



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**Arthur Guilherme Pinheiro Kappaun**

**Estudo da aplicação da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões  
fora-de-estrada: o caso de uma mineradora**

**OURO PRETO - MG**  
**2023**

**Arthur Guilherme Pinheiro Kappaun**  
**arthur.kappaun33@gmail.com**

**Estudo da aplicação da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões  
fora-de-estrada: o caso de uma mineradora**

Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Ouro Preto  
como requisito para a obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** DSc. Washington Luis Vieira da Silva

**OURO PRETO – MG**  
**2023**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

K17e Kappaun, Arthur Guilherme Pinheiro.  
Estudo da aplicação da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões fora-de-estrada [manuscrito]: o caso de uma mineradora. / Arthur Guilherme Pinheiro Kappaun. - 2023.  
71 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Washington Luis Vieira Silva.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Confiabilidade (Engenharia). 2. Engenharia - Manutenção. 3. Equipamentos industriais - Caminhão fora-de-estrada. 4. Análise de dados de vida (LDA - Life Data Analysis). 5. Princípios e parâmetros - Princípio de Pareto. I. Silva, Washington Luis Vieira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Arthur Guilherme Pinheiro Kappaun**

**Estudo da aplicação da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões fora-de-estrada: o caso de uma mineradora**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 29 de Junho de 2023

### Membros da banca

DSc. Washington Luis Vieira da Siva - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DSc. Diogo Antônio de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)  
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Washington Luis Vieira da Siva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/07/2023



Documento assinado eletronicamente por **Washington Luis Vieira da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/07/2023, às 20:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0558483** e o código CRC **7FA42A5E**.

Dedico esse trabalho a minha família, em especial aos meus pais Marcelo e Edneia, meus irmãos Marcelo H. e Rúbia e a minha querida avó Janette, por todo o amor e apoio ao longo dessa jornada.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus por ter concluído essa etapa em minha vida. Agradeço aos meus pais e familiares por seu apoio incondicional, que foram minha força durante toda essa jornada.

Quero estender meus agradecimentos ao meu orientador, DSc. Washington Luis Vieira da Silva, pelo incentivo constante e valiosa orientação ao longo deste trabalho. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para o seu desenvolvimento.

Aos professores do curso de engenharia mecânica, sou grato pelas suas importantes contribuições, que ajudaram para o aprimoramento deste trabalho. Seus ensinamentos foram de grande importância para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Também gostaria de agradecer à vida republicana de Ouro Preto, que me acolheu durante esses 5 anos. A convivência me proporcionou valiosos aprendizados sobre responsabilidades e o convívio em sociedade. Agradeço a todos os ex-alunos e atuais moradores que estiveram presentes, tornando-se uma segunda família para mim durante esse período.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento. Sem o apoio e suporte, essa conquista não seria possível.

*“Todo conhecimento implica poder, pois tudo que falamos e/ou fazemos implica um ato de exteriorizar o nosso conhecimento, ou seja, falamos e fazemos porque temos conhecimento, e isto é poder.”*

Friedrich Nietzsche

## RESUMO

O presente trabalho consiste em um estudo de confiabilidade em caminhões fora de estrada, com foco na análise e detecção de falhas dos pneus OTR (*Off The Road*). Utilizando uma metodologia de estudo de caso aplicada a uma empresa de mineração, foram analisados registros e informações sobre paradas programadas e não programadas dos caminhões. A análise de confiabilidade, por meio do gráfico de Pareto, permitiu quantificar e qualificar as falhas ocorridas. Os principais modos de falha identificados foram desgaste normal (61 perdas de pneus), forçado (19 perdas de pneus), cortes no pneu (8 perdas) e separação mecânica (14 perdas), que resultaram em paradas não programadas. O estudo proporcionou a identificação desses modos de falha dos pneus dos caminhões fora de estrada, possibilitando a sugestão de manutenções preventivas e a implementação de ações corretivas para eliminar ou minimizar suas causas. Utilizando a análise de dados de vidas (LDA - *Life Data Analysis*), foram determinadas as curvas de confiabilidade de cada modelo de pneu, bem como a densidade de probabilidades de falhas e a taxa de falhas. Esse estudo permitiu identificar os modos de falha mais impactantes, recomendando ações para tratar suas causas raízes, como a manutenção das pistas para remover objetos cortantes e a suavização de curvas e rampas inclinadas.

**Palavras-chave:** Pareto, Análise de dados de vida, Caminhões Fora de Estrada, Confiabilidade, Engenharia da Manutenção.

## ABSTRACT

*The present work consists of a reliability study in off-road trucks, focusing on the analysis and detection of failures in Off The Road (OTR) tires. Using a case study methodology applied to a mining company, records and information regarding scheduled and unscheduled truck stoppages were analyzed. Reliability analysis, through Pareto charts, allowed for the quantification and qualification of the observed failures. The main failure modes identified were normal wear (61 tire losses), forced wear (19 tire losses), tire cuts (8 losses), and mechanical separation (14 losses), resulting in unscheduled stoppages. The study enabled the identification of these failure modes in off-road truck tires, providing suggestions for preventive maintenance and the implementation of corrective actions to eliminate or minimize their causes. Utilizing life data analysis (LDA), reliability curves for each tire model, as well as probability density of failures and failure rates, were determined. This study allowed for the identification of the most impactful failure modes, recommending actions to address their root causes, such as maintaining road surfaces to remove sharp objects and smoothing curves and inclined ramps.*

**Keywords:** *Pareto, Life Data Analysis, Off-road Trucks, Reliability, Maintenance Engineering.*

**LISTA DE SIMBOLOS**

$R(t)$  – Confiabilidade a qualquer tempo  $t$ .

$e$  – Base dos logaritmos neperianos ( $e = 2,718$ ).

$\lambda$  – Taxa de falhas.

$h(t)$  - Função de risco.

$\gamma$  – Parâmetro de forma de Weibull.

$\theta$  – Parâmetro de escala de Weibull.

$f(t)$  - Função densidade de probabilidade.

$n$  - Número de amostras.

$x_i$  - Indica o valor de  $x$  no intervalo  $i$ .

$k$  - É dado por  $\sqrt{n}$ .

