplicação do método permite sistematizar a mensuração e análise de perda de vida útil causada por cada tipo de falha, identificar as principais causas das falhas críticas, focar esforços em medidas preventivas adequadas e ainda definir o tempo de remoção antes da falha para obter o menor custo.

Para mensurar a perda causada por cada tipo de falha em uma amostra, calculam-se os percentuais de perda das falhas na amostra (variação percentual da média de vida da amostra considerando a erradicação da falha). Os maiores valores positivos do percentual de perda indicam as falhas que provocam as maiores perdas de vida do produto e que devem ser evitadas prioritariamente.

Identificando as falhas que causam as maiores perdas, verificam-se quais as suas causas mais prováveis, tornando possível focar esforços em medidas para seu combate.

Com o objetivo de calcular os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull para uso em campo, evitando o uso de computadores ou softwares específicos para a análise, desenvolveu-se um método de fácil cálculo dos parâmetros utilizando a média e o desvio padrão da amostra (método CV).

Para recomendar a substituição de pneus em função do tempo de uso, foi apresentado um método que permite obter o menor custo/tempo de uso em função dos custos de substituição programada e não programada e dos parâmetros de forma e escala da função de Weibull bi-paramétrica.



Enquanto o método de análise de sucata usualmente adotado no mercado brasileiro classifica os tipos de falha pelo seu nível de incidência e relata possíveis causas para sua redução, o método proposto apresenta como principais vantagens a possibilidade de mensurar as perdas econômicas causadas por cada tipologia de falha e estabelecer critérios de remoção de uso antes da falha para obter menor custo final.

A metodologia proposta neste estudo foi aplicada na análise de confiabilidade de pneus da medida 295/80R22.5 de produção nacional, tomando os dados de pneus sucitados de 10 frotas de transporte rodoviário de carga.

Para este produto, verificou-se que a confiabilidade do pneu é modelada por uma distribuição de Weibull de dois parâmetros.

Foram efetuadas análises de confiabilidade das falhas mais frequentes utilizando o programa de planilha eletrônica Excel<sup>TM</sup>.

As falhas mais frequentes podem ser agrupadas em 2 categorias:

- Falhas com maiores percentuais de perda (valores positivos) que apresentam menores parâmetros de forma da distribuição de Weibull, sendo suas prováveis causas: avarias em pistas, manutenção inadequada do sistema de freios e consertos efetuados fora do padrão.
- Falhas com menores percentuais de perda (valores negativos) que apresentam maiores parâmetros de forma da distribuição de Weibull, sendo suas prováveis causas: efeitos cumulativos dos esforços (velocidade, carga, impactos, temperatura, etc) a que o pneu é solicitado durante a vida útil e redução da adesão entre componentes e resistência mecânica de estrutura resistente (conseqüências do envelhecimento ou ao número de recapagens/reparos do produto).

As falhas com maiores percentuais de perda (valores positivos) são as principais responsáveis pela redução da vida média das amostras analisadas, devendo ser prioritárias as medidas para evitá-las.

Através da aplicação desta metodologia, é possível avaliar o desempenho dos pneus de uma frota e priorizar contra-medidas que apresentem resultados significativos em menor prazo e custo, aumentando o tempo de vida do produto e identificando o melhor momento de substituição do mesmo, minimizando assim o impacto ambiental causado por este resíduo, aumentando a segurança das pessoas, cargas e veículos e principalmente, possibilitando a redução de custos da empresa.

## 5.2. Recomendações para trabalhos futuros

Apresenta-se a seguir recomendações para desenvolvimentos de trabalhos futuros:

A aplicação da metodologia de análise de confiabilidade desenvolvida neste trabalho pode ser efetuada para outros produtos de uso corrente em frotas, desde que estejam disponíveis dados que permitam avaliar o tempo de exposição do produto até sua falha, como também um sistema de classificação de falhas com respectivas causas possíveis. A verificação do modelo de análise de custos no uso com outros tipos de produto podem validar o modelo proposto e sugerir melhorias e acréscimos aos procedimentos.

O método CV, aqui desenvolvido para determinação dos parâmetros de forma e escala, deve ser aprimorado com o acréscimo de um procedimento, também de fácil aplicação em campo, para a determinação do parâmetro de posição, permitindo a aplicação da distribuição de três parâmetros recomendada originalmente por Weibull (Weibull, 1951).

Observou-se que as somas dos percentuais de perda positivas e parâmetros de forma das amostras apresentam uma correlação (vide item 4.11) que deve ser melhor investigada com a adição de novas amostras ao estudo ou simulação pelo método de Monte Carlo.

Recomenda-se também verificar a aderência das amostras analisadas neste estudo a modelos mistos da distribuição de Weibull, como por exemplo o de modos de falhas competidores (Tarum, 1999) e (Meyer et al., 2002), que possivelmente podem permitir uma melhor aderência dos dados da amostra ao modelo adotado.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

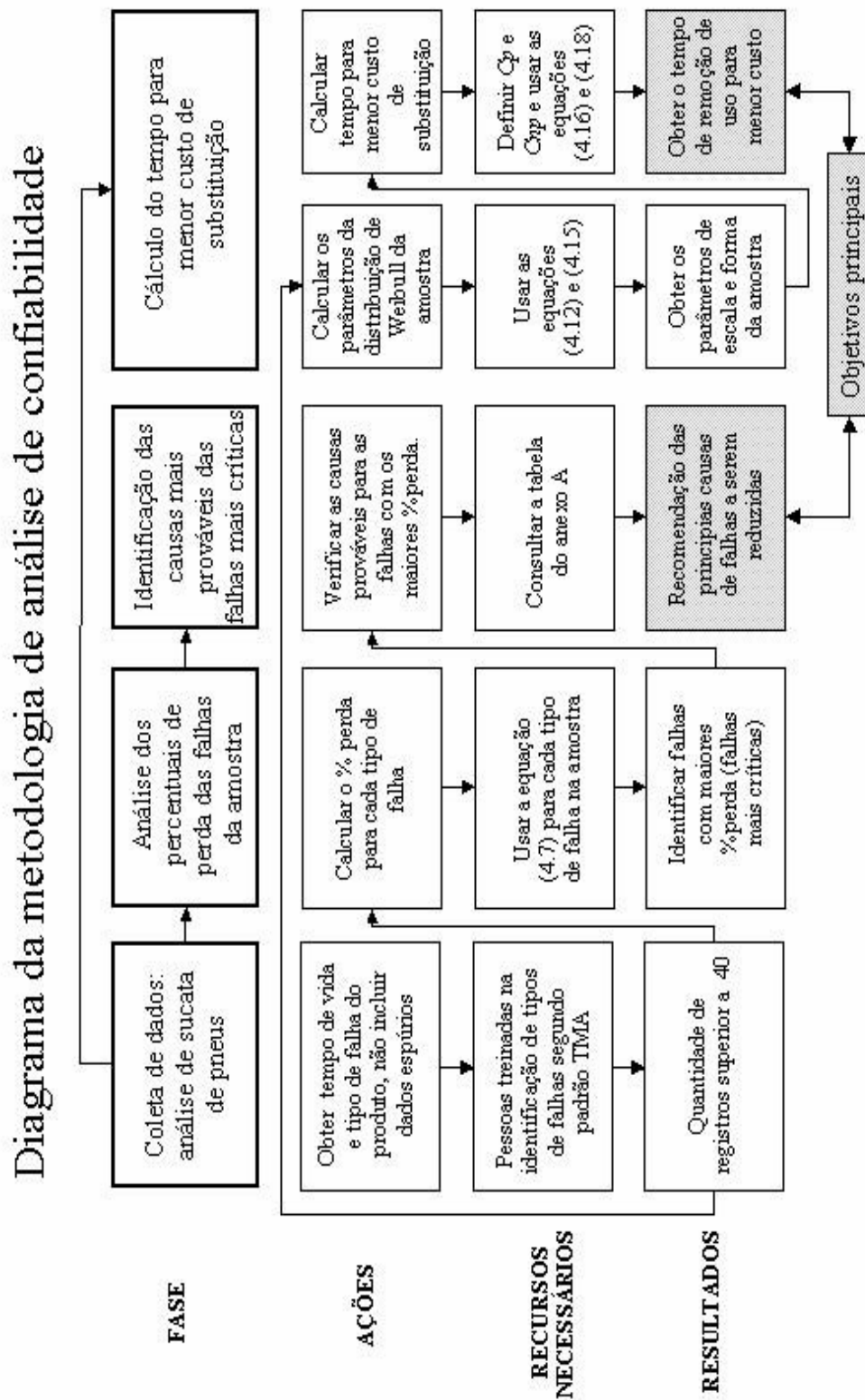
- ABERNETHY, R. **The New Weibull Handbook**. 4.ed. Flórida: Publicado e Distribuído pelo Autor, 2000.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma Mercosul NBR NM 224:2000 – Conjunto pneumático – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2000.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NB NM 225 – Critérios mínimos de seleção de pneus para reforma e reparação – Inspeção e identificação**. Out. 2000.
- ANIP – Associação Nacional das Indústrias de Pneus. **Vendas de pneus para caminhões e ônibus no Brasil**. São Paulo, Jun. 2004.
- ALAPA – Associação Latino Americana de Pneus e Aros. **Manual de Normas Técnicas 2003**. São Paulo, 2003.
- ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Assessoria e Comunicação Social – Transporte Terrestre Números do Setor**. Última atualização Abr. 2005.
- ARAGÃO COSTA, A . L. **Estudo de desgaste de pneus de caminhões e ônibus utilizando-se o Método dos Elementos Finitos**. São Paulo, 2000. 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BRIDGESTONE. **Una guía para las ventas eficaces de neumaticos – Conocimiento fundamental de la ingeniería de neumaticos**. 134p.
- BROWMICK, A .K.; HALL, M.M.; BENAREY, H.A. ed. **Rubber Products Manufacturing Technology**. New York: Marcel Dekker, 1994.
- BUREAU OF TRANSPORTATION STATISTICS – U. S. **Department of Transportation National Transportation Statistics 2003**. Maio 2004.
- CAREY, J. **Survey of Tire Debris on Metropolitan Phoenix Highways**. Phoenix: Arizona Department of Transportation, Nov. 1999.
- CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Relatório Analítico - Pesquisa Empresa de Cargas CNT - 2002**.

- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução No 258, de 26 de agosto de 1999. Destinação de pneus inservíveis no território brasileiro.** Ago. 1999.
- DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. **Anuário estatístico de acidentes de Trânsito - 2002.**
- DIXON, J. C. **Tires, Suspension and Handling.** 2.ed. Warrendale PA: SAE – Society of Automotive Engineers, 1996.
- FORD, T. L.; CHARLES, F. S. **Heavy Duty Truck Tire Engineering.** SP-729. Warrendale PA: SAE – Society of Automotive Engineers, 1988.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics.** Warrendale PA: SAE – Society of Automotive Engineers, 1992.
- HEMÉTRIO, E. Epidemia Pública – Acidentes provocados por rodovias ruins crescem 68,5% em 3 anos. **Revista CNT**, Ano IX, p. 64, Abr./Maio 2004. Edição especial – Dossiê CIDE.
- ISHIKAWA, Y.; HOTAKA, T. Effects of compound ingredients on rubber adhesion to steel cord. **Wire Journal International**, Jun. 2002.
- KASTER, B.R. **Tire manufacturing processes.** Disponível em: <<http://www.tirefailures.com>>. Acesso em: 13 de março de 2004.
- LAFRAIA, R.B.L. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.** Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobrás, 2001.
- LEWIS, E.E. **Introduction to Reliability Engineering.** 2.ed. John Wiley & Sons, 1994.
- LUKO, S.N. **A Review of the Weibull Distribution and Selected Engineering Applications.** SAE Technical Paper Series 1999-01-2859. SAE - Society of Automotive Engineers, Set. 1999.
- MARTHA DE SOUZA, G.F. **Apostila do curso PMC 5613: Confiabilidade de Produtos e Sistemas.** São Paulo: Politécnic-USP, 2003.
- MEYER, M.; MEYNA, A.; PAULI, B.; GRODZICKI, P. **Reliability Prediction for Automotive Components in Field Use.** SAE Technical Paper Series 2002-01-2241. SAE - Society of Automotive Engineers, Jul. 2002.

- SINDIPEÇAS – Sindicato da Indústria de Auto Peças. **Desempenho do Setor de Autopeças – Sindipeças**. São Paulo, 2003.
- O'CONNOR, P.D.T. **Practical Reliability Engineering**. 3.ed. revisada Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 1991.
- TARUM, C.D. **Determination of the Critical Correlation Coefficient to Establish a Good Fit for Weibull and Log Normal Failure Distribution**. SAE Technical Paper Series 1999-01-0057. SAE - Society of Automotive Engineers, Mar. 1999.
- TARUM, C.D. **Classification and Analysis of Weibull Mixtures**. SAE Technical Paper Series 1999-01-0055. SAE - Society of Automotive Engineers, Mar. 1999.
- TMC – Technological & Maintenance Council American Trucking Associations, Inc. **Recommended Practice - Guidelines for tire inflation pressure maintenance**. Out. 2003.
- TMC – Technological & Maintenance Council American Trucking Associations, Inc. **Technology & Maintenance Council no Recommended Maintenance Practices Manual 2004-2005**.
- TRA – The Tire and Rim Association Inc. – **2003 Yearbook** – Ohio: 2003.
- WINSOR, J. ed. Break down 10 top reasons. **Heavy duty trucking**. Jan. 2003. p. 38-39.
- WEIBULL, W. **A Statistical Distribution Function of Wide Applicability**, ASME Journal of Applied Mechanics, Set. 1951.



