

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Clério Santos Vieira

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE VIDA ÚTIL DE PNEUS APLICADOS EM
EQUIPAMENTOS DE MINERAÇÃO:**

Tratamento de dados de supervisórios transmitidos via telemetria

Belo Horizonte

2016

Clério Santos Vieira

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE VIDA ÚTIL DE PNEUS APLICADOS EM
EQUIPAMENTOS DE MINERAÇÃO:**

Tratamento de dados de supervisórios transmitidos via telemetria

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paiva Brito

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Belo Horizonte

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

V657a Vieira, Clério Santos
Análise probabilística de vida útil de pneus aplicados em equipamentos de mineração: tratamento de dados de supervisórios transmitidos via telemetria / Clério Santos Vieira. Belo Horizonte, 2016.
103 f. : il.

Orientador: Pedro Paiva Brito
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Pneumáticos. 2. Falhas estruturais. 3. Caminhões. 4. Análise estrutural (Engenharia). I. Brito, Pedro Paiva. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 629.027.542.2

Clério Santos Vieira

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE VIDA ÚTIL DE PNEUS APLICADOS EM
EQUIPAMENTOS DE MINERAÇÃO:**

Tratamento de dados de supervisórios transmitidos via telemetria

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paiva Brito

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Prof. Dr. –Ing. Pedro Paiva Brito – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Pedro Américo de Magalhães Jr. – PUC Minas (Banca examinadora)

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva – CEFET/MG (Banca examinadora)

Belo Horizonte, 01 de julho de 2016.

A família, meu porto seguro, pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela bênção da vida. Agradeço a minha família pela compreensão e suporte nos estudos. Agradeço a todos da Vale S/A pelo apoio além da conciliação dos estudos com as minhas atividades profissionais. Por fim agradeço a todo o grupo docente da PUC-Minas por todo conhecimento transmitido e oportunidades ofertadas.

“Ainda que eu tivesse o dom da profecia, o conhecimento de todos os mistérios e de toda a ciência; ainda que eu tivesse toda a fé, a ponto de transportar montanhas, se não tivesse o amor, eu não seria nada.” (1CORÍNTIOS 13, 2-3).

RESUMO

Este trabalho descreve uma análise estatística de vida útil de pneus aplicados em caminhões fora-de-via utilizados em minerações a céu aberto. A compreensão do processo de ocorrência de falhas estruturais, correlacionadas com o mecanismo de fadiga, comumente observadas em componentes mecânicos é de vital importância para a indústria atual. Como na maioria das vezes tais falhas ocorrem repentinamente, o seu entendimento nos mais diversos componentes sujeitos a cargas cíclicas auxilia a análise de deteriorações progressivas do material ao longo do tempo, serve de retorno para potenciais melhorias no produto retroalimentando os dados de simulação computacional e, também, potencialmente aumenta a segurança operacional com a mitigação de suas consequências no processo produtivo e às pessoas expostas a tais falhas. Os pneus são componentes que integram grande parte da frota de veículos sobre rodas, dentre estes: equipamentos de transporte, equipamentos móveis industriais e equipamentos de mineração. Equipamentos fora-de-via, como caminhões de grande porte utilizados na indústria de mineração, também equipados com pneus, pela sua própria condição operacional sofrem esforços cíclicos. Estes caminhões possuem sistemas de monitoramento remoto que registram dados de vários sensores embarcados como as pressões de enchimento, as temperaturas internas de trabalho dos pneus além das distâncias percorridas com suas respectivas parcelas de tempo durante seu trabalho normal. Os parâmetros de tensão utilizados são oriundos do sistema de pesagem dos veículos cujos dados dos pressostatos embarcados nas suspensões hidropneumáticas informam as distribuições de carga nos eixos ao longo de todo seu percurso de trabalho, monitorando ainda os esforços gerados na dinâmica operacional dos caminhões como picos de solicitações em virtude das frenagens, acelerações tangenciais nas curvas, componentes geradas devido às inclinações, depressões e intempéries presentes nas pistas de rolamento. Todos esses dados, coletados em campo durante a operação normal dos veículos subsidiaram os resultados de suas correlações com as vidas úteis dos pneus, compondo a análise desenvolvida pelo autor e as demais conclusões neste trabalho apresentadas.

Palavras-chave: Vida útil. Falha. Pneus. Equipamentos fora-de-via.

ABSTRACT

This work describes a statistic analysis of the service life of tires applied in off-highway trucks used in open-pit mining. Understanding the process of occurrence of structural failures, correlated to the fatigue mechanism and often observed in mechanic components, is of vital importance for the current industry. Since these failures usually happen suddenly, understanding them in the most diverse components submitted to cyclic loads helps analyzing the material's progressive deterioration along time; it acts as a return to potential improvements in the product, giving feedback of computing simulation data; and it potentially increases operational safety by mitigating the consequences it has on the productive process and on the people exposed to such failures. The tires, components that integrate great part of the on wheels vehicles fleet – amongst them: transportation equipment, industrial mobile equipment and mining equipment – are inserted in this context. Off-highway trucks commonly used in the mining industry, which are also equipped with tires, are submitted to cyclical efforts due to their own operational conditions. These trucks have remote monitoring systems that register and store monitored data through several sensors embedded in these machines like internal pressures and temperatures of the tires, times and distances covered. The stress parameters comes from the weighing system of these vehicles and the data from the hydro-pneumatic suspension sensors that measure the load distribution on the vehicles axles during normal operation, monitoring the stresses generated during dynamic operational of trucks: load peaks due braking, tangential acceleration due cornering, and forces generated by roads slopes and bumps on the roads are also monitored. All these data, collected during normal operation of the vehicles supported the results of the correlations of it and tires useful life, was utilized in the analysis developed by the author and sustains the other conclusions showed in this work.

Keywords: Service life. Failure. Tires. Off-Highway Trucks.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BR - Borracha Sintética Polibutadieno

DD – Dianteira Direita

DE – Dianteira Esquerda

DMT – Distância Média de Transporte

F_x – Força Longitudinal ou de Tração

F_y - Força Lateral

F_z - Força Normal

GPS – Sistema de Posicionamento Global (do inglês *Global Positioning System*)

IIR - Borracha Sintética Butyl

M_x - Momento de sobrerolagem

M_y – Momento de resistência à rotação

M_z - Torque de alinhamento

MFLE - Mecânica da Fratura Linear Elástica

NR - Borracha Natural

OEM – Fabricante Original do Equipamento (do inglês *Original Equipment Manufacturer*)

P - Pressão

SBR - Borracha Sintética Estireno-butadieneo

TD – Traseira Direita

TE – Traseira Esquerda

TKPH – Tonelada Quilômetro por Hora (do inglês *Ton Kilometer per Hour*)

V^t - Velocidade tangencial

α - Distância Vazio

β - Distância Cheio

γ – Momento de arfagem (do inglês *pitch*)

φ – Momento de rolagem (do inglês *bias*)

η – Momento de guinada (do inglês *rack*)

δ - Tempo Cheio

θ - Tempo Vazio

ϕ – Toneladas Movimentadas

Π – Carga transportada pelo caminhão entre 251 e 274 toneladas métricas

E – Carga transportada pelo caminhão acima de 274 toneladas métricas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Justificativa	21
1.2 Objetivos.....	23
1.3 Limitações do trabalho	24
1.4 Estrutura do trabalho	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 Forças, momentos e deformações no pneu	25
2.2 Detalhes construtivos de um pneu	31
2.3 O uso do pneu em equipamentos móveis de mineração	37
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
3.1 Fadiga	41
3.2 Danos pré-existentes e defeitos em elastômeros.....	44
3.2.1 <i>Fadiga em Compósitos de Borracha</i>	45
3.2.2 <i>Resistência à fratura</i>	49
3.3 Teoria do dano cumulativo e previsão de vida	50
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	53
4.1 Sistema de monitoramento de pressão e temperatura dos pneus	53
4.2 Sistema de Controle de Análise de Pista	56
4.2.1 <i>Movimento de arfagem</i>	58
4.2.2 <i>Movimento de rolagem</i>	59
4.2.3 <i>Movimento de guinada</i>	60
4.3 Sistema de controle de carga útil	61
4.4 Sistemas de Telemetria e Despacho Eletrônico	62
5 METODOLOGIA NUMÉRICA	67
5.1 Análise de regressão	67
5.2 Análise de correlação	77
5.3 Regressão linear múltipla	79
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
6.1 Predições para vida útil estrutural de pneus	86
6.2 Análise dos modos de falha dos pneus sucateados.....	87
7 CONCLUSÕES.....	93
REFERÊNCIAS	95
ANEXO A – Coeficiente K_1 para cálculo do TKPH	99
ANEXO B – Coeficiente K_2 para cálculo do TKPH.....	99
APÊNDICE A – Gráficos de caixa ou blox-plot para modos de falha de pneus	101

1. INTRODUÇÃO

Supervisionar os vários sistemas, evitando falhas inesperadas, ao mesmo tempo em que a produtividade é maximizada e os custos operacionais dos equipamentos reduzidos, tornou-se um diferencial no atual mundo corporativo.

Na dimensão custo percebe-se que procedimentos de inspeção, reparação, manutenção ou substituição dos produtos falhados são consideráveis e oneram o produto final. Dowling (1993) destaca que boa parte destes custos pode ser eliminada com as tecnologias disponíveis ou que se desenvolvem num intervalo curto de tempo servindo como motivador para estudos da fratura mecânica:

Engenheiros com conhecimento nesta área podem ajudar as empresas em que trabalham na redução de custos com falhas estruturais, ajudando no desenvolvimento de processos mais eficientes, mais econômicos e rápidos na atenção prematura destes problemas potenciais. Benefícios para a sociedade resultam como menores custos para o consumidor e o aumento da segurança. (DOWLING, 1993, p.20).

Neste contexto, empresas mineradoras procuram agregar eficiência em sua frota de equipamentos móveis com a utilização de supervisórios que, além de aumentar a eficiência dos seus equipamentos, reduzem custos e ao mesmo tempo agregam segurança operacional.

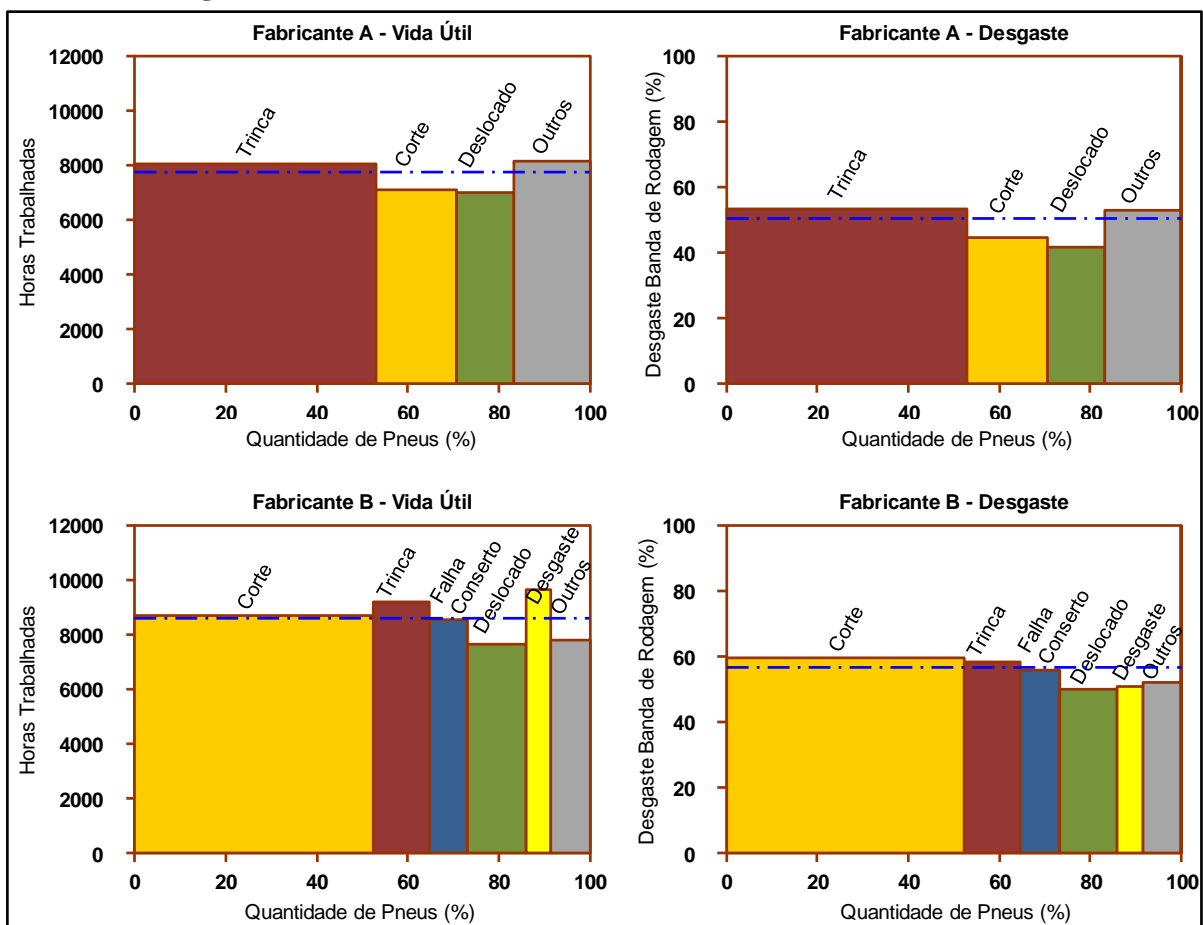
Sabe-se que pneus de equipamentos de mineração são insumos chave do processo, pois em equipamentos sobre rodas, são estes componentes que promovem o contato com o solo, suportando as cargas, as agressividades do meio, promovendo a tração e o deslocamento. Sem pneus, torna-se impossível garantir a operação do processo produtivo em uma mineração de lavra convencional. Um fator de grande importância é que este insumo representa gastos relevantes em uma mina a céu aberto. Além disso, as grandes massas de ar deslocadas, em caso de incidentes operacionais com pneus de equipamentos de grande porte, podem resultar em danos materiais e pessoais.

1.1. Justificativa

O Pneu é um insumo de grande representatividade no processo produtivo de uma mina. De acordo com a Caterpillar (2013) os gastos com pneus dos caminhões fora-de-via representam 16% do seu custo operacional total.

Dependendo das solicitações, um pneu pode atingir o final de vida útil¹ por motivos distintos. Alguns fabricantes de pneus os classificam em três diferentes grupos, sendo eles: desgaste da banda de rodagem; danos provocados por agressões externas representadas por cortes que inutilizam os pneus; e a fadiga representada como a exaustão da resistência mecânica da carcaça do pneu. Embora o processo de fadiga em pneus seja diferente do observado em materiais metálicos, os processos de acúmulo de dano subsistem e também são associados à propagação de trincas (SCHUBEL *et al.*, 2004). Os dados apresentados na Figura 1 oferecem uma perspectiva do universo de pneus e seus respectivos motivos de sucateamento para uma mineração a céu aberto. Os modos de falha destacados como trincas e deslocamento têm relação direta com o processo de fadiga, foco deste trabalho. Nota-se ainda um grande potencial de aumento da utilização destes componentes, pois foram sucateados com remanescente de mais de 40% em média da espessura da banda de rodagem.

Figura 1 – Motivos de Sucateamento de Pneus Fabricantes A e B



Fonte: Elaborado pelo Autor.

¹ “Sob dadas condições, é o intervalo de tempo desde o instante em que um item é colocado pela primeira vez em estado de disponibilidade, até o instante em que a intensidade de falha torna-se inaceitável ou até que o item seja considerado irrecuperável depois de uma pane” (NBR5462, 1994).

Atualmente a demanda por remoção de um pneu que atingiu o limite de vida útil é feita por inspeções visuais. Conforme Michelin (2012a) profissionais devidamente treinados são capazes de determinar tecnicamente a continuidade de operação de um pneu. Esses técnicos vão a campo regularmente buscando identificar fisicamente características típicas de pneus cujas carcaças atingiram seu limite de vida útil. Como o procedimento atualmente utilizado para priorizar as inspeções é a aproximação do final de vida útil do pneu medido em horas trabalhadas, uma orientação com informações de solicitações geradoras de danos estruturais podem ser úteis para apoiar a identificação dos pneus que se aproximam da quantidade limite de ciclos de carregamento. Esta medida pode ser antecipada ou postergada em detrimento da quantidade de ciclos e intensidade das solicitações sobre o pneu durante toda sua operação.

Como ocorrem muitas vezes abruptamente e, como o pneu contém certa massa de ar confinada sob pressão, falhas repentinas podem resultar em grandes deslocamentos destas massas de ar. Potenciais danos pessoais e materiais podem ser evitados caso ocorra uma atuação antes do atingimento do limite de vida útil estrutural de um pneu.

Outra justificativa para a realização deste trabalho é a existência de monitoramentos de dados já embarcados nas máquinas. A frota de caminhões em estudo conta com sistemas de monitoramento, inclusive com transmissão de dados em tempo real, composto por sensores e centrais eletrônicas que monitoram variáveis operacionais durante a operação normal destes equipamentos cujos dados subsidiaram o modelo matemático neste trabalho apresentado.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar estatisticamente a ocorrência de falhas estruturais em pneus de equipamentos de grande porte de mineração através das solicitações mecânicas reais em que estes componentes são submetidos, com base em dados obtidos por sistemas de monitoramento remoto.

Em termos de objetivos específicos pretende-se ainda:

- Avaliar, dentre as diversas variáveis monitoradas por sistemas de monitoramento remoto em equipamentos fora-de-via, as que exercem maiores influências na vida útil da estrutura de pneus em minas de céu aberto;
- Elaborar um modelo estatístico global de previsão de final de vida útil da estrutura de pneus dos equipamentos de grande porte de mineração utilizando dados oriundos de sistemas de monitoramento nativos de tais equipamentos;

- Avaliar a preponderância das variáveis monitoradas nos diferentes modos de falha observados.

1.3. Limitações do trabalho

Este trabalho limita-se na utilização de dados reais, monitorados em campo, através dos atuais sistemas de monitoramento de componentes de máquinas. Todos os dados utilizados para construção do algoritmo foram adquiridos de sensores OEM embarcados nos caminhões, sem a necessidade de instalação de sensoriamento adicional, otimizando a eletrônica embarcada existente, reduzindo-se com isso custos de implantação. Os dados foram adquiridos remotamente através de um sistema de telemetria embarcado.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em sete capítulos e é apresentado na seguinte estrutura:

No capítulo 1 é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho, seus objetivos gerais, objetivos específicos e as limitações do trabalho.

No capítulo 2 é feito um amplo levantamento bibliográfico sobre conceitos e teorias a respeito de pneus aplicados em equipamentos de mineração.

O capítulo 3 caracteriza e classifica o fenômeno da fadiga aplicada a elastômeros.

No capítulo 4 é descrita a metodologia experimental do estudo e são abordados os sistemas remotos de monitoramento de dados dos equipamentos além de como são feitas as aquisições dos dados para geração de informação.

No capítulo 5 é abordada a metodologia numérica, onde são correlacionados os dados de monitoramento em campo, ponderando-se as variáveis com suas respectivas análises. Também é apresentado um modelo matemático que visa correlacionar as variáveis monitoradas que possuem maiores influências no limite de vida útil da estrutura dos pneus.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados do estudo elaborado.

O capítulo 7 encerra o trabalho com as conclusões a cerca do tema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre o tema abordado. O pneu é um produto de alta complexidade e todo seu ciclo de vida, que envolve desde sua concepção até a destinação final, envolve diversos ramos da engenharia. O ciclo de trabalho dos pneus, nas mais diversas aplicações, com amplo detalhamento das cargas e momentos incidentes nestes, são detalhados nas obras de Blundell e Harty (2004), Gillespie (1992) e Wong (2001). Mark, Erman e Roland (2013) abordam em seu trabalho questões técnicas referentes ao processo construtivo, materiais e denominações dos constituintes deste complexo elastômero. Informações técnicas relevantes podem ser obtidas a partir de fabricantes de pneus como a Bridgestone (2007) e a Michelin (2011, 2012a, 2012b e 2015). Por fim, temas como a pressão de enchimento, temperatura e capacidades de trabalho dos pneus durante sua operação são abordados nos trabalhos de Avallone, Baumeister e Sadegh (2007) e Milliken e Milliken (1995).

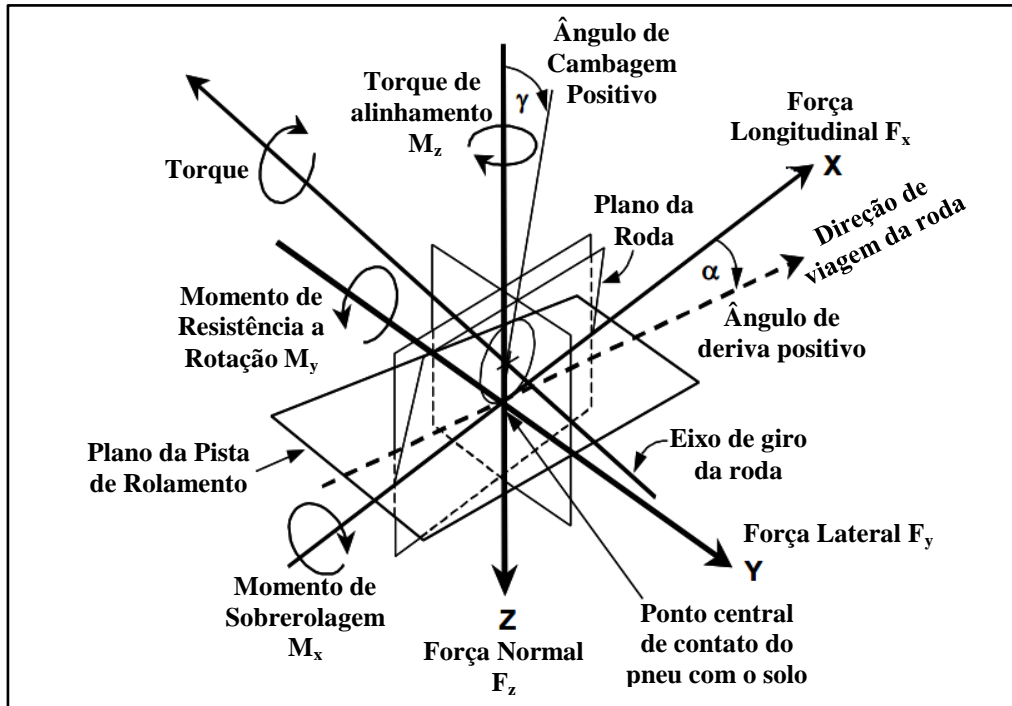
2.1. Forças, momentos e deformações no pneu

O pneu é o elemento que possui a importante função de transmitir as forças verticais, longitudinais e laterais entre o veículo e o solo. Mark, Erman e Roland (2013) classificam três parâmetros que podem ser monitorados através destas funções básicas: o perfil de aplicação do veículo; as características estéticas, de dirigibilidade e de conforto ao operador; e as propriedades mecânicas que são medidas através da resistência da carcaça, foco deste trabalho, além da resistência ao desgaste da banda de rodagem do pneu. Forças ainda de tração, frenagem e direcionais surgem como consequências da interação entre o pneu e o solo. A Figura 1 ilustra as forças e momentos atuantes num pneu.

No que tange aos momentos atuantes, primeiramente será discutido o Torque de Alinhamento M_z . Este momento torçor é gerado em função do ângulo de cambagem e também do ângulo de deriva. O Momento de Direção M_x é gerado pela reação do solo no pneu em virtude da força normal F_z num plano diferente ao plano da carga aplicada. Já o Momento de Resistência à Rotação ou de Resistência ao Rolamento M_y é gerado pela força que impede o movimento livre da roda no solo. Esta resistência é criada pela constante compressão e expansão da banda de rodagem do pneu além de intempéries presentes na via de rolamento. A histerese gera perda de energia na região da banda de rodagem e nas paredes laterais do pneu em virtude das deformações. Crolla (2009) complementa concluindo que este fenômeno

contribui para o aumento da temperatura do pneu devido à transformação da energia mecânica em energia térmica.

Figura 1 - Padrão SAE de forças e momentos atuantes em um pneu



Fonte: Adaptado de MILLIKEN; MILLIKEN, 1995, p. 62

Blundell e Harty em sua obra afirmam que “deslizamentos estarão sempre presentes na área de contato do pneu com o solo mesmo com a ausência de forças de tração, direcionais e de frenagem.” (BLUNDELL; HARTY, 2004, P. 260, tradução nossa).² A Figura 2 ilustra um pneu com simples contato no solo, sem a aplicação das forças de tração, direcionais e de frenagem impostas pelo veículo, girando a uma velocidade V em relação à pista de rolamento. As condições de movimento baseiam-se na seguinte equação:

$$V = \omega R_e \quad (1)$$

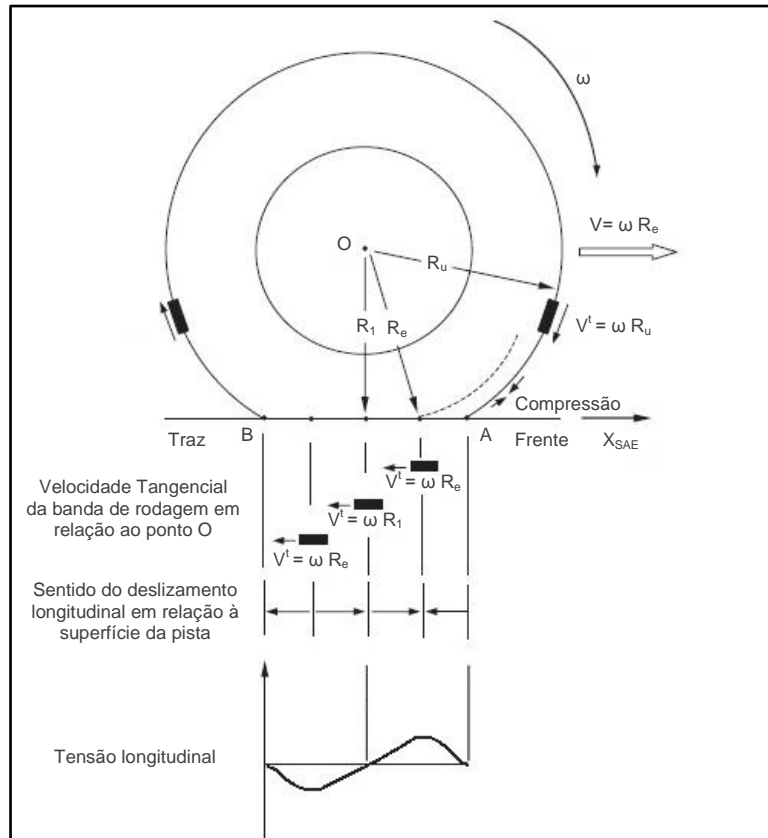
onde

ω é a velocidade angular do pneu

R_e é o raio de rolagem efetivo do pneu

² “slip will always be present in the tyre contact patch even in the absence of tractive, driving and braking forces” (BLUNDELL; HARTY, 2004).