**LISTA DE SIGLAS**

LDA – *Life Data Analysis*

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade

MTBF – *Mean Time Between Failure*

MTTF – *Mean Time To Failure*

MTTR – *Mean Time To Repair*

DF – Disponibilidade Física

OTR – *Off The Road*

FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*

FTA – *Failure Tree Analysis*

FCA – Fato, Causa e Ação

RCA – Análise da Causa Raíz

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mudança de paradigma na manutenção. ....	7
Figura 2: Curva P-F. ....	10
Figura 3: Confiabilidade x Custos. ....	14
Figura 4: Comportamento em função do parâmetro de forma da distribuição de Weibull. ....	15
Figura 5: Comportamento da taxa de falha em relação ao parâmetro $\gamma$ . ....	17
Figura 6: Comportamento da densidade de probabilidade em relação ao parâmetro $\gamma$ . ....	18
Figura 7: Comportamento do fator de confiabilidade variando o parâmetro $\gamma$ . ....	19
Figura 8: Diagrama de seleção dos tipos de manutenção a serem aplicados. ....	23
Figura 9: Exemplo de Diagrama de Causa e Efeito. ....	26
Figura 10: Exemplo de Diagrama de Pareto. ....	27
Figura 11: Fluxograma dos materiais e métodos. ....	32
Figura 12: Ciclo de carregamento e transporte de uma mina a céu aberto. ....	35
Figura 13: Organograma da Gerência de Engenharia de Mina. ....	36
Figura 14: Caminhão fora de estrada. ....	38
Figura 15: Construção dos pneus radial e diagonal. ....	40
Figura 16: Comparação de tecnologia dos pneus radial e diagonal. ....	41
Figura 17: Dados da frota 777G inseridos na tela principal do software ProConf 2000. ....	50
Figura 18: Confiabilidade em função do tempo. ....	51
Figura 19: Densidade de probabilidade de falha em função do tempo. ....	52
Figura 20: Taxa de falha em função do tempo. ....	53
Figura 21: Dados da frota 789C inseridos na tela principal do software ProConf 2000. ....	54
Figura 22: Confiabilidade em função do tempo. ....	55
Figura 23: Densidade de probabilidade de falha em função do tempo. ....	56
Figura 24: Taxa de falha em função do tempo. ....	57

Figura 25: Dados das frotas 789D e 730E inseridos na tela principal do software ProConf 2000. .....	58
Figura 26: Confiabilidade em função do tempo. ....	59
Figura 27: Densidade de probabilidade de falha em função do tempo. ....	60
Figura 28: Taxa de falha em função do tempo. ....	61
Figura 29: Ocorrência de falhas dos pneus 27.00R49 da frota 777G.....	62
Figura 30: Ocorrência de falhas dos pneus 37.00R57 da frota 789C.....	62
Figura 31: Ocorrência de falhas dos pneus 40.00R57 da frota 789D e 730E.....	63
Figura 32: Dashboard das principais falhas e falhas adicionais dos pneus das frotas.....	65

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Variáveis e indicadores.....	32
Tabela 2: Dados gerais técnicos. ....	39
Tabela 3: Dados gerais técnicos dos pneus. ....	42
Tabela 4: Manutenção corretiva dos pneus da frota 777G. ....	45
Tabela 5: Manutenção corretiva dos pneus da frota 789C. ....	46
Tabela 6: Manutenção corretiva dos pneus das frotas 789D e 730E.....	47
Tabela 7: Manutenção corretiva dos pneus das frotas 789D e 730E.....	48
Tabela 8: Faixas de confiabilidade para o pneu 27.00R49.....	51
Tabela 9: Faixas de limites técnicos de vida para o pneu 27.00R49.....	52
Tabela 10: Faixas de confiabilidade para o pneu 37.00R57.....	55
Tabela 11: Faixas de confiabilidade para o pneu 37.00R57.....	56
Tabela 12: Faixas de confiabilidade para o pneu 40.00R57.....	59
Tabela 13: Faixas de limites técnicos de vida para o pneu 40.00R57.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral .....	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Manutenção .....	5
2.2	Métodos de manutenção .....	7
2.2.1	Manutenção Corretiva .....	8
2.2.2	Manutenção Preventiva .....	9
2.2.3	Manutenção Preditiva.....	10
2.2.4	Manutenção Detectiva .....	11
2.2.5	Engenharia da Manutenção .....	12
2.3	Confiabilidade .....	13
2.3.1	Análise de Dados de Vida ( <i>Life Data Analysis – LDA</i> ).....	15
2.3.2	Distribuição Estatística de Weibull .....	16
2.3.3	Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1	Tipo de Pesquisa.....	30
3.2	Materiais e Métodos .....	31
3.3	Variáveis e Indicadores .....	32
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	33
3.5	Tabulação dos Dados.....	33
3.6	Considerações Finais do Capítulo .....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
4.1	Características da Empresa.....	34
4.2	Descrição do Componente Estudado: Pneu.....	38
4.2.1	Descrição do Equipamento.....	38
4.2.2	O Pneu OTR .....	39

4.3	Estratificação do Perfil de Perdas .....	44
4.4	Modelagem dos dados utilizando os <i>Softwares</i> Estatísticos.....	49
4.4.1	Frota 777G (Pneu: 27.00R49) .....	49
4.4.2	Frota 789C (Pneu: 37.00R57).....	53
4.4.3	Frota 789D e 730E (Pneu: 40.00R57) .....	57
4.5	Análise das Causas Potenciais de Falhas.....	61
4.6	Redução Projetada de Gastos com os Pneus a partir da aplicação da Confiabilidade 65	
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>67</b>
5.1	CONCLUSÃO.....	67
5.2	Recomendações .....	68
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>69</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

A manutenção desempenha um papel estratégico e essencial dentro de uma empresa, assegurando que os equipamentos estejam sempre prontos para uso nos processos produtivos. Seguindo as diretrizes da NBR 5462 (1994), o setor de manutenção adota técnicas preventivas e preditivas para conservar os ativos, visando minimizar os tempos de paradas e detectar possíveis falhas nos componentes. Ao garantir um dinamismo na liberação dos equipamentos, a manutenção contribui para a continuidade das operações e o cumprimento de metas estabelecidas pela empresa.

Assim, de acordo com a norma NBR 5462 (1994, p.4), a falha é “caracterizada pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos”.

O setor de manutenção desempenha um papel imprescindível na busca da empresa pela redução das paradas em suas operações. É essencial que os equipamentos estejam em perfeito funcionamento para atender à alta demanda de produção, levando em consideração a qualidade dos produtos e a minimização dos custos operacionais (SANTOS, 2003).

Segundo a NBR 5462 (1994, p.6), “manutenção é uma combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

Contudo, a área da manutenção abrange várias atividades. Uma destas atividades é a confiabilidade, que se pode determinar como, segundo a norma NBR 5462 (1994, p.3) “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

Uma das técnicas amplamente utilizadas na área de confiabilidade é a distribuição estatística de Weibull. Conforme mencionado por Barringer (1997), essa técnica foi desenvolvida pelo físico sueco Waloddi Weibull na década de 1940. A distribuição estatística de Weibull envolve a coleta de amostras de falhas em objetos e a plotagem de uma distribuição de probabilidade contínua. Essa análise permite determinar intervalos de confiabilidade em componentes, bem como calcular o tempo médio de vida e a taxa de falhas em relação ao tempo acumulado de operação. Essa abordagem estatística é uma ferramenta valiosa para a análise e previsão da confiabilidade de componentes e sistemas.

