



**Simpósio de Métodos
Numéricos em Engenharia**

25 a 27 de outubro, 2017

Confiabilidade de Produto: Pneus de Rodagem

Comparação da Durabilidade de Marcas e Modelos

*Rogério de Jesus Hultmann
Anselmo Chaves Neto
PPGMNE
Universidade Federal do Paraná
Curitiba - Pr
rjh2009@gmail.com*

Resumo—Neste trabalho são abordados conceitos sobre confiabilidade de produto e se aplicou as funções de confiabilidade para estabelecer a estimativa de tempo até a falha desses produtos, possibilitando a mensuração de seu tempo de garantia e, conseqüentemente, dos custos demandados por este processo. O estudo foi aplicado a pneus de rodagem de veículos utilizados no transporte coletivo de Curitiba-PR. Os resultados estimam a quilometragem média dos pneus estudados de acordo com sua marca, modelo e recapes sofridos.

Palavras-chave—*Pneu; função de confiabilidade; durabilidade.*

I. INTRODUÇÃO

Na cidade de Curitiba, atualmente, circulam mil duzentos e noventa (1.290) ônibus que transportam diariamente um milhão quinhentos e onze mil setecentos e quarenta e três (1.511.743) passageiros em quatorze mil setecentos e vinte e duas (14.722) viagens, totalizando trezentos e três mil setecentos e sessenta e nove (303.769) km percorridos. Considerando que a maior parte dos veículos citados utilizam ao menos quatro (04) pneus, chega-se à quantidade subestimada de cinco mil, cento e sessenta (5.160) pneus rodando diariamente, somente na capital do Paraná [10].

É bem conhecido que os pneus é um dos mais agressivos agentes ao meio ambiente, tanto pelos insumos utilizados na

sua produção como pela dificuldade de seu descarte, pois sua degradação é considerada como indeterminada [9].

Os mais diversos engenhos desenvolvidos nas áreas de atuação humana possuem componentes dos tipos: mecânicos, elétricos, eletrônicos, entre outros. O funcionamento dos mesmos depende, em parte, de fator aleatório.

Segundo [7] alguns parâmetros básicos, tais como massa, dimensões, coeficiente de atrito, resistência a tensões, não são exatamente determinísticos, estando sujeitos a variações associadas ao processo, aos materiais, aos fatores humanos e às aplicações, sendo que alguns parâmetros também variam com o tempo. Assim, qualquer sistema está sujeito ao risco de não funcionar adequadamente ou deixar de fazê-lo após algum tempo. Os elementos que formam um sistema complexo precisam ter bem especificadas as características que os qualificam para o uso.

I.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é construir as funções de confiabilidade de pneus de diferentes marcas e modelos e comparar sua durabilidade, ou melhor, o seu tempo de substituição ou de reparo, bem como verificar as necessidades de manutenção e estabelecer programas de manutenção preventiva.

I.2. Justificativa

A construção de uma função de confiabilidade servirá para que as empresas que utilizam pneus de forma intensiva possam tomar decisões que propiciem maior eficácia às suas operações. Tais decisões poderão servir tanto para tomada de decisões quando para planejamento de futuras compras, através da comparação da durabilidade e custos de operação, bem como na programação das necessidades de manutenção e até mesmo da viabilidade econômica de fazê-la.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

II.1 Conceitos

Quando se discute o significado de confiabilidade, engenheiros respondem que o produto deve operar sem falhas, ou que o produto deverá funcionar sempre que os usuários quiserem utilizá-lo. De acordo com [7], a confiabilidade é um conceito abstrato. Assim, todo produto deve ter atributos que influenciem a decisão de sua utilização, tais como: durabilidade, manuseabilidade, potência, capacidade, entre outras. Essas são características que, de acordo com as necessidades do usuário, levarão à aquisição de um produto ou outro. A confiabilidade é um desses atributos e é buscada por projetistas e construtores de sistemas de todo o tipo, sendo seu nível estabelecido na fase de projeto. A confiabilidade está implicitamente incluída no conceito de qualidade não sendo conveniente dissociá-los.

Essa busca da confiabilidade por projetistas e construtores em todos os sistemas é histórica. A partir da segunda metade do século XX emerge o movimento para quantificar a confiabilidade. É um movimento similar, e provavelmente tão importante quanto o movimento de séculos atrás para quantificar as propriedades dos materiais (Juran, apud [5]).

Confiabilidade é um conceito global que se decompõe nas seguintes variáveis: fiabilidade, disponibilidade, reparabilidade, segurança contra acidentes e segurança contra acesso não autorizado. Essas variáveis são ameaçadas por impedimentos tais como: faltas, erros e falhas.

A confiabilidade é uma medida da qualidade e do desempenho dos produtos que dependem do tempo. Um componente submetido a um esforço pode assumir um estado de falha. Se este componente foi posto sob condições de esforço durante um tempo a partir de um instante inicial, chamado t_0 , e observado até que pare de funcionar adequadamente sob o esforço aplicado em um instante chamado t_f , a duração até falhar (tempo de vida) $T = t_f - t_0$ pode ser considerada como uma variável aleatória contínua com alguma função densidade de probabilidade. Para [6] as provas de que T pode ser previsto a partir de modelos determinísticos são empíricas e o emprego de um modelo probabilístico, considerando T como uma variável aleatória, constitui-se no único tratamento realista do assunto.

