



ALGORITMO PARA PREVISIBILIDADE DE VIDA ÚTIL POR FADIGA EM PNEUS DE CAMINHÕES FORA-DE-VIA

Clério Santos Vieira

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito

cleriovieira@hotmail.com

pbrito@pucminas.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/MG

Avenida Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, CEP: 30535-901, Minas Gerais, Brasil

Abstract. *Este trabalho descreve um algoritmo para determinação de vida útil por fadiga em pneus de caminhões fora-de-via utilizados em minerações a céu aberto. 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. Dados de distâncias e tempos em que os pneus operaram com e sem carga durante seu ciclo de trabalho normal são utilizados como parâmetros para o cálculo. Os parâmetros de tensão utilizados são oriundos do sistema de pesagem destes veículos. Dados dos pressostatos embarcados nas suspensões hidropneumáticas informam as distribuições de cargas nos eixos dos veículos ao longo de todo seu percurso de trabalho. Os esforços gerados na dinâmica operacional dos caminhões: picos de solicitações em virtude das frenagens, acelerações tangenciais nas curvas, componentes geradas devido às inclinações das pistas de rolamento, bem como depressões e intempéries também presentes nas pistas também são consideradas no cálculo. Todos os dados, transmitidos via sistemas de telemetria e também pelo sistema de despacho eletrônico são utilizados na análise e quantificação do processo de fadiga. A validação do modelo é então feita através da correlação dos dados acima descritos para pneus que falharam por separação das lonas, resultante do fenômeno de fadiga.*

Keywords: *Fadiga, Pneu, Caminhões fora-de-via, Telemetria.*

1 INTRODUÇÃO

Em virtude das várias solicitações durante seu trabalho, um pneu pode atingir o final de vida útil por motivos distintos. 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 os inutilizam; e a fadiga representada como a exaustão da resistência mecânica da carcaça do pneu. O gráfico da fig. 1 detalha o universo de pneus, com se respectivos motivos de sucateamento, aplicados em caminhões fora-de-via de 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.