No setor de mineração, a confiabilidade é crucial para garantir a disponibilidade dos ativos e cumprir os prazos de produção estabelecidos. Um dos ativos de maior importância nesse ramo são os caminhões fora-de-estrada, responsáveis pelo transporte do minério de ferro. Esses equipamentos desempenham um papel fundamental ao movimentar toneladas de minério para as plantas de beneficiamento. Devido à sua relevância na atividade de mineração, é essencial assegurar o bom funcionamento desses caminhões, principalmente por meio de uma manutenção planejada e cuidadosa de seus componentes. Isso visa garantir o máximo desempenho e confiabilidade desses equipamentos, minimizando assim interrupções não programadas e otimizando a produtividade do processo de mineração.

Diante do exposto, torna-se evidente a necessidade de identificar possíveis falhas nos componentes desses equipamentos, buscando encontrar a causa raiz dos problemas. Nesse contexto, o presente trabalho consiste em um estudo realizado na frota de caminhões fora-de-estrada de uma mineradora, com o objetivo de determinar intervalos de confiabilidade e tempo de vida esperado por meio da manutenção dos pneus. Para alcançar esses objetivos, o seguinte questionamento será abordado:

### **Como aplicar o estudo da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões fora-de-estrada de uma mineradora?**

#### **1.2 Justificativa**

No contexto da confiabilidade, existem conceitos inter-relacionados, tais como qualidade, disponibilidade, manutenibilidade, segurança e confiança. É comum ocorrer confusão entre os conceitos de confiabilidade e qualidade. No entanto, a diferença fundamental entre eles reside na consideração do tempo. Enquanto a confiabilidade abrange a passagem do tempo e implica na capacidade de um item em manter seu desempenho ao longo do tempo, a qualidade é uma descrição estática de um item em um determinado momento. Assim, pode-se afirmar que uma alta confiabilidade geralmente está associada a uma alta qualidade, embora o contrário nem sempre seja verdadeiro (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

O setor industrial atribui grande importância ao minério de ferro, sendo um insumo de relevância significativa. O Brasil se destaca nesse segmento devido à presença das melhores jazidas do mundo, caracterizadas por altos teores de concentração de ferro, alcançando uma média de aproximadamente 60% (CARVALHO *et al.*, 2014).

Segundo Quevedo (2009), os caminhões fora-de-estrada são considerados um dos tipos mais importantes de equipamentos na atividade de mineração, representando aproximadamente metade da frota de equipamentos pesados em minas a céu aberto. O foco deste trabalho recai sobre o estudo dos pneus utilizados nesses caminhões, bem como as estratégias de manutenção empregadas visando prolongar sua vida útil e aumentar seu desempenho. O objetivo é analisar e desenvolver abordagens que contribuam para maximizar a eficiência e a produtividade desses pneus dentro do contexto operacional dos caminhões fora-de-estrada.

Nesse sentido, torna-se relevante realizar um estudo fundamentado na análise estatística da confiabilidade desse componente, pois proporciona informações estratégicas essenciais para os engenheiros e gestores de manutenção. Essas informações são cruciais na tomada de decisões com o objetivo de aprimorar a confiabilidade e o desempenho dos equipamentos, ao mesmo tempo em que se alinha com as metas orçamentárias estabelecidas. Dessa forma, por meio desse estudo, busca-se embasar as decisões estratégicas e otimizar o uso dos recursos disponíveis, visando aumentar a confiabilidade e o desempenho dos pneus.

Em alguns casos, o preço dos pneus pode representar cerca de 10% a 20% do preço total do caminhão, enquanto em outros casos, especialmente para caminhões maiores e mais especializados, o preço dos pneus pode representar uma porcentagem maior do preço total. Essa proporção significativa destaca a importância dos pneus como um componente de custo significativo na aquisição de um caminhão fora de estrada.

A escassez de estudos acadêmicos relacionados aos equipamentos pesados de mina ressalta a necessidade e justifica a importância deste trabalho. Ao abordar esse tema, contribui-se para a disseminação do conhecimento sobre mineração e os equipamentos utilizados em minas a céu aberto.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

Aplicar o estudo da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões fora-de-estrada de uma mineradora.

#### **1.3.2 Específicos**

- Realizar um estudo teórico sobre: manutenção, métodos de manutenção, confiabilidade, manutenção centrada na confiabilidade e caminhão fora-de-estrada;
- Elaborar um procedimento metodológico para realizar o estudo de confiabilidade para o componente selecionado;
- Comparar os dados obtidos com a base teórica para atingir o objetivo geral.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho é dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 aborda a formulação do problema, a justificativa, os objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho. No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica que explora os conceitos e teorias relacionados à manutenção mecânica, além de detalhar métodos estatísticos de confiabilidade e abordagens qualitativas e quantitativas da manutenção centrada na confiabilidade. O Capítulo 3 descreve a metodologia e os métodos utilizados na pesquisa, incluindo a análise de dados e o diagnóstico do problema. O Capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões referentes ao estudo realizado, com considerações importantes para a resolução dos principais modos de falha dos pneus. A conclusão do trabalho é apresentada no Capítulo 5, onde são destacados os pontos-chave e resumidos os resultados obtidos, buscando responder ao problema levantado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manutenção

Segundo Motter *apud* Martins (2019), o campo da manutenção começou a ser compreendido com a invenção do relógio mecânico no século XVI, na região da Europa central. A partir da primeira revolução industrial, esse conceito passou por uma evolução significativa. Nessa época, a manutenção era considerada secundária no processo produtivo, e as indústrias buscavam extrair a máxima produção das máquinas até que elas falhassem ou parassem completamente.

A manutenção pode ser definida como um conjunto de atividades cujo objetivo é restaurar ou preservar um determinado bem em conformidade com suas especificações originais, mantendo-o em perfeito estado de conservação e funcionamento. Essas atividades abrangem equipamentos, acessórios e todos os elementos que se relacionam com os diversos setores de uma indústria (OLIVEIRA, 2013).

A manutenção pode ser definida como um conjunto de ações técnicas e administrativas que têm como propósito preservar ou restaurar um item, colocando-o em um estado em que possa desempenhar a função exigida. Essa função requerida refere-se ao conjunto de funções necessárias para a realização de uma determinada atividade (GREGÓRIO, 2018).

A manutenção engloba todas as atividades que visam assegurar que um equipamento esteja em plenas condições de operação, garantindo assim a confiabilidade dos processos e a segurança das operações realizadas. Um planejamento estratégico de manutenção fornece as ferramentas necessárias para alcançar uma eficiência produtiva (MOTTER, 1992).