Figura 2 – Geração de deslizamento longitudinal em um pneu girando livremente



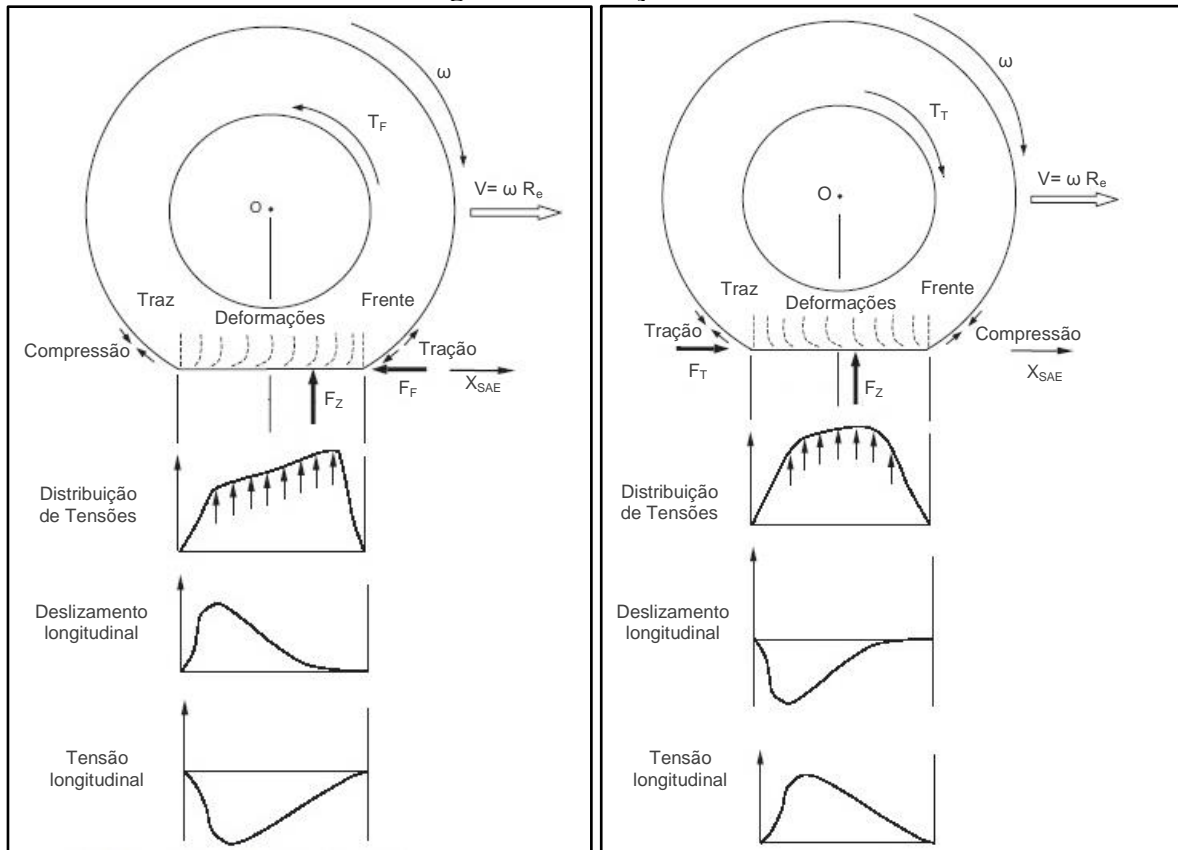
Fonte: Adaptado de BLUNDELL; HARTY, 2004, p. 261

À medida que a região do pneu em contato com o solo deforma-se, a velocidade tangencial V' da banda de rodagem em relação ao ponto central da roda também é alterada devido à variação do raio compreendido entre o centro da roda ao extremo da banda de rodagem, para a manutenção da velocidade angular. Notam-se regiões de compressão e tração na região compreendida entre os pontos A e B com consequente geração de tensões de cisalhamento na banda de rodagem. Compressões também ocorrem na região imediatamente anterior ao ponto A. Como consequência deste mecanismo, a região de contato do pneu com o solo sofre deslizamentos para compensação destas variações do diâmetro.

Momentos torsores originado pelas forças de tração e de frenagem do veículo também incidem sobre os pneus gerando alterações em sua estrutura. Além disso, os pneus sujeitos a estes torques estão mais sujeitos à deslizamentos (WONG, 2001). A força de frenagem F_F numa roda em movimento gerará um torque de frenagem no sentido oposto ao sentido de rotação chamado de T_F . Já durante a aceleração ocorrerá o contrário, ou seja, um torque de tração T_T favorável ao sentido de rotação é aplicado como consequência da força de tração F_T . Em virtude das variações das velocidades angulares, mudanças ocorrem nas áreas de contato do pneu com o solo, com consequente surgimento de zonas de compressão e tração próximas

desta região. Com isso há de um aumento do deslizamento em comparação com as condições de uma roda girando livremente, como pode ser visto na Figura 3.

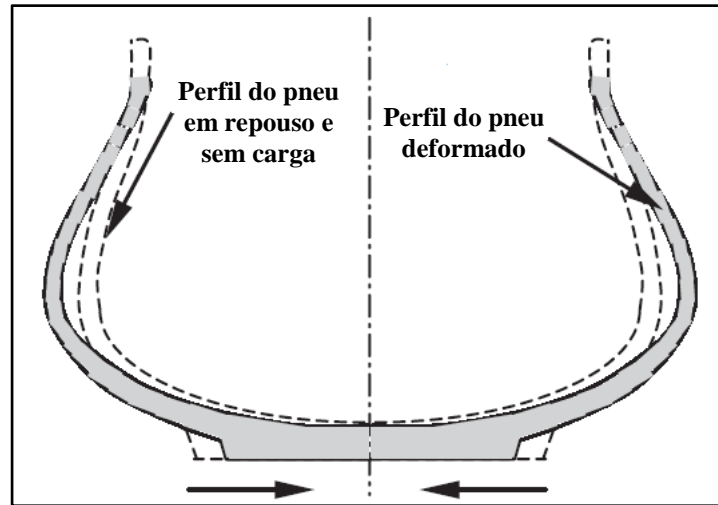
Figura 3 – Geração de deformação em um pneu devido às aplicações dos torques de frenagem e aceleração no veículo



Fonte: Adaptado de BLUNDELL; HARTY, 2004, p. 265 e 268

Na direção transversal ao movimento do pneu também ocorrem deformações. Deformações nas paredes laterais e na periferia da área de contato do pneu com o solo podem ser vistas na Figura 4. Com a aplicação das cargas de trabalho, bem como dos torques de frenagem e aceleração do veículo, estas deformações são ampliadas. Pela própria condição de operação do pneu é razoável afirmar que estes fenômenos ocorrem em todo seu perímetro durante suas sucessivas revoluções.

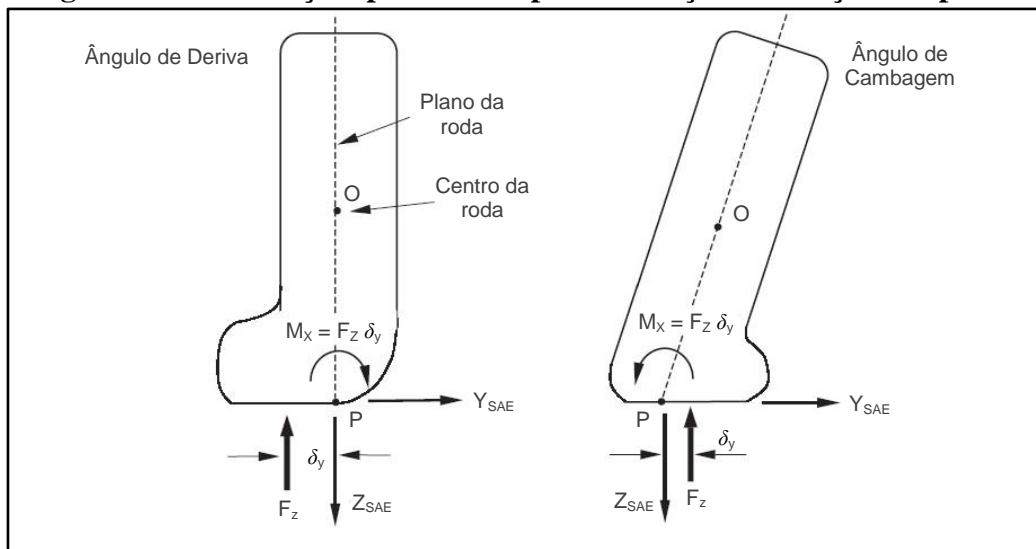
Figura 4 – Deformação das paredes de um pneu girando livremente



Fonte: Adaptado de MOORE apud BLUNDELL; HARTY, 2004, p. 262

Momentos gerados a partir de mudanças de direção dos pneus são mostrados na Figura 5. Estes momentos são gerados pelo ângulo de deriva da direção ou pelo ângulo de cambagem da suspensão responsável pelo seu auto-alinhamento³. Deformações na parede lateral do pneu próximo da sua região de contato com o solo devido são provenientes do ângulo de deriva, ângulo de cambagem ou por uma combinação de ambos. Estes momentos são gerados em virtude do deslocamento δy da força normal F_z em relação ao eixo ao plano da roda ou eixo Z.

Figura 5 – Deformações provocadas por mudanças da direção dos pneus



Fonte: Adaptado de BLUNDELL e HARTY, 2004, p. 277

³ O torque de auto-alinhamento da direção é responsável por auxiliar no retorno da direção do veículo em linha reta após seu esterçamento (WONG, 2001).

Todas as deformações mencionadas são ampliadas na aplicação prática onde podemos citar uma condição corriqueira como quando um veículo carregado é acelerado e encontra-se em manobras. Gillespie (1992) alerta para o fato de que, quando o pneu encontra alguma descontinuidade na pista como degraus ou buracos aonde há geração de choques repetitivos, cargas dinâmicas verticais e longitudinais são geradas, alterando abruptamente o módulo das forças incidentes anteriormente explanadas. Ainda é ressaltado que a magnitude destas forças é significativa na fadiga e na durabilidade dos componentes do veículo. A capacidade de carga dos pneus é de vital importância neste momento, pois dinamicamente as cargas incidentes podem chegar a 170% da sua capacidade nominal (PREM, apud CHAMANARA, 2013, p. 1).

A Bridgestone (2007) salienta que pneus de máquinas utilizadas em transporte de cargas tem a função básica de transportar altas cargas rapidamente e em longas distâncias, gerando uma elevação da temperatura destes componentes. Temperaturas de trabalho acima de certos limites podem provocar danos aos pneus. Avallone, Baumeister e Sadegh (2007) complementam que a temperatura de operação do pneu tem interferência direta em sua vida útil. A carcaça do pneu tem seu módulo de elasticidade alterada com o aumento da temperatura, refletindo negativamente em sua capacidade de carga. A capacidade de carga do pneu tem influência direta com sua pressão de enchimento. Os fabricantes de pneus disponibilizam tabelas e equações que podem ser utilizadas na correlação destas duas variáveis.

Além da temperatura, Milliken e Milliken (1995) lembram que os pneus também são sensíveis à pressão. Por razões de durabilidade as pressões de trabalho do pneu são de grande importância. Com pressões de calibração muito baixas as paredes laterais do pneu se deformam excessivamente, criando zonas localizadas de alta tensão. Avallone, Baumeister e Sadegh (2007) complementam que a esta condição gera um aumento da temperatura de trabalho do pneu. O ideal é que a pressão de calibração do pneu garanta a que toda a banda de rodagem, inclusive a região dos ombros, conectadas as paredes laterais do pneu, sustentem as cargas aplicadas proporcionalmente. Com pressões mais altas, a resistência a rolamento, que representa a energia perdida com a deformação do pneu, é reduzida. Entretanto, a área de contato da banda de rodagem com o solo pode também ser reduzida. Além disso, é recomendado que os pneus montados na configuração geminada operem com pressões padronizadas, evitando-se com isso a sobrecarga de algum dos pneus deste par.

2.2. Detalhes construtivos de um pneu

Mark, Erman e Roland (2013) destacam que para veículos e caminhões leves, cujo peso bruto total não ultrapassa 7250 kg fibras têxteis são predominantemente utilizadas na estrutura dos pneus. Enquanto isso, pneus de veículos pesados como equipamentos de agricultura, de movimentação de cargas como equipamentos de mineração e de grandes aviões, além de materiais têxteis, o aço também faz parte da sua estrutura.

O pneu é basicamente uma estrutura composta por borracha e lonas. Ele é reforçado com camadas de lonas dispostas transversalmente entre os dois talões que, como visto anteriormente dependendo da aplicação, são fabricadas de aço, fibras têxteis ou uma mistura de ambos.

Cada uma das partes que compõem um pneu possui uma função específica e estão correlacionadas com seu rendimento mecânico. Dentre estas partes pode-se destacar:

Banda de rodagem

Parte do pneu que tem contato direto com a via. A banda de rodagem deve proporcionar tração e baixa geração de calor. A mesma é composta de borrachas naturais, sintéticas, negro de fumo, sílica, óleos e agentes químicos.

Ombro do pneu

Região entre a parede lateral e a banda de rodagem do pneu que afeta a dissipação de calor.

Parede lateral

Transfere a carga para a banda de rodagem e tem papel importante na dirigibilidade do veículo. É fabricada com uma mistura de borrachas naturais, sintéticas, negro de fumo, óleos e agentes químicos que apoiam na estabilidade lateral.

Talões

Dois aros de aço que prendem a carcaça do pneu à roda. Eles devem possuir características de baixa deformação além de evitar o deslocamento entre o pneu e a roda. Na região dos talões observa-se também o retorno da lona que compõe a carcaça.

Carcaça

Lonas têxteis ou de aço fixadas entre os dois talões. Este elemento é considerado como a parte mais importante do pneu (WONG, 2001). O peso do veículo é sustentado pela carcaça que, através do ar comprimido no interior do pneu, tensiona as lonas da carcaça, sustentando as cargas incidentes no conjunto.

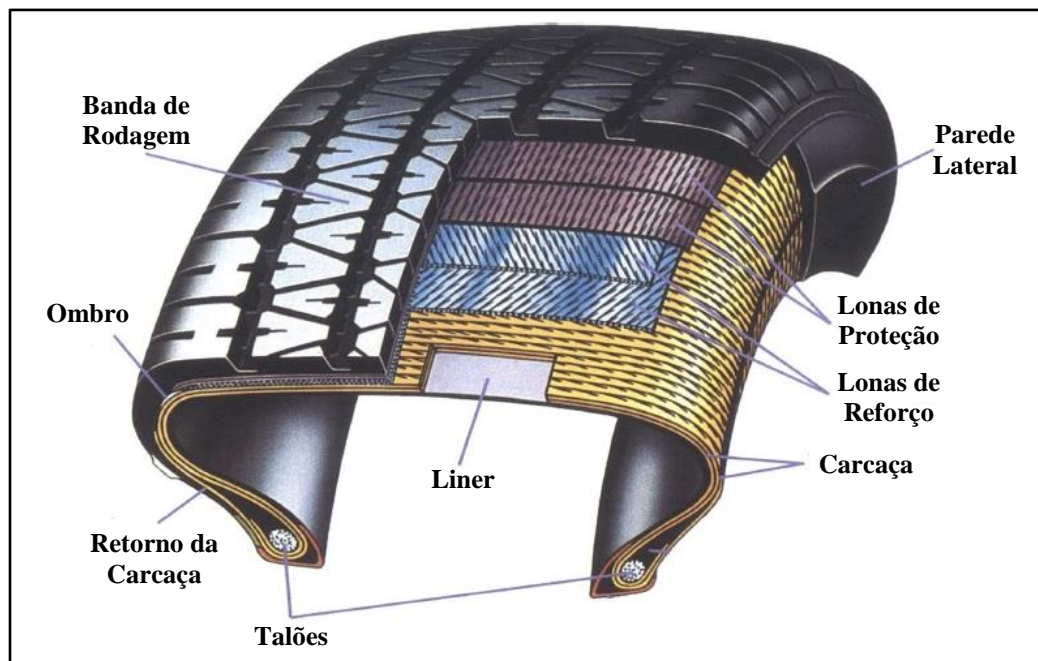
Lonas

Camadas construídas de fibras têxteis ou de aço localizadas entre a banda de rodagem e a carcaça. As lonas possuem finalidades como a proteção da carcaça contra cortes, também reforçando-a mecanicamente proporcionando a dirigibilidade do veículo e garantindo um desgaste regular da banda de rodagem. As fibras têxteis que compõem as lonas são normalmente de fibra de vidro ou aramida.

Liner

Parte interna dos pneus sem câmara de ar. Responsável pela retenção do fluido de inflagem no seu interior. É fabricada com borrachas sintéticas e polímeros.

Figura 6 – A estrutura de um pneu radial



Fonte: Adaptado de MARK; ERMAN; ROLAND, 2013, p. 623

A carcaça, talões, lonas, parede lateral, liner e banda de rodagem são essenciais na determinação do desempenho dos pneus. Os demais elementos são nomeados como

componentes secundários, pois protegem os componentes principais contra concentração e tensões (MARK; ERMAN; ROLAND, 2013). O estudo das tensões, deformações e materiais envolvidos na construção dos pneus é de alta complexidade e envolve várias áreas do conhecimento como a Engenharia Mecânica, Engenharia Química, da Engenharia da Computação além da Matemática.

Materiais como fibras de algodão, rayon, nylon, poliéster, aço, fibra de vidro, e aramida são utilizados nos pneus para aprimorar sua resistência à fadiga, controle da durabilidade, resiliência e da tensão de ruptura.

Os aços utilizados nos pneus são de elevada qualidade e alto teor de carbono além de outros elementos de liga que agregam propriedades mecânicas específicas como alongamento, resistência à ruptura e à flexão. Estas funções podem ser visualizadas na Tabela 1. Além disso, uma fina camada de cobre utilizada no recobrimento dos fios de aço ajuda na coesão entre este e a borracha dos pneus.

Tabela 1 – Composição química típica do aço utilizado na fabricação de pneus

Elemento	Composição (%)	Função
Carbono	0,65	Resistência mecânica
Cromo	0,05	Resistência mecânica
Cobre	0,02	Resistência mecânica
Manganês	0,60	Resistência à oxidação
Sílica	0,25	Resistência à oxidação
Enxofre	0,03	Conformabilidade

Fonte: Adaptado de MARK; ERMAN; ROLAND, 2013

As fibras têxteis utilizadas na fabricação dos pneus passam por várias etapas em seus processamentos. Por exemplo, as fibras de rayon oriundas da celulose, passam por inúmeros processos químicos para possuírem a tenacidade adequada para esta aplicação. Na fase final de processamento estas fibras são tracionadas para proporcionar uma melhor orientação cristalina do material. Outros materiais utilizados na fabricação dos pneus são o nylon e a aramida, fabricados a partir de polímeros de amida; o poliéster fabricado a partir da polimerização de monômeros⁴ como o etileno-glicol; a fibra de vidro proveniente de materiais

⁴ “Substância composta por moléculas denominadas básicas como o metano (CH₄) e o etileno (CH₂:CH₂). A partir dos monômeros, através do processo de polimerização, são criadas as grandes moléculas como o polietileno que é formado por uma cadeia de CH₂ unida por átomos de carbono” (PINHEIRO, 2001).

inorgânicos como o dióxido de silício, óxidos de cálcio, boro, alumínio e magnésio. A Tabela 2 destaca algumas características e aplicações destas fibras nos mais diversos tipos de pneus.

Tabela 2 – Características das fibras têxteis e aços utilizados na fabricação de pneus

Fibra	Tenacidade (g.Den)	Elongação máxima (%)	Módulo de elasticidade (g.Den)	Aplicação
Rayon	5,0	16	50	Carros de passeio
Nylon	9,0	19	32	Caminhões e veículos fora-de-via
Poliéster	6,5	18	65	Carros de passeio e caminhões
Fibra de Vidro	9,0	4,8	260	Carros de passeio
Aramida	20,1	4,0	350	Carros de passeio
Aço	3,8	2,5	200	Caminhões e veículos fora-de-via

Fonte: Adaptado de MARK; ERMAN; ROLAND, 2013

Depois de selecionadas, as fibras são trançadas formando-se cordões. Este processo é útil, pois com a redução da tensão de ruptura, há um aumento da resistência à fadiga e consequente aumento da durabilidade dos cordões com a redução de potenciais rasgos ou danos nestas fibras devido à incidência das cargas. Os cordões criados são então usados na confecção dos tecidos que, após etapas de aplicação de adesivos e, gerenciando-se as variáveis de tempo, temperatura e pressão são transformados em lonas.

O pneu é então construído em máquinas especiais e recoberto com inúmeros tipos de borracha em todo seu perímetro. Cada tipo de borracha e demais matérias possuem uma função específica em sua estrutura. Os tipos de borrachas mais utilizados na construção dos pneus são a Borracha Natural (NR), Borracha Sintética Estireno-butadieneo (SBR), Borracha Sintética Polibutadieno (BR) que são as mais utilizadas na banda de rodagem e nas paredes laterais enquanto a Borracha Sintética Butyl (IIR) é a muito utilizada na região interna para retenção do ar no interior do pneu (JAZAR, 2008). Vale ressaltar que é comum a mistura dos diferentes tipos de borracha para atendimento aos requisitos técnicos de cada parte do pneu. Por exemplo, as borrachas sintéticas BR são normalmente misturadas às borrachas naturais NR buscando conferir qualidades como resistência à fadiga além de coibir o crescimento de trincas (MARK; ERMAN; ROLAND, 2013).

Após a construção, o pneu passa pelo processo de vulcanização que Pinheiro (2001) define como uma reação química que ocorre sobre pressão e temperaturas controladas, além

da exposição do pneu a agentes químicos como o enxofre, convertendo a borracha de um estado plástico a um estado elástico, através de um processo de ligações cruzadas⁵. Com isso a borracha adquire resistência mecânica através do aumento de seu módulo de elasticidade e consequente elevação de sua resistência à fadiga.

Produtos adicionais como o Carbono e Sílicas são utilizados para aumentar a resistência à ruptura da borracha bem como conferi-la resistência à abrasão. Alguns outros são utilizados como antioxidantes para melhorar as propriedades da borracha contra a degradação térmica e até mesmo no aumento da resistência à reversão.

“A qualidade de um pneu depende da habilidade em utilizar todos os componentes unitários num produto com coesão que satisfaça as necessidades operacionais.” (JAZAR, 2008, P. 12, tradução nossa).⁶ A Tabela 3 exemplifica os percentuais em peso dos vários componentes constituintes de um pneu:

Tabela 3 – Composição típica das partes constituintes de um pneu

Componente	Descrição	Composição (em peso)
Estrutura	Aço, Rayon, Nylon	16%
Borracha	Natural ou Sintética	38%
Compostos	Carbono, Sílica	30%
Agentes	Óleos, Resinas	10%
Vulcanizadores	Enxofre, Óxido de Zinco	4%
Outros	-	2%

Fonte: Adaptado de JAZAR, 2008

Apesar de todas as características associadas aos métodos e compósitos utilizados na fabricação de um pneu, cuidados na sua utilização são requeridos de forma a ter um máximo aproveitamento deste componente. Cuidados como a correta pressão de inflagem para a aplicação devem ser tomados.

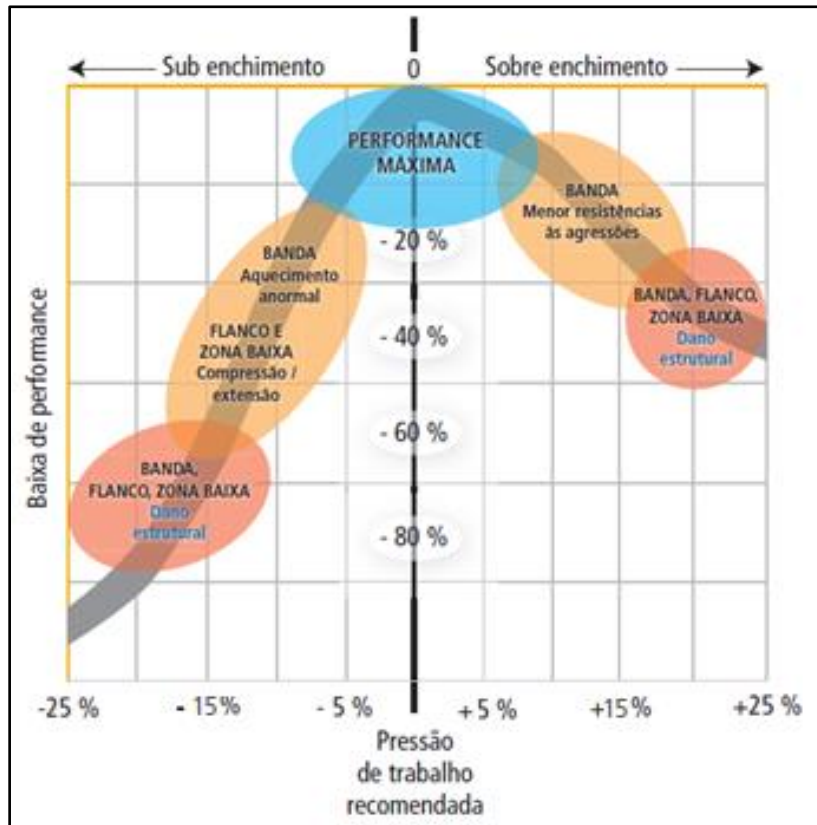
A pressão de enchimento tem influencia direta na vida útil do pneu. Pressões abaixo do recomendado para a aplicação geram um aumento excessivo da flexão das paredes laterais do pneu além do desgaste irregular da banda de rodagem. Pressões acima do recomendado

⁵ “As ligações cruzadas unem as redes lineares de polímeros através dos elastômeros. A força resistente às deformações é proporcional ao número de redes de polímeros por unidade de volume. A vulcanização é o processo químico capaz de produzir tal união entre tais redes, produzindo ligações cruzadas na cadeia polimérica” (PINHEIRO, 2001).

⁶ “Tire quality depends on the ability to blend all of the separate components into a cohesive product that satisfies the driver’s needs” (JAZAR, 2008).

para a aplicação além do desgaste irregular da banda de rodagem deixam o pneu mais suscetível a falhas como cortes e danos por choques oriundos da pista de rolamento (MICHELIN, 2012a). O gráfico da Figura 7 ilustra as consequências na utilização dos pneus fora da pressão de trabalho recomendada.

Figura 7 – Desempenho devido à sub enchimento ou sobre enchimento de um pneu e suas consequências



Fonte: Adaptado de MICHELIN, 2012a, p.59

Quando o pneu opera com sobrecarga ou com baixa pressão, sua temperatura interna aumenta devido ao incremento da flexão de suas paredes laterais. Além disso, ciclos de trabalho de maiores severidades podem expor os pneus a temperaturas elevadas. Caso as temperaturas de trabalho ultrapassem limites máximos admissíveis, o composto de borracha entra numa fase de reversão, ou seja, diminuição das propriedades obtidas pelo processo de vulcanização. Dentre elas pode-se citar a quebra das ligações cruzadas oriundas do processo de vulcanização, a formação de estruturas secundárias nas cadeias poliméricas devido à quebra das ligações químicas, a diminuição da massa molar e queda da resistência à fadiga (MARK; ERMAN; ROLAND, 2013) fenômeno classificado pela Bridgestone (2007) como a deterioração do pneu.

Wong (2010) conclui que a análise e conhecimento da interação entre o sistema de locomoção de uma máquina e o meio é essencial para estudos de desempenho, qualidade da pista e operação dos veículos.

2.3. O uso do pneu em equipamentos móveis de mineração

As operações unitárias que envolvem a escavação e a movimentação de massas de materiais em minerações são conhecidas como manuseio de materiais. Neste manuseio, o transporte em minas subterrâneas e em minas a céu aberto é feito na maioria das vezes em veículos sobre rodas. Em minas a céu aberto, caminhões são o principal meio utilizado para o transporte de materiais.

Neste contexto, Hartman e Mutmansky (2002) ressaltam que os caminhões de grande porte, também chamados fora-de-via cujo nome é dado a equipamentos que possuem como características sua grande capacidade de carga e dimensões elevadas impedindo sua utilização em estradas de tráfego normal, são uma maneira de agregar eficiência ao processo de mineração.

Uma maneira de transformar os processos de mineração mais eficientes é aumentar o tamanho do equipamento assim, a produtividade é aumentada e o custo decresce por unidade de material produzido. Por exemplo, a escala dos equipamentos de mina a céu aberto aumentou significativamente nas últimas décadas. As razões pelo gigante crescimento da escala dos equipamentos de mina a céu aberto são encontradas nas suas grandes produtividades e baixos custos operacionais. (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002, p.139).