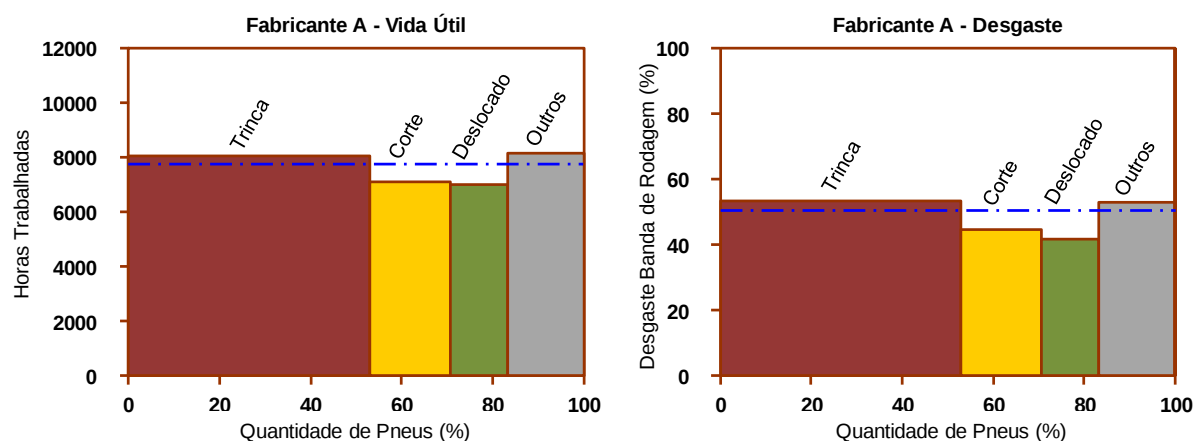


Figura 1. Motivos de sucateamento de pneus: Pesquisa de campo

Percebe-se, através dos dados da fig. 1, que a quantidade de pneus sucateados com causas relacionadas com a fadiga representa mais de 60% da quantidade total de pneus. Nota-se ainda um grande potencial de aumento da utilização destes componentes, pois estes foram sucateados com remanescente médio de mais de 40% da espessura original da banda de rodagem. Como o pneu é um insumo de grande representatividade no processo produtivo de uma mina, maximizar sua utilização pode trazer uma redução significativa nas despesas de uma mineração. Em um trabalho recentemente publicado, a Caterpillar (2013) revela que os gastos com pneus dos caminhões fora-de-via representam 16% do custo operacional total desta máquina.

Outro grande motivador para o trabalho é que as falhas por fadiga normalmente ocorrem muitas vezes abruptamente. Potenciais danos pessoais e materiais podem ser evitados caso ocorra uma atuação antes do atingimento do limite de vida útil por fadiga em um pneu (Previati et al., 2011).

1.1 Fadiga em compósitos de borracha

Mark et al. (2013) destaca 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 (1) representa tal princípio, onde G_c é a energia na ponta da trinca requerida para fraturar uma unidade de volume de borracha:

$$2k.l.U \geq G_c \quad (1)$$

As demais variáveis da eq. 1 são a energia de deformação acumulada por unidade de volume do material (U), a constante numérica que depende da deformação aplicada (k) e o comprimento da trinca (l).

Nota-se que não é explicitamente evidenciada na eq. 1 a tensão aplicada. A mesma está implícita na energia de deformação acumulada, ou seja:

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

O crescimento da trinca de fadiga é regido então pela eq. 3:

$$\frac{\Delta l}{l^\alpha} = (2k.U)^\alpha B.\Delta n \quad (3)$$

Onde n é número de vezes em que o material é imposto à deformação e α é a 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:

$$l_0^{(1-\alpha)} - l^{(1-\alpha)} = (2k.U)^\alpha B.N \quad (4)$$

Além dos conceitos 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 que compõem o pneu. Os conceitos de energia de deformação são aplicados nestes elastômeros de forma a modelar o crescimento de trincas de fadiga nesta região, culminando no deslocamento entre 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 se origina na 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.

Além disso, 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-existentes 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 et al., 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.

Complementarmente, Mars et al. (2004) em sua obra destaca 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 e 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 deve ser observada. Destaca-se que elevadas temperaturas tem efeito danoso à borracha, 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 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 deflexões enquanto suas temperaturas de trabalho também se elevam, culminando em falhas nesta região do pneu. Os efeitos mais comuns de tais falhas é 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 2 ilustra uma separação próxima à região da borda de retorno da carcaça do pneu, gerando uma protuberância em sua parede lateral.



Figura 2. Separação entre a borracha e carcaça na parede lateral de um pneu: Pesquisa de Campo

A figura 3 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, falha característica de sobre flexões da sua parede lateral. Todos estes modos de falha estão associados à redução na durabilidade de pneus (Archibald et al., 2010).



Figura 3. Trincas na parede lateral e erosões na região de assentamento do talão: Pesquisa de Campo

Os pneus de equipamentos de mineração, em plena carga, exigem muitas vezes que os seus pneus operem próximo do limite de capacidade de carga estática (Milliken, 2005). Neste caso os fabricantes de pneus utilizados em equipamentos pesados de transporte de cargas, como a Michelin (2012), 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:

$$TKPH_{Operacional} = Q_m \cdot V_m \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (5)$$

Os termos Q_m e V_m da eq. (5) referem-se respectivamente a carga média e a velocidade média aplicadas no pneu no período avaliado. Os Coeficientes K_1 e K_2 são tabelados pelos fabricantes de pneus.