É fundamental que a manutenção esteja em busca contínua de melhorias, visando o aproveitamento máximo dos equipamentos. Além disso, os operadores dos equipamentos devem receber treinamento adequado para garantir o funcionamento adequado das máquinas nas indústrias (VIANA, 2002).

Ao longo da história, a manutenção passou por uma evolução significativa. Inicialmente, suas atividades eram pouco organizadas e se concentravam em limpeza, lubrificação e reparos devido a avarias (KARDEC e NASCIF, 2013).

No entanto, a importância da manutenção cresceu e começaram a ser aplicadas técnicas que buscavam melhorar a eficiência dos equipamentos em termos de disponibilidade, desempenho e qualidade (TRINDADE, 2015).

As atividades de manutenção têm como objetivo reparar e prevenir danos e degradação nos equipamentos e instalações causados pelo desgaste e uso, muitas vezes manifestados por perda de desempenho, aparência inadequada e interrupções na produção (XENOS, 2014).

A manutenção não se limita apenas a reparar os equipamentos, mas desempenha um papel mais qualificado e técnico, como no caso da confiabilidade dos equipamentos, identificando e antecipando falhas (MARTINS, 2019).

Conforme a necessidade de reparos mais significativos nos equipamentos, a manutenção foi se consolidando e foram desenvolvidas técnicas de organização, planejamento, gerenciamento e controle nas empresas (MORO e AURAS, 2007).

Com o avanço da indústria e a expansão dos computadores, a manutenção passou a ser integrada a processos mais sofisticados, como controle e análise atualizados diariamente (KARDEC e NASCIF, 2013).

Na manutenção, destacam-se a combinação de ações técnicas definidas a partir de uma concepção da manutenção, ações administrativas e de gestão ao longo do ciclo de vida de um equipamento, com o objetivo de mantê-lo em funcionamento ou restaurá-lo para que possa cumprir sua função (KOMONEN, 2002).

Segundo Kardec, Nascif e Baroni (2002), uma visão moderna da manutenção busca garantir a disponibilidade funcional dos equipamentos e instalações, atendendo aos requisitos de confiabilidade, segurança e custos adequados em um processo de produção.

Além disso, a manutenção não se restringe apenas a máquinas e equipamentos em operação, mas também desempenha um papel na concepção de projetos. A disposição das peças, a acessibilidade dos conjuntos para os técnicos e até mesmo o dimensionamento dos componentes devem obedecer a critérios que facilitem as operações de manutenção futuras (ALMEIDA, 2014).

Portanto, a manutenção deve antecipar falhas e determinar os melhores e mais econômicos momentos para a execução da manutenção preventiva. Isso vai além de simplesmente basear-se no tempo, envolvendo a manutenção preventiva condicionada, que consiste em realizar a manutenção nos componentes somente quando há necessidade identificada por meio de um evento predefinido ou autodiagnosticado, como indicado por sensores que detectam desgaste ou outros indicadores de degradação do equipamento (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

## 2.2 Métodos de manutenção

Existem diferentes formas de classificar os métodos de manutenção e abranger adequadamente todas as tarefas que compõem as atividades técnicas de manutenção. Entre elas estão: corretiva, preventiva, preditiva, melhoria de equipamentos e prevenção de manutenção (XENOS, 2014).

Atualmente, os métodos básicos de manutenção podem ser definidos como: corretiva não planejada, corretiva planejada, preventiva, preditiva, detectiva e engenharia da manutenção. A escolha dos métodos está diretamente relacionada aos resultados esperados a serem alcançados (KARDEC, NASCIF e BARONI, 2002).

Existem vários tipos de manutenção, baseados nas intervenções realizadas nos equipamentos de produção. Dependendo da forma como a manutenção é executada, ela pode ser classificada como: corretiva não planejada, corretiva planejada, preventiva, preditiva e detectiva. Esses métodos têm como objetivo preservar, adequar, restaurar, substituir e prevenir os equipamentos, de forma a atingir os objetivos da função desempenhada (VIANA, 2002).

A Figura 1 relaciona esses métodos adotados com a obtenção de resultados de confiabilidade de equipamentos, que será abordado neste capítulo.



Figura 1: Mudança de paradigma na manutenção.  
Fonte: Finocchio (2013).

Observa-se na figura 1 que a mudança evolutiva do tipo de manutenção trouxe maiores resultados produtivos, isso é perceptível pela mudança de cultura manutentiva nas grandes empresas.

### **2.2.1 Manutenção Corretiva**

De acordo com a NBR 5462 (1994), a manutenção corretiva não planejada é definida como a atividade realizada após a ocorrência de uma falha, com o objetivo de restabelecer um item em condições de desempenhar sua função requerida.

Em termos de custos de manutenção, a abordagem corretiva geralmente é mais econômica do que medidas de prevenção de falhas. No entanto, ela também pode resultar em grandes perdas devido a interrupções na produção (XENOS, 2014).

Segundo Vianna (2002), a manutenção corretiva consiste em corrigir falhas decorrentes do desgaste ou deterioração de máquinas e equipamentos. Envolve reparos, alinhamentos, balanceamentos, substituição de peças ou até mesmo a substituição do próprio equipamento para resolver a falha ocorrida.

A manutenção corretiva pode ser dividida em duas fases, de acordo com Otani e Machado (2008): a manutenção corretiva não planejada, que ocorre de forma imprevista, e a manutenção corretiva planejada, que é programada com antecedência para corrigir um desempenho abaixo do esperado.

Segundo Gregório (2018), a manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha, quando um componente é usado até sua exaustão. Seu objetivo é restabelecer o item em condições de desempenhar sua função requerida e pode ser classificada como corretiva não programada ou corretiva programada.

Para Almeida (2014), a manutenção corretiva é um conjunto de procedimentos executados imediatamente para atender à produção quando uma máquina ou equipamento apresenta uma parada. A equipe de manutenção age rapidamente para restabelecer o funcionamento o mais rápido possível.

Quanto à manutenção corretiva planejada, focada no processo produtivo, ela se refere à correção de desempenho abaixo do esperado ou falha por decisão gerencial. Isso significa que a manutenção é realizada com base no acompanhamento das condições ou pela decisão de operar até a falha ocorrer (KARDEC e NASCIF, 2013).

### 2.2.2 Manutenção Preventiva

De acordo com a NBR 5462 (1994), a manutenção corretiva não planejada é definida como a atividade realizada após a ocorrência de uma falha, com o objetivo de restabelecer um item em condições de desempenhar sua função requerida.

Em termos de custos de manutenção, a abordagem corretiva geralmente é mais econômica do que medidas de prevenção de falhas. No entanto, ela também pode resultar em grandes perdas devido a interrupções na produção (XENOS, 2014).