Anexo B – Diagrama apresentando as fases da metodologia com suas principais ações, recursos necessários e resultados



### Anexo C – Falhas e tempos de vida da amostra de pneus sucitados da Frota 01

descrição da falha	tempo (meses)	descrição da falha	tempo (meses)
1203 - lateral separada - causada por avaria	8,5	1320 - separação do recape	29,8
1309 - desgaste excessivo	12,0	1203 - lateral separada - causada por avaria	30,0
1301 - dano por travamento de freio	13,3	1317 - levantamento ou separação da cinta	30,0
1317 - levantamento ou separação da cinta	13,3	1320 - separação do recape	30,0
1500 - falha do reparo	13,3	1607 - penetrações e avarias em pista	30,0
1500 - falha do reparo	17,5	1607 - penetrações e avarias em pista	30,0
1500 - falha do reparo	17,8	1407 - trinca no interno	30,5
1605 - quebra por impacto	17,8	1407 - trinca no interno	30,5
1320 - separação do recape	18,3	1203 - lateral separada - causada por avaria	31,0
1607 - penetrações e avarias em pista	18,3	1500 - falha do reparo	31,0
1407 - trinca no interno	18,8	1606 - rodou vazio	31,0
1320 - separação do recape	19,0	1106 - talões queimados	31,3
1207 - cortes e esmagamentos	19,3	1203 - lateral separada - causada por avaria	31,3
1207 - cortes e esmagamentos	21,5	1203 - lateral separada - causada por avaria	31,3
1207 - cortes e esmagamentos	21,5	1500 - falha do reparo	31,3
1500 - falha do reparo	21,5	1606 - rodou vazio	31,3
1203 - lateral separada - causada por avaria	21,8	1320 - separação do recape	31,5
1207 - cortes e esmagamentos	21,8	1106 - talões queimados	32,3
1320 - separação do recape	21,8	1320 - separação do recape	32,3
1500 - falha do reparo	21,8	1606 - rodou vazio	32,3
1605 - quebra por impacto	21,8	1207 - cortes e esmagamentos	32,5
1203 - lateral separada - causada por avaria	22,0	1500 - falha do reparo	32,5
1207 - cortes e esmagamentos	22,0	1500 - falha do reparo	32,5
1407 - trinca no interno	22,0	1607 - penetrações e avarias em pista	32,5
1605 - quebra por impacto	22,8	1605 - quebra por impacto	34,0
1203 - lateral separada - causada por avaria	23,0	1606 - rodou vazio	34,3
1207 - cortes e esmagamentos	23,0	1320 - separação do recape	34,8
1406 - bolhas e separações no interno	23,0	1606 - rodou vazio	34,8
1320 - separação do recape	23,3	1606 - rodou vazio	34,8
1320 - separação do recape	23,5	1320 - separação do recape	36,0
1320 - separação do recape	23,5	1605 - quebra por impacto	36,0
1406 - bolhas e separações no interno	23,8	1607 - penetrações e avarias em pista	36,0
1605 - quebra por impacto	23,8	1500 - falha do reparo	36,5
1320 - separação do recape	25,0	1320 - separação do recape	37,0
1106 - talões queimados	25,3	1500 - falha do reparo	37,0
1407 - trinca no interno	25,3	1320 - separação do recape	37,8
1407 - trinca no interno	25,3	1407 - trinca no interno	38,5
1320 - separação do recape	25,8	1500 - falha do reparo	40,0
1606 - rodou vazio	25,8	1605 - quebra por impacto	40,0
1108 - separação do reforço/chafer	26,0	1605 - quebra por impacto	40,0
1317 - levantamento ou separação da cinta	26,0	1317 - levantamento ou separação da cinta	40,5
1500 - falha do reparo	26,0	1320 - separação do recape	40,5
1607 - penetrações e avarias em pista	26,0	1407 - trinca no interno	40,5
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	26,3	1203 - lateral separada - causada por avaria	40,8
1203 - lateral separada - causada por avaria	26,3	1207 - cortes e esmagamentos	41,3
1407 - trinca no interno	26,3	1606 - rodou vazio	41,8
1320 - separação do recape	26,8	1102 - dano no talão devido a sobrecarga	42,0
1203 - lateral separada - causada por avaria	28,0	1310 - arrancamento da barra	42,0
1320 - separação do recape	28,0	1320 - separação do recape	42,0
1606 - rodou vazio	28,0	1320 - separação do recape	42,3
1607 - penetrações e avarias em pista	28,0	1320 - separação do recape	43,0
1320 - separação do recape	28,5	1606 - rodou vazio	44,0
1500 - falha do reparo	28,5	1607 - penetrações e avarias em pista	47,3
1106 - talões queimados	28,8	1102 - dano no talão devido a sobrecarga	49,8
1203 - lateral separada - causada por avaria	28,8	1320 - separação do recape	50,3
1207 - cortes e esmagamentos	28,8	1309 - desgaste excessivo	50,5
1500 - falha do reparo	28,8	1500 - falha do reparo	51,0
1500 - falha do reparo	28,8	1102 - dano no talão devido a sobrecarga	51,8
1607 - penetrações e avarias em pista	28,8	1605 - quebra por impacto	51,8
1203 - lateral separada - causada por avaria	29,3	1500 - falha do reparo	52,3
1203 - lateral separada - causada por avaria	29,8	1607 - penetrações e avarias em pista	52,8
1203 - lateral separada - causada por avaria	29,8	1320 - separação do recape	54,8
1310 - arrancamento da barra	29,8	1108 - separação do reforço/chafer	55,5
1320 - separação do recape	29,8		

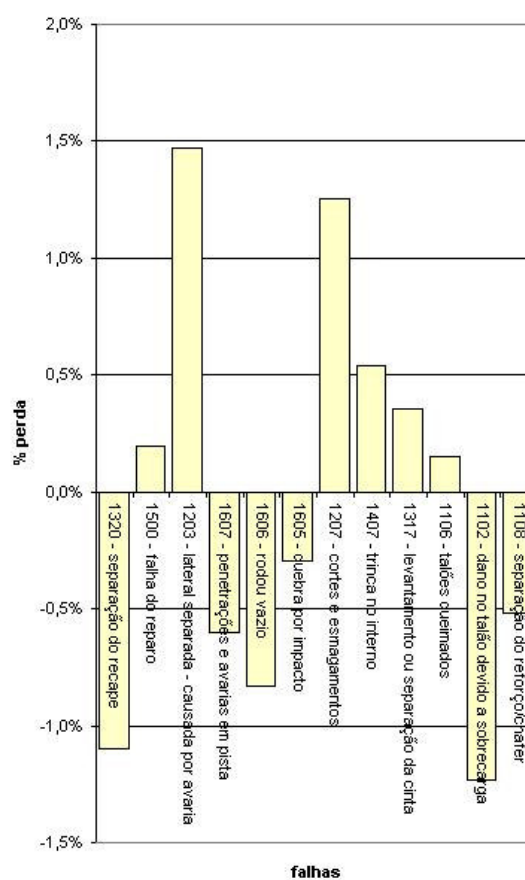
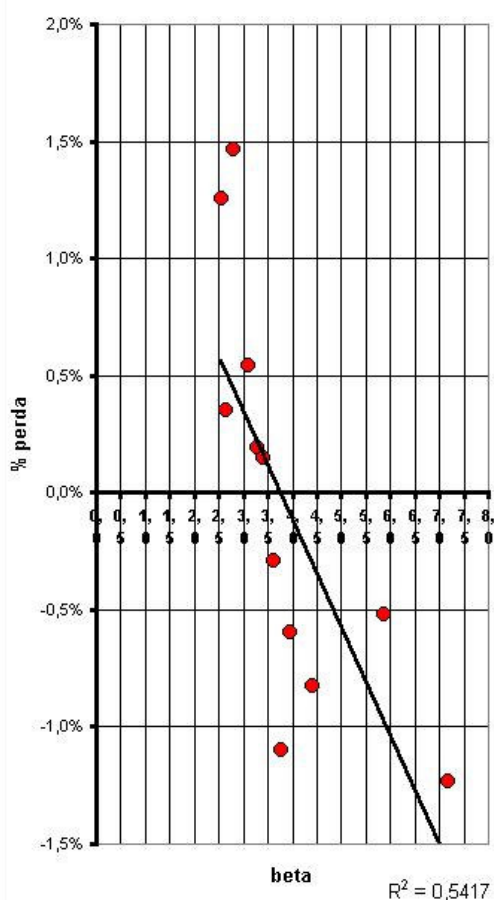


## Anexo D – Análises paramétricas e não paramétricas das amostras de pneus sucitados das frotas

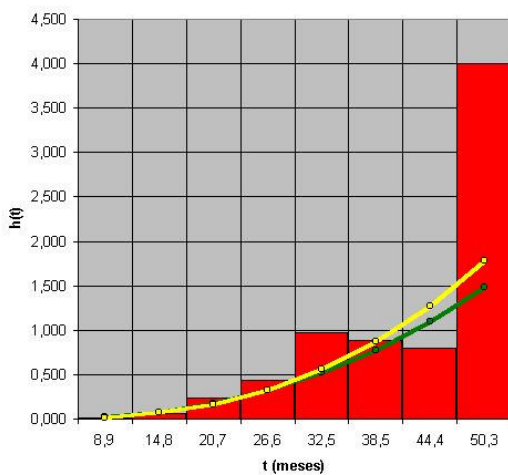
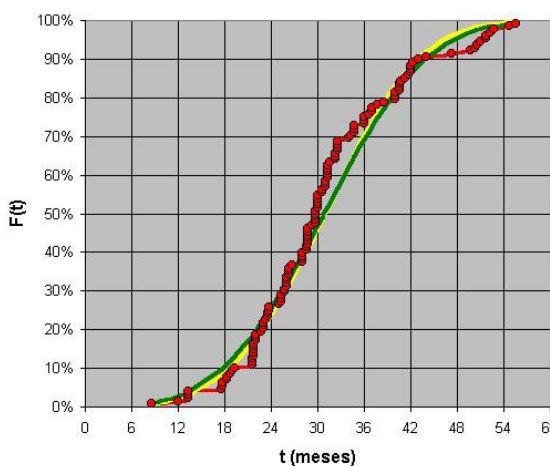
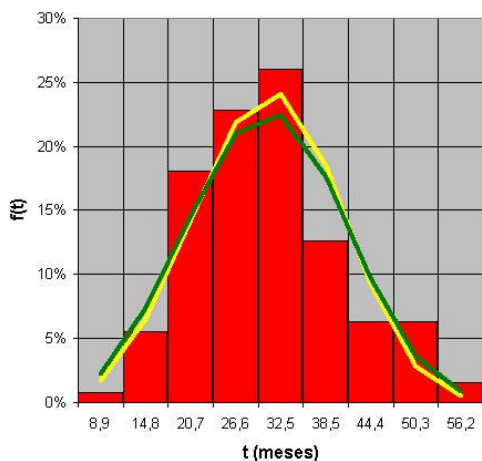
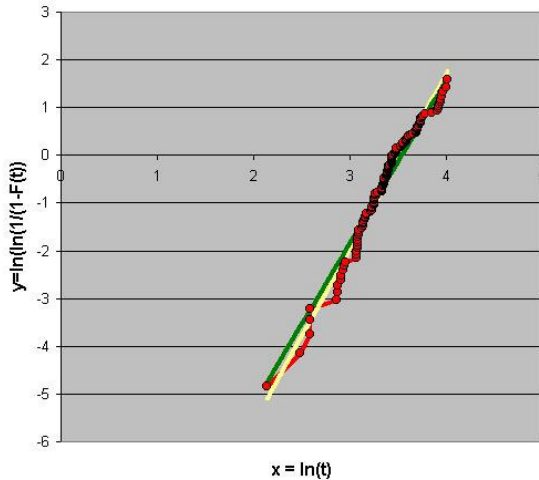
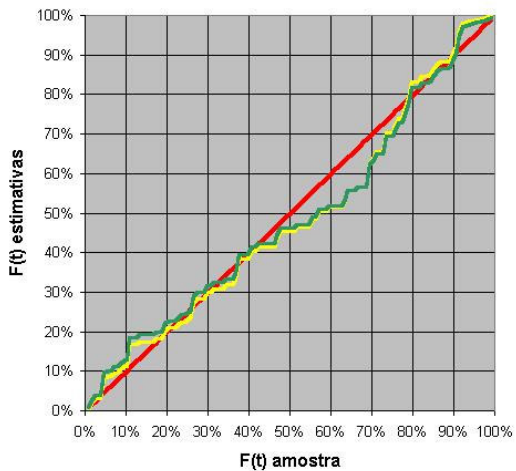
Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

**Produto:** Pneu 295/80R22.5  
**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 01

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	3,4	34,2	127	0	30,8	
1320 - separação do recape	3,8	52,9	26	101	32,1	-1,1%
1500 - falha do reparo	3,3	61,8	18	109	30,4	0,2%
1203 - lateral separada - causada por avaria	2,8	71,9	15	112	27,4	1,5%
1607 - penetrações e avarias em pista	4,0	66,5	10	117	33,0	-0,6%
1606 - rodou vazio	4,4	63,3	10	117	33,8	-0,8%
1605 - quebra por impacto	3,6	71,7	9	118	32,0	-0,3%
1207 - cortes e esmagamentos	2,6	93,0	9	118	25,7	1,3%
1407 - trinca no interno	3,1	79,4	9	118	28,6	0,5%
1317 - levantamento ou separação da cinta	2,6	122,8	4	123	27,4	0,4%
1106 - talões queimados	3,4	94,7	4	123	29,4	0,1%
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	7,2	62,9	4	123	42,4	-1,2%
1108 - separação do reforço/chafer	5,9	75,8	2	125	40,8	-0,5%



soma de % perdas positivas : 4,0%  
 % do total da amostra incluídas nas principais falhas : 94%



Frota 01

mediana	29,75
média	30,79134
desvio	9,657516
cv	0,313644

y = ax + b	
a	3,7
b	-12,9
R <sup>2</sup>	0,972
n	127
beta	3,7
eta	34,1

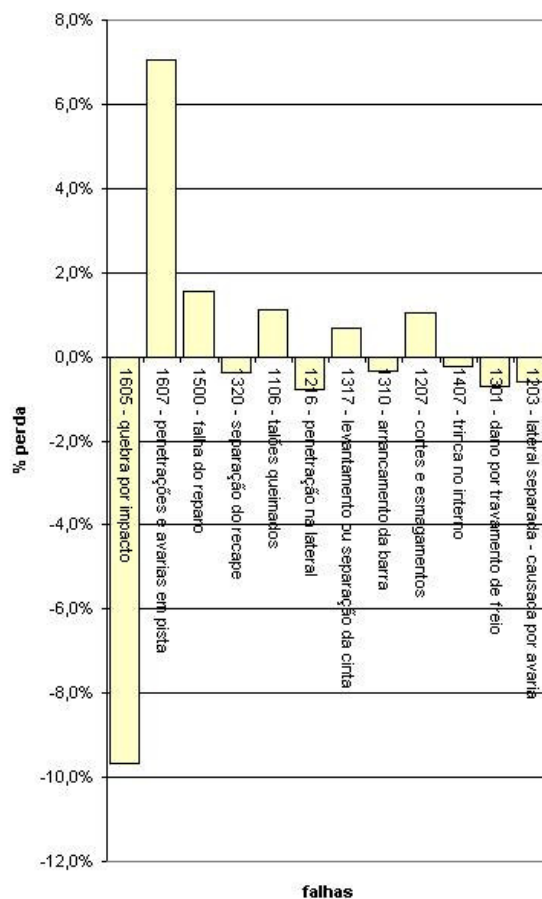
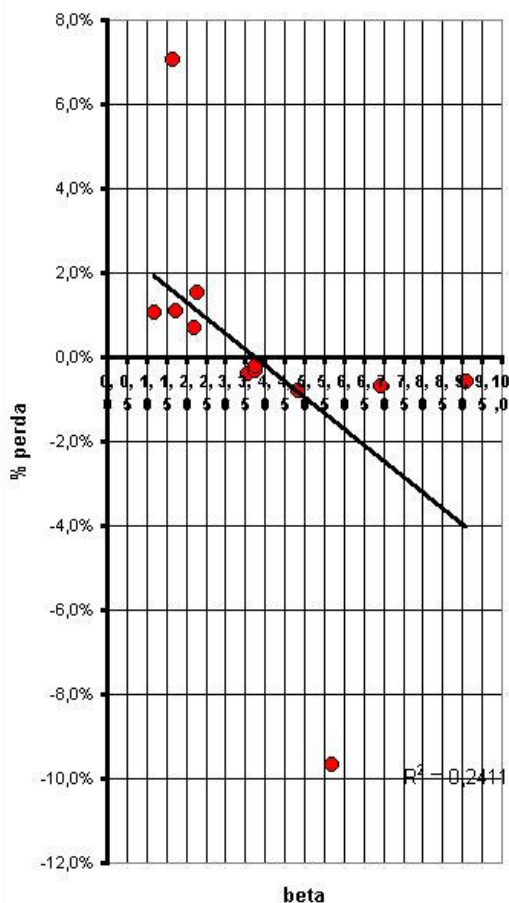
zerar ->	0,000
beta	3,4
eta	34,2