Através das variáveis descritas na eq. (5) pode-se calcular o $TKPH_{Operacional}$ em que o pneu está submetido. Os fabricantes definem valores de TKPH máximos 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 condição da eq. (6), caso contrário danos materiais e acidentes pessoais, além da redução da vida útil dos pneus podem ser percebidas:

$$TKPH_{Operacional} \leq TKPH_{Projeto} \quad (6)$$

2 MATERIAL

Todos os dados utilizados neste trabalho são originados de sistemas de monitoramento de dados já embarcados nas máquinas. A frota de caminhões em estudo conta com sistemas de

monitoramento e transmissão de dados em tempo real, composto por sensores e centrais eletrônicas que, além de transmitir para um servidor que pode ser acessado do escritório, também registraram os dados que subsidiaram o modelo matemático de previsibilidade aqui apresentado.

2.1 Variáveis do Sistema de Despacho Eletrônico

O sistema de despacho eletrônico é utilizado para gerenciar 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.

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 1:

Tabela 1. Conceituação dos parâmetros monitorados pelo sistema de despacho eletrônico

Parâmetro	Sigla	Unidade	Descrição
Viagens Válidas	ε	-	Quantidade de viagens efetivamente transportadas pelo caminhão e despejadas no ponto de destino
Tempo Vazio	α	h	Tempo que o caminhão se deslocou sem carga
Tempo Cheio	β	h	Tempo que o caminhão se deslocou carregado
Distância Vazio	θ	km	Distância que o caminhão se deslocou sem carga
Distância Cheio	δ	km	Distância que o caminhão se deslocou com carga
Movimentação Oficial	ϕ	ton	Somatório das cargas transportadas pelo caminhão
Velocidade Vazio	-	km/h	Velocidade que o caminhão se deslocou sem carga
Velocidade Cheio	-	km/h	Velocidade que o caminhão se deslocou carregado
Velocidade Média	-	km/h	Velocidade média, em quilômetros por hora, do deslocamento total do caminhão
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 Oficial	-	ton/h	É a razão entre a movimentação e os tempos de deslocamento cheio e vazio
Carga Média Oficial	-	ton	Representa a média de todas as cargas transportadas pelo caminhão
Horas Trabalhadas	<i>HT</i>	h	Horas em trabalho de um equipamento ou componente

Cada uma das variáveis descritas na tabela 1 pode ser quantificada para qualquer período desejado.

2.2 Sistema de controle e 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 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, os caminhões fora-de-via atuais são 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.

Esta tecnologia permite que sistemas de controle e análise de pista gerenciem condições operacionais, 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 destes dados mensurados de forma objetiva que alertam ao operador e 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 monitoramento no escritório via sistema de telemetria os alarmes de sobre esforços operacionais.

No caso específico de pneus, a Caterpillar (2012) afirma que os alarmes indicam que a vida útil esperada dos pneus será reduzida devido a causas qualificadas como abuso da máquina, indicando que o caminhão pode estar sendo guiado com velocidades incompatíveis com a condição da pista, sendo sobrecarregado ou conduzido em pistas com buracos. Falhas prematuras nos pneus podem indicar estes abusos operacionais estão ocorrendo. As falhas nos pneus podem ser deslocamento nas paredes laterais ou entre suas lonas.

Através de pressostatos utilizados nos cilindros hidropneumáticos de cada uma das quatro suspensões, que também são utilizados para medição da carga útil transportada pelo caminhão, medem os movimentos de tendência de rotação de arfagem (do inglês pitch) de rolagem (do inglês roll ou bias) e de guinada (do inglês yaw ou rack) impostos ao veículo.

Carvalho (2014) define o movimento de arfagem 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 são abaixo listadas para a geração do movimento de arfagem:

- a) Frenagens bruscas
- b) Esterçamento brusco da direção
- c) Veículo conduzido sobre buracos
- d) Veículo subindo carregado
- e) Veículo descendo carregado
- f) Posicionamento da carga descentralizada longitudinalmente

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

$$Pitch = (P_{suspensãoM} + P_{suspensãoD}) - (P_{suspensãoE} + P_{suspensãoT}) \geq 23944kPa \quad (7)$$

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

$$Bias = (P_{suspensãoM} + P_{suspensãoE}) - (P_{suspensãoD} + P_{suspensãoT}) \geq 23944kPa \quad (8)$$

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.