Segundo Vianna (2002), a manutenção corretiva consiste em corrigir falhas decorrentes do desgaste ou deterioração de máquinas e equipamentos. Envolve reparos, alinhamentos, balanceamentos, substituição de peças ou até mesmo a substituição do próprio equipamento para resolver a falha ocorrida.

A manutenção corretiva pode ser dividida em duas fases, de acordo com Otani e Machado (2008): a manutenção corretiva não planejada, que ocorre de forma imprevista, e a manutenção corretiva planejada, que é programada com antecedência para corrigir um desempenho abaixo do esperado.

Segundo Gregório (2018), a manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha, quando um componente é usado até sua exaustão. Seu objetivo é restabelecer o item em condições de desempenhar sua função requerida e pode ser classificada como corretiva não programada ou corretiva programada.

Para Almeida (2014), a manutenção corretiva é um conjunto de procedimentos executados imediatamente para atender à produção quando uma máquina ou equipamento apresenta uma parada. A equipe de manutenção age rapidamente para restabelecer o funcionamento o mais rápido possível.

Quanto à manutenção corretiva planejada, focada no processo produtivo, ela se refere à correção de desempenho abaixo do esperado ou falha por decisão gerencial. Isso significa que a manutenção é realizada com base no acompanhamento das condições ou pela decisão de operar até a falha ocorrer (KARDEC e NASCIF, 2013).

### 2.2.3 Manutenção Preditiva

Na manutenção preditiva, há uma ampla gama de técnicas e ferramentas que podem ser aplicadas em um determinado equipamento ou instalação. Entre as abordagens mais comumente utilizadas e reconhecidas estão a análise de vibração, ferrografia, termografia, ultrassom e análise de pressões (LIMA e ARANTES, 2008).

Na Figura 2 pode-se notar que a partir da manutenção preditiva, detecta-se a falha potencial (ponto P), que é acompanhada durante todo o tempo de operação, sendo visível a queda na performance do equipamento até que a falha funcional (ponto F) ocorra.

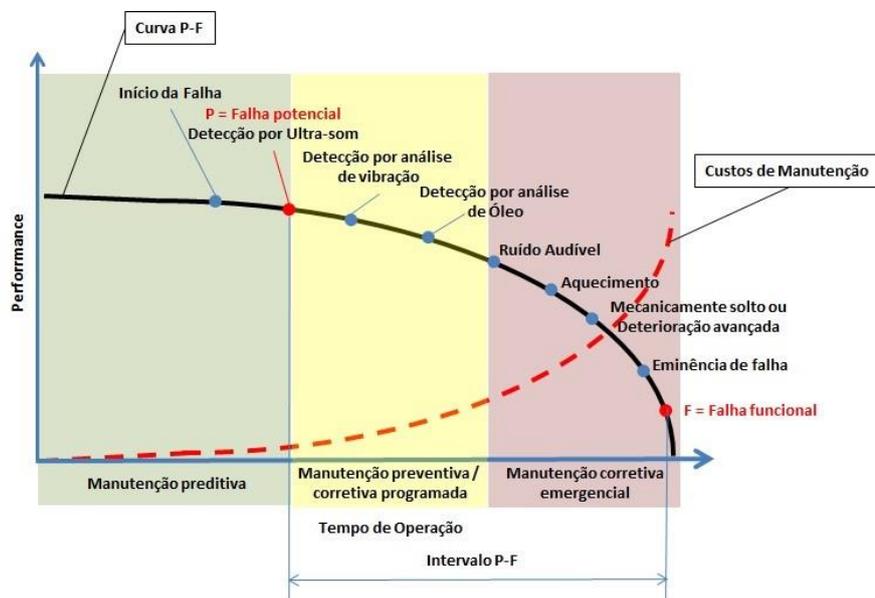


Figura 2: Curva P-F.  
Fonte: Gregório (2018).

Observa-se na figura 2 que quanto maior o tempo para identificar e corrigir a falha, maiores serão os custos, o que indica que a curva de custo para reparo é inversamente proporcional à curva P-F.

A manutenção preditiva é um método de melhoria contínua dos equipamentos, que pode envolver alterações no projeto, nos padrões de operação e manutenção, quando necessário. Para isso, é necessário realizar uma investigação aprofundada das causas fundamentais das falhas (XENOS, 2014).

Segundo Kardec e Nascif (2013), por meio do monitoramento das condições, é possível prever o estado do equipamento, privilegiando a utilização física do mesmo, sem a necessidade de intervenções durante o seu funcionamento para as medições.

De acordo com Gregório (2018), a manutenção preditiva aplica técnicas de análise de forma planejada e sistemática, com o objetivo de reduzir ao mínimo as manutenções preventivas e corretivas. Dessa forma, o componente é utilizado durante toda a sua vida útil, sem perda de tempo de produção. No entanto, os custos de manutenção são elevados, devido ao uso de ferramentas sofisticadas que exigem constante atualização.

Conforme Almeida (2014), a análise preditiva permite observar as condições reais do equipamento e acompanhar a evolução de um defeito, possibilitando o planejamento de intervenções de curto prazo para a troca de peças e eliminação do defeito. Além disso, indica o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos, bem como as condições para otimizar esse tempo de vida útil.

Segundo a NBR 5462 (1994), a manutenção preditiva é caracterizada pela aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando supervisão centralizada ou amostragem, com o objetivo de minimizar a manutenção preventiva e reduzir a manutenção corretiva.

Junior (2004) destaca que a manutenção preditiva tem como característica fundamental o monitoramento de parâmetros que indicam o estado de funcionamento dos equipamentos. Os métodos empregados envolvem técnicas e procedimentos de medição, acompanhamento e análise desses parâmetros, também conhecidos como manutenção preventiva baseada na condição.

#### **2.2.4 Manutenção Detectiva**

A manutenção detectiva é caracterizada pela atuação em sistemas de proteção ou comando, com o objetivo de detectar falhas que não são visíveis ou perceptíveis aos sentidos do pessoal de operação e manutenção (CHIOCHETTA et al., 2004).

De acordo com Kardec e Nascif (2013), a manutenção detectiva consiste na atuação em sistemas de proteção, controle e comando, com a finalidade de identificar falhas ocultas. Um exemplo concreto desse tipo de manutenção é o botão de teste de lâmpadas de sinalização e alarme em painéis, que permite detectar falhas que não seriam percebidas pelo pessoal de operação e manutenção.

A manutenção detectiva também pode ser definida como a forma de atuação em sistemas de proteção, visando identificar falhas que não são perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção (PASCHOAL, 2009).

Segundo Kardec e Nascif (2013), a identificação de falhas ocultas é fundamental para garantir a confiabilidade, especialmente em sistemas complexos onde a utilização de computadores na instrumentação e controle de processos está cada vez mais presente em plantas industriais.