Segundo [5] a confiabilidade é “um aspecto da incerteza da engenharia” associando a capacidade de trabalho de um item durante um intervalo de tempo a uma questão probabilística.

II.2 Definições

De acordo com [1] confiabilidade é a probabilidade de que um componente ou sistema exerça com sucesso sua função, ou seja, que o produto tenha um bom desempenho durante um período de tempo previsto, sob as condições de operação especificadas no seu projeto.

Na visão de [5] confiabilidade é a probabilidade de que um componente ou sistema funcionando dentro dos limites especificados de projeto não falhe durante o período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade do meio.

De acordo com a NBR 5462-1994 apud [4] confiabilidade, $R(t)$, do inglês *reliability*, é capacidade de um item desempenhar uma função requerida em condições especificadas, durante um intervalo de tempo, sendo usada como uma medida de desempenho do produto.

Organismos internacionais apresentam definições para confiabilidade entre as quais figuram três definições básicas para caracterização da confiabilidade: a) segundo a *European Organization for Quality Control* (1965) confiabilidade é medida como uma probabilidade, e é definida como a habilidade de um produto operar com sucesso, quando necessário, por um período de tempo pré-determinado sob condições ambientais específica; b) na definição do *US Military Handbook* (1970) confiabilidade é definida como a probabilidade de um produto executar a sua função durante um determinado período de tempo, de acordo com condições pré-definidas de uso e manutenção; c) o *BS Institution* (1970) e *UK Army* (1976) definem confiabilidade como “a habilidade de um item executar a sua função sob determinadas condições específicas, por um período pré-determinado”.

II.3 Falhas

A falha representa o fim da capacidade que um produto tem para a realização da função a que se destina. A norma americana MIL-STD-721C, de 1981, define os seguintes tipos de falhas: catastrófica, crítica, dependente, intermitente, sem responsabilidade, irrelevante e aleatória. Em relação à segurança as falhas são vinculadas aos níveis de probabilidade de ação dos riscos existente. Os níveis de gravidade destes riscos são estabelecidos pela norma americana MIL-STD-822A, de 1977 [7].

Para [5], as falhas devem sua origem a três fatores básicos: falha de projeto, falha na fabricação ou falha da utilização. Segundo o autor são quatro as categorias em que as falhas se enquadram de acordo com a gravidade do risco associado: catastrófica (pode causar a morte ou perda do sistema), crítica (pode causar grave lesão, grave doença ocupacional ou dano secundário ao sistema), marginal (pode causar lesão secundária, moléstia ocupacional secundária ou dano secundário ao sistema) e desprezível (não resultará em lesão, moléstia ocupacional ou dano ao sistema).

Para [1] as falhas, quanto à sua ocorrência, são de três (3) tipos: aleatórias, por deterioração e catastróficas. Por falhas aleatórias podemos entender aquelas que ocorrem a qualquer momento, associadas a uma probabilidade de

ocorrência. As falhas por deterioração ocorrem de forma crescente à medida que o tempo evolui, causadas por agentes físicos e químicos. Falhas catastróficas são repentinas e não têm condições de serem monitoradas ou previstas e sua ocorrência determina a incapacidade total de um produto desempenhar sua ação.

Um fator importante nos resultados de uma empresa é o custo de falha: necessidades de mudança de engenharia baseada nas falhas ocorridas, custos adicionais resultantes de planejamento deficiente, classificação, sucata, retrabalho e demais custos resultantes de falha entre eles os mais dispendiosos, duradouros e prejudiciais como a insatisfação do cliente, a reputação da empresa e perda de fatia de mercado [6]. Sob essa ótica todas as organizações que buscam eficiência e qualidade devem adotar ferramentas de análises de falhas e seus efeitos, exigindo dos funcionários e fornecedores esforços de “previsão dos problemas potenciais e implantação das melhores opções possíveis para prevenção e controle desses modos de falha potenciais”.

A condução de um estudo acerca das falhas de um processo deve considerar claramente três questões: a) a forma como ela ocorre; b) suas causas e c) suas consequências. Entre os critérios através dos quais a ocorrência de falhas pode ser analisada estão a severidade, a ocorrência e a detecção.

Conforme [1] projeto robusto é conceituado como um procedimento aplicado durante as etapas de pesquisa e desenvolvimento de um produto para aumentar sua produtividade de forma a obter produtos com alta qualidade e custo mínimo. Objetiva-se, dessa forma, obter um produto insensível às variações às quais o produto será exposto durante sua vida. São exemplos de variações às quais o produto é submetido: o ambiente, os hábitos do cliente e a variação descontrolada no processo de produção, em geral chamada de ruído. Quando o ruído influencia significativamente o projeto, distorcendo completamente o modelo ou as previsões de desempenho, os efeitos dessa variação devem ser eliminados pela incorporação de características que deixarão o projeto mais robusto à essas fontes de variação descontrolada [6].

Segundo [5], as técnicas de confiabilidade podem contribuir para a redução das falhas fundamentadas em três ramos: técnicas de atividades para análise de falhas, técnicas para eliminar no projeto os pontos de falhas potenciais e técnicas para melhorar a confiabilidade das operações.