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

$$Rack = (P_{suspensãoM} + P_{suspensãoT}) - (P_{suspensãoD} + P_{suspensãoE}) \geq 23944kPa \quad (9)$$

Quando ultrapassados os limites das eq. (7), (8) e (9), o computador de bordo da máquina registra e transmite em tempo real, para o sistema de telemetria, tais alarmes. Os alarmes de pitch, bias e rack são representados neste trabalho respectivamente pelas siglas γ , φ e η .

2.3 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, dente eles os pneus, e que podem também afetar a segurança do operador.

Interligado ao computador de bordo da máquina este sistema registra e administra as cargas transportadas, informando ao operador e a equipe de escritório, através dos sistemas de despacho eletrônico e do sistema de telemetria por meio de uma rede sem fio, o valor das cargas transportadas. Com base no peso alvo da carga útil e nas configurações de sobrecarga, o sistema avisa também registra e avisa ao operador, através de um painel instalado na cabine de comando quando o caminhão atinge uma sobrecarga após a repesagem quando o mesmo 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 monitoram e convertem os dados de pressão em carga transportada pelo caminhão.

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

2.4 Sistema de monitoramento de pressão e temperatura de pneus

Os principais motivos da utilização de sistema de monitoramento de pressão e temperatura de trabalho de pneus é a busca pelo aumento da vida útil destes, garantindo a operação 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). Além disso, estes sistemas possuem ainda uma lógica programável que exhibe alarmes na cabine de operação do caminhão, caso a temperatura ou a pressão atinjam valores fora dos limites de trabalho recomendados.

Os dados e alarmes oriundos do sistema de monitoramento de pressão e temperatura de pneus são também transmitidos, em tempo real, pelo o sistema de telemetria da mina para uma base de dados que pode ser acessada no escritório.

3 MÉTODOS

Avalia-se na tabela 2 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. Os dados utilizados referem-se a uma base de 38 pneus sucateados cujos modos de falha estão correlacionados com a fadiga.

Tabela 2. Análise de Correlação

	Horas Trabalhadas	Viagens validas	Tempo vazio	Tempo cheio
Viagens validas	0,974 (0,000)			
Tempo vazio	0,987 (0,000)	0,964 (0,000)		
Tempo cheio	0,988 (0,000)	0,952 (0,000)	0,993 (0,000)	
Distancia vazio	0,989 (0,000)	0,964 (0,000)	0,997 (0,000)	0,994 (0,000)
Distancia cheio	0,990 (0,000)	0,958 (0,000)	0,995 (0,000)	0,997 (0,000)
Movimentação oficial	0,979 (0,000)	0,999 (0,000)	0,971 (0,000)	0,960 (0,000)
Bias	0,694 (0,000)	0,694 (0,000)	0,664 (0,000)	0,660 (0,000)
Pitch	0,544 (0,000)	0,554 (0,000)	0,537 (0,000)	0,535 (0,000)
Rack	0,592 (0,000)	0,559 (0,000)	0,593 (0,000)	0,574 (0,000)
Payload overload	0,613 (0,000)	0,678 (0,000)	0,586 (0,000)	0,557 (0,000)
Payload overload abuse	0,346 (0,031)	0,376 (0,018)	0,298 (0,066)	0,300 (0,063)
Payload overload dump	0,547 (0,000)	0,588 (0,000)	0,521 (0,001)	0,505 (0,001)
Velocidade vazio	-0,049 (0,767)	-0,066 (0,688)	-0,084 (0,611)	-0,057 (0,731)
Velocidade cheio	0,053	0,116	0,040	-0,028