### **2.2.5 Engenharia da Manutenção**

Conforme Kardec e Nascif (2001), a engenharia da manutenção é uma abordagem que se concentra na causa fundamental do problema, em vez de apenas realizar reparos, buscando eliminar a razão do defeito/falha. Isso é alcançado por meio do estudo do projeto do equipamento, análise dos problemas e implementação de modificações.

Os indicadores de manutenção, assim como os indicadores de desempenho ou performance, são conjuntos de informações que visam medir e melhorar os processos, com o objetivo de aumentar a eficiência e produtividade de uma empresa. Geralmente conhecidos como KPIs (*Key Performance Indicators*), eles propõem modelos que visam à prevenção e resolução dos diversos problemas que possam ocorrer em uma organização (SANTOS, 2018).

A busca constante pela melhoria dos métodos e técnicas na Engenharia de Manutenção, juntamente com a exigência de máxima disponibilidade dos equipamentos, é crucial para um bom desempenho de produção (BEZERRA JÚNIOR, 2019).

De acordo com Xenos (2014), para uma gestão eficiente da manutenção, com foco no aumento da confiabilidade dos equipamentos, são necessárias várias funções de apoio, como tratamento de falhas dos equipamentos, padronização da manutenção, planejamento de manutenção, estoque de peças de reposição, orçamento e educação e treinamento dos colaboradores.

A engenharia da manutenção é responsável por projetar modificações e melhorias em equipamentos, processos e sistemas, com o objetivo de otimizar três aspectos com base na análise RAM (*Reliability, Availability, and Maintainability*), que em português são confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (TELES, 2018).

A confiabilidade começou a ser utilizada para compreender os estudos comparativos realizados em aeronaves, sendo medida em termos de acidentes por hora de voo, permitindo assim avaliar o nível de confiabilidade de um sistema (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

### 2.3 Confiabilidade

A confiabilidade, também conhecida como *reliability* em inglês, refere-se à capacidade de um item desempenhar uma função exigida em condições específicas de uso ao longo de um determinado período de tempo. É utilizada como uma medida de desempenho de confiabilidade (KARDEC e NASCIF, 2013).

Conforme Barringer (1997), a confiabilidade é uma medida numérica que varia de 0% a 100% e pode ser expressa como uma probabilidade. Essa probabilidade pode ser calculada utilizando a distribuição exponencial, assumindo uma taxa de falha constante, conforme a equação 1:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Onde:

$R(t)$  – Confiabilidade a qualquer tempo  $t$ .

$e$  – Base dos logaritmos neperianos ( $e = 2,718$ ).

$\lambda$  – Taxa de falhas.

A taxa de falhas é definida por Kardec & Nascif (2013) como o número de falhas por unidade de tempo, dada pela equação 2. Geralmente essa taxa é expressa em unidades de falha por milhão de horas (ou  $10^6$  horas).

$$\lambda = \frac{\text{Número de Falhas}}{\text{Número de horas de Operação}} \quad (2)$$

Ainda conforme Kardec e Nascif (2013), uma falha pode ser definida como qualquer situação onde um equipamento não apresenta o desempenho previsto, causando interrupções na produção ou queda na quantidade produzida e qualidade do produto. Portanto, quanto maior o número de falhas de um equipamento ou sistema, menor será a confiabilidade de um item.

Por outro lado, quanto maior a confiabilidade, melhores serão os resultados para o cliente ou usuário. A Figura 3, adaptada de Kardec e Nascif (2013), expressa a relação entre a confiabilidade e os custos de produção e manutenção.

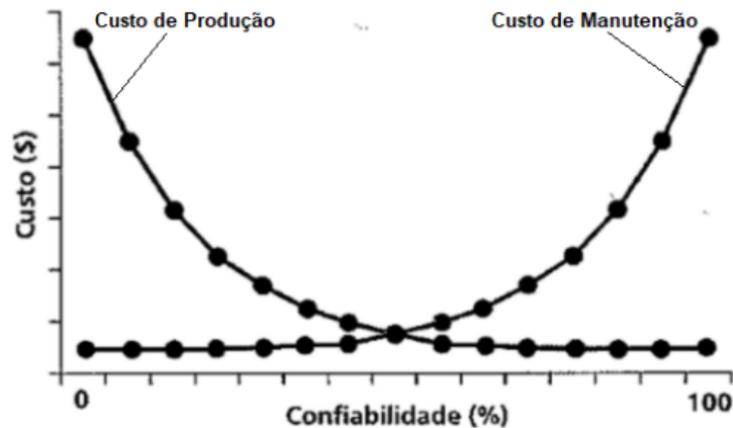


Figura 3: Confabilidade x Custos.  
 Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2013).

Observa-se na figura 3, quanto maior for a confiabilidade, menores serão os custos de produção. Por outro lado, para manter uma alta confiabilidade de um sistema ou equipamento, os custos de manutenção aumentam significativamente, o ideal é encontrar um ponto em comum para maximizar os ganhos em confiabilidade e redução de custos com produção.

A função de risco  $h(t)$  pode ser considerada a medida de confiabilidade mais difundida na prática. Tal função pode ser interpretada como a quantidade de risco associada a uma unidade no tempo  $t$  (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

A função de risco pode ser derivada usando probabilidade condicional. Considere, inicialmente, a probabilidade de falha entre  $t$  e  $t + \Delta t$ , dada pela equação 3:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (3)$$

De acordo com Sellitto (2005), o comportamento da vida de um produto e equipamento pode ser representado por uma curva que possui a forma de uma banheira e relaciona a função de risco de um equipamento com o tempo. Essa curva está representada na Figura 4.

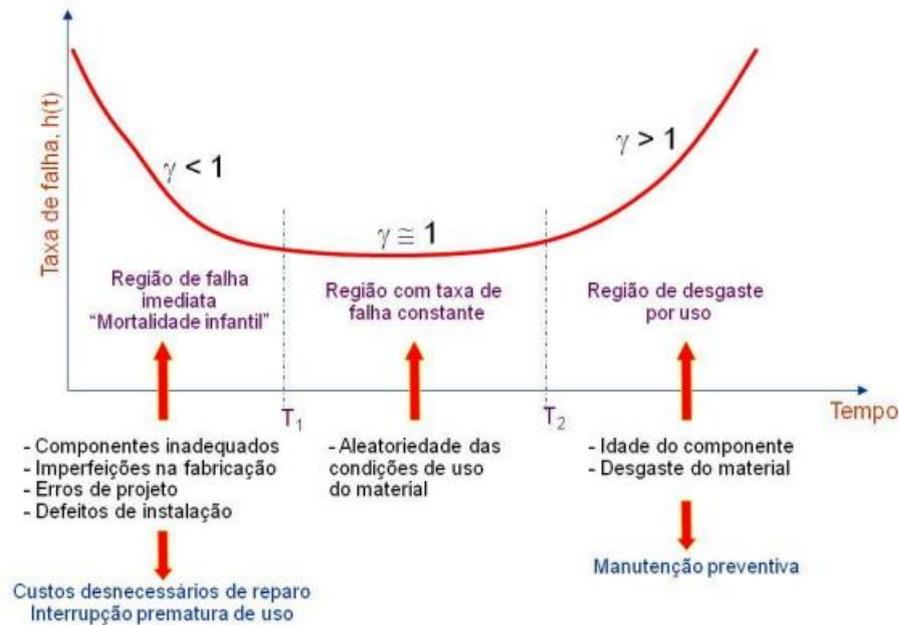


Figura 4: Comportamento em função do parâmetro de forma da distribuição de Weibull.  
Fonte: Andrade e Reis (2009).