II.4 Curva da Banheira

A curva da banheira é a figura obtida a partir dos valores da taxa de falha acumulada. Pela curva da banheira podemos identificar três fases distintas na vida de um produto: mortalidade infantil, vida útil e velhice. Na Fig. 1, adiante, é possível identificar as três fases apresentadas pela Curva da Banheira.

Na fase da mortalidade infantil ocorrem falhas prematuras que podem ter sido originadas, muitas vezes, na linha de produção e que podem ser detectadas pelo Controle Estatístico de Processo (CEP). Suas causas mais frequentes são: mão de obra inadequada, controle de qualidade

deficiente, amaciamento insuficiente, pré-teste inadequado, depuração insuficiente, processos impróprios de manufatura, manuseio e transporte inadequados, materiais fora de especificação, componentes não especificados, componentes não testados, peças de baixo padrão, estocagem inadequada, embalagem defeituosa, transporte inadequado, contaminação, instalação inadequada, deficiências de projeto, partida deficiente, sobrecarga no primeiro teste, entre outros. Nesta fase da vida do produto a taxa de falhas é decrescente.

Na fase de vida útil as falhas ocorrem aleatoriamente e com taxa de falhas constante. De acordo com [4] a taxa de falhas nesta fase é menor e apresenta pequena variação com o tempo, mantendo-se relativamente constante. As falhas nesta fase da vida do produto normalmente são aleatórias e têm fontes externas (casuais) e pouco pode ser feito para evitá-las. Estas falhas podem ter como motivos: interferência indevida, tensão e deficiência, fator de segurança insuficiente, ocorrência aleatória de cargas acima do esperado, resistência menor que a esperada, defeitos abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios que acabam escapando às inspeções, erros humanos no uso ou instalação do produto, aplicação (operação) indevida, falhas não detectáveis por testes, fenômenos naturais imprevisíveis, causas sem explicação definida [1].

Na velhice as falhas ocorrem devido à idade avançada do produto. Nesta fase, o desgaste determina o início do término da vida útil do equipamento. Para [4] nesta fase o desgaste natural, que aumenta com o tempo, é o responsável pelo incremento na taxa de falhas. Essa fase também recebe o nome de Degradação e se caracteriza pelo crescimento contínuo das taxas de falhas. Entre as causas podemos citar: degradação por abrasão, corrosão, fluência, degradação da resistência, fadiga, fluência, deterioração mecânica, elétrica, química ou hidráulica, manutenção inadequada, vida de projeto curta [1].

A curva da banheira pode apresentar aspectos característicos diferentes de acordo com o produto, pois nem todos os produtos apresentam sempre todas as fases. No caso dos programas para computador, por exemplo, as falhas aparecem apenas na fase da mortalidade infantil e vão desaparecendo na medida em que os erros de programação ou definição vão sendo corrigidos.

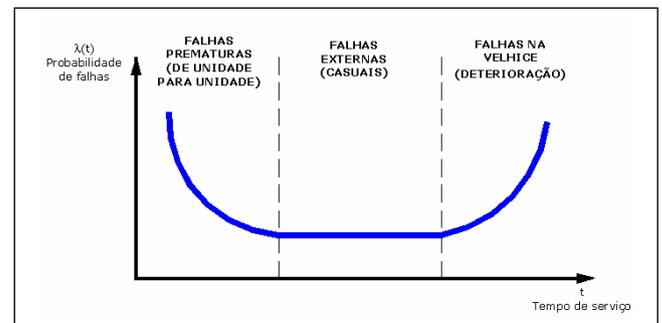


Figura 1. Curva da Banheira Teórica

Fonte: [1]

II.5 Função de Confiabilidade e Função Probabilidade de Falha

A Função de Confiabilidade é definida como a probabilidade de uma observação não falhar até certo tempo t , ou seja, a probabilidade desta observação sobreviver ao tempo t . De acordo com [1] esta é a principal função em termos de probabilidade que é utilizada para descrever dados de durabilidade, na qual o tempo até falhar é uma variável aleatória. Em termos probabilísticos, isto é escrito como:

$$R(t) = P(T \geq t). \quad (1)$$

A partir de (1) se estabelece a probabilidade de uma observação não sobreviver ao tempo (t), o que é dado pela probabilidade complementar e estabelece a Função Probabilidade de Falha:

$$F(t) = 1 - R(t). \quad (2)$$

De acordo com [7] a confiabilidade é considerada como a medida de sucesso de um sistema. Considerando a quantidade total de itens em estudo (n_0) durante um período de tempo (t) e após este tempo essa quantidade se divide em número de itens que falharam (n_f) e o número de itens que sobreviveram (n_s). Assim, tem-se:

$$n_0 = n_f(t) + n_s(t). \quad (3)$$

Chamando de $R(t)$ a Função de Confiabilidade tem-se:

$$R(t) = n_s(t) / n_0. \quad (4)$$

A partir de (3) a Função de Confiabilidade ($R(t)$) pode ser expressa como:

$$R(t) = n_s(t) / (n_f(t) + n_s(t)). \quad (5)$$

De maneira análoga, combinando-se (2), (3) e (4) obtém-se a Função Probabilidade de Falha como o quociente entre o número de itens que falharam e o número total de itens:

$$F(t) = 1 - (n_s(t) / (n_f(t) + n_s(t))) = n_f(t) / n_0. \quad (6)$$

II.6 Função de Risco

A partir da função de confiabilidade é possível expressar a probabilidade de ocorrência de falha em um intervalo de tempo ($t_1 - t_2$) $t_1 > t_2$ pela expressão:

$$P(t_1 \leq t \leq t_2) = R(t_1) - R(t_2). \quad (7)$$

A probabilidade de que a falha ocorra neste intervalo é a taxa de falha dado que não ocorreu antes de t_1 dividida pelo comprimento do intervalo gerando a expressão:

$$(R(t_1) - R(t_2)) / ((t_2 - t_1) \cdot R(t_1)). \quad (8)$$

Considerando que t_2 ocorre em um tempo posterior a t_1 e denominando este intervalo de tempo ($t_2 - t_1$) de Δt , e representando a taxa de falhas por $\lambda(t)$ é obtida a expressão:

$$\lambda(t) = (R(t) - R(t + \Delta t)) / (\Delta t \cdot R(t)). \quad (9)$$

A fim de obter a taxa de falha instantânea, considera-se Δt bem pequeno, levando-se ao limite obtém-se a taxa de falha instantânea condicionada a não ocorrência de falha até o instante t :

$$\lambda(t) = \lim (\Delta t \rightarrow 0) [(P(t \leq T < (t + \Delta t)) | T \geq t)] / \Delta t. \quad (10)$$

A expressão caracteriza a taxa de falha instantânea, ou taxa condicional de falha, como a probabilidade de um item não falhar até o tempo ($t + \Delta t$) dado que não falhou até o tempo t , condicionada à não ocorrência de falha até o instante t e pode ser enunciada nos mesmos termos da probabilidade condicional como a probabilidade de ocorrer uma falha no intervalo (t_1, t_2) dado que não houve falha até t_1 . De acordo com [5] esta função é conhecida como função de risco e pode ser alternativamente denominada de *hazard function* ou *hazard rate*.

II.7 Relacionamento entre a Função de Confiabilidade e a Função de Risco

Sendo $f(t)$ a função de risco modelada estatisticamente pela função densidade de falha que representa a variação da probabilidade de falha de uma unidade dentro do tempo, representada pela expressão $f(t) = dF(t)/dt$ na qual $F(t)$ é a função distribuição da variável aleatória t . Para [5] $F(t)$ é a função acumulada de falhas, é representada graficamente por uma função de distribuição de densidade acumulada e representada matematicamente por:

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt. \quad (11)$$

Mediante estas expressões a probabilidade de falha $p(f)$ de um produto em um determinado intervalo (a, b) é dada por: $p(f) = F(b) - F(a)$ a qual pode ser escrita em termos da seguinte integral:

$$p(f) = \int_a^b f(t) dt. \quad (12)$$

A partir da Função de Confiabilidade $R(t)$ é possível também expressar de outra forma a Função de Risco:

$$\lambda(t) = f(t) / R(t) = f(t) / (1 - F(t)). \quad (13)$$

II.8 Tempo de Falha

O tempo de falha pode ser analisado a partir de técnicas estatísticas aplicadas aos dados de durabilidade de um produto. Estes dados podem ser oriundos de observações de campo ou então de testes de vida realizados com uma fonte de estresse. Neste caso é necessário que se usem modelos estatísticos para estimação do tempo médio até a falha e da fração esperada de falhas dentro de um determinado período, em especial o de garantia [3].

Diante da completa falta ou da escassez de dados de vida providos pelo fornecedor, torna-se necessário encontrar alternativas para a sua obtenção. Uma delas envolve testes que sejam capazes de fornecer as informações dentro de limites aceitáveis de confiabilidade, podendo ser convertidos para as condições de utilização do equipamento no campo [8].

O tempo de início do estudo deve ser bem estabelecido. Os produtos devem ser comparáveis quando do início do estudo, respeitando-se diferenças que possam ser medidas pelas covariáveis.

A escala de medida é quase sempre o tempo real ou “de relógio”, apesar de existirem alternativas, tais como o número de ciclos executados da função. Em testes de engenharia podem surgir, como se escreveu, outras escalas de medida e como exemplos dessas alternativas pode-se citar o mecanismo do vidro das janelas de veículos, em que o número de ciclos de subida e descida dos vidros é uma medida da durabilidade do mecanismo; a quilometragem de um carro é outro exemplo [2].

A análise dos dados de durabilidade de um produto a partir de técnicas estatísticas conduz a análise do tempo de falha a qual é utilizada para estimar os valores dos Parâmetros de Confiabilidade.

A realização de testes para obtenção de medidas de confiabilidade consome tempo e tem custos financeiros elevados. Em geral os testes terminam antes que todos os produtos testados apresentem falhas, o que leva à presença de censuras que são observações incompletas ou parciais. Mesmo que existam estas censuras todos os resultados dos testes devem ser usados para a elaboração da análise estatística. Estas observações trazem informações importantes sobre o tempo de vida dos produtos [3].