Figura 8 – Equipamentos fora-de-via em operação



Fonte: Fotos do Autor

Além disso, estes equipamentos são especialmente construídos e dimensionados para trabalhos pesados, capazes de suportarem solicitações e severidades variadas. Ricardo e Catalani (2007) enfatizam que estes equipamentos são fabricados com foco em resistência mecânica para utilização em trabalhos pesados de construção e mineração.

Neste contexto Bise (2003, p.241) cita premissas a serem seguidas para determinação da produtividade potencial de um sistema de transporte. “Pelo reconhecimento da geologia e das condições de mina que afetam o lay-out do sistema, parâmetros como a capacidade de carga do veículo, carga a ser transportada por período de tempo e distâncias de transporte podem ser determinadas.”

Percebe-se que a capacidade de carga, aliada à necessidade operacional de transportá-la rapidamente, são variáveis que interferem diretamente na produtividade dos equipamentos. Tais cargas são suportadas pela estrutura das máquinas e, conseqüentemente, pelos pneus sustentando todas as cargas estáticas e cíclicas durante a operação.

Milliken e Milliken (1995) afirmam que alguns tipos de veículos operam com cargas próximas do limite dos pneus. Os fabricantes de pneus utilizados em equipamentos pesados de transporte de cargas, como a Michelin (2012b), define uma expressão numérica para sua capacidade de trabalho chamada de Tonelada Quilômetro por Hora ou de suas iniciais do inglês TKPH. Esta expressão é uma função da carga e da distância percorrida por hora do pneu e é expressa por:

$$TKPH_{Operacional} = Qm \cdot Vm \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (2)$$

Onde:

Qm é a carga média, media em toneladas, aplicada no pneu no período avaliado

Vm é a velocidade média, media em km/h, do pneu no período avaliado

K_1 é o coeficiente de correção para tamanhos de ciclo acima de cinco quilômetros

K_2 é o coeficiente de correção para a temperatura ambiente

Com as variáveis acima descritas pode-se calcular o $TKPH_{Operacional}$ em que o pneu está submetido. Os parâmetros da equação podem sofrer ligeiras variações em suas coletas ou até mesmo nos coeficientes de correção dentre os fabricantes dos pneus, entretanto a equação geral é seguida entre eles. Os fabricantes ainda definem valores limites em função da máxima temperatura de operação interna dos diversos tipos de pneus chamado $TKPH_{Projeto}$. O ideal é

que os pneus operem respeitando a seguinte condição, caso contrário danos materiais e acidentes pessoais, além da redução da vida útil dos pneus podem ser percebidas:

$$TKPH_{projeto} \geq TKPH_{operacional} \quad (3)$$

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica, especificando o tema em estudo. Este trabalho envolve duas áreas específicas que são as falhas estruturais, correlacionadas com a fadiga, que podem ocorrer nos pneus devido às cargas dinâmicas impostas nestes durante sua operação e uma análise estatística, desenvolvida pelo autor, que visa correlacionar os estressamentos determinantes na redução gradual de vida útil deste componente.

Na área de fadiga as obras de Collins (1993), Hetzberg (1996) e Anderson (1994) abordam a fadiga clássica. Collins (1993) ainda dedica um capítulo exclusivamente para o uso da estatística na análise da fadiga. As obras de Dowling (1993), Han (2003), Mark, Erman e Roland (2013) aprofundam o tema fadiga especificamente em pneus. Este último aborda o tema de nucleação de defeitos e crescimento de trinca amplamente. Os trabalhos de Mars e Fatemi (2002), Ro (1989), Govindjee (2001), Previati e Kaliske (2011) utilizam os conceitos de mecânica da fratura de forma a prever a vida por fadiga nestes elastômeros.

Já a obra de Grosch (1988) aborda conceitos e equações que quantificam o trabalho total feito pela estrutura do pneu em todo seu ciclo de trabalho. Na área de aquisição de dados, Lee aborda a importância do conhecimento e a realização da medição para quantificação das cargas dinâmicas e deformações.

3.1. Fadiga

O fenômeno da fadiga é caracterizado pela separação catastrófica de um componente mecânico em duas ou mais partes. Ela é resultante da aplicação de cargas de intensidade ou deformações que variam no tempo. A origem de tais falhas é a formação a nível microscópico e posterior propagação de uma ou mais trincas que se ramificam no material até a ocorrência da falha completa (DOWLING, 1993). Estas trincas aumentam de tamanho até atingirem níveis críticos culminando normalmente numa ruptura abrupta. Além disso, os módulos das cargas e deformações que geram as falhas por fadiga são normalmente bem menores que os módulos das cargas que geram falhas estáticas. Outro ponto importante a ser destacado é que o processo de fadiga dos materiais é cumulativo. “A fadiga pode ser caracterizada como um

fenômeno de falha progressiva que ocorre pelo início e pela propagação de trincas até um tamanho instável.” (COLLINS, 1993, P. 181, tradução nossa).⁷

Hertzberg (1996) complementa que a maioria dos componentes mecânicos precisa resistir a numerosas cargas aplicadas, inclusive com reversões de sentido, durante suas vidas úteis. Neste contexto, pela sua própria natureza de operação, equipamentos móveis de mineração estão quase que constantemente sujeitos a carregamentos dinâmicos. Os pneus destas máquinas, foco deste estudo, estão conseqüentemente sujeitos a números elevados de cargas cíclicas. Portanto é de vital importância avaliar as implicações destes estressamentos, que variam no domínio do tempo nestas máquinas. Estes carregamentos geram tensões cíclicas que, conforme será visto posteriormente, culminam em falhas que possuem correlação com o mecanismo da fadiga.

O problema é que as alterações progressivas nas propriedades dos materiais são de difícil detecção. As falhas oriundas deste fenômeno são cumulativas e resultam normalmente em falhas abruptas e sem sinais prévios visíveis. Outro ponto importante é que um componente, mesmo que deixado inativo por longos períodos de tempo, mantém o dano acumulado em sua estrutura e, retornando à operação, o processo de dano continua a ser acumulado (COLLINS, 1993). O termo fadiga então surgiu após as primeiras observações que as cargas cíclicas geravam uma gradual alteração na capacidade do material em resistir às tensões de trabalho.

As demandas de mercado por componentes com maiores performances, velocidades e temperaturas de operação, além de maiores confiabilidades e vidas úteis, são os desafios enfrentados pelos projetistas. Estas demandas ainda precisam ser equacionadas com as variáveis de custo e tempo de construção. Além da durabilidade, os componentes projetados necessitam ser seguros. Deformações excessivas ou fraturas em componentes automotivos podem causar acidentes sérios (DOWLING, 1993). Para solucionar estas questões, o projeto de componentes mecânicos precisa estar adequado o suficiente para prevenir falhas por fadiga.

Autores definem que as características de fadiga de materiais são raramente deduzidas de suas outras propriedades mecânicas. Elas precisam ser medidas diretamente nos materiais estudados. Além disso, protótipos de tamanho real aplicados em campo são normalmente utilizados para os estudos de vidas úteis. Os resultados coletados ainda podem variar entre os testes elaborados necessitando de análises estatísticas dos dados coletados. Na engenharia,

⁷ “Fatigue may be characterized as a progressive failure phenomenon that proceeds by the initiation and propagation of cracks to an unstable size” (Collins, 1993).

para a realização de estudos de fadiga, o interesse é normalmente nos efeitos dos vários espectros de carregamento e sua associação aos respectivos espectros de tensão, em função da condição operacional da máquina.

As investigações de falhas por fadiga envolvem os domínios de tensão cíclica e deformação cíclica que culminam em mecanismos de falhas distintos. No domínio do carregamento cíclico ocorrem deformações plásticas em cada ciclo de carregamento. Este domínio é caracterizado por altas cargas e vidas úteis ou números de ciclos pequenos para produzir as falhas. A este fenômeno é dado o nome de fadiga de baixo ciclo onde o número de ciclos é associado entre 10^4 e 10^5 ciclos para culminar em falhas. O outro domínio é aquele em que os ciclos de carregamentos, normalmente maiores que 10^4 ou 10^5 ciclos para culminar em falhas, são associados a cargas menores. Neste caso a maioria dos ciclos ocorre dentro do regime elástico de deformação do material, culminando em maiores vidas úteis. Às falhas ocorridas em componentes que operaram neste regime é dado o nome de fadiga de alto ciclo (COLLINS, 1993).

Dowling (1993) detalha as fontes dos carregamentos cíclicos em quatro categorias distintas dependendo de sua fonte, são elas:

- a) Cargas estáticas, caracterizadas pela por estarem continuamente presentes e não variarem ao longo do tempo;
- b) Cargas de trabalho, que variam ao longo do tempo em função da operação dos componentes;
- c) Cargas vibratórias, relativamente de alta frequência e são resultantes do ambiente de trabalho ou de efeitos secundários de funcionamento dos componentes como a turbulência ou o atrito;
- d) Cargas acidentais, que são eventos considerados raros que não ocorrem em circunstancias normais de operação.

Os carregamentos e os efeitos combinados das cargas de trabalho e cargas vibracionais são normalmente os causadores da fadiga. Entretanto, se os danos causados pelas cargas estáticas forem mais severos que os das cargas cíclicas, estes também devem ser considerados nas análises. Finalmente, as cargas acidentais, caso não ocorram de forma extraordinária, também podem ser causadoras da fadiga ou danos aos componentes sujeitos a estes carregamentos.

3.2. Danos pré-existent e defeitos em elastômeros

Grande parte das falhas ocorridas em componentes mecânicos tem início em locais onde existe concentração de tensões geradas pela geometria ou descontinuidades microestruturais existentes nestes componentes. “Na aplicação da filosofia de controle de fratura, a premissa básica feita é que descontinuidades existem mesmo em estruturas novas e que estas podem ser indetectáveis.” (COLLINS, 1993, P. 307, tradução nossa).⁸

É reconhecido que os elastômeros, grupo de polímeros modificados pelo homem para o desenvolvimento de materiais de engenharia, como a grande maioria dos materiais sólidos possuem falhas pré-existent que geram zonas de concentração de tensões, exercendo influência nas falhas que ocorrem nestes materiais. Estes efeitos intrínsecos na borracha levaram autores a caracterizá-los. A resistência da borracha é influenciada por defeitos da ordem entre 5 e 70 microns (MARK; ERMAN; ROLAND, 2013).

As trincas de fadiga nucleiam-se em regiões de heterogeneidades ou onde preexistem inclusões e porosidades microestruturais no material. Originalmente, os materiais contêm defeitos microestruturais ou os mesmos são introduzidos durante seu processo de fabricação. Estas falhas ainda podem ser geradas durante os processos de deformação cíclica do material. Como é de se esperar, a eliminação destas falhas preexistentes pode aumentar substancialmente a vida útil de componentes sujeitos à fadiga.

Vários modelos de dislocação são propostos pelos autores com o intuito de explicar o mecanismo de nucleação de trincas de fadiga. Entretanto há um consenso entre a maioria dos autores que o estágio inicial do dano cíclico está associado com os escorregamentos homogêneos e com rápidas deformações de porções do material (HERTZEBERG, 1996).

Por fim, Previati e Kaliske (2011) lembram que outros fatos importantes devem ser considerados no processo de fabricação de componentes mecânicos, em especial os pneus. Durante a construção dos pneus, a interface entre as lonas e a borracha pode sofrer cavitações. Este defeito pode crescer com a aplicação de cargas cíclicas neste componente.

⁸ “In the application of fracture control philosophy, the basic assumption is made that flaws do exist even in new structures and that they may go undetected.” (COLLINS, 1993).

3.2.1. Fadiga em Compósitos de Borracha

Mark, Erman e Roland (2013) destacam em seu trabalho que, sob fadiga, em todo tempo que uma carga cíclica é aplicada, a energia de deformação G , contribui para o crescimento de trincas ou descontinuidades nos elastômeros que compõem os pneus. A equação 4 representa tal princípio, onde G_c é a energia na ponta da trinca requerida para fraturar uma unidade de volume de borracha:

$$2k.l.U \geq G_c \quad (4)$$

onde:

G_c = quantidade de energia por área requerida para rompimento do material

U = energia de deformação acumulada por unidade de volume do material

k = constante numérica que depende da deformação aplicada

l = comprimento da trinca

Nota-se que não é explicitamente evidenciada na equação acima a tensão aplicada. A mesma está implícita na energia de deformação acumulada, ou seja:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (5)$$

Onde E é o módulo de Young do material

O crescimento da trinca de fadiga é regido então pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta l}{l^\alpha} = (2kU)^\alpha B. \Delta n \quad (6)$$

Onde:

n = número de vezes em que o material é imposto a deformação

$B = 1$ Angstrom (1×10^{-10} m) por carga aplicada

α = constante que varia de acordo com o tipo de elastômero

Conclui-se que o comprimento da trinca após N ciclos de fadiga, onde l_0 é o comprimento inicial da trinca será:

$$l_0^{(1-\alpha)} - l^{(1-\alpha)} = (2kU)^\alpha B \cdot N \quad (7)$$

Além dos conceitos acima apresentados, Han (2003) destaca em sua obra uma importante constatação: as falhas que se iniciam numa região vulnerável dos pneus, a região de interface entre as lonas de trabalho. A este fenômeno é dado o nome de separação ou deslocamento entre os elementos constituintes do pneu. Os conceitos de energia de deformação podem ser aplicados nestes elastômeros de forma a modelar o crescimento de trincas de fadiga nesta região, culminando no deslocamento entre as lonas do pneu durante sua operação.

A durabilidade de um pneu à fadiga pode ser caracterizada pelo surgimento e posterior propagação de falhas no perímetro de interface das lonas, normalmente compostas de aço, na região do ombro do pneu. A propagação da falha leva a separação ou deslocamento desta porção anteriormente íntegra, mas posteriormente deslocada da carcaça do pneu. Alguns autores também classificam este mecanismo como clivagem que é a falha nos constituintes de borracha ou falha adesiva entre a borracha e as lonas que compõem o pneu.

O principal motivo destas falhas é o surgimento de trincas originadas em regiões de concentração de tensão, devido a descontinuidades nos materiais, além das grandes deformações que ocorrem no pneu durante sua operação. A Figura 10 ilustra o efeito externo de um pneu cujas lonas foram deslocadas de sua carcaça.

Figura 10- Separação mecânica entre as lonas do pneu



Fonte: MICHELIN, [2015]

Complementarmente, Mars e Fatemi (2004) em sua obra destacam vários fatores que contribuem para o surgimento da fadiga em compósitos de borracha. Dentre eles pode-se elencar:

- a) O histórico de aplicação de cargas no elemento, suas variáveis como frequência de aplicação e carga máxima aplicada.
- b) Como consequência de altas deformações e frequências de aplicação de carga, a taxa de calor gerado pela histerese mecânica é maior que a taxa de troca de calor com o ambiente, causando seu aquecimento. Condições do ambiente como, por exemplo, a temperatura de operação também devem ser observadas. Destaca-se que elevadas temperaturas tem efeito danoso à borracha, como já explicado anteriormente, propiciando a nucleação de trincas além de acelerar a taxa de crescimento das mesmas.

As contínuas flexões nas paredes laterais do pneu, que podem ser observadas pela curvatura da região em contato com o solo durante sua operação, e posteriores relaxamentos são os maiores geradores de calor neste componente. Consequentemente, as paredes laterais são as regiões mais quentes de um pneu em operação. Além das falhas de separação das lonas que compõem a carcaça do pneu outros modos de falha também podem ser observados em caso de sobrecargas. Neste regime as paredes laterais deste componente sofrem sobre flexões enquanto suas temperaturas de trabalho também se elevam, culminando em falhas nesta região do pneu. O efeito mais comum de tais falhas é a separação entre a borracha e a carcaça nas paredes laterais do pneu. Esta separação normalmente inicia-se na região da borda de retorno da carcaça, mas pode também ocorrer mais próximo ao talão, dependendo das características de fabricação de cada modelo de pneu. A figura 11 ilustra uma separação próximo à região da borda de retorno da carcaça do pneu, gerando uma protuberância na parede lateral deste.

Figura 11- Separação entre a borracha e carcaça na parede lateral de um pneu



Fonte: Fotos do Autor

A figura 12 ilustra um pneu com trincas que se propagaram na parede lateral além de erosões na região de assentamento do talão com o flange da roda. Tais erosões são características de sobre flexão da parede lateral do pneu sobre a roda. Todos estes modos de falha estão associados à redução na durabilidade da estrutura de pneus (ARCHIBALD; BROWN; WOEHRLE, 2010).

Figura 12- Trincas na parede lateral e erosões na região de assentamento do talão



Fonte: Fotos do Autor

A Bridgestone (2007) recomenda que pneus que apresentarem alguma das falhas previamente descritas devem ser retirados de operação e serem sucateados.

3.2.2. Resistência à fratura

A magnitude da tensão normal aplicada em um determinado material, culminando em sua fratura, está relacionada com o tamanho das descontinuidades ou trincas pré-existentes em sua estrutura. Testes feitos em laboratório apontam que estas descontinuidades avançam de tamanho lentamente até que, em determinado momento, apresentam uma taxa de crescimento rápido culminando na falha do material. A propriedade intrínseca que cada material possui nesta alteração abrupta de propagação da trinca é dada o nome de Resistência a Fratura e é utilizada como critério de projeto para prevenção de falhas durante a fase de desenvolvimento de produtos. Em condições operacionais sobre aplicação de cargas flutuantes no tempo ou em ambientes agressivos, a análise do crescimento lento das trincas pode ser de interesse na determinação da vida útil de componentes. Além disso, são fatores que contribuem para o surgimento falhas inesperadas (COLLINS, 1993).

O comportamento do avanço das descontinuidades é normalmente de grande interesse, especialmente nos materiais sujeitos a flutuações de cargas. Entendendo a taxa de crescimento de certa descontinuidade no material, correlacionando-a com o um tamanho crítico para que a falha ocorra, é possível determinar a vida útil de componentes mecânicos submetidos a estas cargas cíclicas.

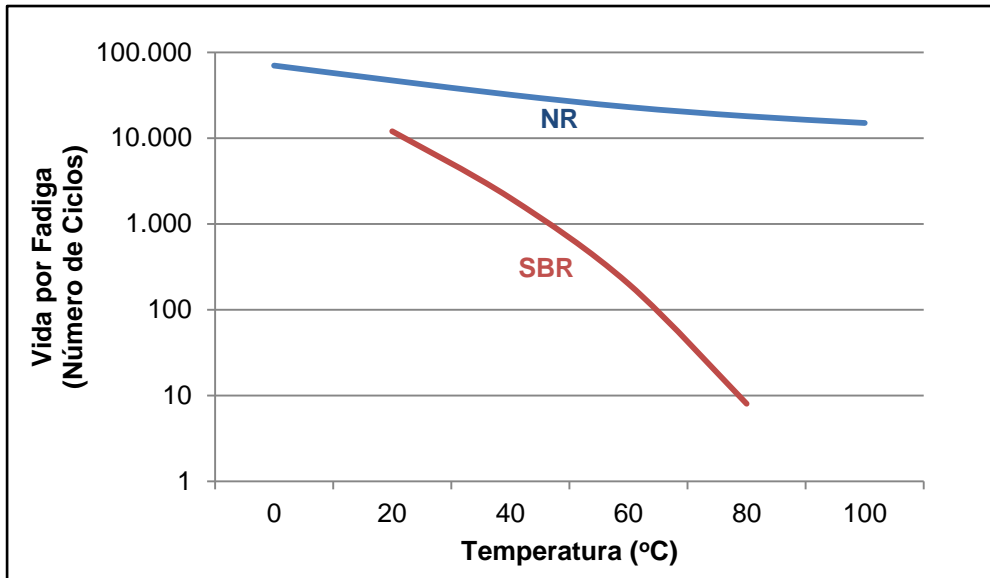
Enquanto materiais de estrutura cristalina sólida como os metais apresentam, sob altas tensões pequenas deformações, na ordem de 0,5% de seu comprimento inicial, outros materiais não cristalinos como os elastômeros apresentam deformações que podem ultrapassar 100% do seu comprimento original. Este fenômeno se deve ao fato de que os elastômeros, conceito dado aos materiais como a borracha, possuem uma cadeia interatômica molecular longa proporcionando estas grandes recuperações dimensionais (COLLINS, 1993).

Outra variável que merece destaque na resistência a fratura de componentes mecânicos é a temperatura. Collins (1993) destaca que a temperatura de operação pode influenciar na resistência a fadiga do material.

Previati e Kaliske (2011) em sua obra destacam que o histórico da exposição dos elastômeros à temperatura durante o trabalho pode aumentar significativamente seu módulo de elasticidade além de alterar suas propriedades viscoelásticas. Govindjee (2001) retifica que a degradação permanente da borracha do pneu é normalmente associada a sua exposição às altas temperaturas de trabalho. Enfatiza ainda que esta exposição é percebida fisicamente como a quebra das ligações cruzadas além da separação dos compostos constituintes da borracha. Outra alteração que pode ser percebida é a diminuição da resistência mecânica da

borracha. O gráfico da Figura 13 ilustra que a vida por fadiga da borracha é drasticamente reduzida com a exposição à temperatura.

Figura 13- Vida por fadiga versus temperatura para borrachas tracionadas a 175% do comprimento original



Fonte: Adaptado de MARK; ERMAN; ROLAND, 2013, p. 487

A Michelin (2012a) esclarece que a temperatura do pneu aumenta, pois durante o trabalho, suas paredes laterais são continuamente flexionadas gerando calor. Caso a demanda de trabalho do pneu contribua para que seja ultrapassada sua temperatura ótima de trabalho, ocorre a degradação irreversível de seus componentes, culminando na separação das partes constituintes do pneu. O termo separação é utilizado para conceituar o descolamento de partes como a banda de rodagem da carcaça do pneu.

3.3. Teoria do dano cumulativo e previsão de vida

As teorias de danos cumulativos propostas por Palmgren e Miner, também conhecidas como teoria do dano linear, são utilizadas para cargas cíclicas de amplitude constante. Estas curvas são denominadas S-N, respectivamente as iniciais dos termos tensão, do inglês stress e do número de ciclos para a falha. São plotadas curvas de forma a identificar graficamente a vida de componentes sujeitos a cargas repetitivas. Estas curvas são normalmente plotadas com os dados da vida na escala logarítmica (COLLINS, 1993).

Hertzberg (1996) lembra que uma das mais antigas investigações sobre os efeitos da fadiga na vida de componentes foi desenvolvida por Wohler em rotores de vagões ferroviários que sofriam falhas relacionadas a cargas cíclicas.

Normalmente, as tensões incidentes em muitos dos componentes mecânicos, variam de amplitude ao longo do tempo. Com isso, as utilizações das curvas S-N padronizadas tornam-se obsoletas para estas condições, já que as mesmas são concebidas para espectros de cargas de amplitudes constantes.

Com isso, outras teorias de dano cumulativo foram então desenvolvidas para quantificação da fadiga em componentes mecânicos sujeitos a aplicação de cargas não-lineares. As investigações dos diversos autores a respeito consideram que qualquer amplitude de carga cíclica incidente sobre o componente estudado sempre contribuirá para a geração do processo de fadiga. Também é convencionado que, para uma operação em diferentes amplitudes de carregamento, o dano gerado por estas cargas cíclicas é permanente e que cada um dos carregamentos individuais que geram tais danos conseqüentemente compõem, de forma incremental, o dano total acumulado da estrutura no período de tempo observado (COLLINS, 1993).

Existe um consenso entre vários autores nesta área de que o processo de fadiga ocorre em três fases distintas. A primeira fase deste processo é o de nucleação da trinca, seguido do processo de propagação da trinca até a mesma atingir um comprimento crítico. Após esta fase inicia-se o terceiro estágio que é o de crescimento rápido e instável da trinca até a fratura do material. Devido à complexidade do componente pneu estudado neste trabalho, não se pretende detalhar cada um dos estágios da fadiga neste, mas entender a ocorrência do mecanismo, sua evolução e as variáveis operacionais contribuintes para a geração deste fenômeno.

É considerado neste estudo que as descontinuidades são fruto de cargas cíclicas ou por falhas na estrutura do pneu, antes ou após sua entrada em operação, conforme detalhamento subsequente. Estas descontinuidades aumentam de tamanho devido às aplicações de cargas cíclicas no pneu até chegarem a tamanhos críticos e, por conseguinte, atingem o colapso daquela região da estrutura.

Neste contexto Collins (1993) ressalta que o tempo em que a descontinuidade leva para crescer a tamanhos críticos é normalmente uma grande porção da vida útil da estrutura. Entretanto Hertzberg (1996) ratifica que a vida de componentes sujeitos à fadiga é drasticamente reduzida pela presença de descontinuidades se comparados a componentes similares íntegros.

Além das cargas cíclicas, cargas e deslocamentos rápidos e de altas intensidades também incidem nos pneus. Estes tipos de carregamentos são chamados de cargas de choque e de impacto, oriundos de aplicações súbitas de forças devido aos movimentos das máquinas durante sua operação. O estado de tensão provocado pelas cargas de choque e impacto merece atenção quando o tema é pneus de equipamentos de mina. Nesta aplicação em específico as propriedades dos materiais aplicados podem sofrer a influencia destas rápidas aplicações de cargas e suas consequentes deformações geradas, se comparadas com as aplicações quase estáticas de carregamento. Collins (1993) ratifica que a maioria dos materiais apresenta um substancial aumento em sua tensão de ruptura quando submetidos a carregamentos com altas taxas de velocidade de aplicação de forças.

Outro ponto que merece atenção é que uma variedade de fatores podem influenciar as amostras de materiais que compõem as curvas S-N como a tensão média aplicada, a temperatura de trabalho, tensões residuais e geometrias dos membros que compõem o componente (DOWLING, 1993).

Dowling (1993) destaca ainda a importância em se analisar a deformação plástica em componentes de máquinas devido a dois motivos:

- a) Existem situações em que é necessário conhecer a carga necessária para a geração de deformação plástica no material, também conhecido como colapso plástico. O fator de segurança para cobrir falhas por sobrecargas acidentais pode ser calculado comparando-se a intensidade do carregamento gerador da falha com a intensidade das cargas usuais de trabalho do componente;
- b) As tensões e deformações geradoras de deformações plásticas em regiões localizadas do componente podem ser de interesse. Deformações plásticas localizadas causadas por carregamento cíclicos são de importância considerável e normalmente associadas com trincas de fadiga.

Por fim, Anderson (2004) estabelece duas abordagens para a análise de fraturas mecânicas são seguidas pelos diversos autores nesta área: o critério da energia e a abordagem da intensidade de tensão.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os atuais equipamentos de mineração são dotados de inúmeros sistemas de monitoramento e controle compostos por sensores, atuadores e computadores que gerenciam o funcionamento dos vários subsistemas que compõem tais máquinas. Como exemplo, pode-se citar que os avanços no desenvolvimento de sistemas eletrônicos cada vez mais sofisticados têm levado até mesmo a operação e controle de equipamentos de mineração de forma autônoma.

Atualmente através destes sistemas de monitoramento e controle embarcados, os equipamentos são totalmente conectados a sistemas de controle de mina e de telemetria que possibilitam seu gerenciamento buscando-se a máxima produtividade destes ativos. O motivo da utilização de tecnologias é a geração de valor para as operações de mineração (MACMILLAN, 1994).

Os parâmetros utilizados neste estudo são monitorados através de sistemas OEM ou sistemas já embarcados nas máquinas, sem a necessidade de instalação de instrumentação adicional, reduzindo custos, não interferindo no fluxo operacional ou no processo produtivo. Alguns destes dados são calculados e monitorados pelo Sistema de Despacho Eletrônico. Os demais dados, monitorados por sistemas OEM e embarcados, são transmitidos em tempo real pelo sistema de telemetria para servidores fixos. Através do uso de computadores interligados por uma rede no escritório é possível extrair e filtrar todos os dados para qualquer período ou equipamento que se tenha interesse em estudar.