- amostra
- mínimos quadrados
- máxima verossimilhança

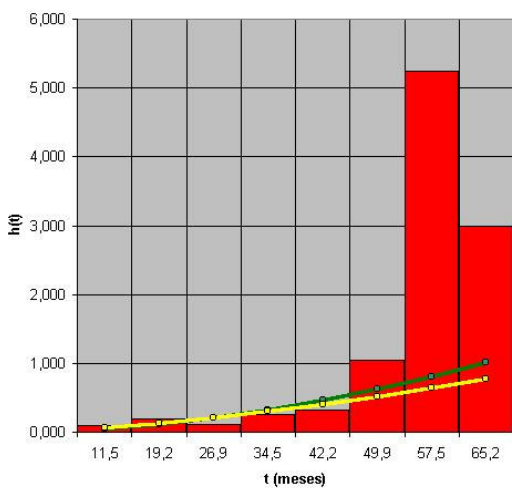
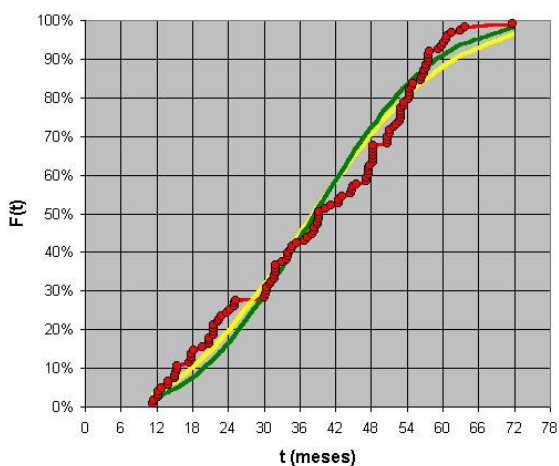
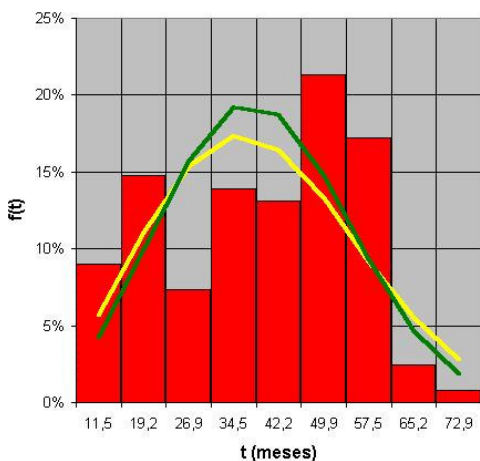
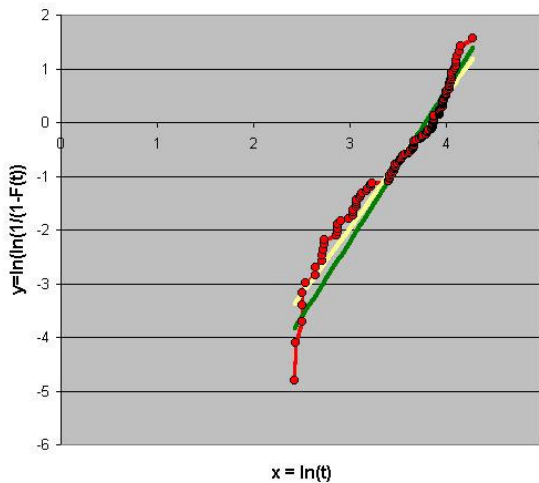
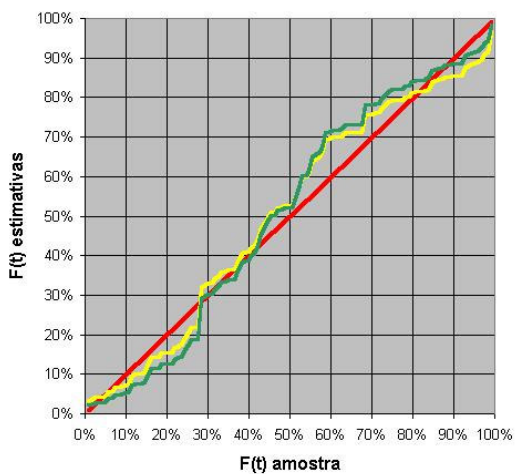
**Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull**

**Produto:** Pneu 295/80R22.5  
**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 02

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	2,8	43,8	122	0	38,9	
1605 - quebra por impacto	5,7	59,8	36	86	47,9	-9,7%
1607 - penetrações e avarias em pista	1,7	106,0	25	97	28,2	7,1%
1500 - falha do reparo	2,3	92,0	21	101	36,0	1,5%
1320 - separação do recape	3,5	101,1	7	115	41,4	-0,4%
1106 - talões queimados	1,7	257,1	5	117	28,8	1,1%
1216 - penetração na lateral	4,9	91,2	5	117	46,0	-0,8%
1317 - levantamento ou separação da cinta	2,2	200,7	4	118	31,1	0,7%
1310 - arrancamento da barra	3,8	113,0	4	118	42,8	-0,3%
1207 - cortes e esmagamentos	1,2	879,8	3	119	22,6	1,1%
1407 - trinca no interno	3,8	121,9	3	119	42,3	-0,2%
1301 - dano por travamento de freio	6,9	84,6	3	119	49,8	-0,7%
1203 - lateral separada - causada por avaria	9,1	80,8	2	120	52,8	-0,6%



soma de % perdas positivas : 11,5%  
 % do total da amostra incluídas nas principais falhas : 97%



mediana 39,25  
 média 38,88525  
 desvio 15,55303  
 cv 0,399973

**Frota 02**

y=ax+b	
a	2,5
b	-9,4
R <sup>2</sup>	0,958
n	122
beta	2,5
eta	44,1

zerar ->	0,000
beta	2,8
eta	43,8

█ amostra

█ mínimos quadrados

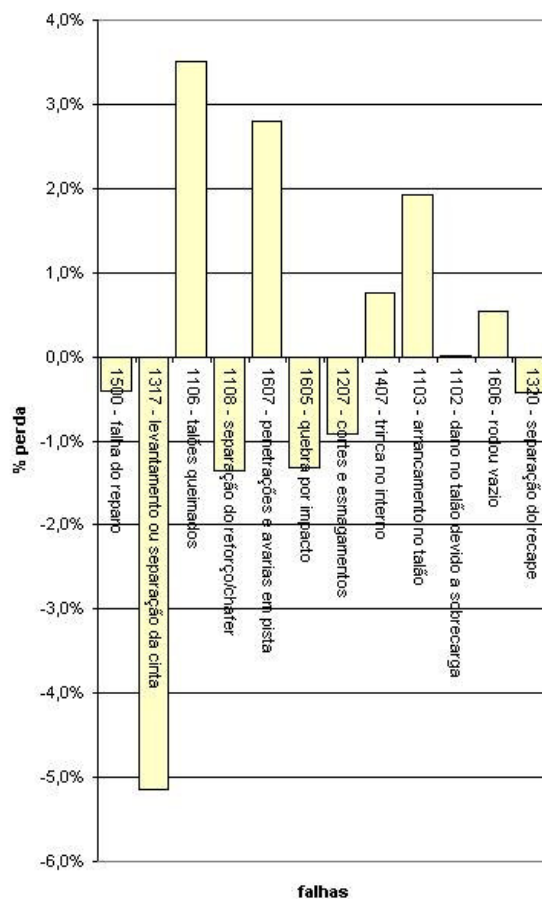
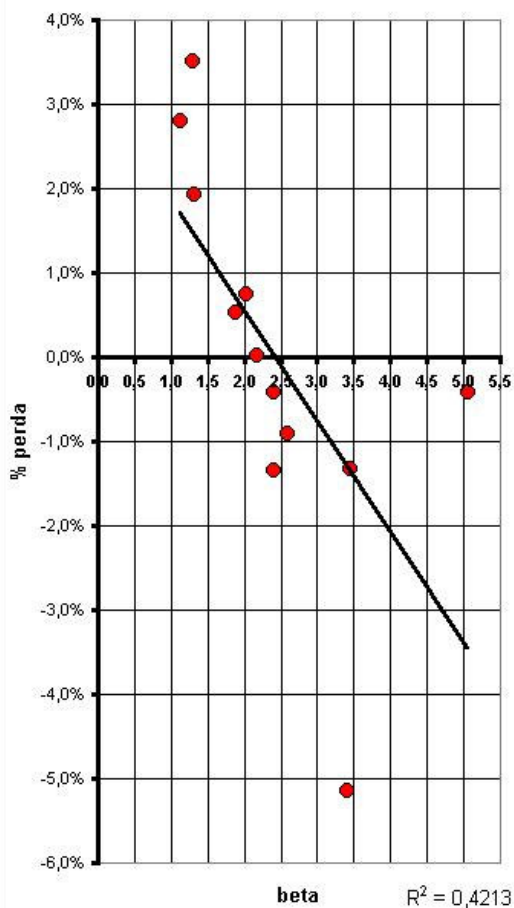
█ máxima verossimilhança

### Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

**Produto:** Pneu 295/80R22.5

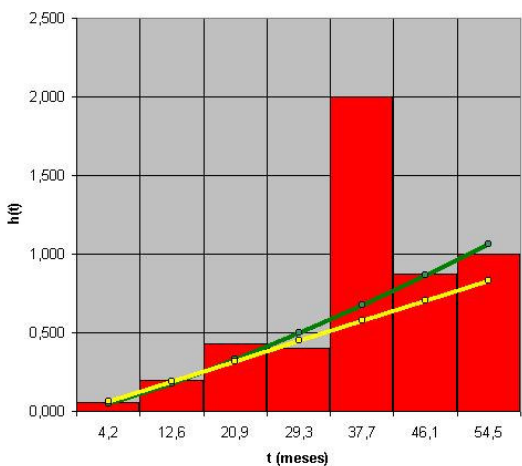
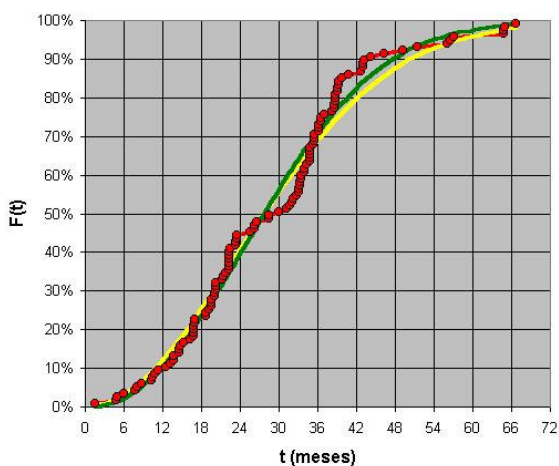
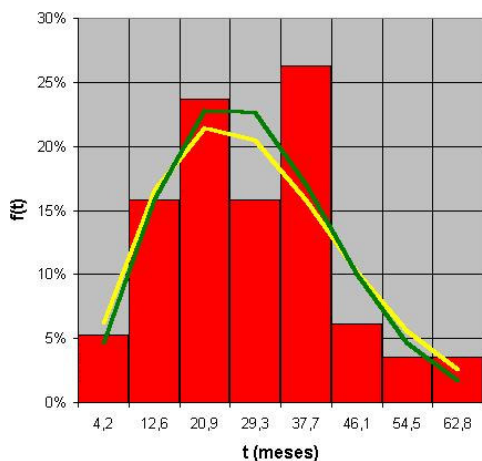
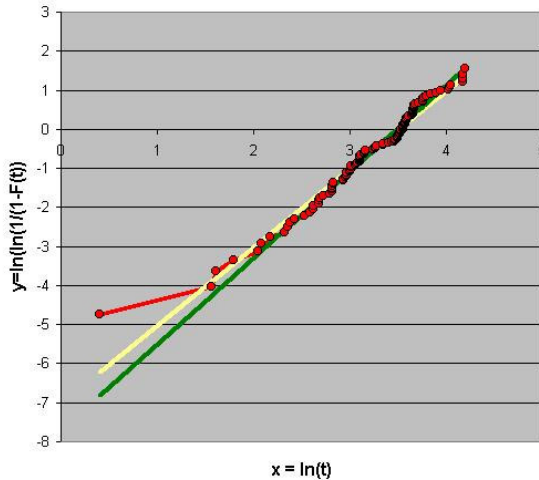
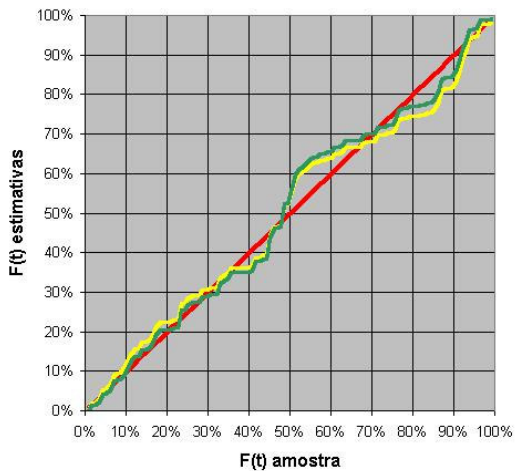
**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 03

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	2,2	32,6	114	0	28,9	
1500 - falha do reparo	2,4	59,4	28	86	29,3	-0,4%
1317 - levantamento ou separação da cinta	3,4	57,9	22	92	35,1	-5,1%
1106 - talões queimados	1,3	196,8	10	104	18,4	3,5%
1108 - separação do reforço/chafer	2,4	95,5	9	105	33,4	-1,3%
1607 - penetrações e avarias em pista	1,1	308,6	8	106	18,2	2,8%
1605 - quebra por impacto	3,4	84,2	6	108	35,8	-1,3%
1207 - cortes e esmagamentos	2,6	104,3	6	108	33,6	-0,9%
1407 - trinca no interno	2,0	136,7	6	108	25,0	0,7%
1103 - arrancamento no talão	1,3	317,2	5	109	16,8	1,9%
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	2,2	152,0	4	110	28,8	0,0%
1606 - rodou vazio	1,9	218,0	3	111	23,2	0,5%
1320 - separação do recape	5,1	100,9	1	113	42,8	-0,4%



soma de % perdas positivas : 9,5%

% do total da amostra incluídas nas principais falhas : 95%



**Frota 03**

mediana 29,25  
 média 28,89474  
 desvio 13,77606  
 cv 0,476767

y=ax+b	
a	2,0
b	-7,0
R <sup>2</sup>	0,972
n	114
beta	2,0
eta	33,2

zerar ->	0,000
beta	2,2
eta	32,6

■ amostra

■ mínimos quadrados

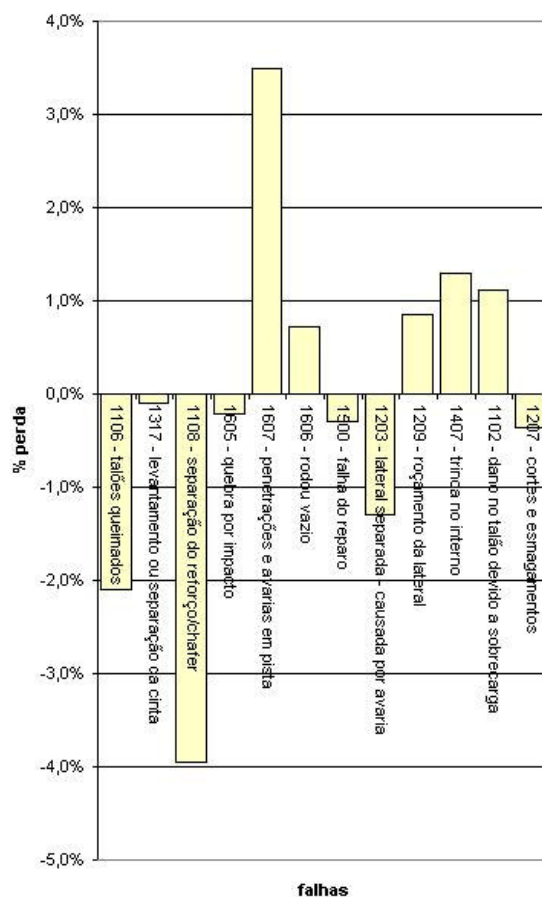
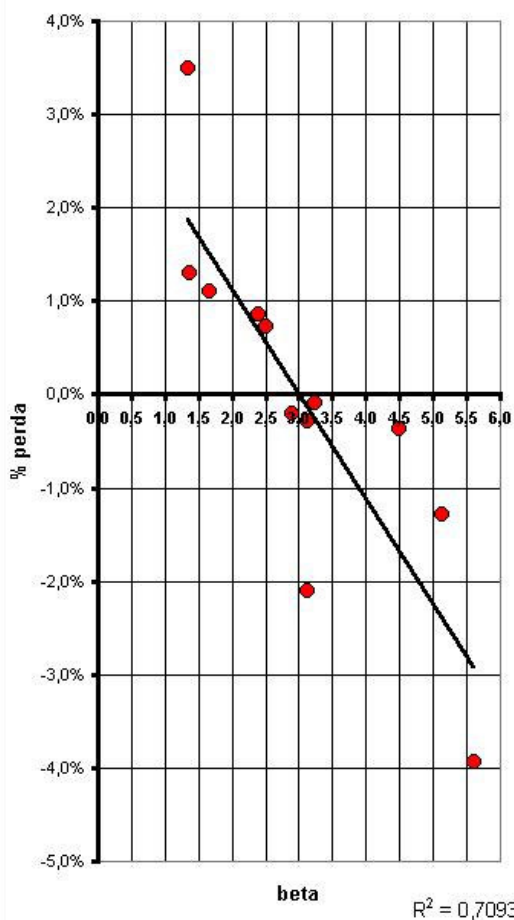
■ máxima verossimilhança

### Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

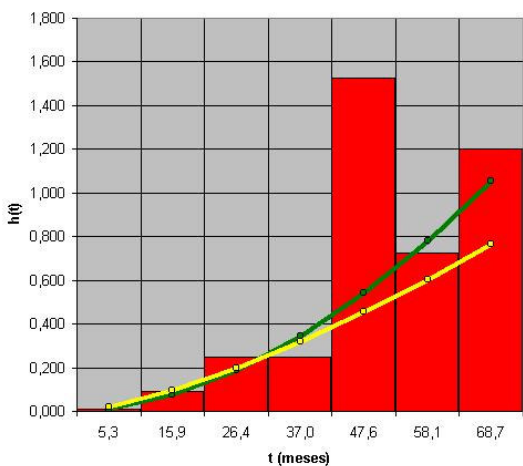
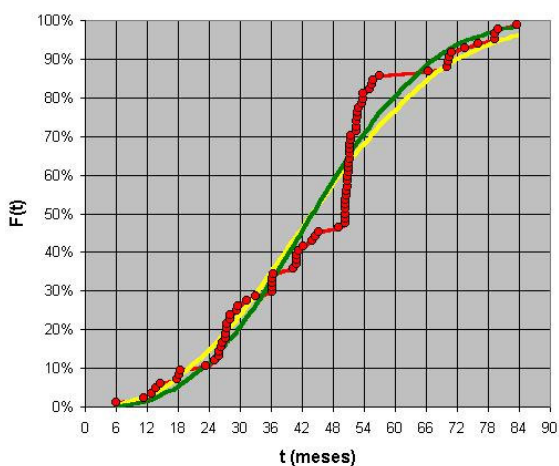
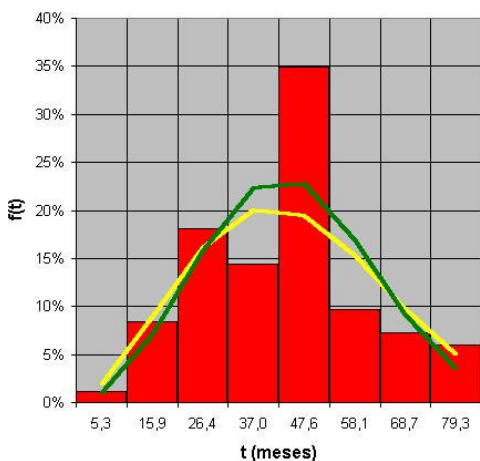
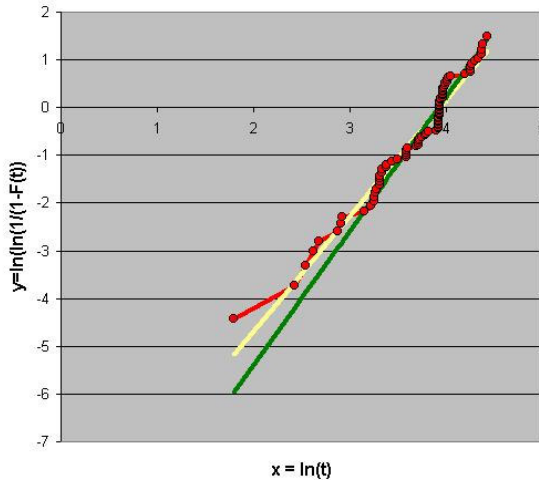
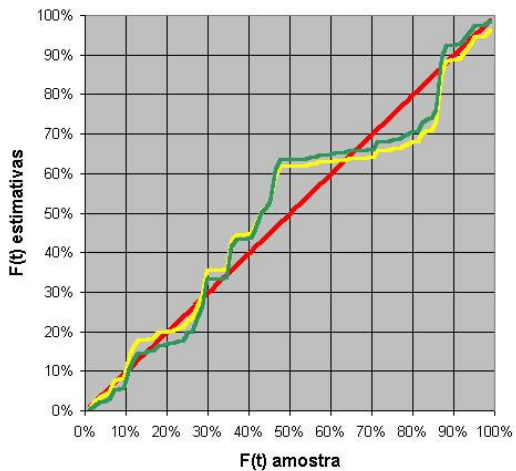
**Produto:** Pneu 295/80R22.5

**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 04

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	2,8	50,0	83	0	44,6	
1106 - talões queimados	3,1	92,0	13	70	49,6	-2,1%
1317 - levantamento ou separação da cinta	3,2	92,9	12	71	44,8	-0,1%
1108 - separação do reforço/chafer	5,6	81,7	10	73	57,4	-3,9%
1605 - quebra por impacto	2,9	112,8	8	75	45,5	-0,2%
1607 - penetrações e avarias em pista	1,3	289,4	7	76	27,7	3,5%
1606 - rodou vazio	2,5	132,0	7	76	41,1	0,7%
1500 - falha do reparo	3,1	117,7	6	77	46,3	-0,3%
1203 - lateral separada - causada por avaria	5,1	99,6	4	79	55,9	-1,3%
1209 - roçamento da lateral	2,4	174,3	4	79	37,1	0,9%
1407 - trinca no interno	1,4	512,5	3	80	29,2	1,3%
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	1,7	347,6	3	80	31,4	1,1%
1207 - cortes e esmagamentos	4,5	123,4	2	81	51,3	-0,4%



soma de % perdas positivas : 7,5%  
% do total da amostra incluídas nas principais falhas : 95%



**Frota 04**

mediana 50,25  
 média 44,59036  
 desvio 17,38089  
 cv 0,38979

y= ax+b	
a	2,4
b	-9,5
R <sup>2</sup>	0,966
n	83
beta	2,4
eta	50,9

zerar ->	0,000
beta	2,8
eta	50,0

amostra

minimos quadrados

máxima verossimilhança

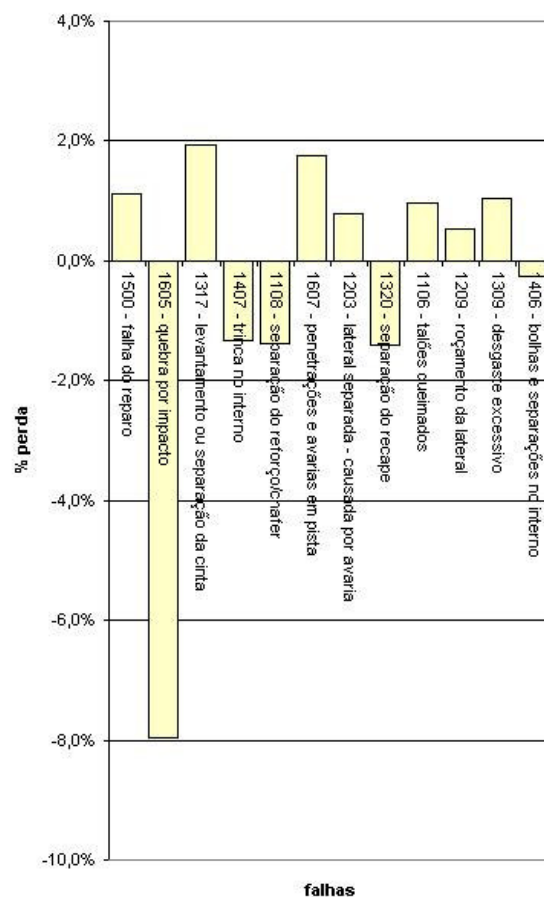
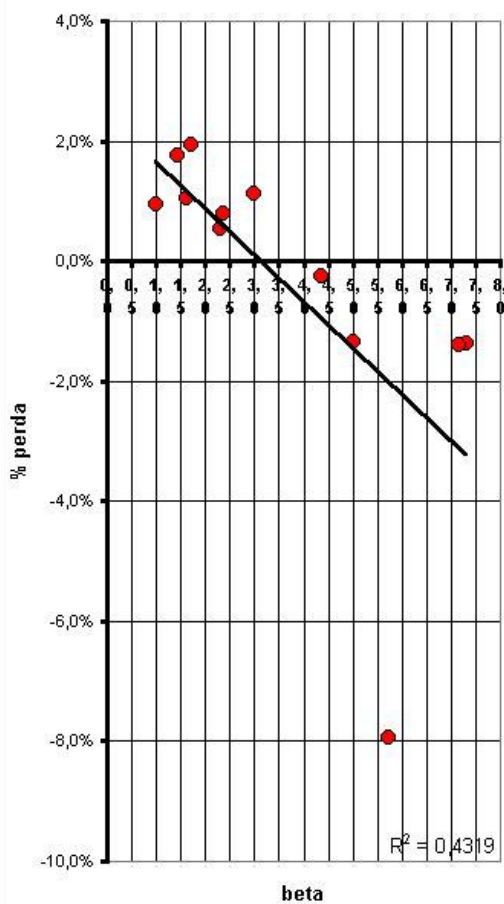


### Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

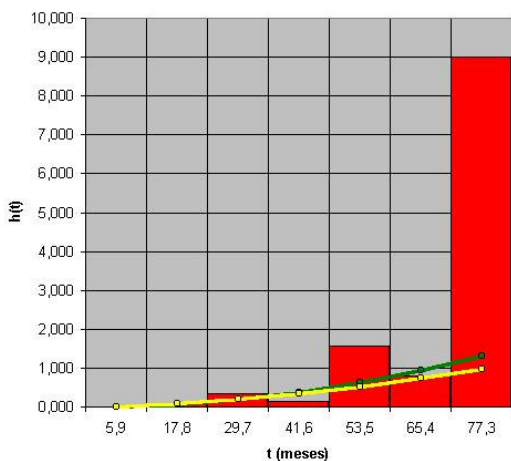
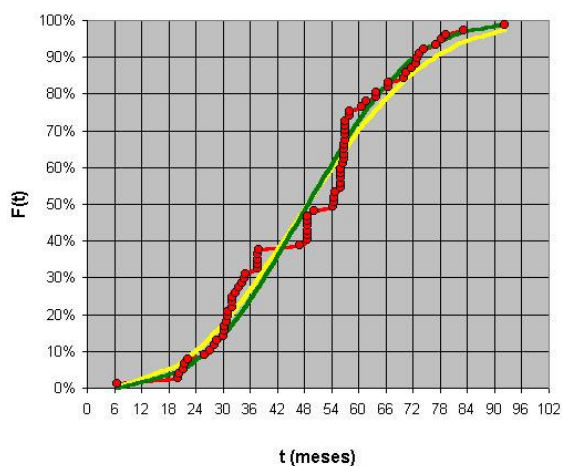
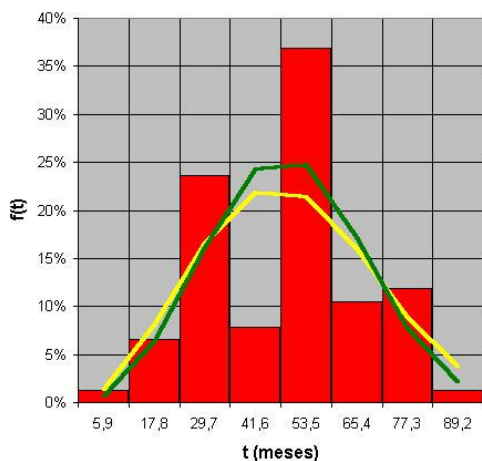
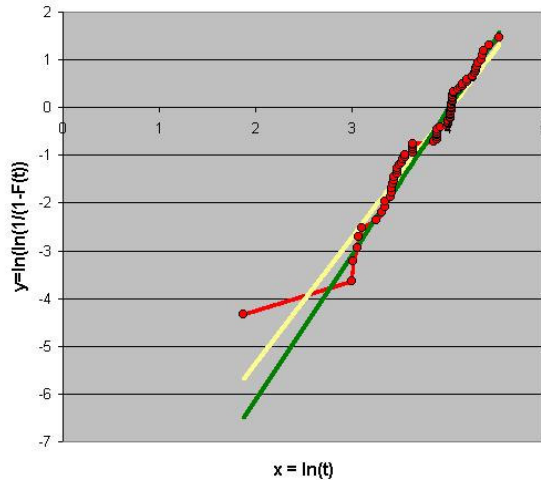
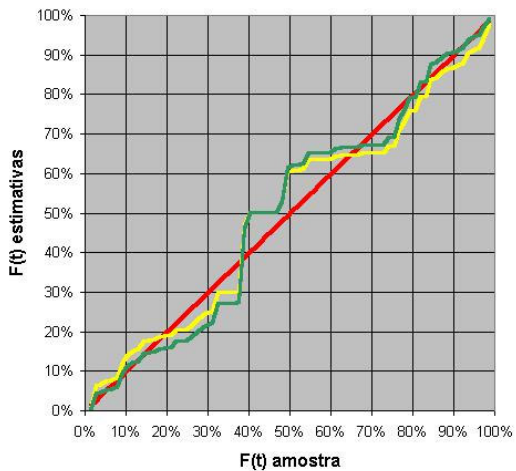
**Produto:** Pneu 295/80R22.5