II.9 Parâmetros da Confiabilidade

A definição de confiabilidade não é de fácil assimilação e apresenta dificuldades, principalmente na comunicação com o público consumidor. Assim, associam-se alguns parâmetros à confiabilidade. Os principais são o MTBF (*Mean Time Between Failures* – Tempo Médio Entre Falhas), o MTTF (*Mean Time To Failure* - Tempo Médio Até Falhar) e o MTTR (*Mean Time To Repair* – Tempo Médio de Reparo).

Para obter o Tempo Médio Entre Falhas é obtido a partir do inverso da taxa de falhas:

$$MTBF = 1/\lambda. \quad (14)$$

O Tempo Médio Até Falhar é dado pela média aritmética do tempo que os produtos que fazem parte da amostra levaram até apresentar a falha:

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (15)$$

O Tempo Médio de Reparo é o tempo médio para reparo do produto que é dado pela média aritmética dos tempos de reparo (β_i) de cada produto da amostra. De acordo com [5] o MTTR é dado pela seguinte expressão:

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (16)$$

Outros parâmetros de interesse são o MTBM (*Mean Time Between Maintenance* – Tempo Médio Entre Manutenções), o MTTR_{ativo} (*Mean Time To Repair Active* – Tempo Médio Para Reparos) e o MDT (*Mean Down Time* – Tempo Médio de Paralisações).

II.10 Disponibilidade

De acordo com a NBR 5462-1994, a Disponibilidade (do inglês *Availability*) é a capacidade de um item estar em condições de executar uma determinada função, em certo instante ou durante um período de tempo determinado, considerando-se os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo assegurada a disponibilidade dos recursos externos requeridos. O termo Disponibilidade é usado como uma medida de desempenho de disponibilidade. (NBR 5462-1994, apud [4]). A Disponibilidade (*Disp*) é dada pelo quociente entre o estado operativo e a soma do estado operativo (*EO*) mais estado não operativo (*ENO*), o que resulta na fórmula:

$$Disp = EO/(EO + ENO). \quad (17)$$

Outra forma de obter a disponibilidade é através do seguinte quociente entre os Parâmetros da Confiabilidade:

$$Disp = MTBF/(MTBF + MTTR). \quad (18)$$

De acordo com [4] a Disponibilidade pode ser classificada como Disponibilidade Inerente (*Inherent Availability*), Disponibilidade Técnica (*Achieved Availability*) e Disponibilidade Operacional (*Operational Availability*). A Disponibilidade Inerente (*DispIner*) é o percentual de tempo que o produto estaria disponível se não ocorressem perdas de tempo ou atrasos, ela pode ser calculada por:

$$DispIner = (MTBF/(MTBF + MTTR)).100. \quad (19)$$

A Disponibilidade Técnica (*DispTec*) é calculada sem computar os tempos adicionais de logística, esperas, atrasos, entre outros, porém considerando-se as manutenções corretivas e preventivas. É obtida por:

$$DispTec = (MTBM/(MTBM + MTTR_{ativo})).100. \quad (20)$$

A Disponibilidade Operacional (*DispOp*) é a avaliação mais real da Disponibilidade [4], sendo a informação mais interessante para a empresa pois considera além do tempo para manutenção preventiva e corretiva os tempos de esperas, atrasos, paradas para inspeções, deslocamentos e todos os demais tempos que contribuem para a indisponibilidade dos equipamentos. Para cálculo da Disponibilidade Operacional usa-se a expressão:

$$DispOp = (MTBM/(MTBM + MDT)).100 \quad (21)$$

II.11 Análise do Tempo de Falha

Para [3], a Análise de Tempo de Falha é um conjunto de técnicas estatísticas aplicadas à análise de dados de durabilidade os quais podem ser oriundos de dados de campo ou de testes acelerados de vida.

A análise de confiabilidade possibilita, por meio de estimativas, 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.

Quando da realização de um teste para obter as funções de confiabilidade e de taxa de falhas nem sempre se pode contar que todos os itens em teste falhem. De acordo com [3], na prática os dados apresentam censuras que fornecem apenas parte da informação sobre o tempo de falha dos itens em teste. Os dados censurados informam que o tempo de falha daqueles itens que não falharam é maior do que aquele no qual a censura foi registrada. Nesses casos, podem ser utilizados dois estimadores não paramétricos para a função de confiabilidade: Estimador da Tabela de Vida e Estimador de *Kaplan-Meier* (limite-produto).

De acordo com [3], outras técnicas estatísticas podem ser aplicadas na análise de dados de confiabilidade. Estas técnicas são chamadas de técnicas paramétricas e requerem o conhecimento da distribuição de probabilidade para o tempo de falha. A distribuição de probabilidade deve ser bem escolhida para estimar os dados de interesse. Neste caso as técnicas paramétricas apresentam uma eficiência maior que as técnicas não paramétricas. A distribuição de probabilidade é chamada de modelo probabilístico para o tempo de falha. Quando se utilizam técnicas paramétricas os parâmetros dos modelos são estimados a partir do método da máxima verossimilhança, cujas propriedades possibilitam a construção de intervalos de confiança para as informações de interesse. Entre os modelos probabilísticos existentes, os mais usados são o exponencial, o de *Weibull* e o *log-normal*.

A escolha do modelo probabilístico pode levar a resultados diferentes e induzir a erros na estimativa das informações de confiabilidade.