O diferencial ora apresentado é a possibilidade de coleta e cruzamento de dados reais monitorados, durante a operação normal das máquinas, suprimindo a necessidade de construção de modelos físicos ou criação de protótipos para condução de simulações.

4.1. Sistema de monitoramento de pressão e temperatura dos pneus

A utilização de sistemas de monitoramento da temperatura e da pressão de inflagem de pneus tem sido comum nos equipamentos de mineração sobre rodas. Os principais motivos da utilização destes tipos de sistemas é a busca pelo aumento da vida útil dos pneus, garantindo a operação destes dentro dos parâmetros recomendados de pressão e temperatura de trabalho, além do aumento da segurança das pessoas próximas a estes vasos de pressão. Variações de pressão são muito comuns em pneus de caminhões devido aos inúmeros ciclos de trabalho em

diferentes velocidades de transporte com o veículo carregado e descarregado (BRADLEY, 2009). Lampert (2015) ainda enumera os benefícios da utilização de sistemas de monitoramento de temperatura e pressão de enchimento de pneus:

- a) Perdas de pneus provocadas por repentinas quedas de pressão ou aumento de temperatura podem ser eliminadas;
- b) Alarmes podem ser criados para alertar sempre que os pneus estiverem operando com pressões de enchimento ou temperatura de trabalho fora dos limites recomendados;
- c) A manutenção da pressão de enchimento recomendada para as diversas temperaturas de trabalho de pneu aumenta sua vida útil;
- d) Eliminação da necessidade da conferência manual da pressão de enchimento do pneu, aumentando a produtividade e a segurança operacional.

Neste trabalho serão usados os dados de pressão e temperatura do fluido de enchimento, neste caso o nitrogênio, durante a operação de pneus já monitorados por um sistema fabricado e comercializado pelo fornecedor Michelin. Os sensores de pressão e temperatura são instalados na parte interna dos pneus, na área descrita como região do talão, como pode ser observado na Figura 14.

Estes sensores são configurados para transmitir um dado de pressão e temperatura por minuto (MICHELIN, 2011). Os dados monitorados por tais sensores são então coletados por antenas receptoras e armazenados em um módulo de controle eletrônico embarcado no próprio equipamento.

Figura 14- Sensor de monitoramento de pressão e temperatura interna instalado no interior de um pneu



Fonte: Fotos do Autor

Os dados de pressão e temperatura de trabalho são também enviados, em tempo real, através de um sistema de telemetria para uma central de controle no escritório. Além disso, o sistema possui ainda uma lógica programável que envia alarmes, caso a temperatura ou a pressão interna de enchimento do pneu atinjam valores fora dos limites de trabalho recomendados, também através do sistema de telemetria.

A Michelin (2012a) explica que o sistema de monitoramento de pressão e temperatura dos pneus é configurado para monitorar a operação destes dentro de uma faixa ideal, chamada de zona verde. Se a pressão do pneu ultrapassar os limites superiores ou inferiores configurados da zona verde, ela chegará uma zona de alarme amarelo. Se a pressão ultrapassar a zona amarela e limites previamente configurados sejam atingidos, ela chegará numa zona de alarme vermelho.

Alarmes serão gerados automaticamente pelo sistema alertando tais situações, registrando todos os dados, inclusive a duração de cada evento. Além das zonas de pressão, também há zonas de temperatura anormal.

[O alarme amarelo de temperatura anormal] trata-se de uma advertência prévia que concede tempo para que se tomem as medidas necessárias para conduzir o pneu de volta à zona verde. Uma operação prolongada do pneu na zona amarela pode reduzir sua vida útil. [Para o alarme vermelho de temperatura anormal] é necessário tomar uma medida imediata para remediar a situação e evitar danos permanentes ao pneu. (MICHELIN, 2011, p.5).

A Tabela 4 aborda os parâmetros configurados para cada nível de alarme do sistema de monitoramento de pressão e temperatura de pneus.

Tabela 4 – Alarmes configurados no sistema de monitoramento de pressão e temperatura de pneus

Alarme	Condição para geração do alarme
Alta temperatura vermelho	Temperatura do fluido interno do pneu maior ou igual a 80°C
Alta temperatura amarelo	Temperatura do fluido interno do pneu maior ou igual a 75°C e menor que 80°C
Baixa pressão vermelho	Pressão de inflagem do pneu menor ou igual a 105psi
Baixa pressão amarelo	Pressão de inflagem do pneu 10% abaixo da recomendada para a temperatura atual do fluido de enchimento

Alta pressão amarelo	Pressão de inflagem do pneu 10% acima da recomendada para a temperatura atual do fluido de enchimento
Alta pressão vermelho	Pressão de inflagem do pneu maior ou igual a 143psi ou 15% acima da recomendada para a temperatura atual do fluido de enchimento

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados extraídos do SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO E TEMPERATURA DE PNEUS, 2015

Todos os alarmes são armazenados em um banco de dados e são acessíveis para qualquer computador interligado em rede. Uma equipe na central de controle, de posse dos dados, pode tomar as ações necessárias para cada anormalidade encontrada.

4.2. Sistema de Controle de Análise de Pista

Duas das funções básicas de um pneu são suportar as cargas de trabalho e absorver os impactos sobre as irregularidades presentes na pista de rolamento. Uma gama de desafios em várias aplicações, dentre elas a mineração, demandam a locomoção de veículos especializados sobre rodas em terrenos de severidades variadas. O desempenho operacional dos veículos sobre rodas depende da maneira como este se interage nos mais diversos tipos de terrenos (WONG, 2001).

Neste contexto, com os avanços previamente citados na eletrônica embarcada dos equipamentos, os desenvolvimentos nas áreas de projeto e de manufatura proporcionados por fabricantes como a Caterpillar (2002) tornaram os equipamentos de mineração, mais precisamente os caminhões fora-de-terra, capazes de detectar condições ou solicitações danosas que afetam a produtividade e impactam no custo operacional de tais máquinas. Estas condições podem afetar a vida útil da estrutura destes caminhões acarretando ainda danos nos pneus, rodas e seus demais componentes.

O sistema desenvolvido por este fabricante denominado Controle de Análise de Pista possibilita o gerenciamento das condições da pista, retornando alarmes para o operador do equipamento, quantificando a severidade operacional além de proporcionar informações para os pontos das pistas que precisam de correções. Através de dados mensurados de forma objetiva é possível alertar ao operador e também a equipe da mina sobre as condições que causam altas tensões nos pneus, rodas, suspensões e estrutura da máquina. Com uma tecnologia integrada ao computador de bordo da máquina que mede as cargas dinâmicas e os

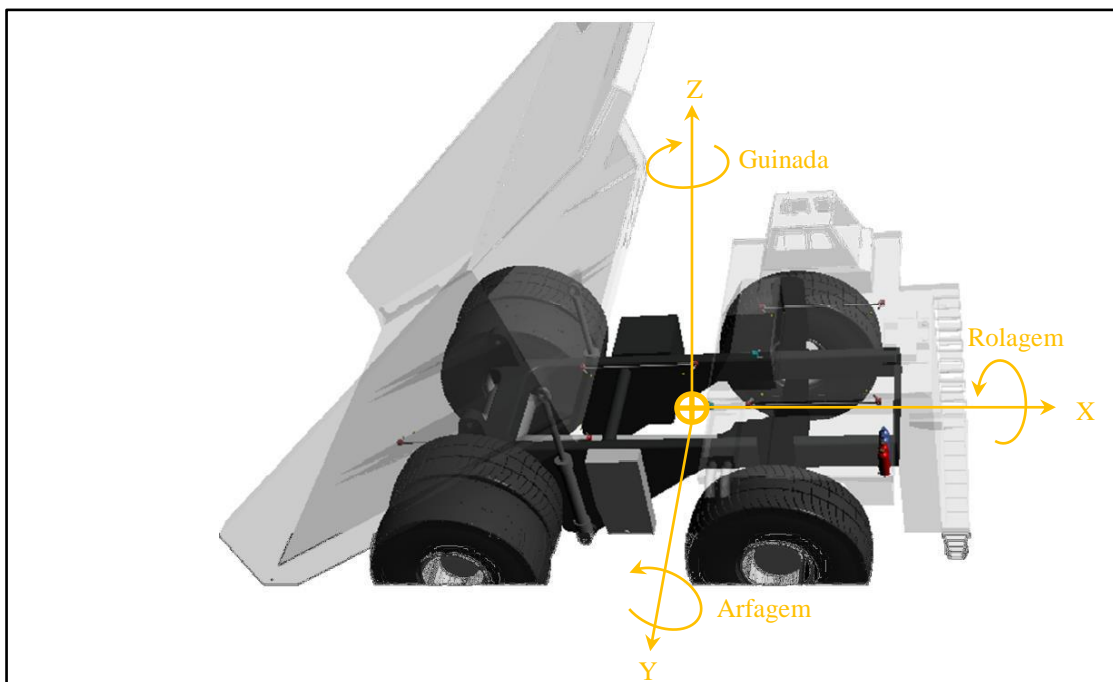
impactos provenientes do contato com a pista durante a operação do equipamento, o sistema é capaz de comunicar em tempo real para o operador e também para a equipe de monitoramento no escritório, via sistema de telemetria, os alarmes de esforços operacionais acima de parâmetros previamente estabelecidos. Estes alarmes também são armazenados em banco de dados para futuras consultas.

No caso específico de pneus, a Caterpillar (2012) afirma que os alarmes indicam que a vida útil esperada dos pneus será reduzida devido às causas abaixo qualificadas como abuso da máquina:

O caminhão pode estar sendo guiado com velocidades incompatíveis com o percurso, sendo sobrecarregado ou sendo conduzido em pistas com buracos. Falhas prematuras nos pneus podem indicar que estes abusos operacionais estão ocorrendo. As falhas nos pneus podem ser deslocamento nas paredes laterais ou entre suas lonas. (CATERPILLAR, 2012, p. 4).

Através dos mesmos pressostatos utilizados nos cilindros hidropneumáticos das quatro suspensões, também utilizados para medição da carga útil transportada pelo caminhão, os sensores medem os movimentos de tendência de rotação de arfagem (do inglês *pitch*) sobre o eixo *Y*, de rolagem (do inglês *roll* ou *bias*) sobre o eixo *X* e de guinada (do inglês *yaw* ou *rack*) sobre o eixo *Z* impostos ao veículo. Estes movimentos são ilustrados na Figura 15.

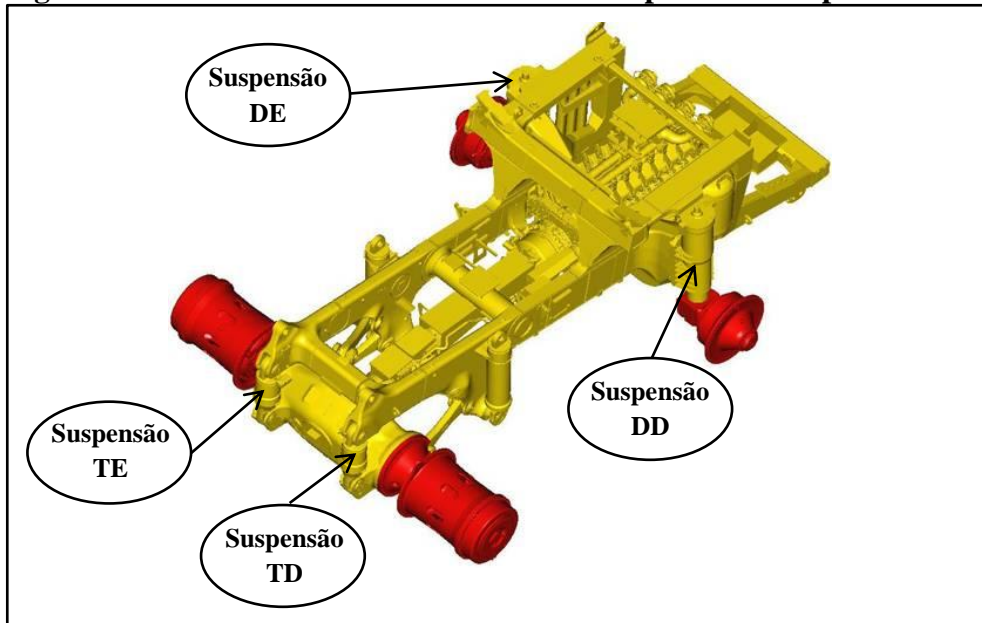
Figura 15- Sistema de eixos para movimentos de arfagem, rolagem e guinada



Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2014, p.30

As pressões das suspensões hidropneumáticas são coletadas 10 vezes por segundo enquanto cálculos são feitos para avaliar as sobrecargas dinâmicas que determinam os esforços geradores dos momentos de rolagem, arfagem e guinada na estrutura do caminhão. O esquema da Figura 16 ilustra os cilindros hidropneumáticos e suas respectivas descrições.

Figura 16- Posicionamento dos cilindros de suspensão hidropneumáticos



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.1. Movimento de arfagem

Carvalho (2014) informa que o movimento de arfagem (do inglês *Pitch*) pode ser exemplificado quando o veículo passa sobre um obstáculo como uma lombada. Quando os pneus dianteiros sobem a lombada, a parte dianteira do veículo é inclinada verticalmente para cima enquanto a suspensão traseira é comprimida. Na descida da lombada, a dianteira do veículo inclina-se para baixo e a suspensão dianteira é comprimida. A Caterpillar (2012) complementa com outras situações operacionais, listadas a seguir, para a geração do movimento de arfagem:

- a) Frenagens bruscas;
- b) Esterçamento brusco da direção;
- c) Veículo conduzido sobre buracos;
- d) Veículo subindo ou descendo carregado;
- e) Posicionamento da carga descentralizada longitudinalmente conforme Figura 17.

Figura 17- Exemplo de posicionamentos de carga no caminhão que influenciam no movimento de arfagem



Fonte: CATERPILLAR, 2013, p.109

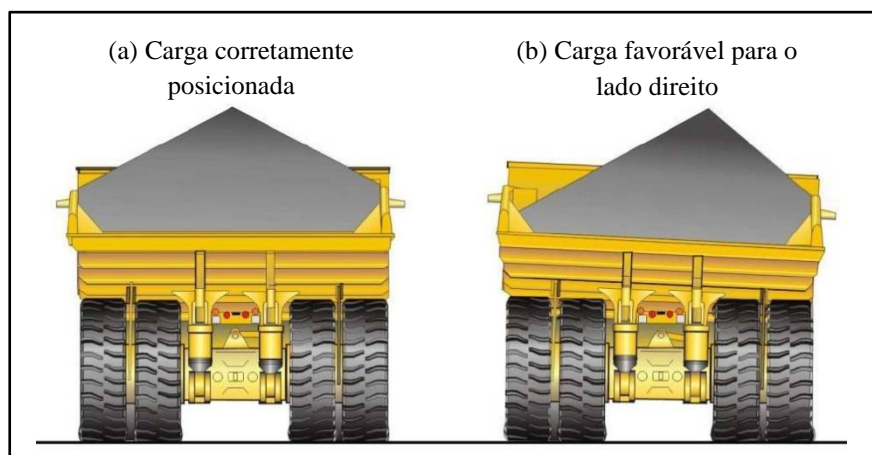
Os alarmes são gerados pela análise da diferença de pressão de calibração das suspensões hidropneumáticas de acordo com a seguinte equação:

$$Pitch = (P_{suspensão\ DE} + P_{suspensão\ DD}) - (P_{suspensão\ TE} + P_{suspensão\ TD}) \geq 23994kPa \quad (8)$$

4.2.2. Movimento de rolagem

O movimento de rolagem é gerado, conforme a Caterpillar (2012), por forças que atuam lateralmente no caminhão. Superelevações nas pistas também podem gerar este tipo de movimento. Outro motivo do movimento de rolagem pode ser a carregamento descentralizado transversalmente no veículo conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18- Exemplo de condição de posicionamento de carga no caminhão que influencia no movimento de rolagem



Fonte: CATERPILLAR, 2013, p.111

Os alarmes são gerados pela análise da diferença de pressão de calibração das suspensões hidropneumáticas de acordo com a seguinte equação:

$$Bias = (P_{suspensão\ DE} + P_{suspensão\ TE}) - (P_{suspensão\ DD} + P_{suspensão\ TD}) \geq 23994kPa \quad (9)$$

4.2.3. Movimento de guinada

O movimento de guinada ocorre quando a estrutura do caminhão é torcida devido a cargas dinâmicas. Esta condição ocorre quando o mesmo está sendo locomovido carregado e desloca-se sobre um buraco devido à falta de manutenção da pista. Outro exemplo é quando o caminhão encontra-se estacionado carregado com o pneu dianteiro direito numa depressão e os traseiros esquerdos numa protuberância na pista (CATERPILLAR, 2012).

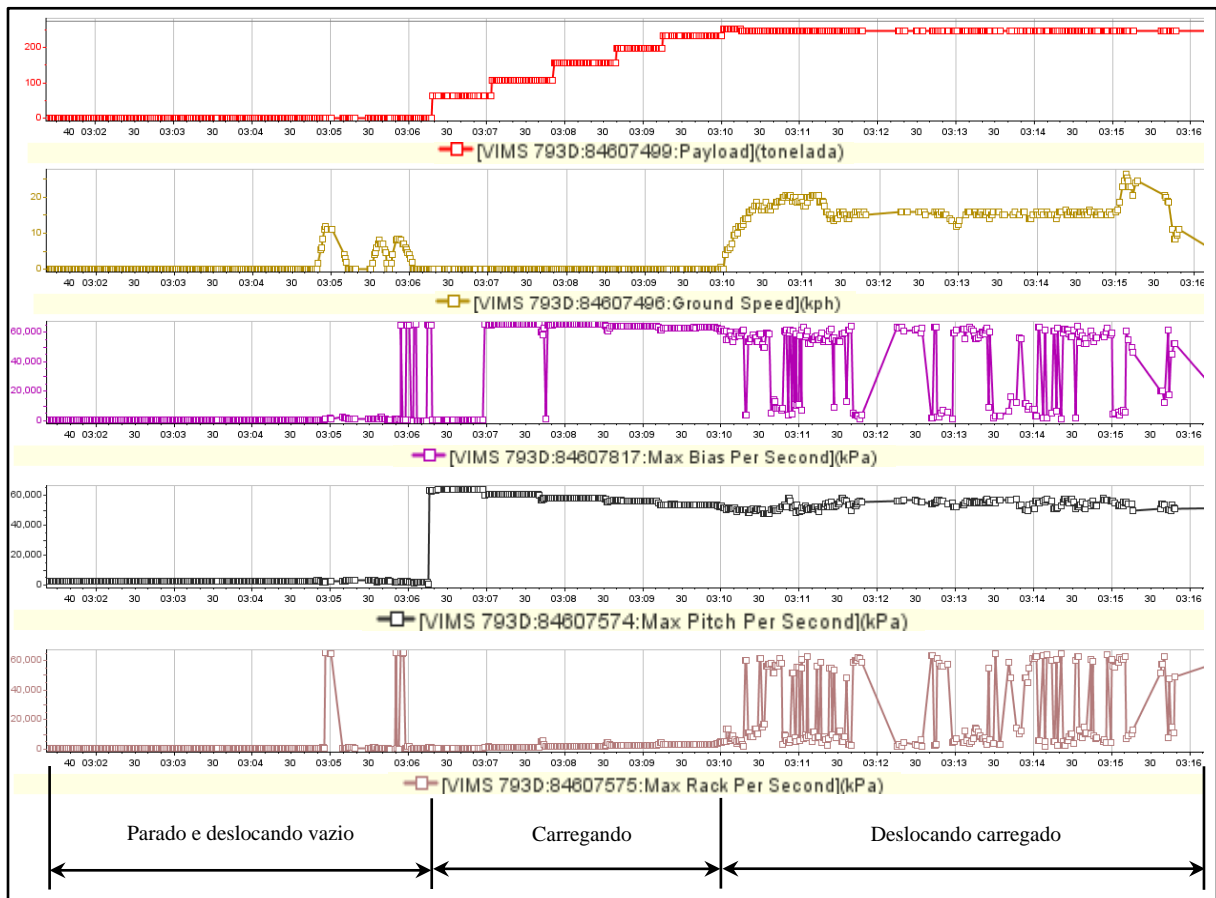
Os alarmes são gerados pela análise da diferença de pressão de calibração das suspensões hidropneumáticas de acordo com a seguinte equação:

$$Rack = (P_{suspensão\ DE} + P_{suspensão\ TD}) - (P_{suspensão\ DD} + P_{suspensão\ TE}) \geq 23994kPa \quad (10)$$

Através do sistema de telemetria, tais variáveis podem ser acompanhadas e seus respectivos alarmes arquivados. A Figura 19 ilustra uma sessão de monitoramento em tempo real dos movimentos de rolagem, arfagem e guinada de um caminhão fora-de-via modelo 793D . O monitoramento foi elaborado para ilustrar o comportamento dos momentos durante o traslado do caminhão vazio, parado durante seu carregamento além do seu deslocamento carregado com uma carga útil de 247,1 toneladas métricas. Observa-se que, durante o carregamento, há uma diferença alta entre as pressões das suspensões do lado esquerdo em comparação das suspensões do lado direito do veículo, caracterizando-se um posicionamento de carga descentralizada transversalmente, favorecendo o movimento de rolagem. Através dos dados do movimento de arfagem, também é possível perceber o posicionamento da carga de forma descentralizada longitudinalmente no equipamento.

Conseqüentemente, nota-se ainda que, durante o deslocamento do veículo carregado, vários picos de solicitações referentes ao movimento de guinada ocorrem, muito provavelmente devido às condições da via, mas ampliados devido à descentralização da carga no veículo.

Figura 19- Monitoramento em tempo real das variáveis de carga, velocidade de solo, rolagem, arfagem e guinada de um caminhão fora-de-via



Fonte: SISTEMA DE TELEMETRIA, 2015

Os alarmes de *pitch*, *bias* e *rack* são representados neste trabalho respectivamente pelas siglas γ , φ e η .

4.3. Sistema de controle de carga útil

O sistema de controle de carga útil proporciona um maior controle do caminhão fora-de-via e da máquina de carga a fim de aumentar a produtividade dos mesmos, alertando quando ocorrem sobrecargas que possam reduzir a vida útil dos componentes que compõem tais máquinas, dentre eles os pneus, que podem também afetar a segurança do operador (CATERPILLAR, 2012).

Interligado ao computador de bordo da máquina este sistema registra e administra as cargas transportadas informando ao operador e à equipe de escritório, através dos sistemas de despacho eletrônico e do sistema de telemetria, o valor das cargas transportadas. Com base no

peso alvo da carga útil e nas configurações de sobrecarga, o sistema também registra e avisa ao operador, através de um painel instalado na cabine de comando quando o caminhão atinge uma sobrecarga. Este evento ocorre somente se confirmada a sobrecarga após a repesagem da carga transportada quando o veículo troca de primeira para segunda marcha.

O princípio de funcionamento deste sistema baseia-se no monitoramento da pressão de cada um dos quatro cilindros hidropneumáticos das suspensões do caminhão. Pressostatos instalados nestes cilindros, conforme Figura 20, monitoram e convertem os dados de pressão em carga transportada pelo caminhão.

Figura 20- Sensor de pressão instalado na suspensão do equipamento



Fonte: Fotos do Autor

Os dados são então enviados para o computador de bordo da máquina que converte e disponibiliza os mesmos para o painel de controle na cabine de operação e para os sistemas de despacho eletrônico e de telemetria. Estes sistemas armazenam todo o histórico em um banco de dados para futuras consultas no escritório.

De acordo com a Caterpillar (2013) este sistema gera alarmes de sobrecarga, do inglês *payload overload*, de abuso de sobrecarga do inglês *payload overload abuse* e de sobrecarga crítica do inglês *payload overload dump*.

4.4. Sistemas de Telemetria e Despacho Eletrônico

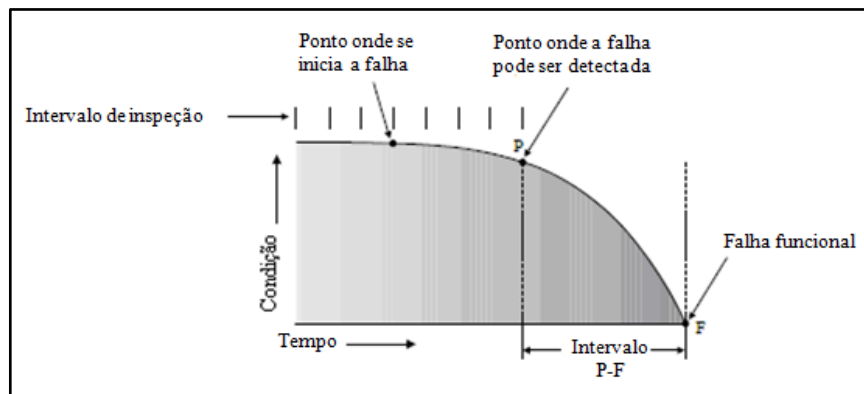
O uso de sistemas de monitoramento de dados está inserido no conceito de manutenção preditiva. Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994, p.7) este

é o tipo de “manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem” [...]. Neste modelo, Pinto e Xavier (2001) afirmam que para se adotar a manutenção preditiva é necessário que:

- a) Deve ser disponível algum tipo de monitoramento ou medição no equipamento ou sistema;
- b) Devido aos custos para operacionalizar este tipo de manutenção, deve ser feita uma análise prévia quanto à viabilidade de sua aplicação;
- c) As causas das falhas devem possibilitar seu monitoramento, garantindo o acompanhamento de sua progressão;
- d) Deve-se sistematizar um programa de acompanhamento, análise e diagnósticos dos dados preditivos.

A Figura 21 ilustra a evolução da falha e é denominada curva P-F. Esta curva mostra como a evolução da deterioração ocorre num ponto monitorado até o momento em que esta condição possa ser detectada (ponto P). Se a falha não é detectada e posteriormente corrigida ela então evolui até a ocorrência da falha funcional (ponto F).

Figura 21- Curva P-F



Fonte: Adaptado de AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, 2004, p.21

Neste contexto, busca-se a introdução de sistemas como o de telemetria na busca da prevenção ou antecipação da falha através do monitoramento de parâmetros que indiquem a evolução de uma falha a tempo de serem corrigidas, ou seja, antes da falha funcional. Conclui-se que a manutenção preditiva é a técnica que busca intervir no equipamento de maneira planejada e paralisando o mínimo a produção.

Mikulski (2010) define o termo telemetria como uma solução das áreas de Telecomunicação, Automação e Tecnologia da Informação adaptada para as necessidades de vários sistemas físicos integrando-os. Como um ramo recente da tecnologia, a telemetria já é aplicada a várias áreas como a de construção, médica, de transportes além da área de esportes como a fórmula1. As funções principais deste tipo de sistema são coletar, processar e distribuir informação.

Vários equipamentos de mineração, com seus respectivos sistemas de controle, possuem interface com sistemas de telemetria para transmissão de dados em tempo real possibilitando que as equipes de escritório possam fazer diagnósticos de potenciais falhas remotamente. A coleta e análise de dados remota proporciona à equipe de manutenção a tomada de decisões que permitem executar reparos antes que falhas ocorram, além de reduzir manutenções não planejadas e custos de reparo (LAMPERT, 2015).

Além disso, o sistema de telemetria proporciona, através da coleta, monitoramento e interpretação de dados, uma forma de se conhecer melhor os equipamentos. A interpretação e possibilidade de cruzamento de dados operacionais proporcionam um melhor gerenciamento para as equipes de manutenção e operação de mina. O sistema de telemetria possui três aplicativos principais: a coleta e armazenamento de eventos anormais, o monitoramento em tempo real e o monitor de tendências.