**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 05

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	3,0	55,0	76	0	49,1	
1500 - falha do reparo	3,0	84,2	21	55	47,7	1,1%
1605 - quebra por impacto	5,7	76,9	19	57	60,8	-7,9%
1317 - levantamento ou separação da cinta	1,7	283,8	4	72	31,9	1,9%
1407 - trinca no interno	5,0	106,3	4	72	60,9	-1,3%
1108 - separação do reforço/chafer	7,3	97,9	3	73	65,5	-1,4%
1607 - penetrações e avarias em pista	1,4	475,2	3	73	28,1	1,8%
1203 - lateral separada - causada por avaria	2,4	210,0	3	73	39,8	0,8%
1320 - separação do recape	7,1	98,5	3	73	65,8	-1,4%
1106 - talões queimados	1,0	1.903,8	2	74	31,8	1,0%
1209 - roçamento da lateral	2,3	256,0	2	74	39,5	0,5%
1309 - desgaste excessivo	1,6	490,3	2	74	30,3	1,0%
1406 - bolhas e separações no interno	4,4	133,3	2	74	53,6	-0,2%



soma de % perdas positivas : 8,1%  
 % do total da amostra incluídas nas principais falhas : 89%



**Frota 05**

mediana 54,375  
 média 49,09539  
 desvio 17,93469  
 cv 0,365303

y=ax+b	
a	2,6
b	-10,6
R <sup>2</sup>	0,949
n	76
beta	2,6
eta	55,8

zerar ->	0,000
beta	3,0
eta	55,0

■ amostra

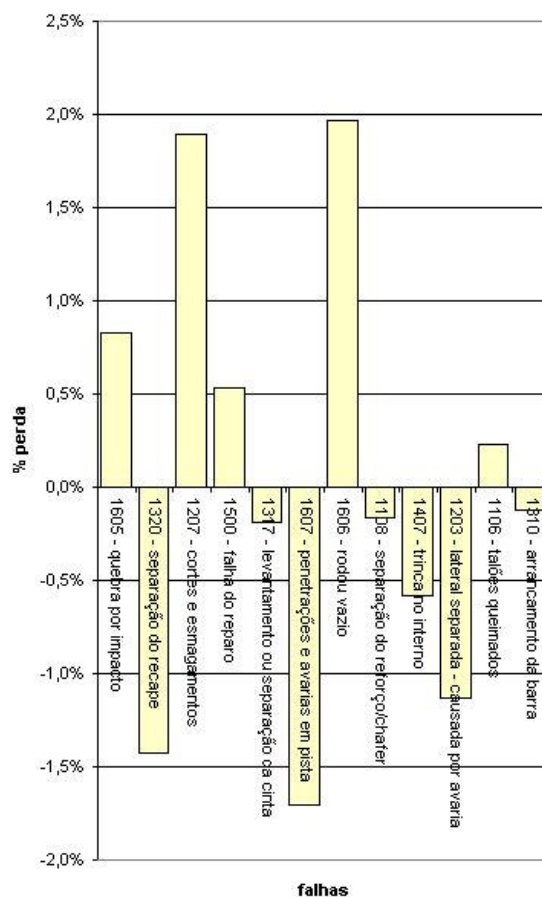
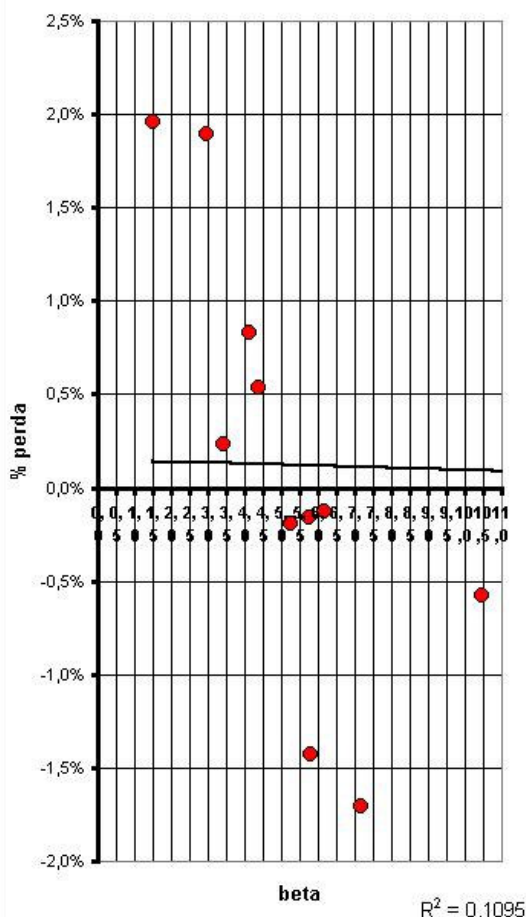
■ mínimos quadrados

■ máxima verossimilhança

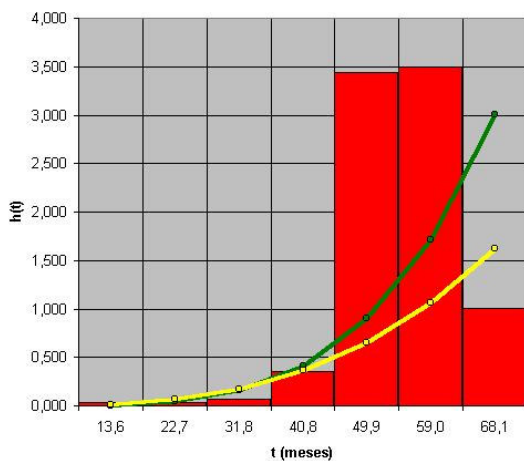
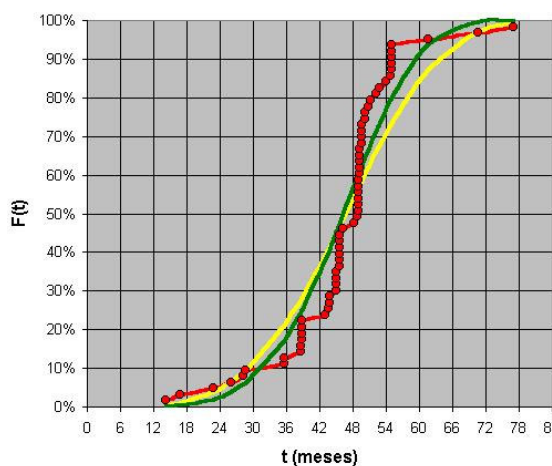
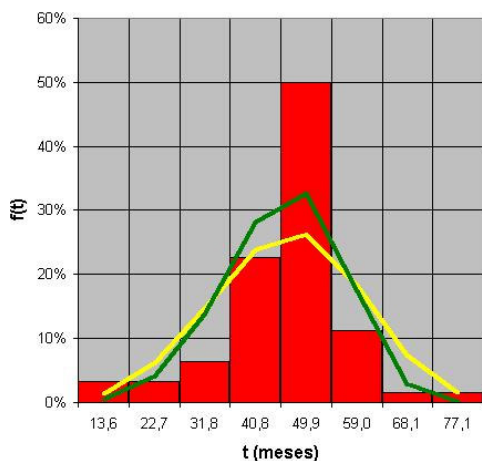
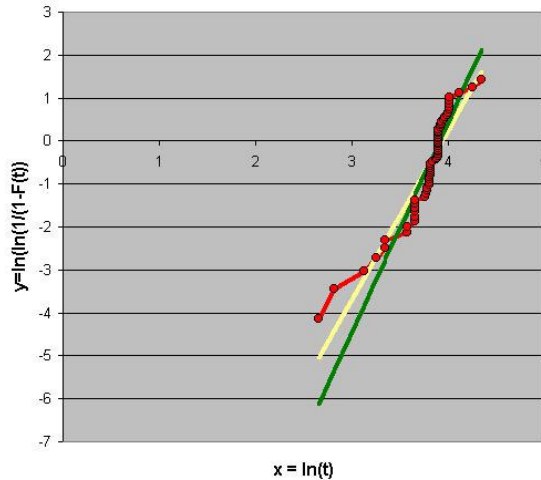
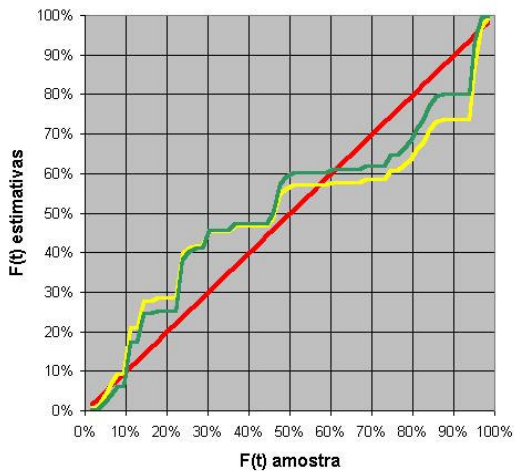
**Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull**

**Produto:** Pneu 295/80R22.5  
**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 06

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	4,40	49,19	63	0	45,3	
1605 - quebra por impacto	4,2	73,0	12	51	43,7	0,8%
1320 - separação do recape	5,8	67,3	12	51	48,0	-1,4%
1207 - cortes e esmagamentos	3,0	95,9	8	55	39,4	1,9%
1500 - falha do reparo	4,4	81,1	7	56	43,3	0,5%
1317 - levantamento ou separação da cinta	5,3	78,2	6	57	46,1	-0,2%
1607 - penetrações e avarias em pista	7,2	72,0	6	57	52,6	-1,7%
1606 - rodou vazio	1,5	242,3	5	58	35,0	2,0%
1108 - separação do reforço/chafer	5,8	91,8	2	61	47,5	-0,2%
1407 - trinca no interno	10,5	82,2	1	62	61,5	-0,6%
1203 - lateral separada - causada por avaria	239,1	#NUM!	1	62	77,0	-1,1%
1106 - talões queimados	3,4	160,6	1	62	38,8	0,2%
1310 - arrancamento da barra	6,2	99,6	1	62	48,8	-0,1%



soma de % perdas positivas : 5,5%  
 % do total da amostra incluídas nas principais falhas : 98%



**Frota 06**

mediana 48,875  
 média 45,93952  
 desvio 10,46919  
 cv 0,227891

y=ax+b	
a	3,9
b	-15,5
R <sup>2</sup>	0,876
n	62
beta	3,9
eta	51,1

zerar ->	0,000
beta	4,9
eta	49,8

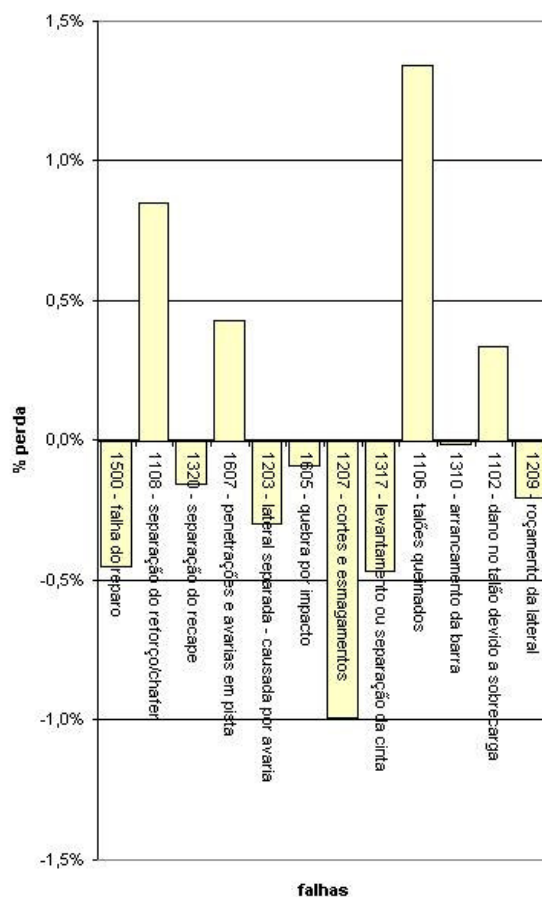
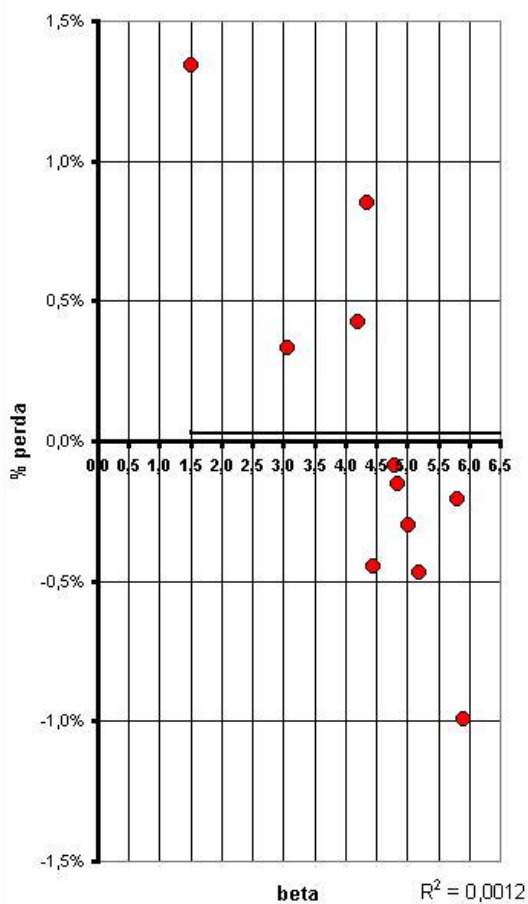
- amostra
- mínimos quadrados
- máxima verossimilhança

### Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

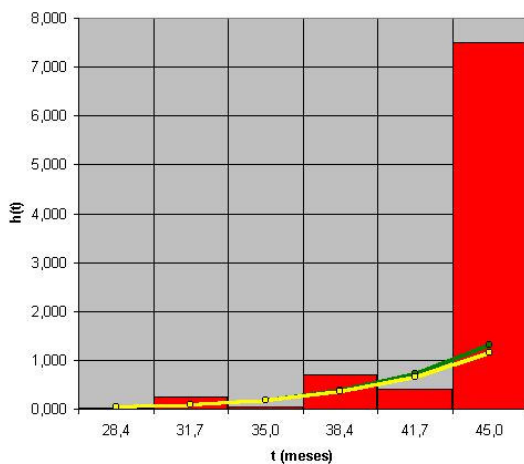
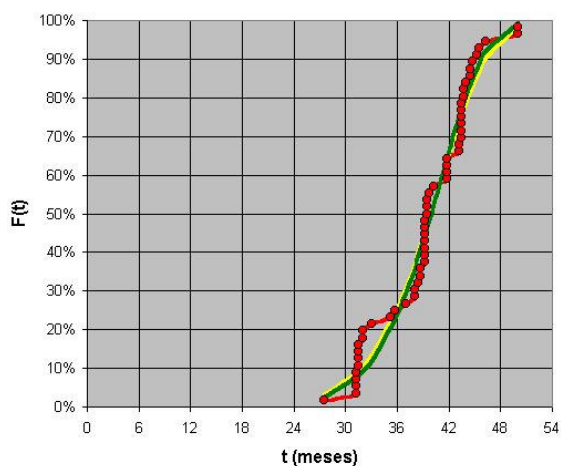
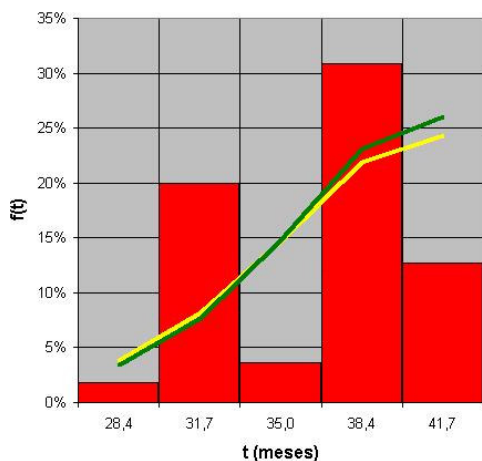
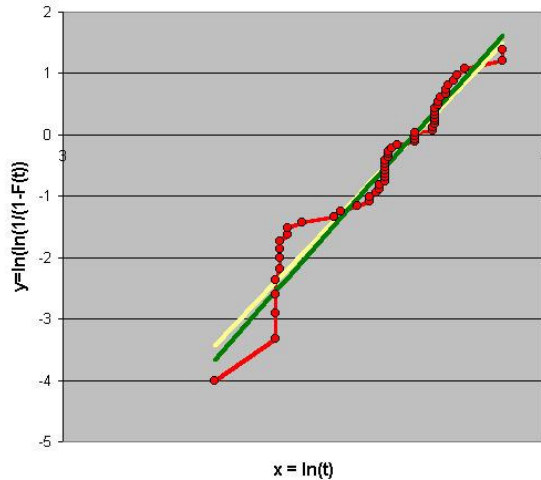
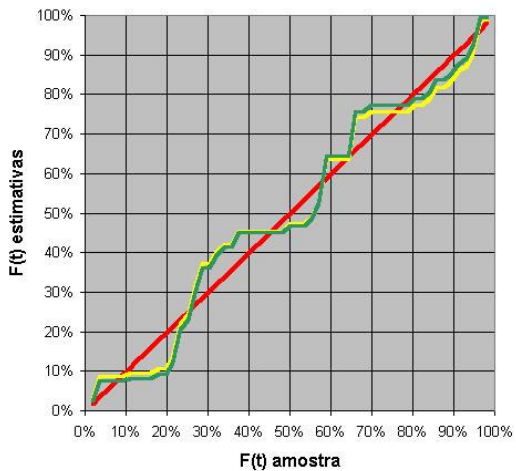
**Produto:** Pneu 295/80R22.5