Os modelos de probabilidade são caracterizados por parâmetros, que são valores desconhecidos que devem ser observadas a partir das observações amostrais.

II.12 Testes Acelerados de Confiabilidade

Os dados para a Análise de Tempo de Falha são informações sobre o desempenho do produto e se originam de informações de campo ou de testes realizados em protótipos. Os dados relativos às informações de campo não são de fácil obtenção, eles podem ser originados a partir dos serviços autorizados de assistência técnica, porém a obtenção dos mesmos pode se tornar inviável após o prazo de garantia, pois o consumidor pode optar por outros serviços de assistência técnica que não repassem informações para os fabricantes. Ainda, para produtos novos, estes dados não estão disponíveis sendo necessário, em alguns casos, utilizar informação disponível para produtos similares que já se encontram no mercado. Existe ainda a possibilidade de serem efetuados testes de mercado nos quais uma quantidade de produtos é fornecida a uma amostra de consumidores e seu desempenho em condições reais de uso é observado durante um período de tempo. O teste de mercado apresenta como inconveniente o fato de

que um produto é projetado para funcionar por muito tempo, o que torna demorado acompanhar o desempenho deste produto junto aos consumidores [3].

De acordo com [1] o procedimento para obtenção de informações acerca do desempenho de um produto é fazer a obtenção de dados experimentais através de testes acelerados de confiabilidade realizados em laboratório.

Testes Acelerados de Confiabilidade consistem na colocação de uma quantidade de componentes/sistemas em funcionamento, porém em condições de estresse maiores do que aquelas para os quais foram projetados com a finalidade de acelerar o aparecimento de falhas. A realização destes testes se justifica pelo fato de fornecerem dados mais rapidamente para a análise estatística e propiciando contribuições para conhecimento das falhas, contribuindo para a revisão do projeto. Face às exigências atuais que os fabricantes enfrentam no desenvolvimento de novos produtos as informações de confiabilidade devem ser obtidas rapidamente para a construção de novos projetos e também na melhoria dos já realizados [3].

Conforme propõe [1] as seguintes questões que devem ser respondidas no caso dos testes acelerados de confiabilidade: a) quais variáveis de estresse que serão utilizadas?; b) quais níveis de estresse que serão utilizados?; c) qual a forma de aplicação do estresse?

III. DADOS, METODOLOGIA E RESULTADOS

III.1 Dados

As informações para realização deste trabalho são constituídas das quilometragens de pneus instalados em ônibus coletivos urbanos que rodam na cidade de Curitiba-PR, e são compostas pelos seguintes dados: marca e modelo do pneu, número (identificação) do pneu, quilometragem que o pneu rodou antes de sofrer recapagem (pneu novo) e quilometragem que o pneu rodou após a primeira, segunda e terceira recapagens, coletados para subsidiarem atividades de controle de estoque e almoxarifado. Ao todo foram utilizados registros de mil duzentos e trinta e seis (1236) unidades de diferentes modelos das marcas *Firestone*, *Goodyear*, *Kumho*, *Michelin*, *Pirelli* e *Toyo*.

III.2 Metodologia

Na condução do trabalho foram adotados os métodos descritos na Fundamentação Teórica e foi utilizado o software *Statgraphics Plus* versão 5.1 para a análise dos dados.

Inicialmente foram obtidas as estatísticas descritivas da quilometragem rodada em cada período de vida útil dos pneus participantes da amostra estudada. Em seguida foi feito o teste de ajuste dos dados às distribuições de probabilidade: Exponencial, *log-normal*, Normal e *Weibull* e verificado o *p-valor* resultante em cada um, o qual foi adotado como critério para verificação da aderência de cada teste.

As funções de confiabilidade foram obtidas agrupando-se os dados de duas formas. Na primeira forma os dados

foram agrupados visando efetuar a análise entre as diferentes marcas e modelos e estimando-se as funções de confiabilidade para pneus novos, com uma recapagem, com duas recapagens, com três recapagens e para pneus com mais de três recapagens. Foram obtidas as estatísticas descritivas relativas a cada modelo de pneu em cada uma de suas vidas. Em seguida foi efetuada a comparação entre as funções de confiabilidade. Essa comparação foi feita a partir do teste *log-rank* efetuado entre todas as marcas e modelos cujos dados estavam disponíveis e também entre as marcas e modelos comparadas duas a duas sendo o *p-valor* resultante de cada comparação lançado em tabelas.

Na segunda forma de agrupamento os dados foram separados por marcas e modelos e se obteve as estatísticas descritivas e funções de confiabilidade para os diversos períodos de vida útil dos pneus, conforme a disponibilidade de dados. Também foi efetuada a comparação entre todas as funções de confiabilidade de cada marca e modelo através do teste *log-rank* e entre cada uma das funções de confiabilidade duas a duas registrando-se em tabelas o *p-valor* obtido em cada comparação.

Também foram agrupados os dados de todos os pneus, em todas as vidas e calculadas as estatísticas descritivas e as funções de confiabilidade correspondentes. O teste *log-rank* foi aplicado com o objetivo de investigar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as vidas de todos os pneus e entre as vidas duas a duas.