A coleta e armazenamento de eventos anormais ocorrem por meio de uma interface entre o sistema de telemetria e os sistemas OEM das máquinas monitorando continuamente dados dos sensores e computadores de bordo destas. Quando um alarme predefinido ocorre, via rádio, o sistema de telemetria recebe e armazena-o. Então os mesmos são carregados ordenadamente na tela de notificações de eventos para a equipe de escritório.

A aplicação de monitoramento em tempo real permite que, através da rede sem fio, sejam feitos monitoramentos de todos os dados dos sensores das máquinas para análise. Esta função é muito robusta e traz o grande benefício de avaliar os dados monitorados pelos sensores das máquinas de forma a correlacioná-los para diagnosticar a saúde do equipamento.

A aplicação de tendências permite o desenho de condições para o monitoramento de parâmetros quando uma condição numérica monitorada for alcançada, enviando um registro através da rede sem fio, para a equipe de escritório. A vantagem deste aplicativo é a possibilidade de criação de regras e alertas sempre que uma condição previamente estabelecida for atingida. Com isso é proporcionada maior versatilidade na antecipação de falhas potenciais, cujos sistemas nativos das máquinas não monitoram ou informam tardiamente a ocorrência de condições operacionais indesejadas.

Já o Sistema de Despacho Eletrônico é utilizado para gerenciar remotamente a frota de equipamentos de mina de modo a maximizar a produtividade de cada máquina, gerenciando-as através de algoritmos de otimização. Cada equipamento é monitorado via GPS proporcionando o gerenciamento de dados como o posicionamento de cada máquina nos mais diversos pontos da mina, suas distâncias percorridas, velocidades e parcelas do tempo gasto para cada atividade, monitorando sua produtividade.

Além dos dados dos sistemas de Controle de Análise de Pista e do sistema de monitoramento de pressão e temperatura dos pneus, transmitidos em tempo real pelo sistema de telemetria, este trabalho utilizará também os dados de distâncias percorridas, tempos e dados das cargas transportadas pelos caminhões contabilizados pelo Sistema de Despacho Eletrônico. Dentre os inúmeros parâmetros monitorados e calculados pelo Sistema de Despacho Eletrônico durante a operação dos equipamentos, este estudo considerou as seguintes, caracterizadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Parâmetros monitorados pelo Sistema de Despacho Eletrônico

Parâmetro	Unidade	Descrição
Viagens	-	Quantidade de viagens efetivamente transportadas pelo caminhão e despejadas no ponto de destino
Tempo Vazio	h	Tempo que o caminhão se deslocou sem carga
Tempo Cheio	h	Tempo que o caminhão se deslocou carregado
Distância Vazio	km	Distância que o caminhão se deslocou sem carga
Distância Cheio	km	Distância que o caminhão se deslocou com carga
Movimentação	ton	Somatório das cargas transportadas pelo caminhão
Velocidade Vazio	km/h	Velocidade que o caminhão se deslocou vazio
Velocidade Cheio	km/h	Velocidade que o caminhão se deslocou carregado
Velocidade Média	km/h	Velocidade que o caminhão se deslocou vazio e carregado
DMT	km	Iniciais de Distância Média de Transporte. Representa a distância média entre os pontos de carregamento e os pontos de despejo das cargas transportadas pelo caminhão

Produtividade	ton/h	É a razão entre a movimentação e os tempos de deslocamento cheio e vazio
Carga Média	ton	Representa a média de todas as cargas transportadas pelo caminhão
Horas Trabalhadas	h	Horas em trabalho de um equipamento ou componente
Fila Escavadeira	minutos	Tempo médio de espera do caminhão para ser carregado
Manobra	minutos	Tempo médio de manobra do caminhão para carga
Carregamento	minutos	Tempo médio de carregamento do caminhão
Fila Britador	minutos	Tempo médio de espera do caminhão para despejo
Basculo	minutos	Tempo médio de despejo da carga do caminhão

Fonte: SISTEMA DE DESPACHO ELETRÔNICO, 2015

Estas variáveis são oportunamente coletadas do Sistema de Despacho Eletrônico, sem a necessidade de instalação de sistemas de monitoramento adicionais.

Por meio de computadores interligados em rede é possível realizar a extração de todas as variáveis que compõem este estudo. Especificamente para os pneus, que possuem vidas úteis de normalmente mais de um ano e que ainda podem sofrer rodízios entre equipamentos distintos, torna-se necessário filtrar os dados para cada período de operação e equipamento em que o pneu foi montado para particularizar os dados de forma fiel. Após esta preparação da base de dados são realizadas as análises probabilísticas apresentadas neste trabalho.

5. METODOLOGIA NUMÉRICA

Neste capítulo é discutida a análise estatística das variáveis monitoradas, as correlações entre elas além da aplicação da técnica de regressão linear múltipla avaliando as variáveis que impactam na vida útil de pneus aplicados em equipamentos de mineração. Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o *software* Minitab. Parte dos resultados relacionados ao tratamento estatísticos dos dados foi apresentada pelo autor no *XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering* (VIEIRA e BRITO, 2015).

Todos os dados obtidos pelas variáveis detalhadas no Capítulo 4 deste trabalho são particularizados para cada um dos 55 pneus na etapa de análise numérica, desde o momento do início de operação de cada um destes novos até seus respectivos sucateamentos. Destaca-se que os pneus que compõem esta amostra já atingiram o final de suas vidas úteis e foram sucateados com modos de falhas relacionadas ao processo de fadiga, previamente discutido no Capítulo 3 deste trabalho. Cabe ressaltar ainda que os pneus operaram, durante todas suas vidas úteis, em caminhões fora-de-via Caterpillar modelo 793 em um mesmo complexo minerador. A base de dados é composta por pneus de dois fabricantes distintos descritos neste trabalho como fabricante A e fabricante B.

5.1. Análise de regressão

Hair et al. (2005) destaca que os gráficos de dispersão possibilitam uma análise visual da relação entre duas variáveis e como elas covariam⁹. Esta análise é útil para avaliar visualmente como duas variáveis se relacionam bem como qual é a natureza desta relação: linear, ou não linear. Adicionalmente é possível ainda incrementar tal análise, com a ajuda de técnicas estatísticas, encontrando uma equação que melhor se ajusta aos dados amostrais emparelhados. Triola (2014) afirma que a equação que descreve algebricamente a relação entre as variáveis estudadas chama-se equação de regressão, por conseguinte, a reta que melhor se ajusta aos dados plotados chama-se reta de regressão. Weisberg (2005) complementa que uma equação de regressão linear consiste em uma função intercepto e uma função de variância como pode ser observado na equação 11.

⁹ “As variáveis estão associadas quando exibem covariação. A covariação existe quando uma variável coerente e sistematicamente muda em relação a outra variável” (HAIR, et al. 2005, p. 311).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X \quad (11)$$

Y é a variável resposta ou variável dependente

β_0 é o parâmetro da regressão ou intercepto

β_1 é a inclinação da curva

X é a variável preditora ou variável independente

Com o auxílio do software Minitab gráficos de dispersão com uma análise de regressão linear foram gerados. Tais gráficos auxiliam na avaliação da covariação entre as variáveis dos sistemas de monitoramento remoto e as vidas úteis dos respectivos pneus no momento de seu sucateamento. Ressalta-se que as vidas úteis dos pneus são medidas em horas trabalhadas.

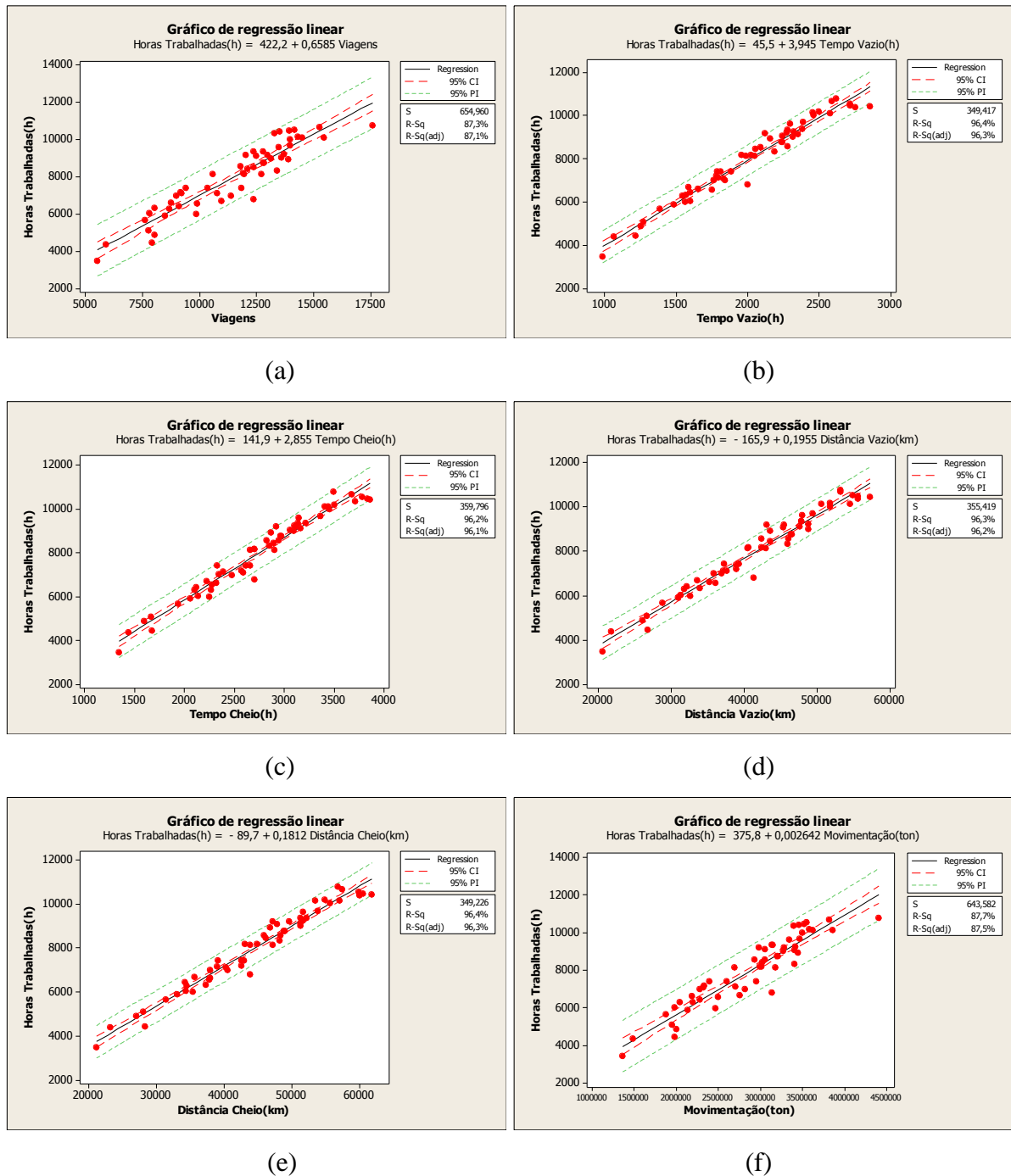
O primeiro passo da análise probabilística deste trabalho é apresentado pelos gráficos das figuras 22 a 29. Tais gráficos foram construídos com as variáveis detalhadas no Capítulo 4 deste trabalho representadas no eixo das abscissas. Já no eixo das ordenadas foram plotadas as vidas úteis dos pneus sucateados. Tais variáveis foram particularizadas para cada um dos 55 pneus estudados. Com vistas a garantir maior clareza na apresentação deste trabalho, os gráficos foram agrupados por sistemas de monitoramento e do grau de correlação.

O grau de correlação pode ser avaliado pela proporção da variação de y explicada pela relação linear entre as variáveis x e y também chamado de coeficiente de determinação R^2 . Como exemplo, se para uma análise estatística a relação entre duas variáveis resulta em um R^2 de 98% significa que apenas 2% dos dados do eixo y não são explicados pelos dados plotados no eixo x da análise estatística (TRIOLA, 2014).

É possível observar graficamente que, com a utilização da técnica de regressão linear e análise do grau de correlação, algumas das variáveis monitoradas tem alta correlação com a vida útil dos pneus enquanto que, para outras variáveis, esta correlação é quase imperceptível ou inexistente.

Os gráficos de regressão linear apresentados na Figura 22 correlacionam as variáveis monitoradas pelo Sistema de Despacho Eletrônico com as vidas úteis dos pneus sucateados. Verifica-se que as variáveis monitoradas referentes à quantidade de viagens, o tempo total em que o pneu operou com o caminhão vazio e carregado, as distâncias percorridas pelos pneus com o caminhão deslocando vazio e carregado além de sua movimentação total representados nas Figuras 22-a a 22-f possuem graus de correlação superiores a 87% com as vidas úteis dos pneus sucateados apresentando conseqüentemente baixa dispersão.

Figura 22- Gráficos de regressão linear das variáveis monitoradas pelo Sistema de Despacho Eletrônico cujo grau de correlação com a vida útil dos pneus é superior a 87%

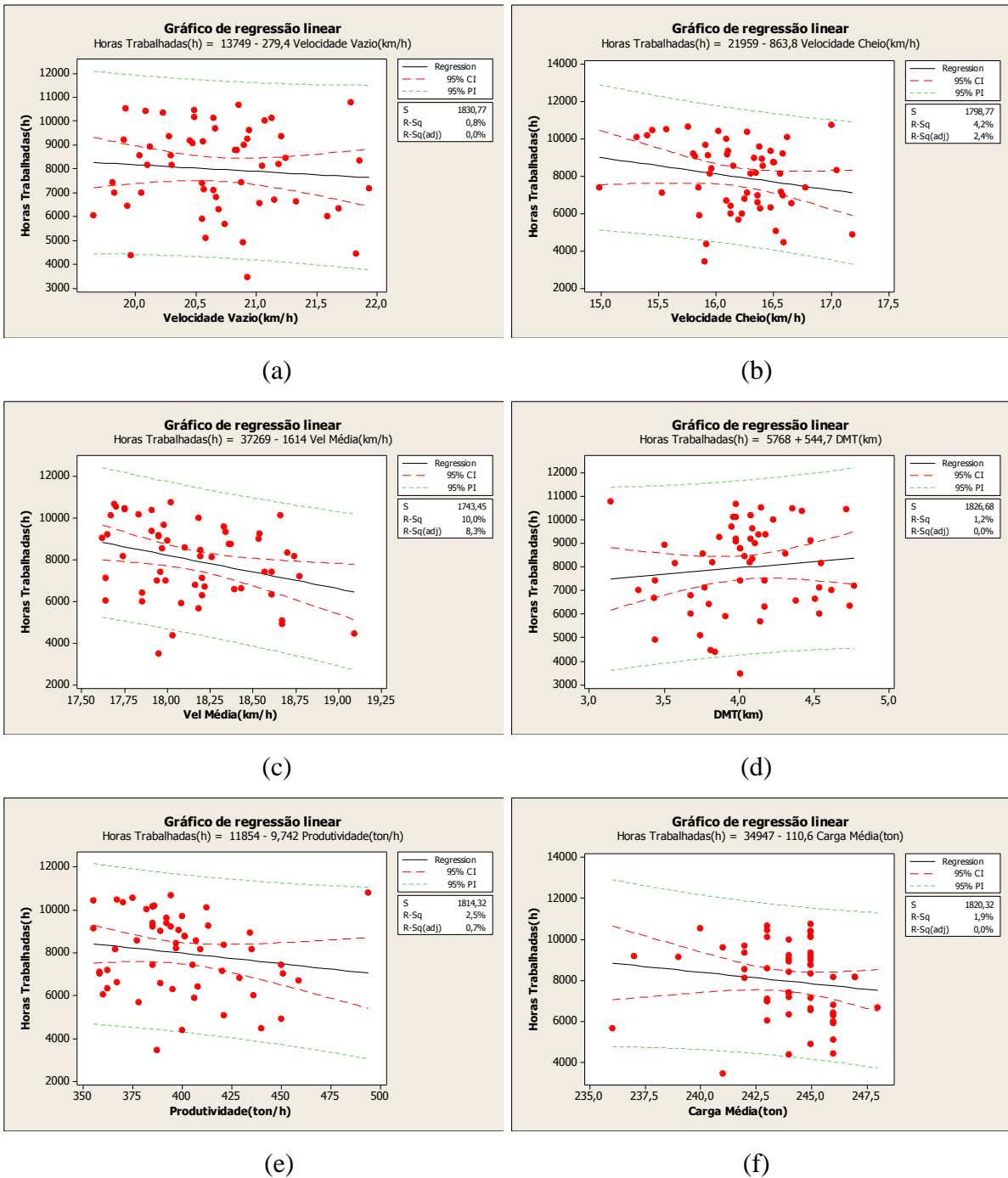


Fonte: Resultado da pesquisa

Apesar das variáveis de distância e tempo observadas possuírem alto grau de correlação com as vidas úteis dos pneus sucateados, verifica-se através da Figura 23 que as variáveis de velocidade e distância média de transporte apresentam coeficientes de determinação menores ou iguais a 10% e em alguns casos o valor deste é nulo. Nota-se ainda

que apesar de a variável movimentação possuir alto grau de correlação com as vidas úteis dos pneus sucateados, as variáveis de produtividade e de carga média não apresentam correlação com as vidas úteis dos pneus sucateados.

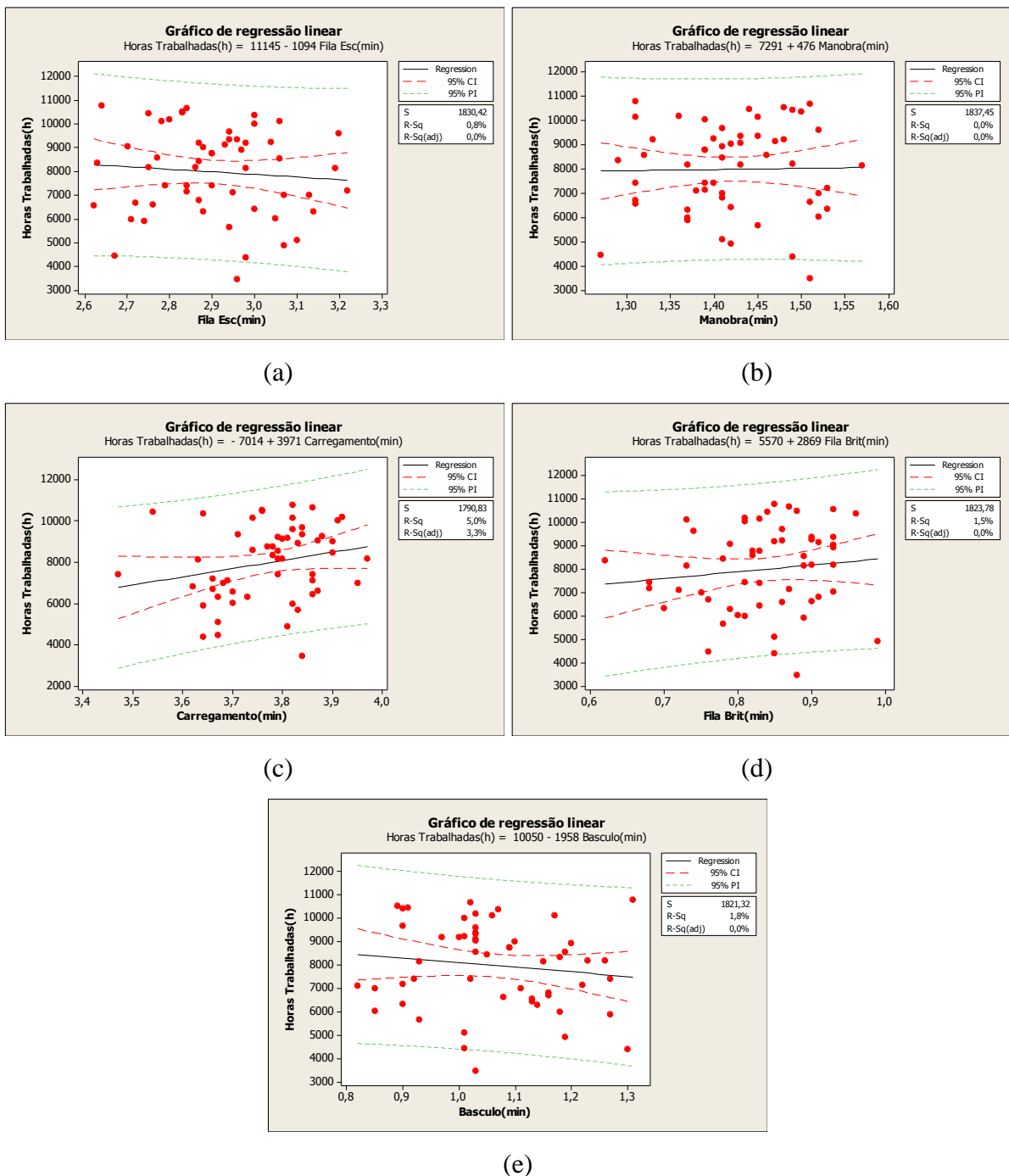
Figura 23- Gráficos de regressão linear das variáveis monitoradas pelo Sistema de Despacho Eletrônico cujo grau de correlação com a vida útil dos pneus é menor ou igual a 10%



Fonte: Resultado da pesquisa

Já as parcelas do ciclo de trabalho dos pneus, também controladas pelo Sistema de Despacho Eletrônico, que correspondem aos tempos em fila, manobra, carregamento e basculo possuem grau de correlação com as vidas úteis dos pneus próximo de 0%, como pode ser observado na Figura 24.

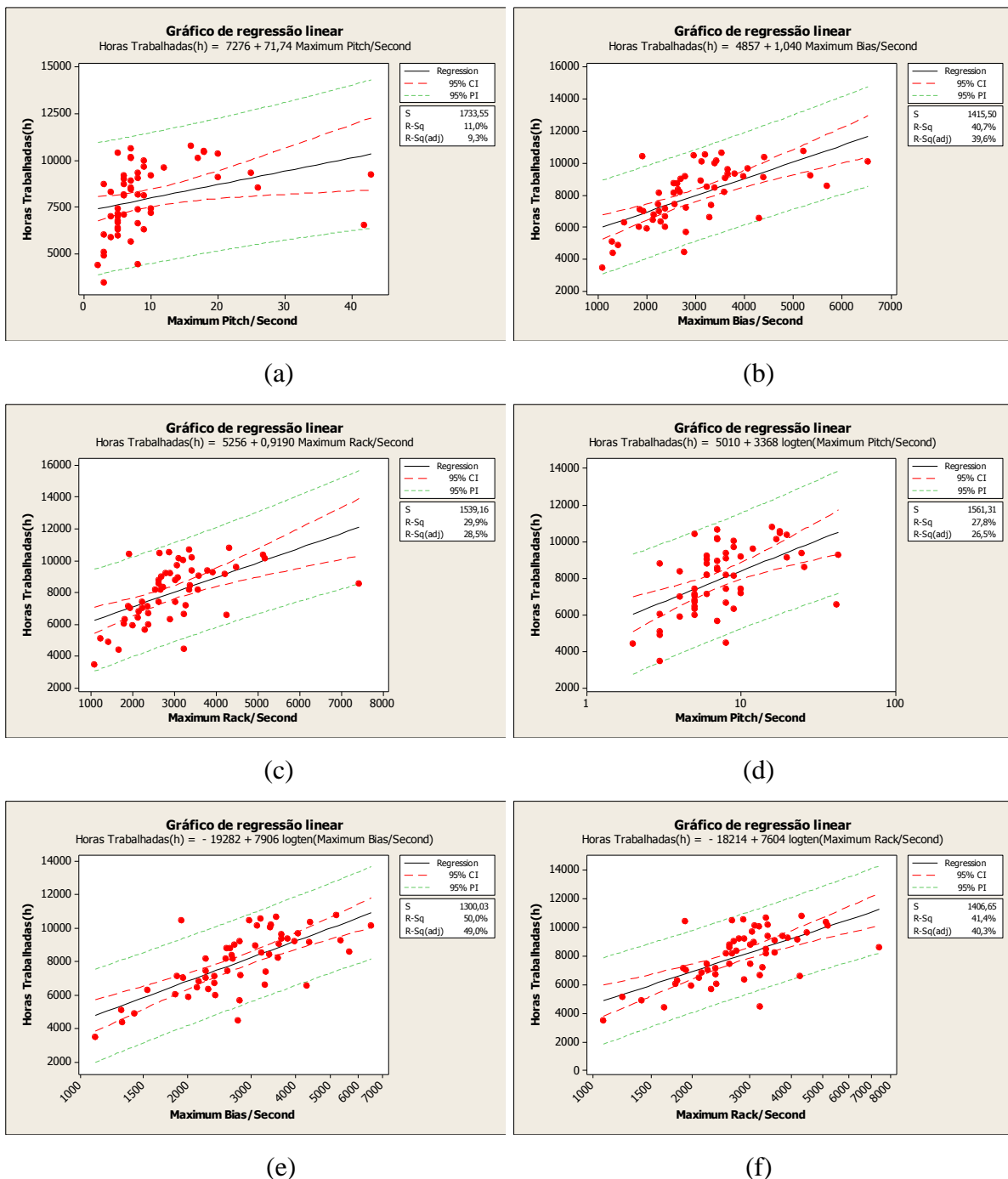
Figura 24- Gráficos de regressão linear das parcelas de tempo monitoradas pelo Sistema de Despacho Eletrônico versus vida útil dos pneus



Fonte: Resultado da pesquisa

Ao correlacionar as variáveis do sistema de Controle de Análise de Pista com as vidas úteis dos pneus, Figuras 25-a a 25-c, observa-se o grau de correlação superiores a 10%. Em escala logarítmica (Figuras 25-d a 25-f), elevam-se graus de correlação sofrem elevação, em consonância com acúmulo de dano por fadiga esperado em pneus (SCHUBEL *et al.*, 2004).