**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 07

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	4,4	42,0	58	0	38,9	
1500 - falha do reparo	4,5	60,0	12	46	39,6	-0,4%
1108 - separação do reforço/chafer	4,4	61,5	11	47	37,5	0,9%
1320 - separação do recape	4,9	70,4	5	53	39,6	-0,2%
1607 - penetrações e avarias em pista	4,2	74,8	5	53	37,2	0,4%
1203 - lateral separada - causada por avaria	5,0	69,5	5	53	40,2	-0,3%
1605 - quebra por impacto	4,8	74,0	4	54	39,4	-0,1%
1207 - cortes e esmagamentos	5,9	68,8	4	54	44,1	-1,0%
1317 - levantamento ou separação da cinta	5,2	71,7	4	54	41,4	-0,5%
1106 - talões queimados	1,5	233,6	4	54	31,9	1,3%
1310 - arrancamento da barra	239,1	#NUM!	1	57	39,3	0,0%
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	3,1	152,8	1	57	31,5	0,3%
1209 - roçamento da lateral	5,8	87,7	1	57	43,5	-0,2%



soma de % perdas positivas : 3,0%  
% do total da amostra incluídas nas principais falhas : 98%



**Frota 07**

mediana 39,5  
 média 39,37273  
 desvio 5,24512  
 cv 0,133217

y=ax+b	
a	8,3
b	-30,8
R <sup>2</sup>	0,941
n	55
beta	8,3
eta	41,7

zerar ->	0,000
beta	8,9
eta	41,6

amostra

minimos quadrados

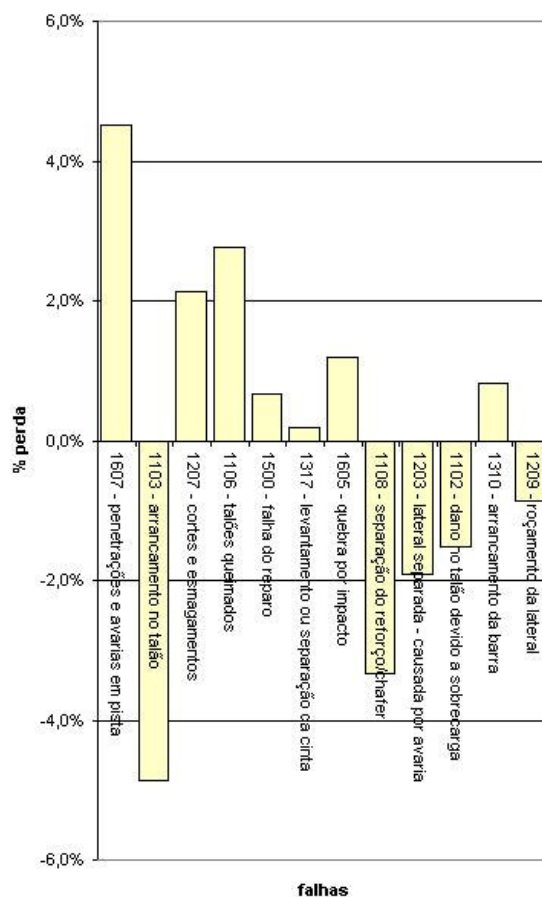
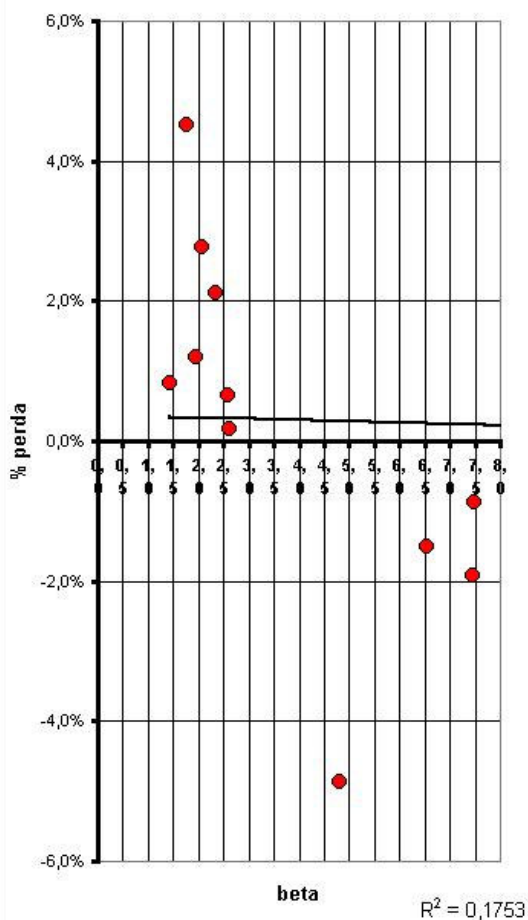
máxima verossimilhança

### Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

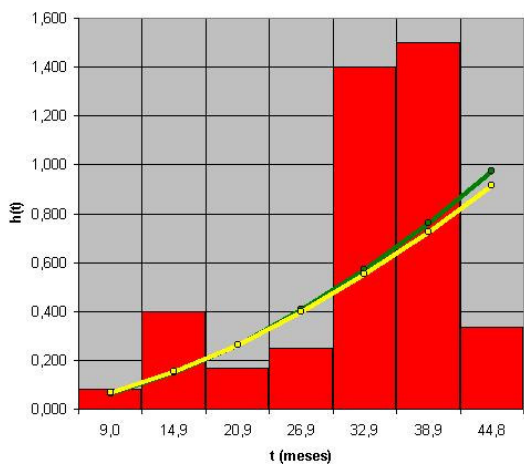
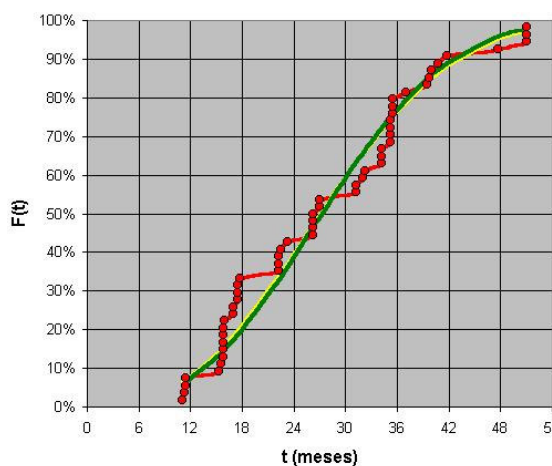
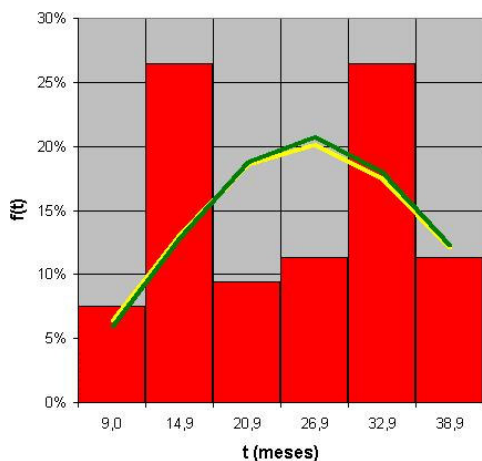
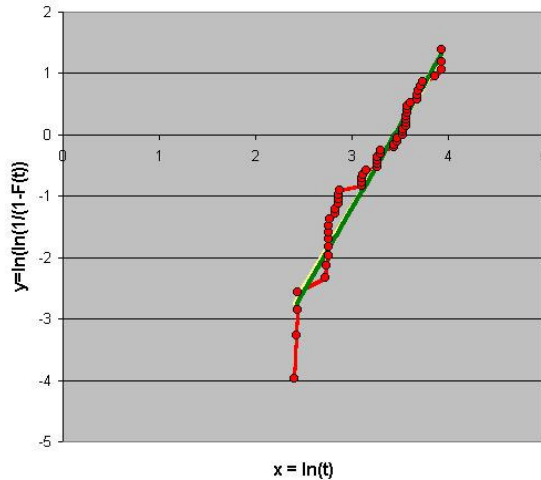
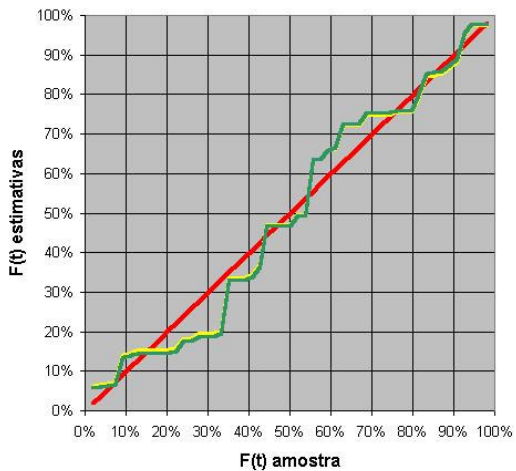
**Produto:** Pneu 295/80R22.5

**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 08

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	2,7	31,1	53	0	27,6	
1607 - penetrações e avarias em pista	1,8	79,5	9	44	21,5	4,5%
1103 - arrancamento no talão	4,8	51,0	8	45	35,2	-4,9%
1207 - cortes e esmagamentos	2,4	71,9	7	46	23,8	2,1%
1106 - talões queimados	2,1	78,9	7	46	22,6	2,8%
1500 - falha do reparo	2,6	84,0	4	49	25,4	0,7%
1317 - levantamento ou separação da cinta	2,6	83,0	4	49	27,0	0,2%
1605 - quebra por impacto	2,0	128,5	3	50	22,1	1,2%
1108 - separação do reforço/chafer	205,3	#NUM!	2	51	51,0	-3,3%
1203 - lateral separada - causada por avaria	7,5	58,2	2	51	41,1	-1,9%
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	6,6	60,3	2	51	38,3	-1,5%
1310 - arrancamento da barra	1,4	464,8	1	52	15,8	0,8%
1209 - roçamento da lateral	7,5	63,7	1	52	40,0	-0,9%



soma de % perdas positivas : 12,3%  
% do total da amostra incluídas nas principais falhas : 94%



**Frota 08**

mediana 26,25  
 média 27,60377  
 desvio 11,21323  
 cv 0,406221

y=ax+b	
a	2,6
b	-9,1
R <sup>2</sup>	0,938
n	53
beta	2,6
eta	31,2

zerar ->	0,000
beta	2,7
eta	31,1

amostra

minimos quadrados

máxima verossimilhança

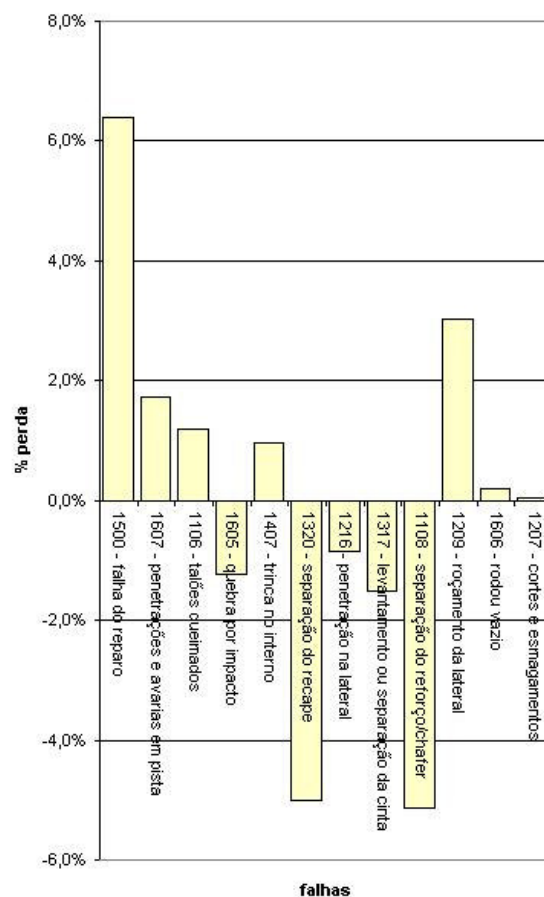
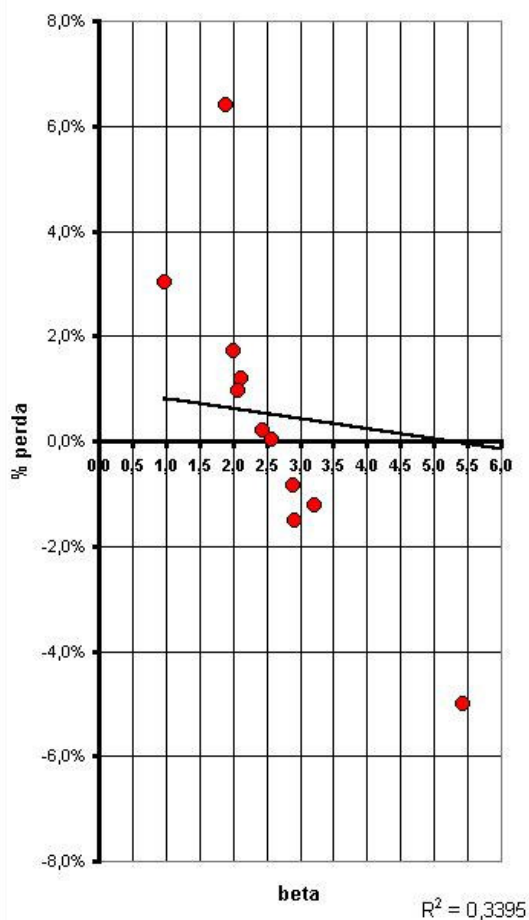


### Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

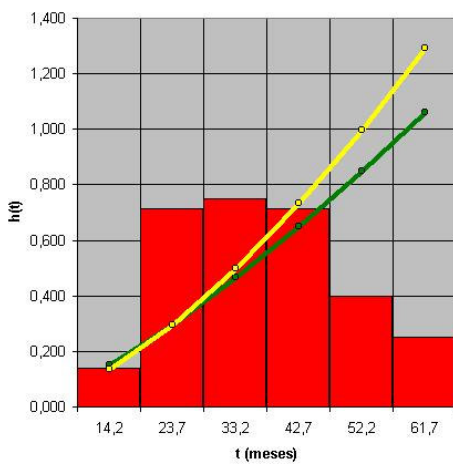
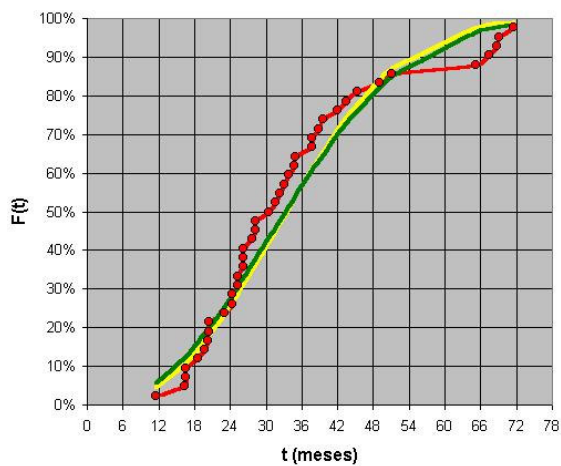
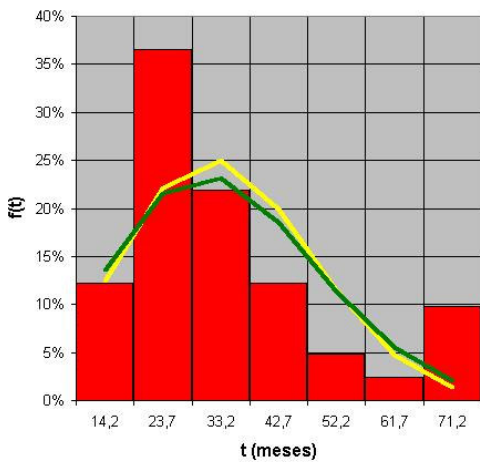
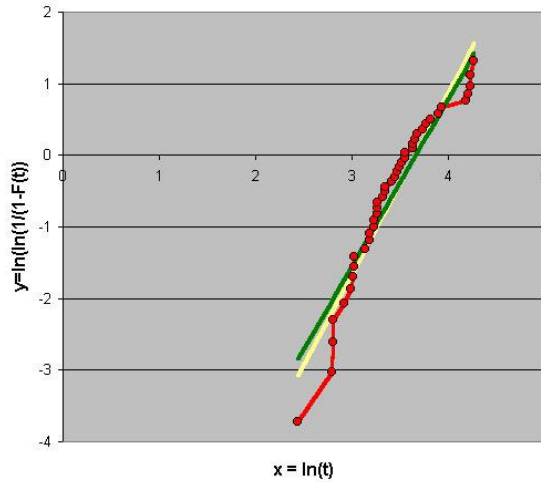
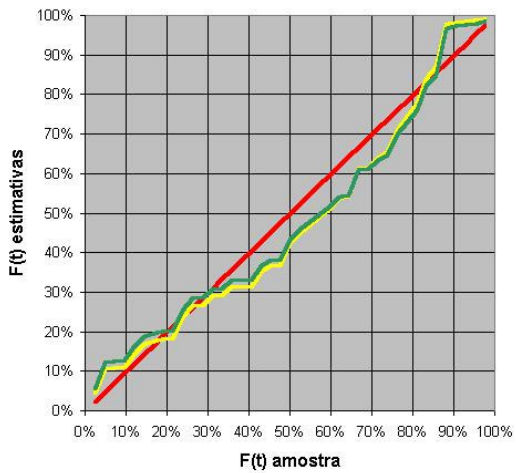
**Produto:** Pneu 295/80R22.5

**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 09

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	2,3	38,8	41	0	34,2	
1500 - falha do reparo	1,9	78,0	10	31	27,4	6,4%
1607 - penetrações e avarias em pista	2,0	107,4	5	36	30,0	1,7%
1106 - talões queimados	2,1	130,5	3	36	29,1	1,2%
1605 - quebra por impacto	3,2	94,0	3	36	39,5	-1,2%
1407 - trinca no interno	2,1	132,2	3	36	30,0	1,0%
1320 - separação do recape	5,4	77,8	3	36	55,9	-5,0%
1216 - penetração na lateral	2,9	100,0	3	36	37,9	-0,9%
1317 - levantamento ou separação da cinta	2,9	114,3	2	39	44,4	-1,5%
1108 - separação do reforço/chafer	35,9	71,2	2	39	68,4	-5,1%
1209 - roçamento da lateral	1,0	711,9	2	39	14,0	3,0%
1606 - rodou vazio	2,4	134,8	2	39	32,9	0,2%
1207 - cortes e esmagamentos	2,6	165,8	1	40	33,8	0,0%



soma de % perdas positivas : 13,5%  
% do total da amostra incluídas nas principais falhas : 95%



**Frota 09**

mediana 30,5  
 média 34,20732  
 desvio 15,82412  
 cv 0,462596

y=ax+b	
a	2,5
b	-9,3
R <sup>2</sup>	0,932
n	41
beta	2,5
eta	38,5

zerar ->	0,000
beta	2,3
eta	38,8

amostra

minimos quadrados

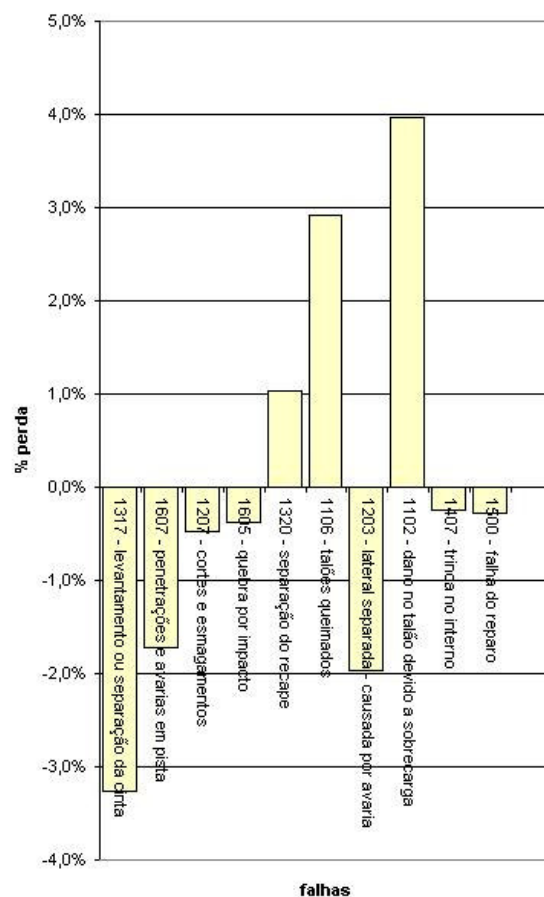
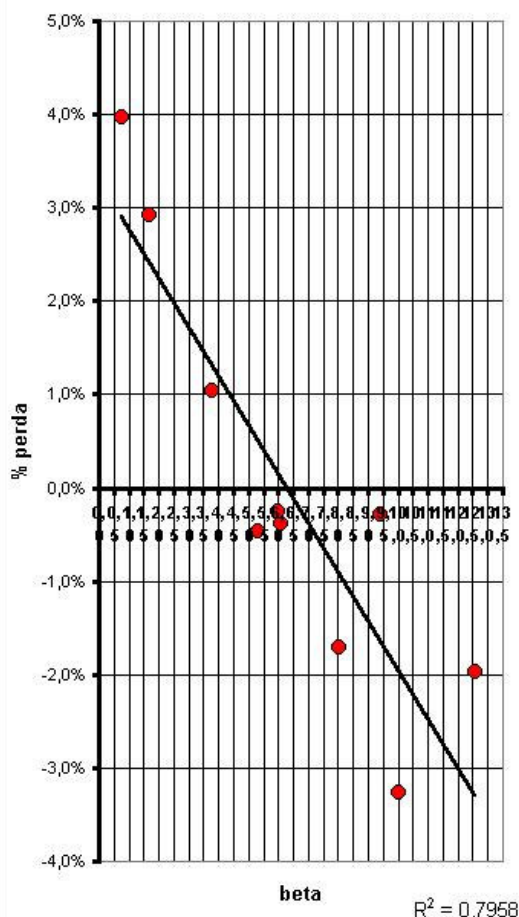
máxima verossimilhança

### Planilha para análise de perda e parâmetro beta da distribuição de Weibull

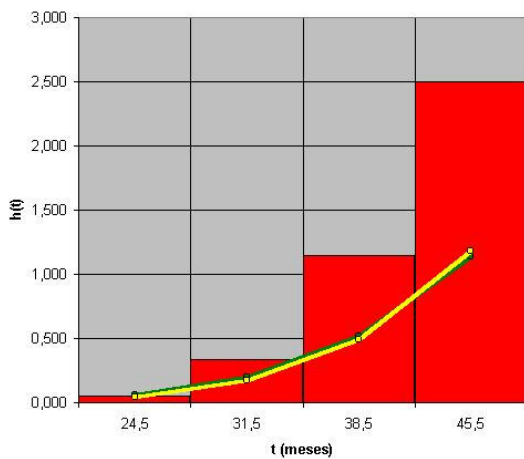
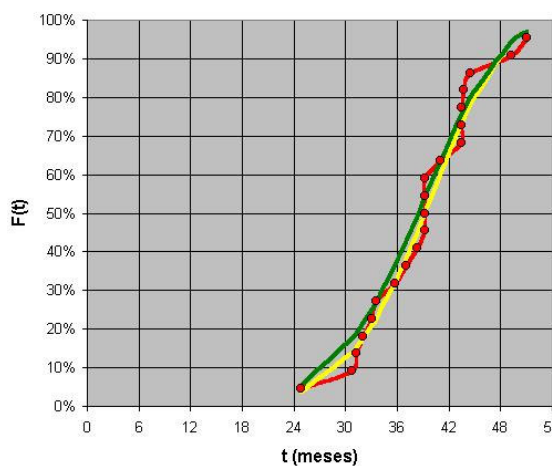
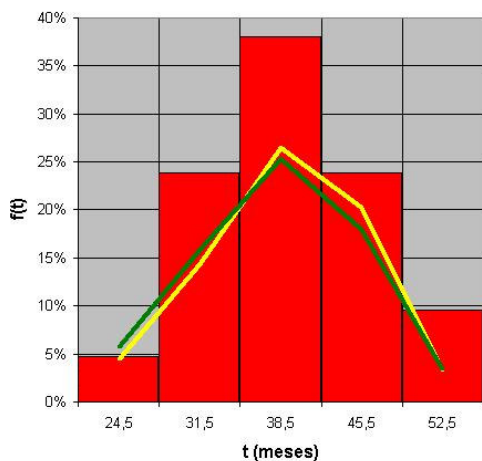
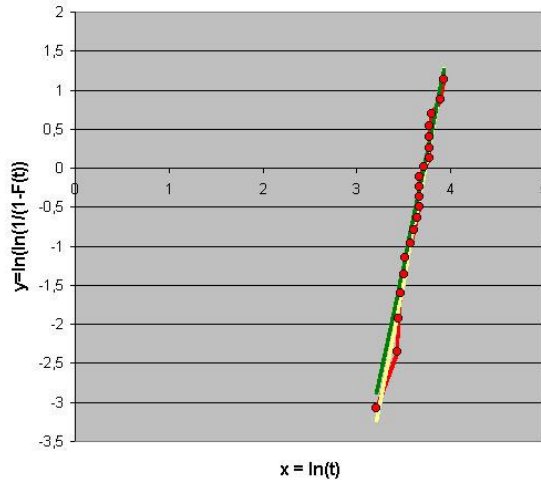
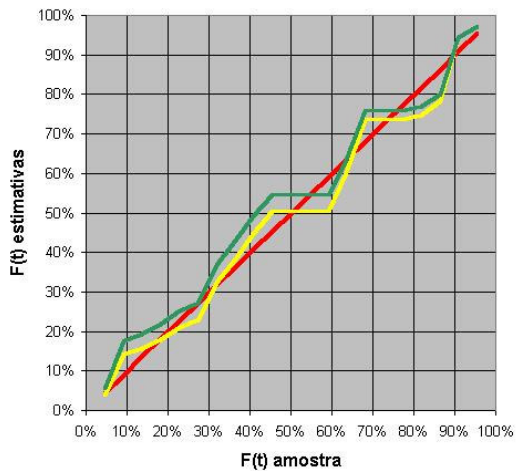
**Produto:** Pneu 295/80R22.5

**Aplicação:** Caminhão de longa distância - FROTA 10

amostra	beta	eta	no. de falhas	no. de censuras	média de vida	% perda
geral	3,9	39,2	23	0	36,0	
1317 - levantamento ou separação da cinta	10,0	50,1	4	19	41,6	-3,3%
1607 - penetrações e avarias em pista	8,0	53,3	3	20	40,2	-1,7%
1207 - cortes e esmagamentos	5,3	58,8	3	20	37,2	-0,5%
1605 - quebra por impacto	6,1	60,4	2	21	37,5	-0,4%
1320 - separação do recape	3,8	74,5	2	21	32,1	1,0%
1106 - talões queimados	1,7	157,1	2	21	25,0	2,9%
1203 - lateral separada - causada por avaria	12,6	52,2	2	21	43,5	-2,0%
1102 - dano no talão devido a sobrecarga	0,8	820,8	2	21	21,0	4,0%
1407 - trinca no interno	6,0	60,8	2	21	37,0	-0,3%
1500 - falha do reparo	9,4	58,4	1	22	38,3	-0,3%



soma de % perdas positivas : 7,9%  
% do total da amostra incluídas nas principais falhas : 100%