	(0,750)	(0,482)	(0,807)	(0,865)
Velocidade média	-0,150 (0,362)	-0,116 (0,482)	-0,175 (0,286)	-0,194 (0,235)
DMT	0,164 (0,318)	-0,005 (0,978)	0,217 (0,184)	0,250 (0,124)
Produtividade oficial	-0,165 (0,315)	0,001 (0,995)	-0,213 (0,194)	-0,253 (0,120)
Carga média oficial	-0,027 (0,869)	-0,005 (0,975)	0,011 (0,945)	-0,024 (0,883)

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

Avaliando-se as correlações entre as horas trabalhadas de pneus sucateados por fadiga com as demais variáveis em estudo, estão destacados os resultados cujas forças de associação são definidas, moderadas, altas e muito altas (cujo coeficiente de correlação é maior em módulo que 0,21) e também considerando correlação significativa aquela com $p \leq 0,05$ (Hair et. al., 2005). Com isso as variáveis com baixa correlação, como por exemplo, a carga média oficial transportada pelos caminhões cujos pneus fadigados operaram, foram descartadas.

Os dados que apresentam correlação significativa são então correlacionados com a vida útil de pneus, através da análise de regressão múltipla. Esta técnica utiliza uma única variável dependente métrica (Y) relacionada com k variáveis independentes também métricas (X), com o objetivo de encontrar um modelo matemático que relacione e explique o comportamento da variável dependente.

Utilizando-se as horas trabalhadas do pneu como variável dependente e os dados monitorados pelos supervisórios como independentes, através da metodologia de análise de regressão linear múltipla a seguinte equação foi então construída:

$$\begin{aligned} \text{HorasTrabalhadas} = & -359 + 060.\alpha - 0,57.\beta - 0,223.\theta + 0,329.\delta + 0,370.\varepsilon - \\ & 0,00040.\phi + 0,025.\varphi - 5,64.\gamma + 0,043.\eta - 0,023.\psi + 1,11.\lambda - 0,08.\mu \end{aligned} \quad (10)$$

Os resultados deste modelo são apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Modelo ajustado para análise de regressão linear múltipla

	Coeficiente	Desvio-padrão	T	P
Constante	-358,8	168,5	-2,13	0,043
Viagens validas	0,3704	0,4713	0,79	0,439

Tempo vazio	0,605	1,053	0,57	0,570
Tempo cheio	-0,573	1,032	-0,56	0,583
Distancia vazio	-0,2228	0,1300	-1,71	0,098
Distancia cheio	0,3288	0,1246	2,64	0,014
Movimentação oficial	-0,000400	0,002005	-0,20	0,843
Bias	0,0250	0,1742	0,14	0,887
Pitch	-5,639	9,545	-0,59	0,560
Rack	0,0432	0,1029	0,42	0,678
Payload overload	-0,0229	0,2188	-0,10	0,917
Payload overload abuse	1,113	1,545	0,72	0,478
Payload overload dump	-0,082	1,196	-0,07	0,946

$R^2=99,2\%$; R^2 ajustado=98,8%

Os dados da eq. (10) acima descrita são então utilizados para a construção do algoritmo descrito a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fluxograma da fig. 4 descreve as etapas de levantamento de dados e metodologia de cálculo do algoritmo. Os dados de entrada são oriundos de três bases distintas e são essenciais para a assertividade dos resultados. Por este motivo, todos os dados devem ser preenchidos com a maior assertividade possível.

As informações referentes ao tipo de equipamento e características técnicas dos pneus nele aplicados podem ser levantadas em campo ou através dos catálogos dos fabricantes. Já os dados referentes às distâncias, tempos, quantidades e cargas transportadas são oriundas do sistema de despacho eletrônico da mina. Por fim, os dados dos alarmes dos sistemas de monitoramento são provenientes do banco de dados do sistema de telemetria.