Figura 25- Gráficos de regressão linear das variáveis monitoradas pelo sistema de controle e análise de pista versus vida útil dos pneus

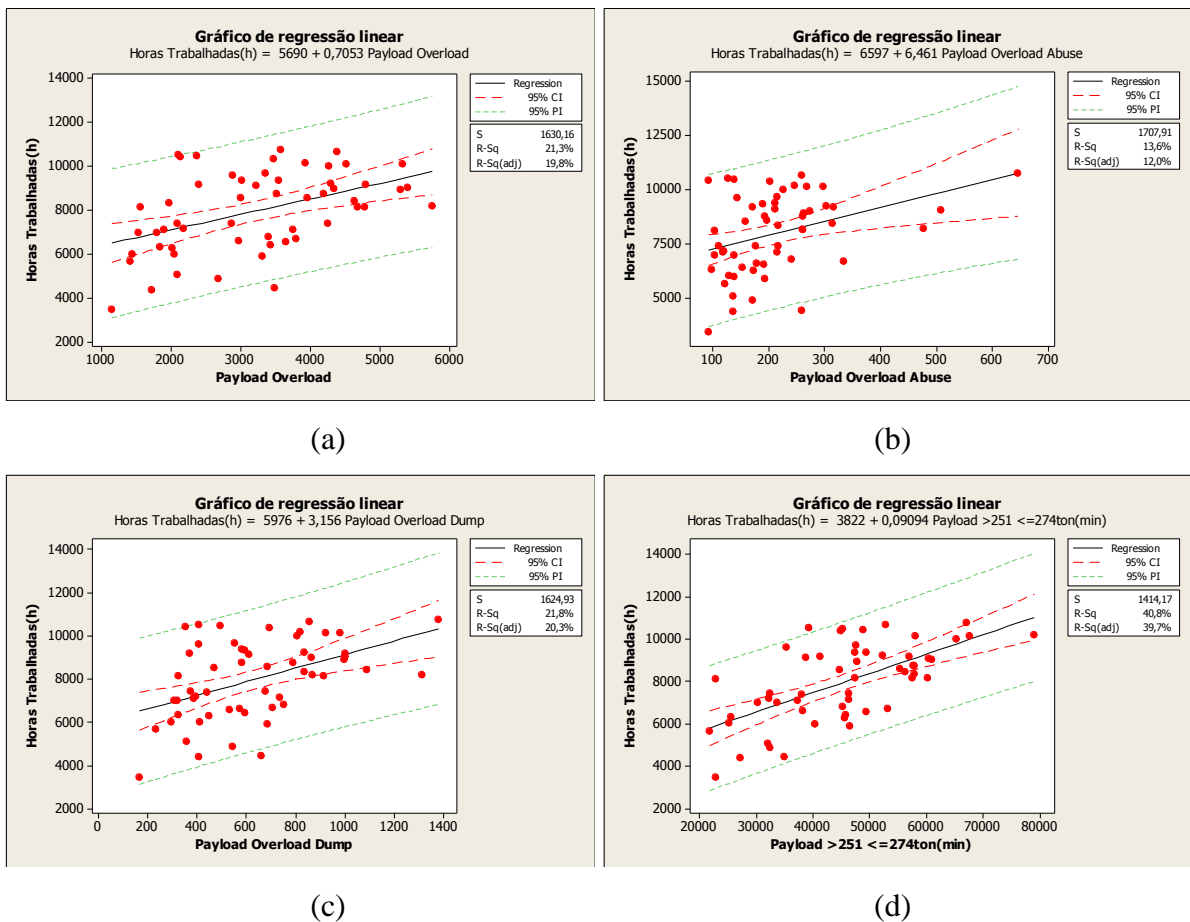


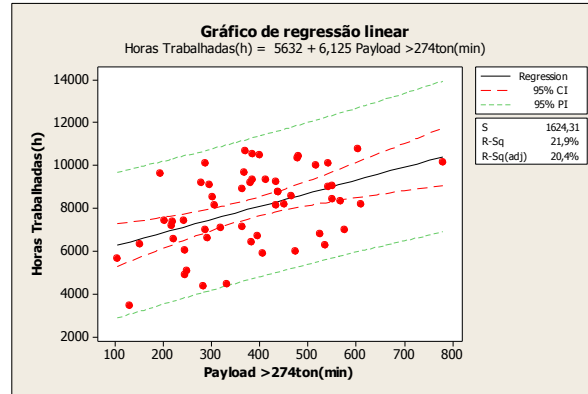
Fonte: Resultado da pesquisa

Correlacionando-se os dados do sistema de monitoramento de cargas com as vidas úteis dos pneus sucateados, apresentado nas Figuras 26-a a 26-c, é possível identificar coeficientes de determinação superiores a 20%.

Outras análises foram incorporadas utilizando-se os dados do sistema de monitoramento de cargas. Na Figura 26-d é percebido um coeficiente de determinação superior a 40% ao se correlacionar o tempo, medido em minutos, em que o caminhão operou com cargas entre 110 e 120% da sua capacidade nominal de trabalho com a vida útil no momento do sucateamento dos pneus. Nesta mesma linha de análise, na Figura 26-e é apresentado um coeficiente de determinação superior a 20% ao se correlacionar o tempo em que o caminhão operou com cargas superiores a 120% da sua capacidade nominal de trabalho com as vidas úteis dos pneus.

Figura 26- Gráficos de regressão linear das variáveis monitoradas pelo sistema de controle de carga útil versus vida útil dos pneus





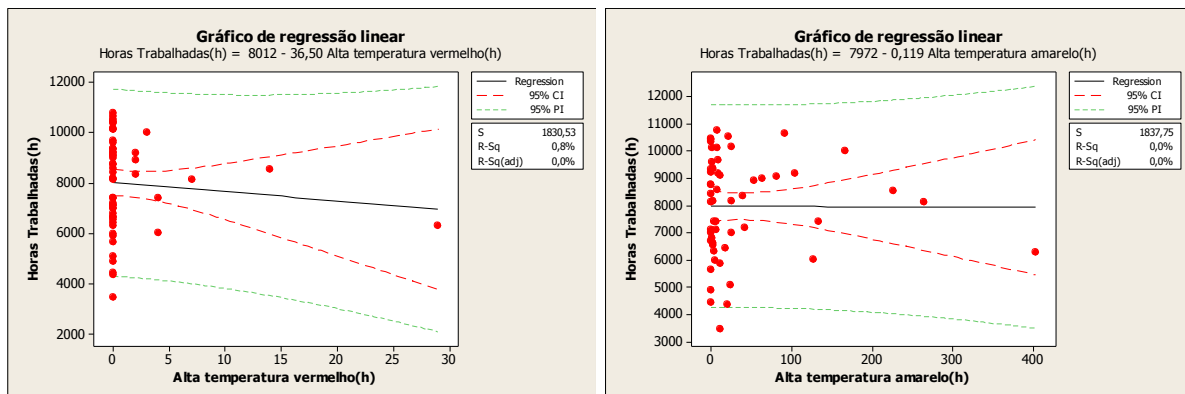
(e)

Fonte: Resultado da pesquisa

Ao avaliar a correlação dos tempos em que os pneus trabalharam com pressões ou temperaturas fora do recomendado com a vida útil dos pneus sucateados, através da Figura 27, verificam-se coeficientes de determinação próximos de 0%.

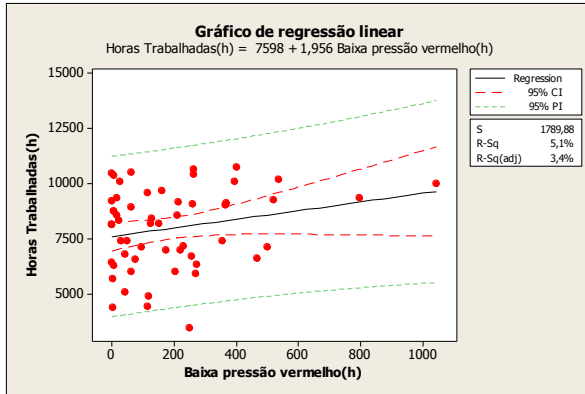
Os baixos coeficientes de determinação, para uma análise linear, podem ser explicados pelos grandes períodos de operação dentro dos limites recomendados de pressão e temperatura dos pneus que compõem a base de dados em estudo.

Figura 27- Gráficos de regressão linear das variáveis monitoradas pelo sistema de monitoramento de pressão e temperatura versus vida útil dos pneus

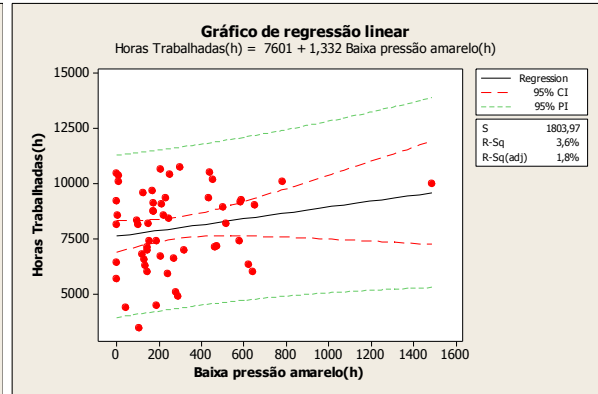


(a)

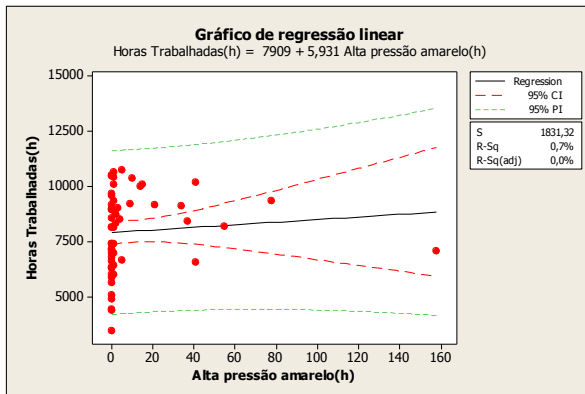
(b)



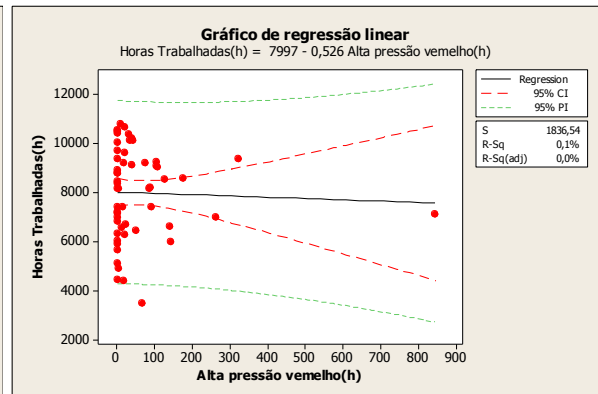
(c)



(d)



(e)



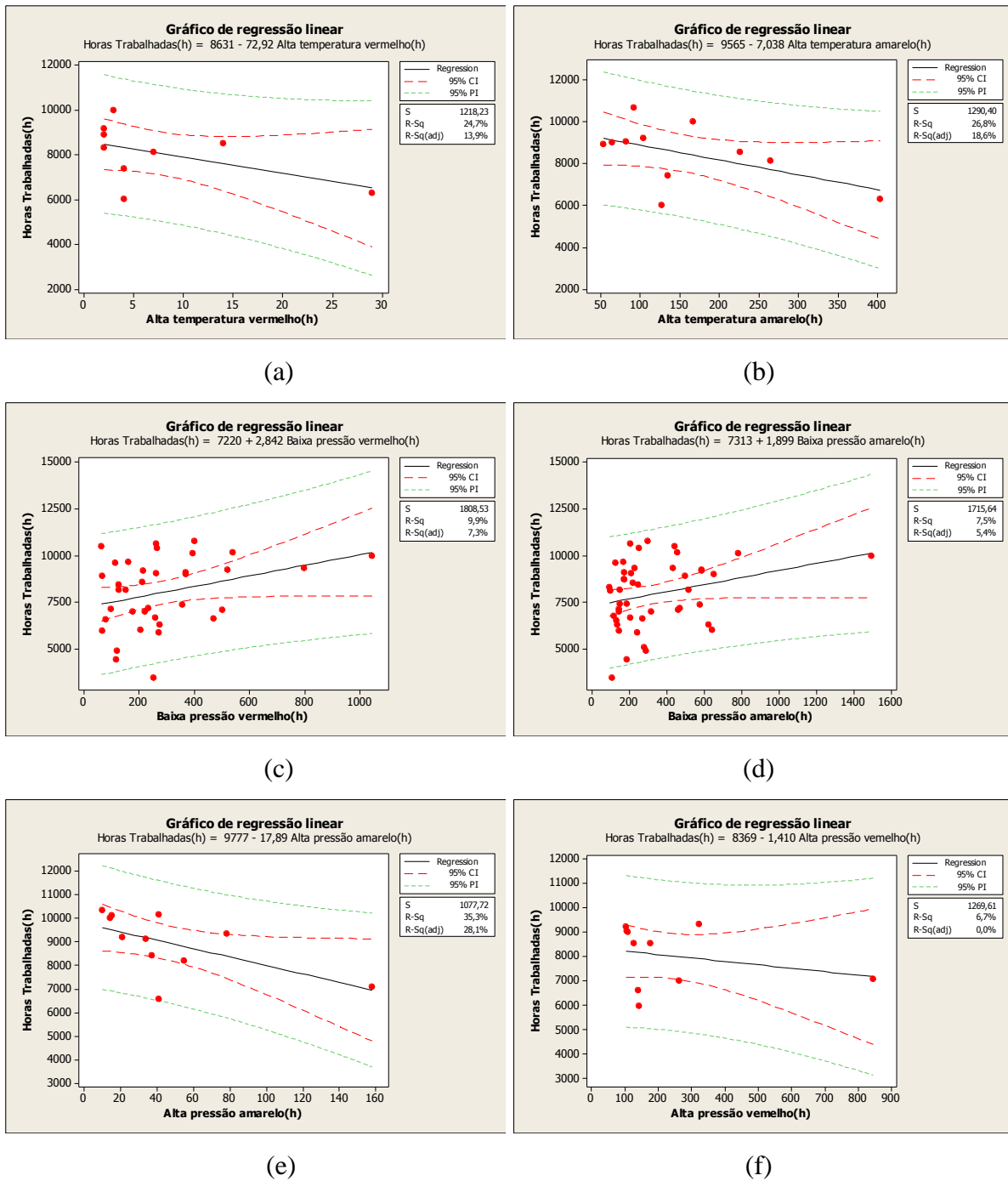
(f)

Fonte: Resultado da pesquisa

Outra análise é apresentada na Figura 28 com a retirada dos dados muito próximos de zero. Observa-se que os coeficientes de determinação, ao se correlacionar as vidas úteis dos pneus sucateados com o tempo total em que estes operaram em alta temperatura, representados nas Figuras 28-a e 28-b, sofreram relevantes acréscimos. Entretanto ao se correlacionar as vidas úteis dos pneus sucateados com o tempo em operação em baixas pressões de enchimento observam-se nas Figuras 28-c e 28-d coeficientes de correlação abaixo de 10%.

Por fim, verifica-se na Figura 28-e grande incremento no coeficiente de determinação, com a base de dados revisada, ao se correlacionar o tempo de operação total em alta pressão de enchimento no nível amarelo com as vidas úteis dos pneus sucateados. Em contrapartida, não se observa o mesmo para o nível crítico de pressão de enchimento destacado na Figura 28-f.

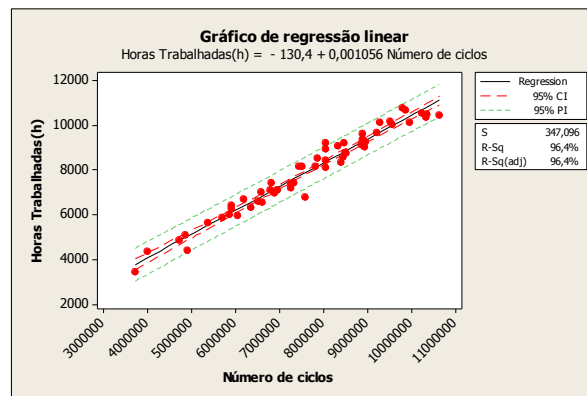
Figura 28- Gráficos de regressão linear das variáveis monitoradas pelo sistema de monitoramento de pressão e temperatura versus vida útil dos pneus revisados



Fonte: Resultado da pesquisa

Outra análise foi desenvolvida, avaliando-se o número total de ciclos de cada pneu durante toda a sua vida útil. Para tanto se dividiu as variáveis distância percorrida vazio e distância percorrida carregado pelo respectivo perímetro de cada pneu ao longo de suas vidas úteis.

Figura 29- Gráfico de regressão linear para a variável número de ciclos versus vida útil dos pneus



Fonte: Resultado da pesquisa

Observa-se na Figura 29 que o grau de correlação entre a quantidade de ciclos de cada pneu e sua respectiva vida útil é superior a 96% com baixa dispersão de dados.

5.2. Análise de correlação

Uma vez verificada, com o auxílio dos gráficos de dispersão e da técnica de regressão linear a existência de padrões distintos no emparelhamento entre os dados oriundos dos sistemas de monitoramento e as vidas úteis dos pneus, utiliza-se a partir daí a técnica de análise de correlação para aprofundamento da avaliação estatística. Neste tópico é utilizada a técnica de análise de correlação de Pearson.

A análise de correlação é uma técnica estatística muito útil na determinação do grau de relacionamento de uma variável em relação à outra. O objetivo desta técnica é medir a força de correlação linear entre valores emparelhados x e y de uma amostra através da determinação do coeficiente de correlação linear r (TRIOLA, 2014). Hair et al. (2005) complementa que este coeficiente varia entre -1,00 a +1,00. O valor intermediário, zero, representa associação nula entre as variáveis emparelhadas. Quanto maior o valor deste coeficiente, maior é o nível de associação entre as variáveis, como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Regras práticas sobre o valor do coeficiente de correlação

Varição do coeficiente	Força de associação
$\pm 0,91 - \pm 1,00$	Muito forte
$\pm 0,71 - \pm 0,90$	Alta
$\pm 0,41 - \pm 0,70$	Moderada
$\pm 0,21 - \pm 0,40$	Pequena mas definida
$\pm 0,01 - \pm 0,20$	Leve, quase imperceptível

Fonte: HAIR, et al., 2005

Entretanto esta técnica possui particularidades que devem ser consideradas:

- A correlação de Pearson mensura a associação linear entre duas variáveis métricas (HAIR et al., 2005).
- O coeficiente de determinação r mede somente a intensidade de relações lineares (TRIOLA, 2014).

Outro parâmetro de avaliação nesta técnica é o índice p-valor que identifica o nível de significância da amostra. Os valores de p-valor equivalentes a 0,05 representam associação de 95% entre os valores preditos pela equação de regressão linear e valores amostrais reais.

Avalia-se na Tabela 7 a dependência funcional de cada uma das variáveis independentes, controladas pelos sistemas de despacho eletrônico e supervisórios dos caminhões, transmitidos e armazenadas pelo sistema de telemetria, com as vidas úteis dos pneus sucateados, medida em horas trabalhadas. Pelo exposto, foram selecionadas as relações que atendem as particularidades desta técnica, ou seja, as relações lineares avaliadas através da técnica de regressão linear compostas por variáveis métricas.

Tabela 7 – Análise de Correlação

Variável métrica	Horas Trabalhadas
Tempo vazio	0,982 (0,000)
Tempo cheio	0,981 (0,000)
Distância vazio	0,981 (0,000)

Distância cheio	0,982 (0,000)
Movimentação	0,937 (0,000)
<i>Maximum Pitch</i>	0,332 (0,013)
<i>Maximum Bias</i>	0,638 (0,000)
<i>Maximum Rack</i>	0,546 (0,000)
Tempo operado com <i>payload</i> entre 251 e 274 toneladas	0,639 (0,000)
Tempo operado com <i>payload</i> >274 toneladas	0,468 (0,006)

Nota: Conteúdo das células: Correlação de Pearson (p-valor)

Fonte: Resultado da pesquisa

Avaliando-se as correlações entre as horas trabalhadas de pneus sucateados por fadiga com as demais variáveis em estudo, é apresentado na Tabela 7 o resultado da correlação linear de Pearson cujas forças de associação são definidas, moderadas, altas e muito altas, ou seja, aquelas cujo coeficiente de correlação é maior em módulo que 0,21 e também considerando correlação significativa aquela com p-valor $\leq 0,05$ (HAIR et al. 2005).

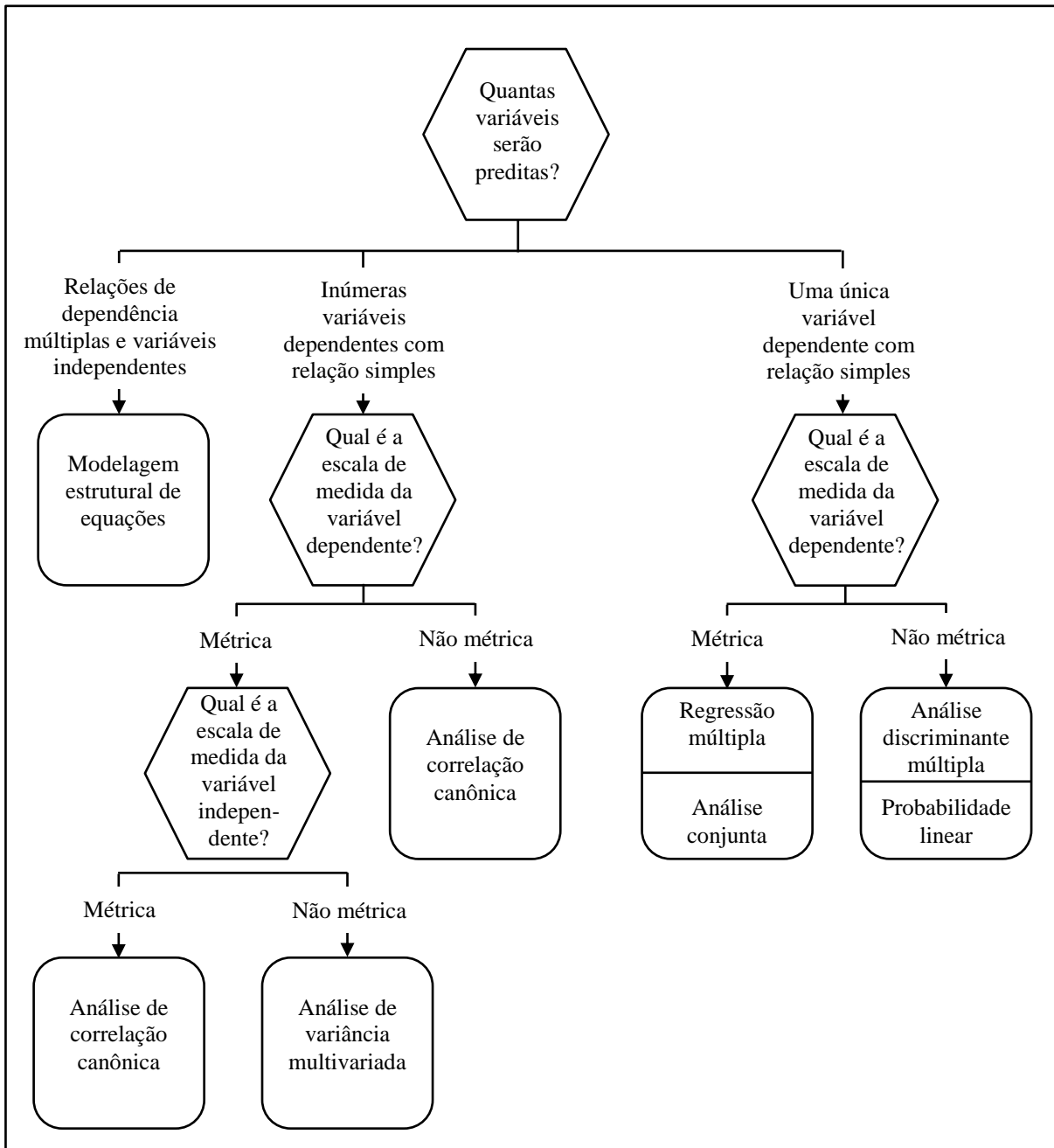
5.3. Regressão linear múltipla

Para se realizar previsões os pesquisadores normalmente utilizam três técnicas diferentes para tal. São elas o julgamento informado, a extrapolação a partir do comportamento passado e a regressão.

As técnicas de julgamento informado e de extrapolação utilizam a premissa básica de que eventos e comportamentos passados continuarão no futuro. Quando estes eventos passados mudam estas técnicas podem induzir a previsões inexatas ou com exatidão duvidosas. Já a técnica de regressão utiliza como premissa os diversos eventos particularizados para cada objeto em estudo, neste trabalho as diversas solicitações em cada pneu ao longo de sua operação. Este “é um modelo mais realista porque, no mundo em que vivemos a previsão quase sempre depende de vários fatores, não de um só” (HAIR et al. 2005, p. 327).

Neste trabalho é utilizada a técnica de análise de regressão linear múltipla que, como pode ser observado no fluxo da Figura 30, este é o método que considera uma relação de dependência entre a vida útil dos pneus, medida em horas de trabalho, com demais variáveis independentes, também métricas, obtidas pelos sistemas supervisórios embarcados nos equipamentos.

Figura 30- Fluxo de seleção de técnica multivariada com relação de dependência



Fonte: Adaptado de HAIR, et al., 2009

Hair, et al. (2009) conceitua a análise de regressão linear múltipla como uma técnica estatística que visa medir, explicar e prever simultaneamente o grau de relação entre mais de duas variáveis a serem estudadas. Este tipo de análise é muito útil para buscar explicar, através de técnicas de dependência, o comportamento de uma variável dependente em relação a diversas variáveis independentes.

A análise de regressão linear múltipla relaciona a variável dependente quantitativa (Y) com n variáveis independentes quantitativas (X_n), cujo objetivo é encontrar uma equação que relacione e explique matematicamente o comportamento da variável dependente. A equação geral da regressão linear múltipla é descrita por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n \quad (12)$$

onde:

Y é a variável dependente

β_0, \dots, β_n são os parâmetros da regressão

X_1, \dots, X_n são as variáveis independentes

Os dados que apresentaram correlação significativa são então correlacionados com a vida útil de pneus, através da técnica de análise de regressão múltipla. Utilizando-se as horas trabalhadas do pneu como variável dependente e os dados monitorados pelos supervisórios como independentes, cujas correlações foram classificadas como significativas, através da metodologia de análise de regressão linear múltipla a equação 13 foi então construída. Busca-se com isso estimar probabilisticamente a vida útil dos pneus para sua respectiva exaustão estrutural.

$$\begin{aligned} \text{Horas Trabalhadas} = & -139 + 1,07 \cdot \alpha + 1,21 \cdot \beta - 0,171 \cdot \theta + 0,166 \cdot \delta \\ & + 0,000659 \cdot \phi + 0,047 \cdot \varphi - 5,107 \cdot \gamma + 0,027 \cdot \eta + 0,013 \cdot \Pi - 0,796 \cdot E \end{aligned} \quad (13)$$

Observam-se na Tabela 8 os resultados do modelo de regressão linear múltipla construído. Primeiramente é possível verificar que o R^2 , ou seja, a variação na vida útil dos pneus é explicada pelas variáveis independentes em 98%. Evitando-se superestimar o impacto da quantidade de variáveis independentes utilizadas, observa-se ainda que o R^2 ajustado é muito próximo do valor nominal indicando-se uma leve superestimativa neste modelo. Tais resultados indicam que o modelo é de grande assertividade.

Tabela 8 – Modelo ajustado para análise de regressão linear múltipla

	Símbolo	Coefficiente	Desvio padrão
Constante	-	-138,8	196,1
Tempo vazio	α	1,0702	0,9404
Tempo cheio	β	1,2083	0,8028
Distância vazio	θ	-0,17115	0,09802
Distância cheio	δ	0,1664	0,1041
Movimentação	ϕ	0,0006591	0,0002174
<i>Maximum Bias</i>	φ	0,047	0,1056
<i>Maximum Pitch</i>	γ	-5,107	7,156
<i>Maximum Rack</i>	η	0,02685	0,08499
251 > <i>Payload</i> ≤ 274ton	Π	0,013307	0,007307
<i>Payload</i> > 274ton	E	-0,796	0,476

S=284,017; R²=98,0%; R² ajustado=97,6%

Fonte: Resultado da pesquisa

Analisando a Tabela 9 a seguir, verifica-se primeiramente que o índice F, resultado da comparação das variações explicadas e não explicadas pelo modelo, obtido pela divisão entre os quadrados médios da regressão e dos resíduos, é altamente significativo, ou seja, afastado de zero. Este resultado indica que a variância na variável dependente, representada pela vida útil do pneu é explicada pelas variáveis independentes. Outro ponto a ser ressaltado é o resultado do valor P que indica a significância global da equação de regressão múltipla. O valor 0,000 também encontrado na Tabela 9 indica “que a equação de regressão múltipla tem boa significância geral e é adequada para predições” (TRIOLA, 2014, p.453).

Confirma-se ainda uma baixa variância não explicada pelo modelo, neste caso aproximadamente 2%, resultado obtido pela divisão da soma dos quadrados dos resíduos pela soma dos quadrados da regressão.