**Frota 10**

mediana 39,25  
 média 38,72619  
 desvio 6,429864  
 cv 0,166034

y=ax+b	
a	6,2
b	-23,3
R <sup>2</sup>	0,973
n	21
beta	6,2
eta	41,5

zera ->	-0,049
beta	5,7
eta	40,9

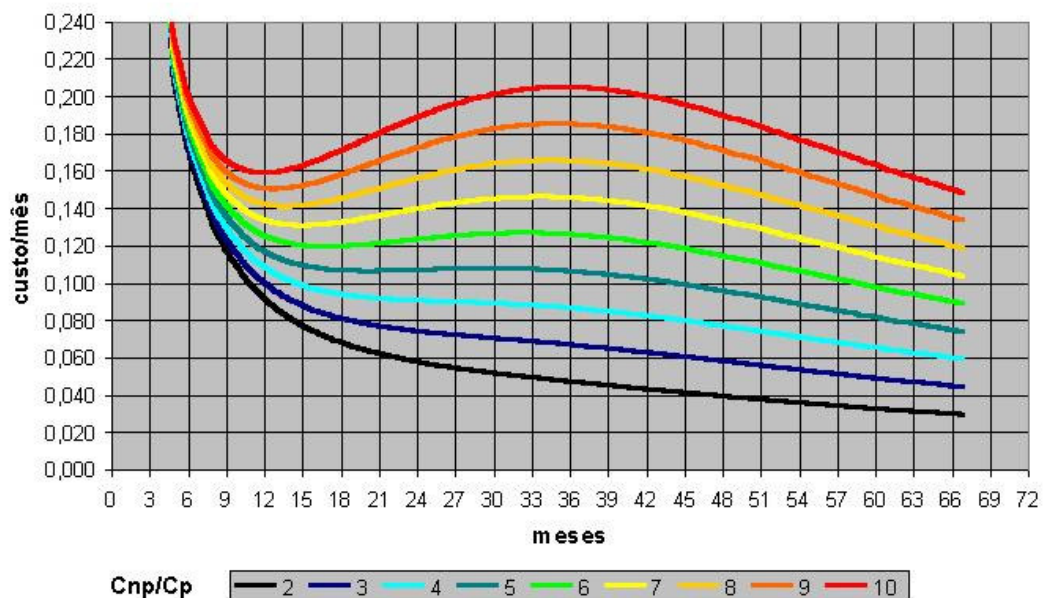
amostra

minimos quadrados

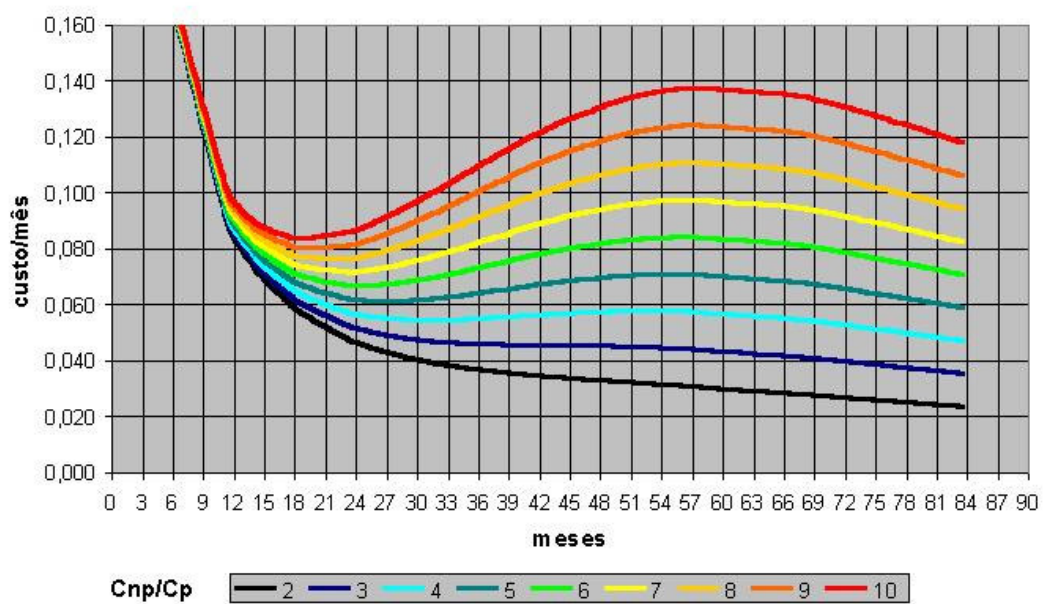
máxima verossimilhança



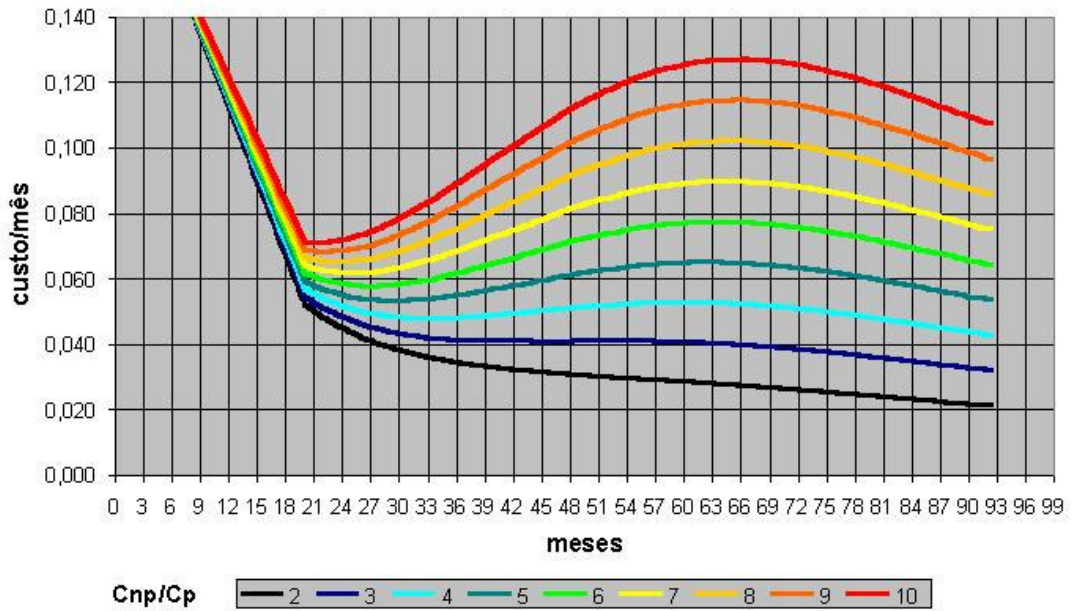
Curva de custo - Frota 03



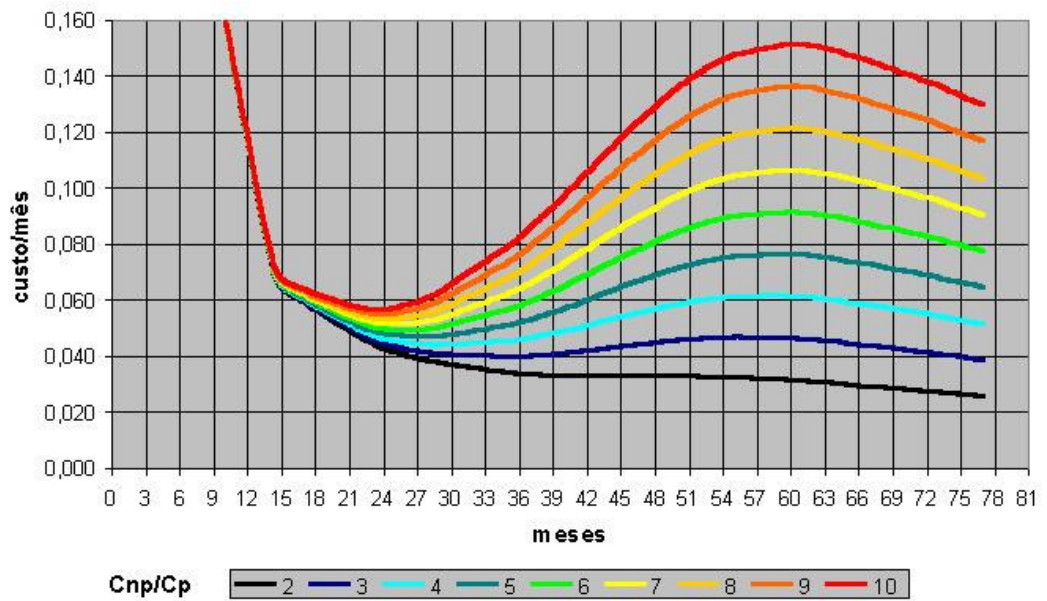
Curva de custo - Frota 04



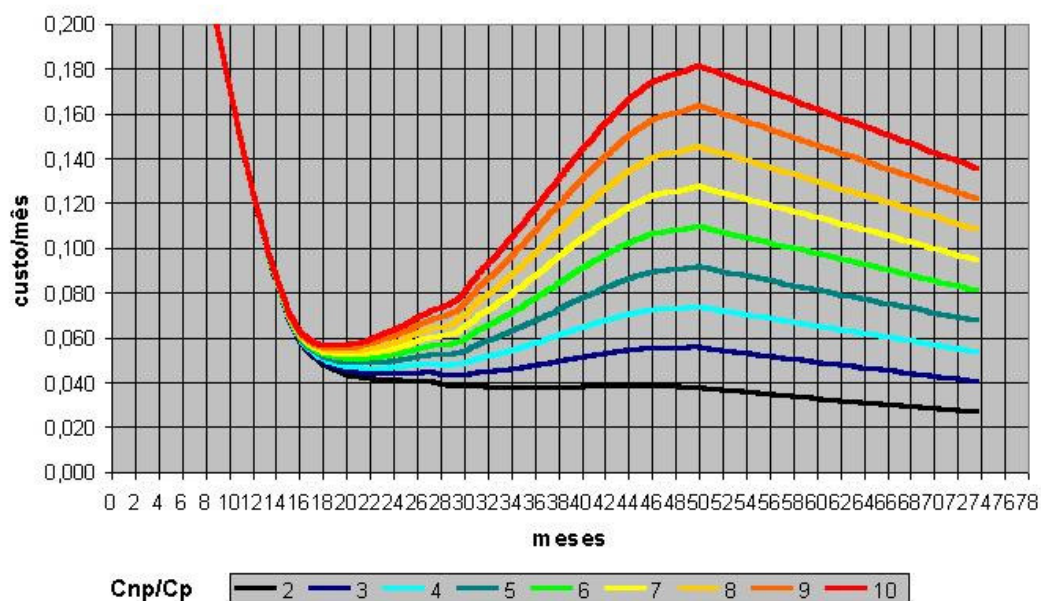
Curva de custo - Frota 05



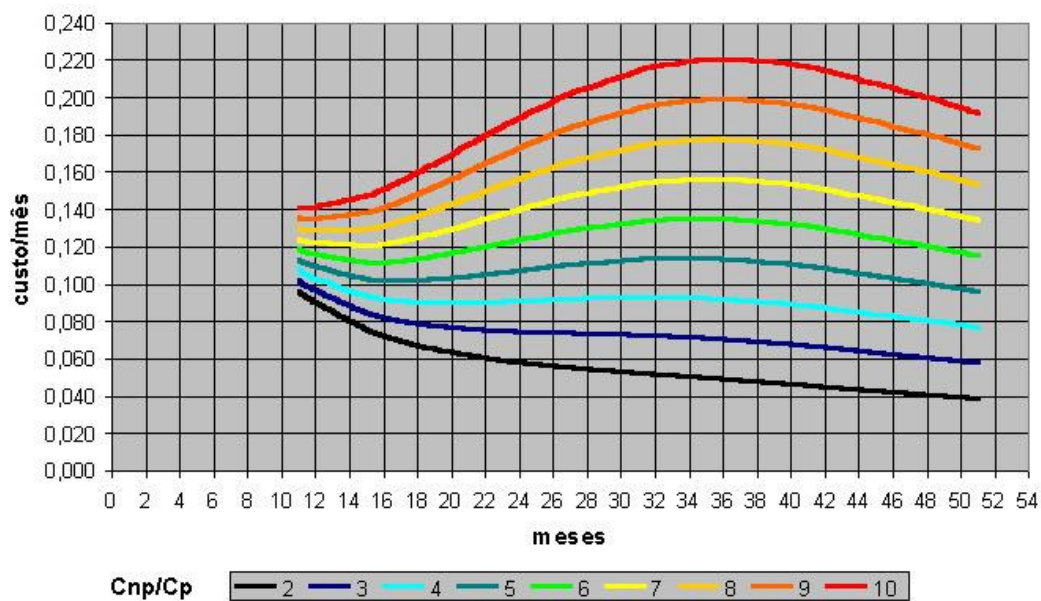
Curva de custo - Frota 06



Curva de custo - Frota 07

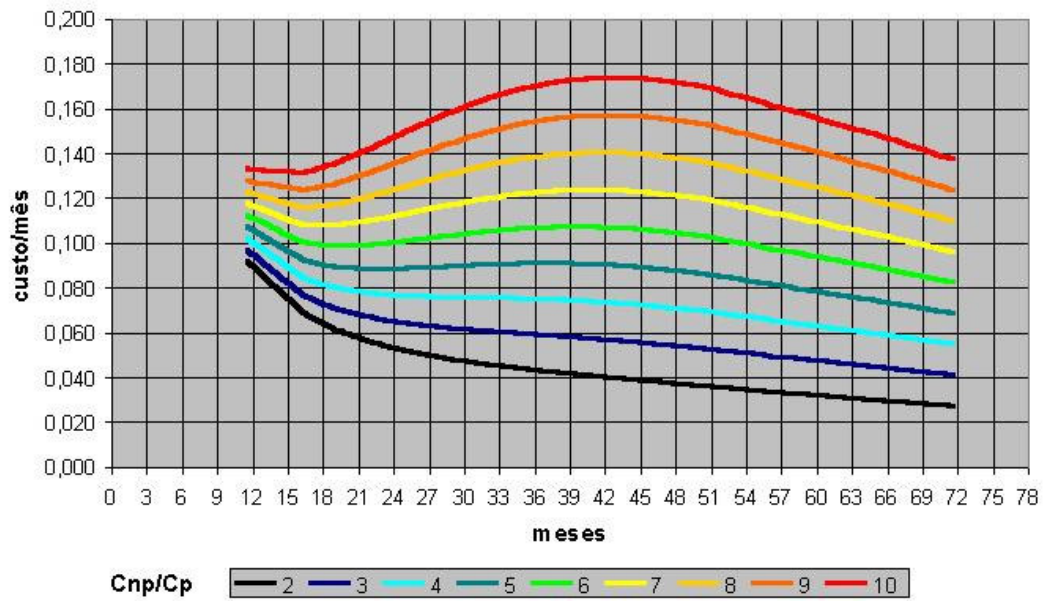


Curva de custo - Frota 08

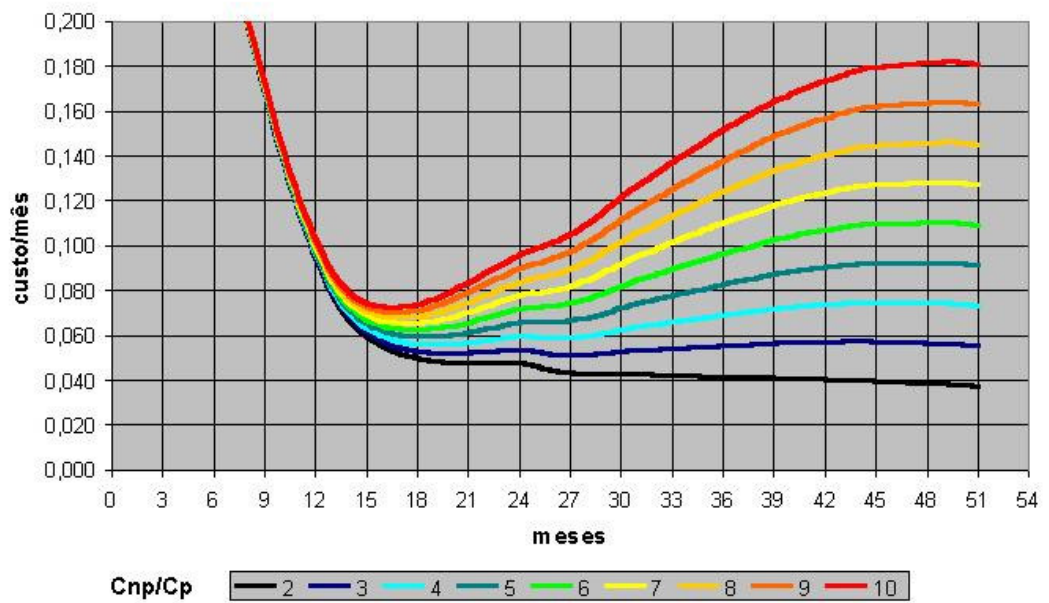




Curva de custo - Frota 09



Curva de custo - Frota 10



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)