Kardec e Nascif (2013) definem os três períodos distintos da curva da banheira como: mortalidade infantil caracterizada por uma grande incidência de falhas causadas por defeitos de fabricação ou deficiências de projeto, vida útil ou maturidade onde a taxa é sensivelmente menor e relativamente constante ao longo do tempo e envelhecimento ou mortalidade senil caracterizada por um aumento nas falhas decorrente do desgaste natural, maior com o passar do tempo.

Sellitto (2005) afirma que a curva da banheira representa as fases da vida características de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil. As fases estão associadas ao fator de forma  $\gamma$ , que é um dos parâmetros de uma eventual distribuição de Weibull que descreve a confiabilidade do item, apresentado mais adiante.

### 2.3.1 Análise de Dados de Vida (*Life Data Analysis – LDA*)

A metodologia de análise de dados de vida (LDA), também conhecida como análise de confiabilidade, é utilizada para estudar a confiabilidade de componentes por meio de uma base de dados que registra os tempos até a falha. A partir desses dados, é possível definir as curvas de confiabilidade do componente (SIMÕES, 2019).

No desenvolvimento desse estudo, a análise de dados de vida (LDA) é aplicada para avaliar a confiabilidade de um componente que tenha apresentado pelo menos uma falha durante o período de acompanhamento.

A análise de dados de vida (LDA) requer o uso de um banco de dados que é tratado com o emprego de distribuições estatísticas. Essas distribuições foram formuladas por estatísticos, matemáticos e engenheiros para modelar matematicamente e representar diferentes comportamentos. Existem várias distribuições frequentemente utilizadas para se adequar às especificações de cada situação (RAMOS JUNIOR, 2019).

No presente trabalho, optou-se por utilizar a distribuição estatística de Weibull para tratar os dados, uma vez que essa é a distribuição mais comumente empregada para representar diferentes tipos de falhas, como falhas prematuras, aleatórias e por desgaste.

### 2.3.2 Distribuição Estatística de Weibull

Segundo Fogliatto & Ribeiro (2009), a distribuição estatística de Weibull é especialmente adequada para modelar tempos até falhas que apresentam funções de risco constantes, estritamente crescentes ou estritamente decrescentes. Devido à sua flexibilidade e capacidade de representar diferentes comportamentos de amostras de tempos até falha, essa distribuição é considerada uma das mais importantes e amplamente utilizadas na modelagem da confiabilidade de componentes mecânicos.

A distribuição de Weibull, introduzida pelo engenheiro Waloddi Weibull em 1951, é uma distribuição contínua de probabilidade utilizada em estatística e probabilidade. Inicialmente, ela foi desenvolvida para estudar as características da função de probabilidade de falha e os tempos de falha associados à fadiga de materiais metálicos (XIE e LAI, 2006).

As representações de confiabilidade da distribuição de Weibull, são fornecidas pelas equações a seguir, considerando os parâmetros  $t \geq 0$ ,  $\gamma > 0$  e  $\theta > 0$ . A função densidade de probabilidade é dada pela equação 4:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^{\gamma/\theta}} \quad (4)$$

Onde:

$\gamma$  – Parâmetro de forma de Weibull

$\theta$  – Parâmetro de escala de Weibull

Da mesma forma, as Equações 5 e 6 são utilizadas para o cálculo da taxa de falha  $h(t)$  e cálculo do fator de confiabilidade  $R(t)$ :

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \quad (5)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad (6)$$

Conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), a distribuição de Weibull modela adequadamente uma ampla variedade de situações em que unidades apresentam funções de risco distintas. O tipo de função de risco da Weibull é definido pelo seu parâmetro de forma em três casos, pode-se observar o comportamento na Figura 5:

1.  $\gamma < 1$ ,  $h(t)$  é decrescente;
2.  $\gamma = 1$ ,  $h(t)$  é constante;
3.  $\gamma > 1$ ,  $h(t)$  é crescente.

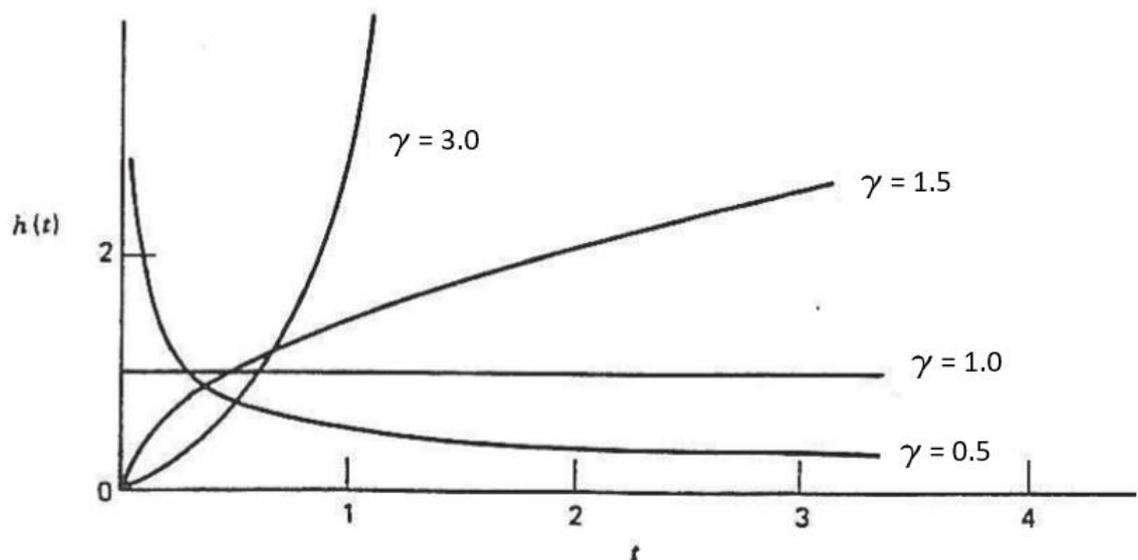


Figura 5: Comportamento da taxa de falha em relação ao parâmetro  $\gamma$ .  
Fonte: Adaptado de Murthy, Xie e Jiang (2004).