Quanto aos pneus, cujos dados de quilometragem rodada quando novos e após a primeira, segunda e terceira recapagem estavam disponíveis, essas quilometragens foram somadas, obtendo-se as quilometragens totais rodadas por cada marca e modelo. Ainda, foram obtidas as estatísticas descritivas e as funções de confiabilidade correspondentes. Aplicou-se o teste *log-rank* entre todas as marcas e modelos, e, em seguida, entre estas marcas e modelos duas a duas. Isto foi feito com o objetivo de verificar diferenças estatísticas significativas entre as funções de confiabilidade das marcas e modelos em estudo. Neste estudo foram excluídas as marcas ou modelos de pneus que tinham amostra com menos de trinta unidades, restando mil cento e trinta e cinco (1.135) pneus das marcas *Goodyear* e *Michelin*.

III.3 Resultados

A partir do cálculo das estatísticas nos dados de todos os pneus foi obtida, para a distância rodada antes de cada recapagem, uma quilometragem média de cinquenta e sete mil quatrocentos e oitenta e quatro (57.484) quilômetros com desvio padrão amostral de vinte e três mil oitocentos e dois (23.802) quilômetros, os valores mínimo e máximo obtidos foram novecentos e quarenta e sete (947) quilômetros e duzentos e vinte e um seiscentos e setenta e dois (221.672) quilômetros.

A Tabela I, a seguir, apresenta as estatísticas descritivas obtidas.

TABELA I: TABELA DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM DOS PNEUS UTILIZADOS NO ESTUDO

Marca/ Modelo	Quilometragem			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<i>Goodyear</i> G291 3/06	52.955	30.439	12.381	190.499
<i>Goodyear</i> G 291 7/06	56.756	14.445	29.560	95.484
<i>Goodyear</i> G 358 5/06	52.050	29.522	3.017	221.672
<i>Goodyear</i> G 358 7/06	55.366	18.120	17.166	108.117
<i>Goodyear</i> G 359 3/06	61.191	35.1220	3.047	200.923
<i>Goodyear</i> G 359 7/06	53.664	12.865	26.134	92.240
<i>Michelin</i> Xze 2 8/06	60.624	27.899	947	181.072
<i>Michelin</i> Xzu 2 7/06	67.265	22.005	27.637	119.507

Fonte: os autores (2017)

A fig. 2 apresenta o gráfico com as curvas das funções de confiabilidade para os diferentes tipos de pneus novos estudados. Através da observação das mesmas pode ser verificado que o pneu *Michelin* Xzu 7/06 apresenta maior confiabilidade do que os demais e que o pneu *Goodyear* G 358 7/06 tem a menor confiabilidade. Como o *p-valor*, obtido através do teste *log-rank* entre os cinco pneus, é igual a zero pode-se optar pela existência de diferença estatística significativa entre os cinco pneus que fizeram parte do estudo. A fim de verificar os modelos de pneus que possuem funções de confiabilidade distintas foram feitas comparações de duas em duas através do teste *log-rank*. E, com base nos *p-valores* obtidos pode-se verificar que o pneu *Goodyear* G 358 7/06 apresenta diferença significativa quando comparado com todos os demais o que leva à concluir que no estudo este modelo apresentou menor performance que os demais cuja comparação de grupos a partir do teste *log-rank* não apresentou evidência de diferença significativa entre os modelos estudados. Após a primeira recapagem o teste *log-rank* entre os modelos indica a existência de diferenças estatísticas significativas. Os pneus *Goodyear* G 291 3/06 e *Michelin* Xzu 2 7/06 foram os que apresentaram maior confiabilidade. A menor confiabilidade foi apresentada pelos modelos *Goodyear* G 359 3/06, *Goodyear* G 291 3/06 e *Goodyear* G 358 5/06. Também se verificou a não existência de diferenças significativas entre os modelos de pneus que pertencem ao grupo com menor confiabilidade, o mesmo se verificou entre aqueles que pertencem ao grupo com confiabilidade maior.

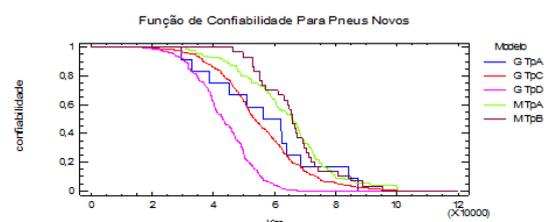


Figura 2. Funções de Confiabilidade Para Pneus Novos
Fonte: os autores (2017),

A aplicação das técnicas de confiabilidade e teste *log-rank* nos dados apurados após a segunda recapagem dos pneus revela uma homogeneidade maior entre os diferentes modelos estudados, notadamente entre os modelos *Goodyear G 291 3/06A* x *Goodyear G 358 5/06C*, *Goodyear G 291 3/06A* x *Michelin Xze 2 8/06A*, *Goodyear G 291 3/06A* x *Michelin Xzu 2 7/06B*, *Goodyear G 291 7/06B* x *Michelin Xzu 2 7/06B*, *Goodyear G 358 5/06C* x *Michelin Xze 2 8/06A*, *Goodyear G 358 5/06C* x *Michelin Xzu 2 7/06B*, *Goodyear G 359 3/06E* x *Michelin Xze 2 8/06* e *Michelin Xze 2 8/06A* x *Michelin Xzu 2 7/06B*.