Para maximizar a assertividade do cálculo do algoritmo, é necessário que se compare o TKPH operacional com o TKPH do pneu, recomendado pelo seu fabricante. Este cálculo é feito através da eq. (6). Caso esta condição seja atendida, os demais dados devem ser digitados e, através da eq. (10) pode ser estimada a vida útil por fadiga do pneu alvo de análise.

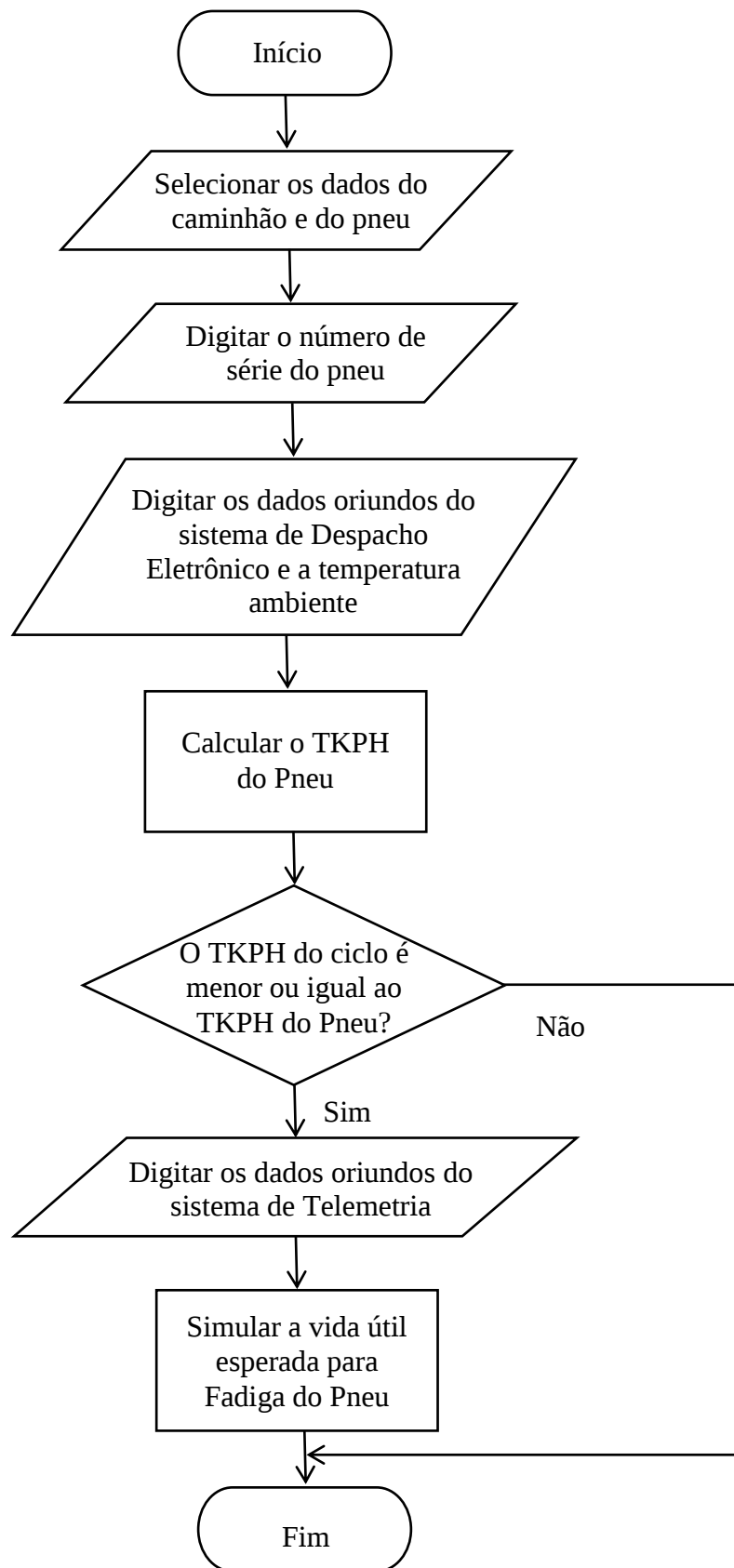


Figura 4. Algoritmo de previsão de fadiga em pneus de caminhões fora-de-via

5 CONCLUSÃO

Através da análise de correlação foi possível elencar as variáveis monitoradas pelos próprios supervisórios dos caminhões fora-de-via possuem covariação com a vida útil dos pneus nestas máquinas instalados. Verificou-se que a técnica de análise de regressão linear múltipla apresenta um bom ajustamento dos dados destes mesmos sistemas de monitoramento.

Através de técnicas estatísticas simples, conclui-se que é possível prever, com boa assertividade, quando um pneu utilizado em mineração está próximo de chegar à exaustão da capacidade de trabalho de sua carcaça. Esta medida de previsibilidade pode apoiar em várias etapas da cadeia produtiva de uma empresa de mineração como, por exemplo, no planejamento de estoque, orçamento e produção da mina. Pode ainda ajudar a prever e antecipar falhas inesperadas, já que o fenômeno da fadiga como anteriormente descrito, pode ocorrer de forma inesperada e gerar acidentes operacionais graves.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/MG e a Vale por todo o apoio prestado.

REFERENCIAS

- Archibald, K., Brown, K., Woehrle, W., 2010. *Failure Modes of Steel Belted Radial Passenger Tires which have been Run Over-deflected on a Wheel Fatigue Test*. TREAD Act.
- Bradley, A., 2009. *Introduction to Tire Pressure Control Systems (TPCS) and synthesis os key research findings in highway and urban applications*. FPInnovations-Vancouver.