Tabela 9 – Análise de variância do modelo de regressão linear múltipla

	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	P
Regressão	175453768	17545377	217,51	0,000
Resíduo	3549295	80666		
Total	179003063			

Fonte: Resultado da pesquisa

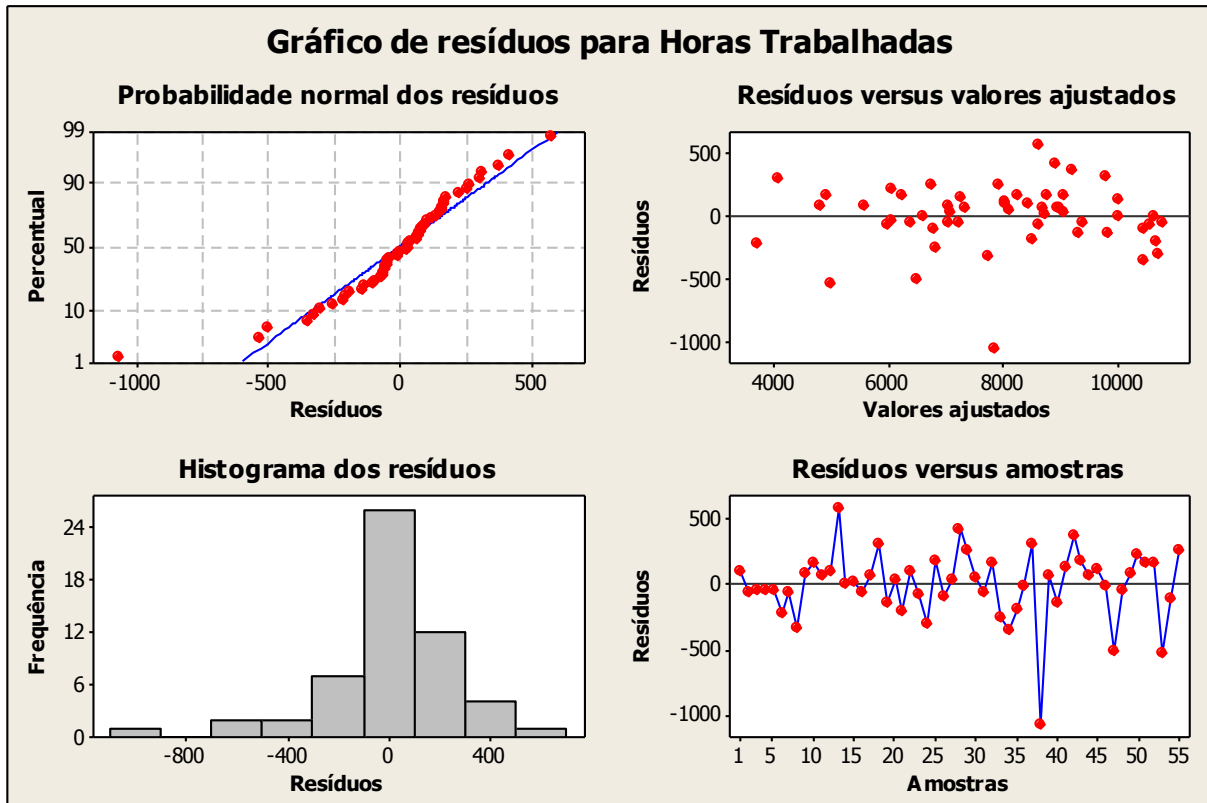
Hair (2005) detalha em sua obra que, após a construção do modelo de regressão linear são estimados os parâmetros de variância explicada ou R^2 e de erros não explicados, definidos como resíduos. A análise dos resíduos oferece uma importante ferramenta sobre a análise de regressão, pois pode indicar erros na suposição elaborada.

A Figura 31 apresenta a análise dos resíduos da equação 13. Nota-se que os resíduos estão dispostos formando uma normal. A normalidade é uma hipótese importante para as inferências envolvendo o modelo de regressão linear. A falta de normalidade pode ser uma indicação de heterocedasticidade ou falta de ajuste do modelo. Com isso não há evidências para se rejeitar a hipótese de normalidade dos resíduos.

Através do gráfico de resíduos versus valores ajustados verifica-se que não aparentam existir defeitos óbvios no modelo, ou seja, grandes erros nas horas trabalhadas projetadas dos pneus. Observa-se ainda que quanto maior a vida útil do pneu, maior a assertividade do modelo.

Ao analisar o gráfico designado resíduos versus amostra, verifica-se que os resíduos são independentes, distribuindo-se aleatoriamente em torno de zero.

Figura 31- Gráfico de Resíduos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se que o apenas o pneu da amostra 38 apenas desviou-se fora do padrão observado dos demais. Chama-se atenção a este ponto, pois este pneu foi monitorado com as mesmas ferramentas, além de ter sido exposto às mesmas condições dos demais. Nota-se então que alguma variável ainda não monitorada pelas atuais tecnologias existentes apresentadas neste trabalho pode também influenciar na vida útil estrutural dos pneus.

Ressalta-se ainda que a equação 13 foi construída por técnicas estatísticas e, por este motivo, deve ser utilizada como referência ou indicativo apenas. Como as unidades das variáveis distinguem-se entre si, regras matemáticas não foram consideradas em sua concepção.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pelo exposto ao longo deste trabalho verificam-se correlações entre variáveis dos sistemas de monitoramento e a vida útil da estrutura dos pneus de caminhões fora-de-via aplicados em mineração. Baseando-se nos dados apresentados, é possível ressaltar que as variáveis de distâncias percorridas, tempos e cargas suportadas pelos pneus ao longo de toda sua vida útil variam linearmente com a vida útil de sua estrutura.

Correlacionando-se outras variáveis, apesar de literaturas ressaltarem a importância da manutenção da pressão de enchimento e da temperatura de trabalho dos pneus dentro de patamares pré-determinados de forma a maximizar sua vida útil, não foi possível correlacioná-los globalmente com base nos dados neste trabalho apresentados.

Ao retrabalhar a base de dados, retirando-se os da base os pneus que operaram longos períodos dentro dos patamares de pressão e temperatura recomendados pelos fabricantes, foram possíveis verificar algumas correlações lineares com suas respectivas vidas úteis. Esta tese é reforçada quando se analisa individualmente todos os pneus da base de dados. São listados na Tabela 10, pneus que operaram altos períodos em alarme de alta temperatura e alta pressão. Verifica-se que estes foram sucateados com vidas úteis, medida em horas trabalhadas, abaixo que a média global da base de dados deste estudo que é de 7246 horas trabalhadas.

Tabela 10 – Tempo em alarme de pneus sucateados prematuramente

Pneu #	Fabricante	Horas Trabalhadas	Tempo (h) em alta temperatura vermelho	Tempo (h) em alta temperatura amarelo	Tempo (h) em baixa pressão vermelho	Tempo (h) em baixa pressão amarelo	Tempo (h) em alta pressão amarelo	Tempo (h) em alta pressão vermelho
50	B	5561	29	403	8	135	0	19
20	A	6475	0	0	500	462	158	844
4	A	5504	4	127	203	641	0	0
52	B	6567	4	134	28	188	0	14

Fonte: Resultado da pesquisa

Apesar da pequena representatividade destes em relação a toda a base de dados, chama a atenção para o fato de estes pneus terem sido retirados prematuramente em relação à média. Sugere-se aprofundamento nesta questão de forma a subsidiar trabalhos futuros a respeito.

Com base nas evidências citadas foi ainda possível elaborar uma equação, através da técnica de regressão linear múltipla, composta pelas variáveis que possuem alta correlação com as vidas úteis dos pneus.

6.1. Predições para vida útil estrutural de pneus

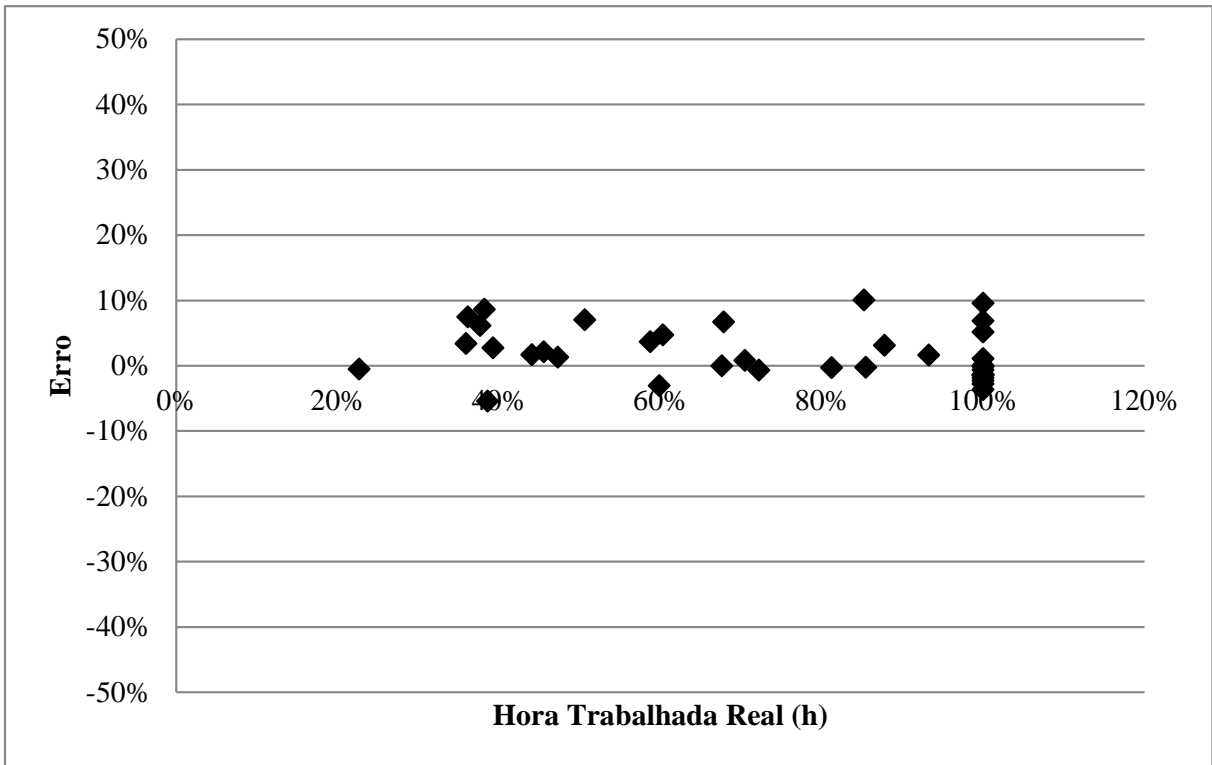
A equação 13 suporta uma abordagem linear entre as variáveis operacionais reais monitoradas pelos sistemas eletrônicos embarcados nos caminhões fora-de-via e a vida útil estrutural dos pneus destes veículos operando em minas a céu-aberto.

Ainda neste contexto, com base na equação 13 é possível realizar predições de vidas úteis para novas amostras de pneus. Hair (2009) destaca que este é o passo final para garantir a representatividade do modelo para certa população bem como as situações apropriadas para sua utilização. Neste caso, a forma mais apropriada de validação é o teste do modelo de regressão linear múltipla numa nova amostra de dados.

Baseado nesta afirmação, uma nova base composta por 14 pneus sucateados com falhas estruturais foi utilizada para este fim. Como estes pneus sofreram rodízios entre diversos caminhões ao longo de suas vidas úteis, foi possível ainda avaliar as predições em fases ao longo de sua operação, logo foram feitas mais que 14 previsões para esta base de dados.

O gráfico da Figura 32 ilustra predições para uma nova base de pneus sucateados com falhas estruturais. Esta previsão se baseia nas variáveis independentes neste trabalho estatisticamente priorizadas, ao longo de toda a vida útil destes pneus.

Figura 32- Gráfico de erros para previsões futuras de vida útil de pneus



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observa-se baixa dispersão com erros máximos de 10% em relação à vida útil real do pneu, validando-se o modelo construído para previsões futuras. O erro médio das previsões elaboradas é de 2%, ou seja, está em linha com o coeficiente de correlação R^2 encontrado no modelo de regressão linear múltipla de 98%, apresentado na seção 5.3 deste trabalho.

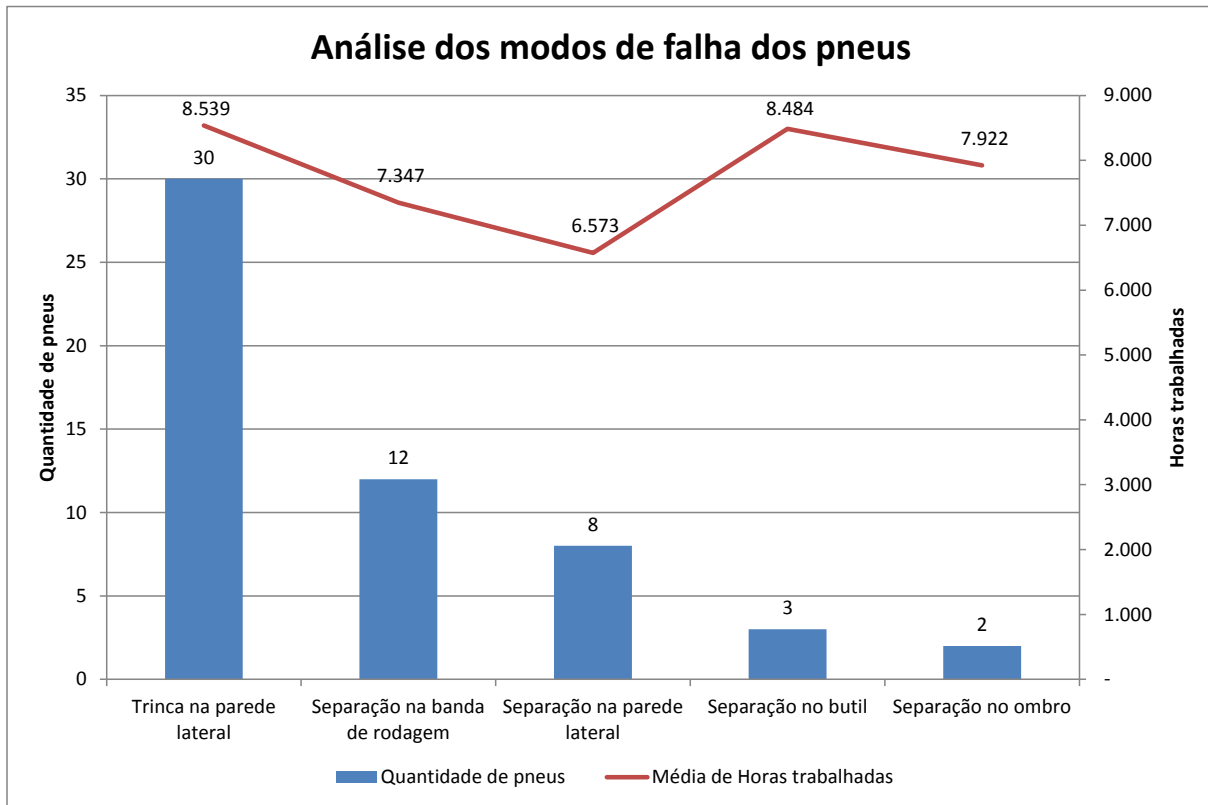
6.2. Análise dos modos de falha dos pneus sucateados

Os pneus sucateados que compõem a base dados deste trabalho, para ambos os fabricantes, podem ser segregados em cinco grupos com distintos modos de falhas, sendo eles: trinca na parede lateral e separações que podem ocorrer na banda de rodagem, na parede lateral, no butil ou na região do ombro.

Correlacionando os pneus sucateados com seus respectivos modos de falha, verifica-se na Figura 33 que aproximadamente 70% dos pneus sucateados possuem falhas estruturais originadas em suas paredes laterais. Tais modos de falha são ilustrados nas Figuras 10 e 11 deste trabalho.

Outra constatação é que a grande maioria dos pneus é sucateada por trincas nas paredes laterais, ponto também destacado na justificativa deste trabalho.

Figura 33- Gráfico de modo de falhas de pneus sucateados por danos estruturais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

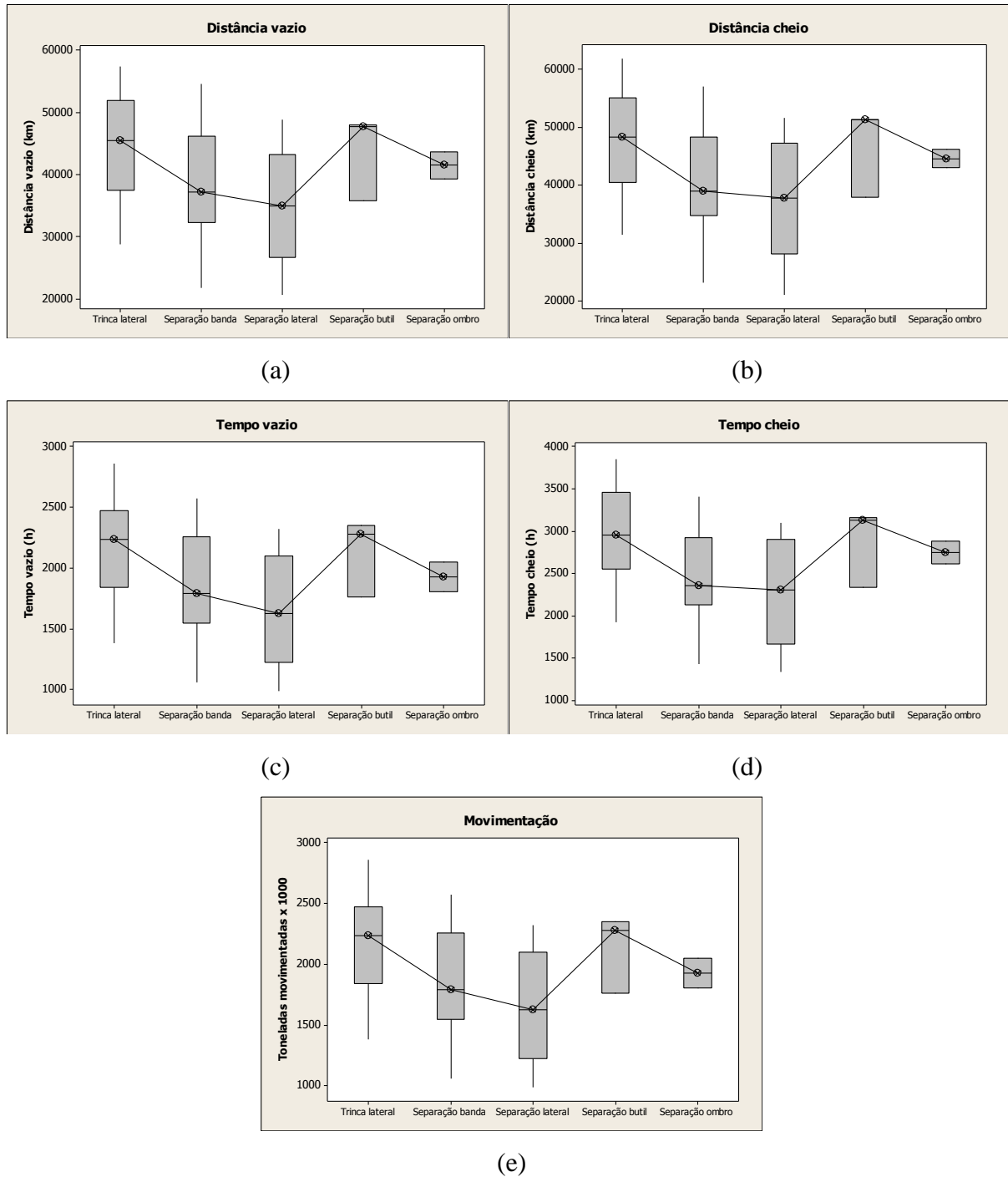
É possível avaliar mais detalhadamente os motivos de sucateamento dos pneus nos diagramas de caixa das figuras 34-a a 34-e. Nestes são correlacionados os dados para cada variável priorizada estatisticamente com os modos de falha de cada pneu sucateado. É possível ainda avaliar a distribuição dos dados em quartis com a identificação de informações como a mediana e outliers para cada modo de falha dos 55 pneus que compõem a base.

Observa-se na figura 34 que as variáveis monitoradas pelo Sistema de Despacho Eletrônico que é privilegiada, provavelmente por questões operacionais, a operação dos pneus com carga por maiores tempos em comparação com os períodos operados sem carga. Entretanto, ao avaliar os modos de falha para cada variável não se observa preponderância de modos de falha para alguma destas variáveis em detrimento de outras.

Com exceção do modo de falha separação no butil, cuja amostra é de apenas três pneus sucateados, para todos os demais as medianas não se encontram demasiadamente deslocadas da média. Outro ponto que chama a atenção é uma grande variabilidade dos dados,

principalmente para os modos de falha trinca na lateral, separação na banda de rodagem e separação na parede lateral dos pneus.

Figura 34- Diagramas de caixa das variáveis monitoradas pelo Sistema de Despacho Eletrônico



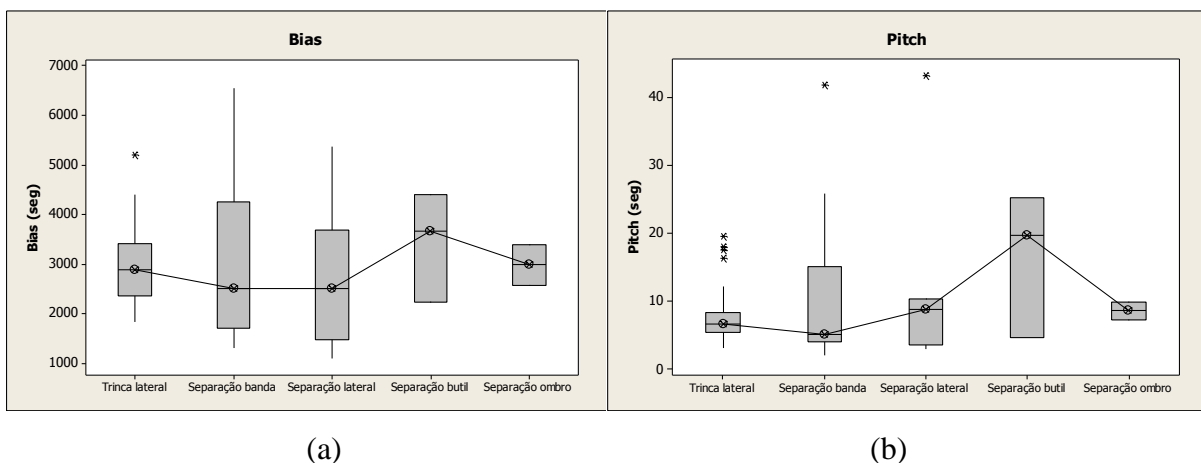
Fonte: Elaborado pelo Autor.

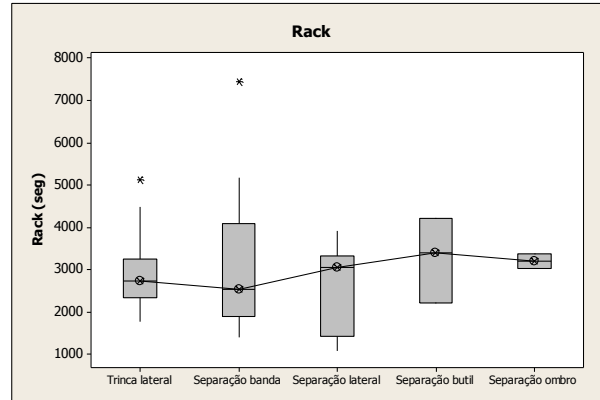
Conclui-se que as variáveis monitoradas pelo sistema de despacho mais precisamente distâncias, tempos e cargas nominais transportadas pelos caminhões cujos pneus operaram não predominam sobre algum dos modos de falha. Entretanto é possível verificar que os pneus são mais resistentes às trincas nas paredes laterais, separações no liner ou butil e na região do ombro do que às separações na banda de rodagem e em suas paredes laterais. Estes dois últimos modos de falha ocorrem com menores exposições dos pneus às condições operacionais.

Nesta mesma linha de análise, são apresentados na Figura 35 gráficos de caixa das variáveis monitoradas pelo sistema de Controle de Análise de Pista em relação aos modos de falha dos pneus sucateados. Observa-se que as medianas estão próximas da média para quase todos os modos de falha, exceto para o modo de falha separação da parede lateral no evento *Rack* da Figura 35-c.

Outro ponto que chama a atenção é que as incidências dos movimentos do veículo não aparentam interferir nos modos de falha, ou seja, não há indicações para identificar influências entre os danos apresentados nos pneus e os movimentos do veículo. Verifica-se ainda a presença de alguns valores discrepantes ou outliers. Outro ponto que chama atenção é a soma total de tempo em alarme *Pitch*, destacado na Figura 35-b, onde para todos os modos de falha é numericamente muito baixo comparado aos eventos *Bias* e *Rack*.

Figura 35- Diagramas de caixa das variáveis monitoradas pelo sistema de Controle de Análise de Pista



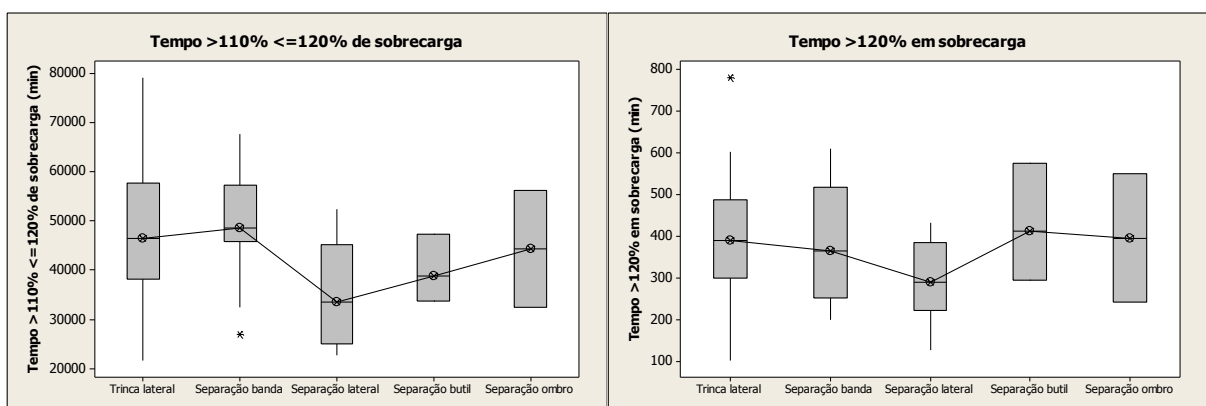


(c)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, ao avaliar as variáveis monitoradas pelo sistema de Monitoramento de Cargas da Figura 36. Observa-se que para até 120% de sobrecarga, apresentado na Figura 36-a as medianas são mais altas para os modos de falha trinca na lateral, separação da banda de rodagem e na região do ombro dos pneus, sugerindo maior resistência mecânica dos pneus para que tais falhas ocorram. Para operações com períodos superiores a 120% de sobrecarga, destacado na Figura 36-b, não se observam grandes variações da mediana para os modos de falha estudados. Observa-se ainda grande variabilidade dos dados para todos os modos de falha.

Figura 36- Diagramas de caixa das variáveis monitoradas pelo sistema de Monitoramento de Cargas



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Outros gráficos de caixa, para as demais variáveis podem ser encontradas no Apêndice A deste trabalho.

7. CONCLUSÕES

O ciclo de trabalho em que o pneu é submetido é de capital importância para a durabilidade de seus componentes estruturais e conseqüentemente determinante para sua vida útil. Em aplicações mais severas, como em ambientes de mineração, estes componentes estão expostos a solicitações mecânicas que variam com o tempo. Esta dinâmica operacional interfere na vida útil dos componentes constituintes destes elastômeros.

Mostrou-se neste trabalho que existem variáveis operacionais que se correlacionam linearmente com a vida útil da estrutura do pneu e, por isso, podem ser consideradas como parâmetros que interferem de sua vida útil. As variáveis totalizadas referentes aos tempos e distâncias em que o pneu operou com o veículo totalmente carregado ou vazio, além das cargas totais movimentadas e quantidade de ciclos efetuados durante toda a vida do pneu variam linearmente com suas vidas úteis medidas em horas trabalhadas. Estas variáveis apresentaram ainda fortes forças de associação com tais vidas úteis dos pneus.