A análise da diferença entre as funções de confiabilidade dos pneus de primeira e segunda recapagem deve considerar que as empresas de transporte, em geral, colocam os pneus de qualidade inferior para rodar em pavimentos com melhores condições, o que exige menores esforços dos pneus. Na cidade de Curitiba as empresas de transporte coletivo enfrentam situações de pavimento e carga bastante heterogêneas, sendo que as regiões onde os pavimentos estão em piores condições são justamente aquelas mais distantes do anel central da cidade e nas quais a carga é maior. A recapagem apenas refaz a superfície de borracha que reveste a estrutura do pneu sem interferir nas condições desta estrutura. O fato dos pneus que vinham apresentando maior confiabilidade terem a diminuição da mesma pode estar relacionado com as diferenças de qualidade entre a borracha que reveste os pneus novos dos diferentes modelos e também a diferença de qualidade existente na estrutura destes pneus. Como essa estrutura não sofre melhorias ao longo da vida do pneu isso compromete sua performance após as recapagens, pois apesar da borracha que reveste o pneu estar nova a estrutura que a suporta tem como tempo de vida toda a quilometragem acumulada no uso do pneu.

Ainda foi conduzido um estudo com o objetivo de comparar a função de confiabilidade entre todos os pneus nas diferentes fases de vida dos mesmos. Este estudo revelou que pneus que sofreram recapagem rodam uma quilometragem maior que pneus novos. Em média, pneus novos rodam cinquenta e três mil seiscentos e sete (53.607) quilômetros. Os pneus que sofreram uma recapagem rodaram cinquenta e três mil seiscentos e sete (57.687) quilômetros e aqueles que sofreram duas recapagens foram utilizados por cinquenta e sete mil trezentos e sessenta e cinco (57.365) quilômetros.

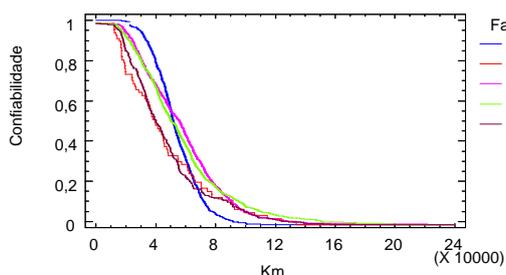


Figura 3. Funções de Confiabilidade Para Todos os Pneus
Fonte: os autores (2017),

Observando o gráfico pode-se visualizar que no início da vida os pneus novos têm confiabilidade maior que os pneus recapados, situação que se inverte após os pneus terem quilometragem superior a 50.000 km. O *p-valor* (0,377x10⁻¹¹), obtido pelo teste *log-rank*, evidencia a existência de diferença estatisticamente significativa entre as funções de confiabilidade.

IV. CONCLUSÃO

Através dos dados reais oriundos da atividade cotidiana de uma empresa, foram comparadas as funções de confiabilidade de pneus novos e com várias recapagens. A ferramenta forneceu resultados consistentes que devem ser interpretados à luz da realidade em que foram coletados e também considerando a forma como os pneus são utilizados em situações profissionais com finalidade econômica. Os resultados obtidos no estudo mostraram consistência com o conhecimento comum entre os profissionais da área de transportes revelando que pneus recapados podem rodar quilometragem superior aos pneus novos, contudo estes são submetidos a condições de uso mais rigorosas.

A aplicação da técnica de confiabilidade mostrou ser capaz de produzir resultados eficientes que, quando acrescidos de informações adicionais tais como preço do pneu e custo de manutenção (realização de rodízios, recapagens, armazenamento), podem contribuir significativamente a fim de decidir o pneu mais adequado a cada necessidade envolvendo fatores como tipo de aplicação e valores econômicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Radsystem Desenvolvimento de Sistemas Ltda pela cessão dos dados utilizados para desenvolvimento do estudo apresentado neste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAVES NETO; A. Confiabilidade e métodos estatísticos aplicados a sistemas de engenharia. Curitiba, 2005. Apostila digitada.
- [2] COLOSIMO, E.A.; GIOLO, S.R. Análise de sobrevivência aplicada. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- [3] FREITAS, M.A.; COLOSIMO, E.A. Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1997.
- [4] KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobrás, 2009.
- [5] LAFRAIA, J.R.B. Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobrás, 2001.
- [6] PALADY, P. FMEA: análise dos modos de falha e efeitos: prevenindo e prevenindo problemas antes que ocorram. São Paulo: IMAM, 1997.
- [7] PIAZZA, G. Introdução à engenharia da confiabilidade. Caxias do Sul: EDUCS, 2000.
- [8] SASSERON, Pedro Luis ; ABACKERLI, A. J. . Métodos de ensaio acelerado como alternativa para os dados de vida de fornecedor. Revista de Ciência & Tecnologia. Piracicaba, v. 11, n. 22, p. 43-48, 2003.
- [9] TEMPO DE DEGRADAÇÃO DOS MATERIAS. Disponível em http://www.fec.unicamp.br/~crsfec/tempo_degrada.html. Acesso em 06 de setembro de 2017.
- [10] URBS EM NÚMEROS. Transporte Coletivo Urbano 2017. Disponível em www.urbs.curitiba.pr.gov.br/institucional/urbs-em-numeros. Acesso em 06 de setembro de 2017.