- Bridgestone, 2007. *Off-the-road tires maintenance*. Bridgestone Off-the-road Tire Department – Tokyo.
- Carvalho, W., 2014. *Validação experimental da similaridade dinâmica para veículos*. Dissertação (Mestrado), Instituto Militar de Engenharia/Rio de Janeiro.
- Caterpillar, 2013. *A Reference Guide to Surface Mining Applications – Field Guide*. Caterpillar-Peoria.
- Caterpillar, 2002. *Cat® Road Analysis Control (RAC) for Cat 785C, 789C, 793C and 797B Mining Trucks*.
- Caterpillar, 2012. *Systems Operation General Information: Road Analysis Control (RAC) for Off-Highway Truck/Tractors*, media number RENR2636-07.
- Han, Y., 2003. *Fatigue Life Prediction for Cord-Rubber Composite Tires Using a Global-Local Finite Element Method*. Tese (Doutorado), University of Texas/Austin.
- Hatajima, C., 2010. *Modelo Matemático para Cálculo e Avaliação de Desgaste em Pneus OTR Aplicados a Caminhões Pesados*. Monografia (Especialização), Universidade Federal de Ouro Preto/Ouro Preto.

- Hair, J., Babin, B., Money, A., Samouel, P., 2005. *Fundamentos de Métodos de Pesquisa em Administração*. Bookman-Porto Alegre.
- Mark, J., Erman, B., Roland, M., 2013. *The Science and Technology of Rubber*. Academic Press- Waltham.
- Mars, W.V., Fatemi, A., 2002. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. *International Journal of Fatigue*. vol. 24. pp. 949-961.
- Michelin, 2012. *Technical Data - Earthmover Tyres*. Michelin-Clermont-Ferrand.
- Milliken, W.F., Milliken, D.L., 1995. *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International-Warrendale.
- Previati, G., Kaliske, M., 2011. Crack propagation in pneumatic tires: Continuum mechanics and fracture mechanics approaches. *International Journal of Fatigue*, vol. 37, pp. 69-78.
- Wong, J. Y., 2001. *Theory of ground vehicles*, John Wiley & Sons- Ottawa.