Comprovou-se ainda que as variáveis que monitoram as sobrecargas dinâmicas impostas pelas condições de pista, modos de operação dos veículos e as ainda sobrecargas transportadas também têm correlação com a vida útil do pneu. Estas variáveis apresentaram essencialmente moderadas forças de associação com tais vidas úteis dos pneus.

Estas conclusões são subsidiadas por dados de solicitações mecânicas reais, monitoradas pelos supervisórios OEM de caminhões fora-de-via. Tais dados adquiridos por sistemas remotos de telemetria e despacho eletrônico propiciaram análises em escritório sem a necessidade de deslocamentos para a realização de extração de dados fisicamente nas máquinas. Vale ainda ressaltar que, como os parâmetros utilizados para a elaboração deste trabalho já são monitorados para outros fins, não é requerida instalação de instrumentação adicional, reduzindo com isso quaisquer custos para implantação de sensores bem como para coleta de dados.

O modelo probabilístico de previsão de final de vida útil estrutural de pneus, desenvolvido pelo método de regressão linear múltipla, é estatisticamente ajustado apresentando resíduos normalmente distribuídos e erros na ordem de 2% nas horas trabalhadas projetadas por tal análise. Com tal análise é possível quantificar a influência de cada variável na vida útil da estrutura do pneu.

Com base neste modelo ainda foi possível construir uma equação que, para variáveis independentes monitoradas, previsões futuras foram realizadas com erros máximos de 10% em relação à vida útil real da estrutura dos pneus analisados.

Conclui-se ainda, através da análise da base de dados que compõem este estudo, que as paredes laterais são as áreas mais suscetíveis a falhas estruturais no pneu para a aplicação em mineração a céu aberto. Ratifica-se ainda que as paredes laterais são as regiões mais vulneráveis a falhas por separação que as demais regiões do pneu.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **Guidance Notes on Reliability-Centered Maintenance**. Houston: ABS Plaza, 2004.
- ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- ARCHIBALD Kenneth; BROWN Keith; WOEHRLE William J. **Failure Modes of Steel Belted Radial Passenger Tires which have been Run Over-deflected on a Wheel Fatigue Test**, [S.l.]: TREAD Act, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- AVALLONE, Eugene A.; BAUMEISTER, Theodore; SADEGH, Ali M. **Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers**. 11. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2007.
- BISE, Christopher J. **Mining Engineering Analysis**. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. 2. ed., 2003.
- BLUNDELL, Mike; HARTY, Damian. **The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics**. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- BRADLEY, Allan. **Introduction to Tire Pressure Control Systems (TPCS) and synthesis os key research findings in highway and urban applications**. Vancouver: FPInnovations, 2009.
- BRIDGESTONE. **Off-the-road tires maintenance**. Tokyo: Bridgestone Off-the-road Tire Department. 2007.
- CARVALHO, Wallace da Silva. **Validação experimental da similaridade dinâmica para veículos**. 2014. 73f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
- CATERPILLAR. **A Reference Guide to Surface Mining Applications – Field Guide 2013**. Peoria: 2013.
- CATERPILLAR. **Cat® Road Analysis Control (RAC) for Cat 785C, 789C, 793C and 797B Mining Trucks**. [S.l.], 2002.
- CATERPILLAR. **Systems Operation General Information: Road Analysis Control (RAC) For Off-Highway Truck/Tractors**, media number RENR2636-07, 2012.
- CHAMANARA, Ali. **Enhancing mine haul truck KPIs via payload balance**. 2013. 152f. Tese (Doutorado) - University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmontn, 2013.
- COLLINS, Jack A. **Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention**. 2. ed. Columbus: John Wiley & Sons, 1993.

CROLLA, David A. **Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body**. Amsterdam: Elsevier, 2009.

DOWLING, Norman E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue**. Blacksburg: Prentice Hall, 1993.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE International, 1992.

GOVINDJEE, Sanjay. **Firestone Tire Failure Analysis**. [S.l.]: Relatório Técnico, 2001.

GROSCHE, K. Rolling resistance and fatigue life of tires. **Rubber Chemistry and Technology**. [S.l.]: v. 61. p. 42-63, Mar. 1988.

HAIR Jr., Joseph. et al. **Multivariate Data Analysis**. 17. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2009.

HAIR Jr., Joseph. et al. **Fundamentos de Métodos de Pesquisa em Administração**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAN, Young-Hoon. **Fatigue Life Prediction for Cord-Rubber Composite Tires Using a Global-Local Finite Element Method**. 2003. 130f. Tese (Doutorado) - University of Texas, Austin, 2003.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. **Introductory Mining Engineering**. New Jersey: John Wiley & Sons. 2. ed. 2002.

HATAJIMA, Caio. **Modelo Matemático para Cálculo e Avaliação de Desgaste em Pneus OTR Aplicados a Caminhões Pesados**. 2010. 65f. Monografia (Especialização) - Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manutenção, Ouro Preto, 2010.

HERTZBERG, Richard W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 1996.

JAZAR, Reza N. **Vehicle Dynamics: Theory and Applications**. Riverdale: Springer, 2008.

LAMPERT, Tom. Remote Monitoring of Surface Mining Equipment. **Engineering and Mining Journal**. Englewood. v. 216. p. 62-65, 2015.

LEE, Yung-Li. et al. **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice**. Amsterdam: Elsevier, 2005.

MACMILAN, Ralph A. New developments in mining truck electronics. **Mining Engineering**. Peoria. p.513-515, Jun. 1994.

MARK, James E.; ERMAN, Burak; ROLAND, Michael C. **The Science and Technology of Rubber**. 4. ed. Waltham: Academic Press, 2013.

- MARS, W.V.; FATEMI, A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. **International Journal of Fatigue**. Findlay. v. 24. p. 949-961, 2002.
- MICHELIN. **Guia de Utilização e de Manutenção: Pneus Engenharia Civil**. Clermont-Ferrand: 2012a.
- MICHELIN. **Manual de danos Cliente**. [S.l.]: [2015].
- MICHELIN. **Operator Manual: MEMS Control Center**. Versão 0.82, [S.l.]: 2011.
- MICHELIN. **Technical Data - Earthmover Tyres**. 2012 edition, Clermont-Ferrand: 2012b.
- MIKULSKI, Jerzy. **Transport Systems Telematics**. Berlin: Springer, 2010.
- MILLIKEN, William F; MILLIKEN, Douglas L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE International, 1995.
- MINITAB Inc. **Suporte ao Minitab 17**. Disponível em:< <http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/>>. Acesso em: 15 de fev. 2016.
- PEREZ, Nestor. **Fracture Mechanics**. Nova York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- PINHEIRO, Eduardo Gonçalves. **Modelos numéricos aplicados a vulcanização de pneus**. 2001. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção: Função Estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- PREVIATI, G.; KALISKE, M. Crack propagation in pneumatic tires: Continuum mechanics and fracture mechanics approaches. **International Journal of Fatigue**, Milan. v. 37. p. 69-78, Oct. 2011.
- RICARDO, Hélio de Souza; CATALANI, Guilherme. **Manual Prático de Escavação: Terraplanagem e Escavação de Rocha**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2007.
- RO, Hee S. **Modeling and interpretation of fatigue failure initiation in rubber related to pneumatic tires**. 1989. 150f. Tese (Doutorado) - Purdue University, Ann Arbor, 1989.
- SCHUBEL, P.M.; GDOUTOS, E.E.; DANIEL, I.M. Fatigue characterization of tire rubber. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Evanston. v.42. p. 149-154, 2004.
- SHUKLA, Arun. **Practical Fracture Mechanics in Design**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2005.
- STONE, Richard; BALL, Jeffrey K. **Automotive Engineering Fundamentals**. Warrendale: SAE International, 2004.
- TRIOLA, Mario F. **Introdução à Estatística: Atualização da Tecnologia**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Tire Aging:** A Summary of NHTSA's Work. [S.l.]: National Highway Traffic Safety Administration, 2014.

VIEIRA C. S., BRITO, P. P. Algoritmo para previsibilidade de vida útil por fadiga em pneus de caminhões fora-de-via. In: XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, **Anais...** Rio de Janeiro: ABMEC, 2015. v.1.

WEISBERG, Sanford. **Applied Linear Regression**. 3. ed. New Jersey: Wiley & Sons, 2005.

WONG, J. Y. **Theory of ground vehicles**, 3. ed. Ottawa: John Wiley & Sons, 2001.

ANEXO A – Coeficiente K_1 para cálculo do TKPH

Coeficiente K_1														
L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1
			11	6,8	1,13	21	13,0	1,19	31	19,3	1,21	41	25,5	1,23
			12	7,4	1,14	22	13,7	1,19	32	19,9	1,21	42	26,1	1,23
			13	8,0	1,15	23	14,3	1,20	33	20,5	1,22	43	26,7	1,23
			14	8,7	1,16	24	14,9	1,20	34	21,1	1,22	44	27,3	1,23
5	3,1	1,00	15	9,3	1,16	25	15,5	1,20	35	21,7	1,22	45	28,0	1,23
6	3,7	1,04	16	9,9	1,17	26	16,2	1,20	36	22,4	1,22	46	28,6	1,23
7	4,3	1,06	17	10,6	1,17	27	16,8	1,21	37	23,0	1,22	47	29,2	1,23
8	5,0	1,09	18	11,2	1,18	28	17,4	1,21	38	23,6	1,22	48	29,8	1,23
9	5,6	1,10	19	11,8	1,18	29	18,0	1,21	39	24,2	1,22	49	30,4	1,23
10	6,2	1,12	20	12,4	1,19	30	18,6	1,21	40	25,0	1,22	50	31,0	1,23

L= Comprimento do ciclo em quilômetros (km) ou milhas (ml)

Fonte: Adaptado de MICHELIN, 2012b, p.109

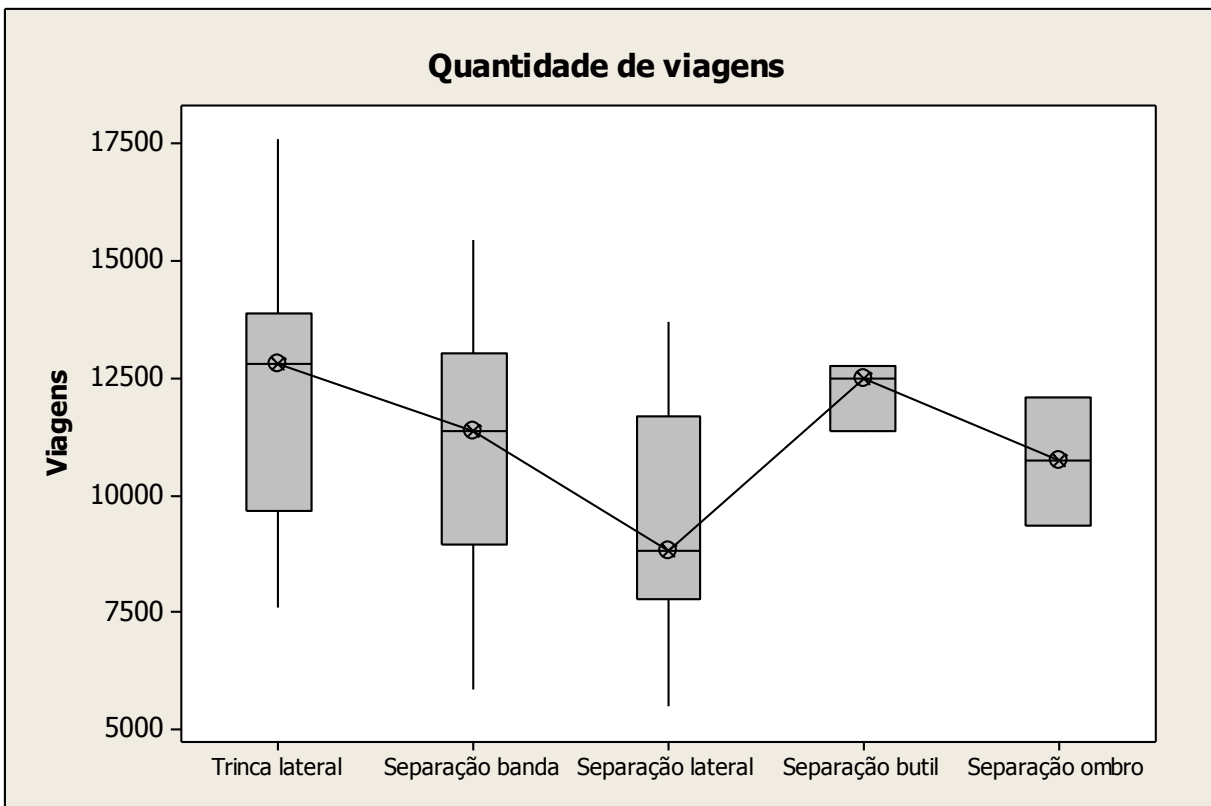
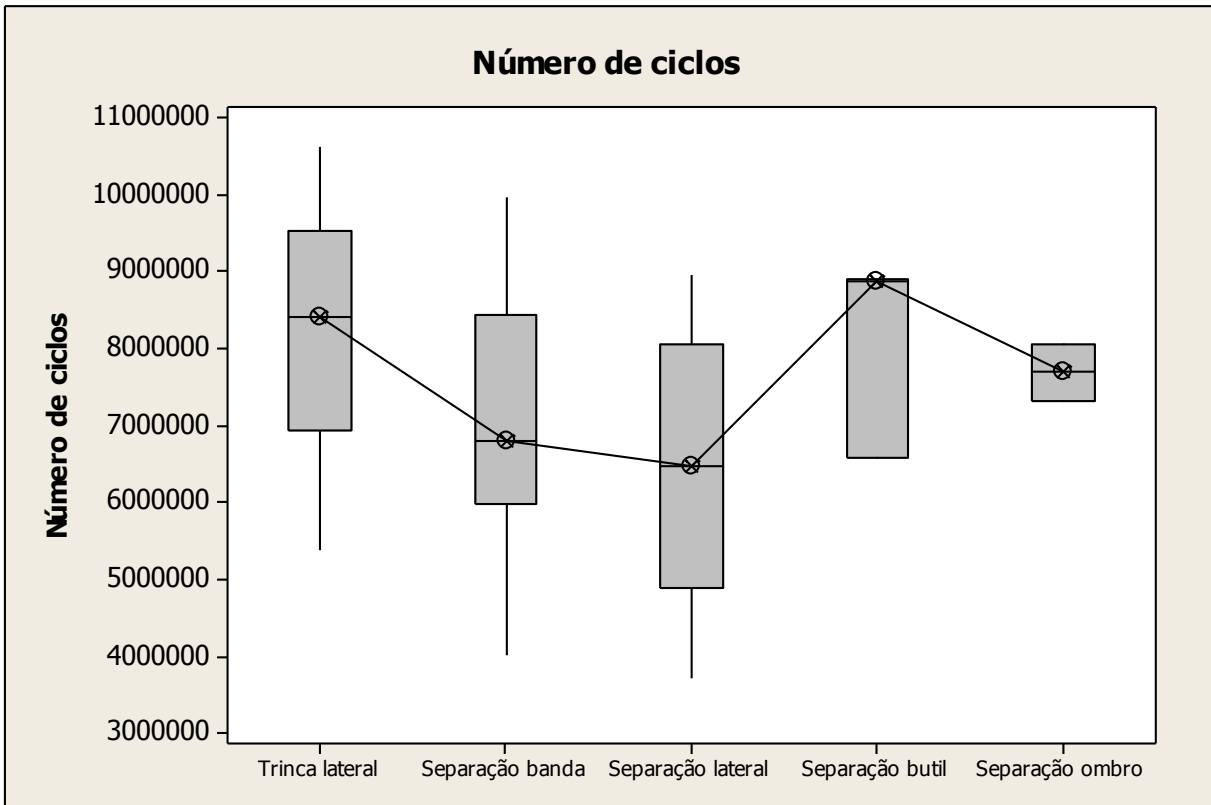
ANEXO B – Coeficiente K_2 para cálculo do TKPH

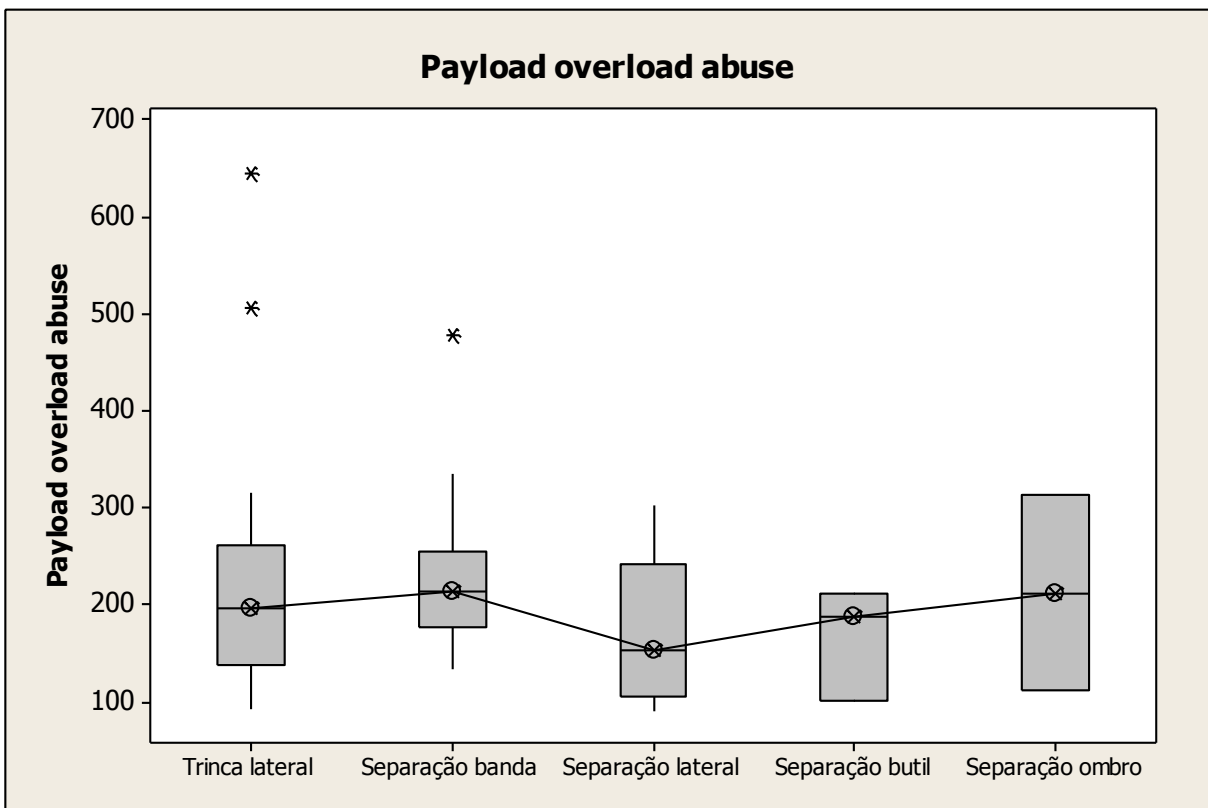
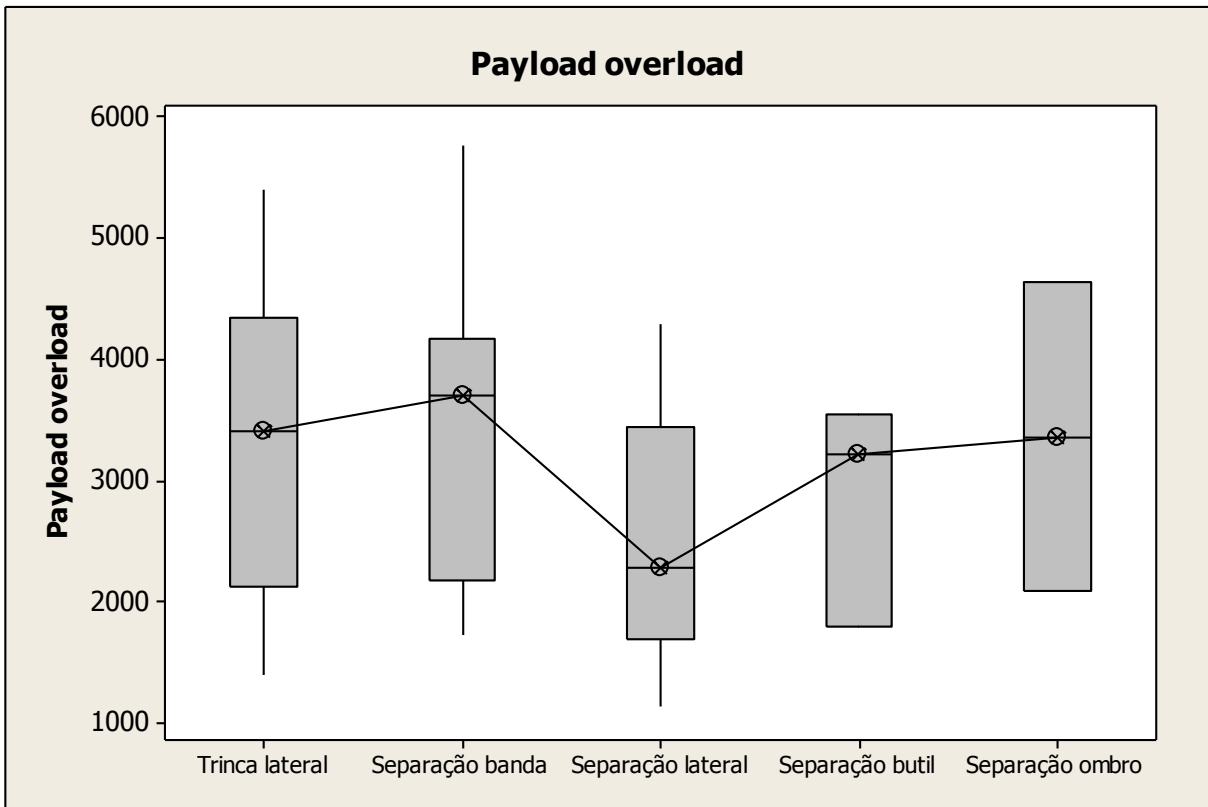
Coeficiente K_2															
Temperatura ambiente (°C)															
Vm (Km)	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40	42,5	45	47,5	50
10	0,635	0,661	0,69	0,721	0,755	0,792	0,833	0,879	0,93	0,988	1,087	1,22	1,389	1,613	1,923
12	0,676	0,701	0,727	0,756	0,787	0,821	0,857	0,897	0,941	0,99	1,071	1,176	1,304	1,463	1,667
14	0,709	0,732	0,757	0,783	0,812	0,842	0,875	0,911	0,949	0,991	1,061	1,148	1,25	1,373	1,522
16	0,736	0,757	0,78	0,805	0,831	0,859	0,889	0,921	0,955	0,992	1,053	1,127	1,212	1,311	1,429
18	0,758	0,778	0,8	0,823	0,847	0,873	0,900	0,929	0,96	0,993	1,047	1,111	1,184	1,268	1,364
20	0,777	0,796	0,816	0,838	0,86	0,884	0,909	0,936	0,964	0,994	1,042	1,099	1,163	1,235	1,316
21	0,785	0,804	0,824	0,844	0,866	0,889	0,913	0,939	0,966	0,994	1,04	1,094	1,154	1,221	1,296
22	0,793	0,811	0,83	0,85	0,871	0,893	0,917	0,941	0,967	0,994	1,038	1,089	1,146	1,209	1,279
24	0,807	0,824	0,842	0,861	0,881	0,901	0,923	0,946	0,97	0,995	1,034	1,081	1,132	1,188	1,25
26	0,819	0,835	0,852	0,87	0,889	0,908	0,929	0,95	0,972	0,995	1,032	1,074	1,121	1,171	1,226
28	0,83	0,845	0,862	0,878	0,896	0,914	0,933	0,953	0,974	0,996	1,029	1,069	1,111	1,157	1,207
30	0,839	0,854	0,87	0,886	0,902	0,92	0,938	0,956	0,976	0,996	1,027	1,064	1,103	1,145	1,19
32	0,848	0,862	0,877	0,892	0,908	0,924	0,941	0,959	0,977	0,996	1,026	1,06	1,096	1,135	1,176
34	0,855	0,869	0,883	0,898	0,913	0,928	0,944	0,961	0,978	0,996	1,024	1,056	1,09	1,126	1,164
36	0,862	0,875	0,889	0,903	0,917	0,932	0,947	0,963	0,98	0,997	1,023	1,053	1,084	1,118	1,154
38	0,869	0,881	0,894	0,907	0,921	0,935	0,95	0,965	0,981	0,997	1,022	1,05	1,08	1,111	1,145
40	0,874	0,886	0,899	0,912	0,925	0,938	0,952	0,967	0,982	0,997	1,02	1,047	1,075	1,105	1,136

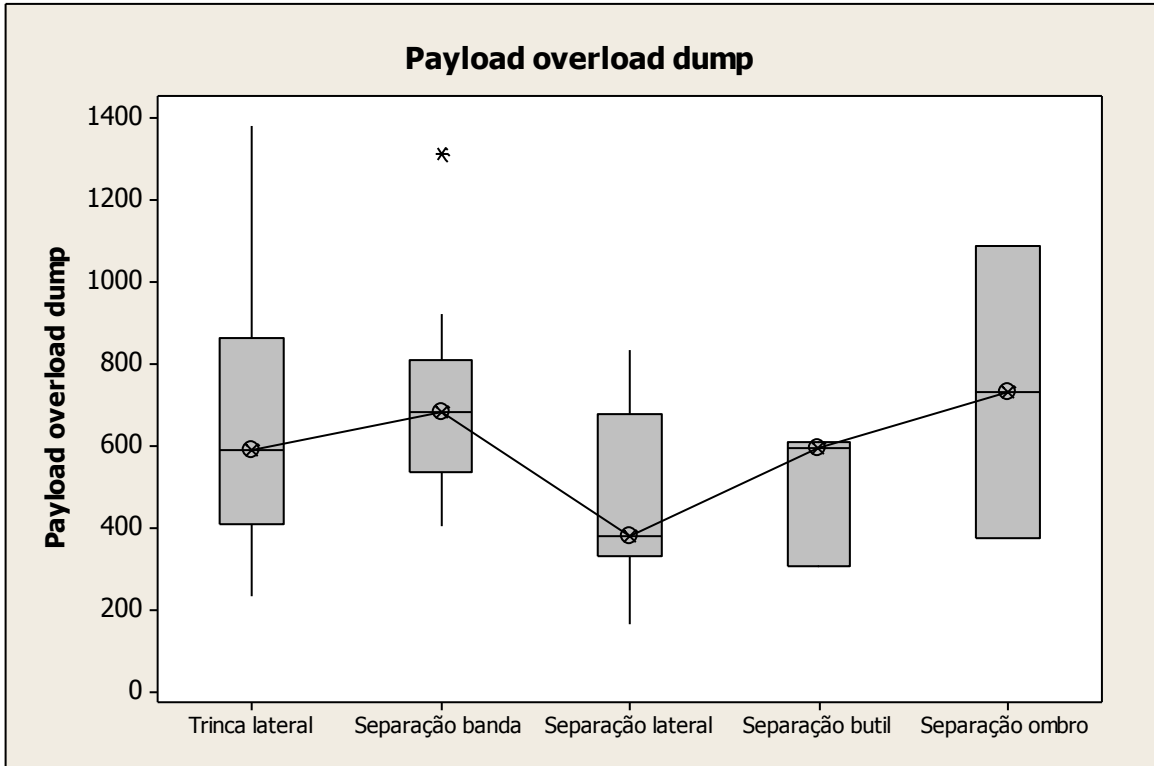
Vm = Quantidade de quilômetros percorridos em uma hora.

Fonte: Adaptado de MICHELIN, 2012b, p.109

APÊNDICE A – Gráficos de caixa ou blox-plot para modos de falha de pneus







Fonte: Elaborado pelo Autor.