A função densidade de probabilidade  $f(t)$  tem seu comportamento apresentado pela Figura 6, que mantém o parâmetro de escala  $\theta$  constante para todos os casos, no intuito de evidenciar as variações no parâmetro de forma  $\gamma$ .

A variação do parâmetro de forma ( $\gamma$ ) tem um impacto significativo na forma da curva de taxa de falhas ao longo do tempo. Aqui estão algumas interpretações comuns das variações em  $\gamma$ :

Valor  $\gamma < 1$ : Isso indica uma taxa de falhas decrescente ao longo do tempo. Significa que o sistema possui uma maior taxa de falhas iniciais, mas essa taxa diminui à medida que o tempo passa. É comumente observado em sistemas onde as falhas são resultado de defeitos iniciais ou degradação rápida de componentes.

Valor  $\gamma = 1$ : Nesse caso, a taxa de falhas é constante ao longo do tempo. Indica um padrão de falha aleatório ou uma falha que ocorre de maneira uniforme ao longo da vida útil do sistema. É comumente observado em sistemas onde as falhas são resultado de fatores externos imprevisíveis ou quando o sistema não está sujeito a degradação com o tempo.

Valor  $\gamma > 1$ : Indica uma taxa de falhas crescente ao longo do tempo. Isso significa que a probabilidade de falha aumenta à medida que o sistema envelhece. É frequentemente observado em sistemas em que as falhas são resultado de fatores de desgaste acumulativo, como fadiga ou estresse progressivo nos componentes.

Em resumo, as variações no parâmetro de forma ( $\gamma$ ) da distribuição Weibull podem fornecer informações valiosas sobre a taxa de falhas de um sistema ao longo do tempo. Essa informação é útil para o planejamento de manutenção, estimativas de confiabilidade e tomada de decisões relacionadas à vida útil do sistema.

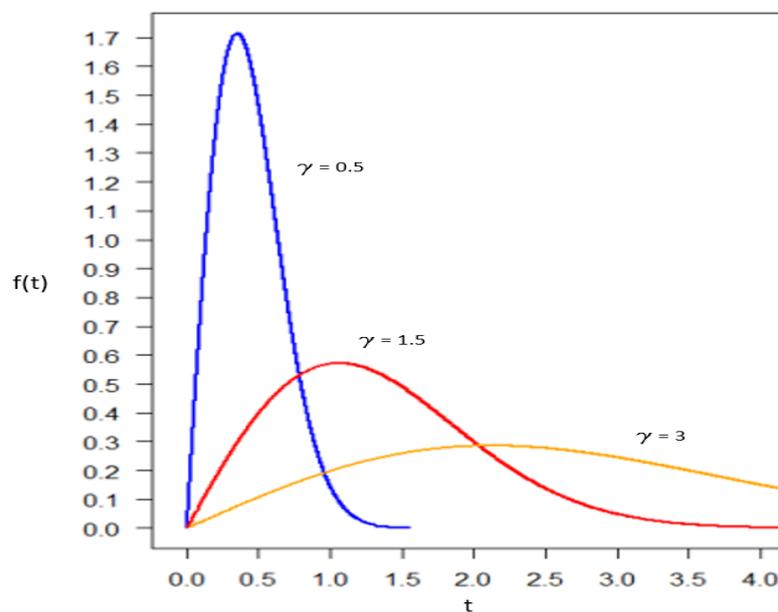


Figura 6: Comportamento da densidade de probabilidade em relação ao parâmetro  $\gamma$ .  
Fonte: Adaptado de Murthy, Xie e Jiang (2004).

Pode-se observar na Figura 6 que são perceptíveis diferentes formas da curva de densidade de probabilidade em relação aos parâmetros de forma. Para as curvas com parâmetros de forma maiores, percebe-se que o comportamento da função  $f(t)$  é distribuído ao longo do

período de tempo de operação da unidade. Já para os valores com parâmetros de forma menores, os valores mais altos da função  $f(t)$  são obtidos logo no início do intervalo de tempo estudado, sugerindo uma maior probabilidade de ocorrência de falhas prematuras.

Por fim, a função que calcula o fator de confiabilidade  $R(t)$  também é afetada pelos diferentes valores do parâmetro de forma  $\gamma$  e mantendo-se constante o parâmetro de escala  $\theta$  em todos os casos. Essa relação é demonstrada pela Figura 7.

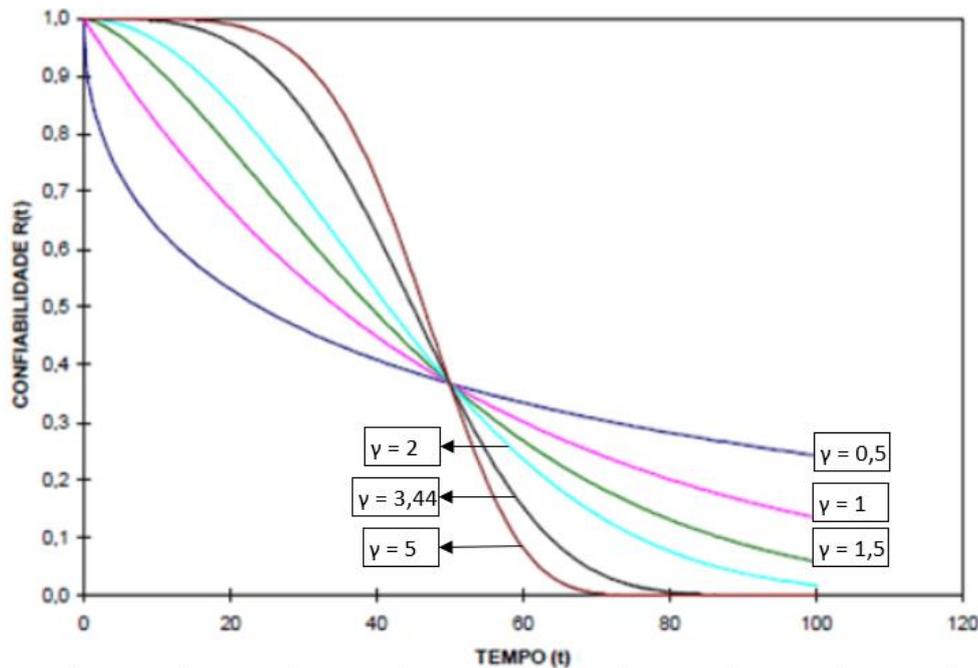


Figura 7: Comportamento do fator de confiabilidade variando o parâmetro  $\gamma$ .  
Fonte: Adaptado de Filho (2003).

Pode-se perceber na análise do gráfico que ilustra a Figura 7, que todas as funções de confiabilidade da Weibull se encontram no ponto  $(\theta, e^{-1})$  conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), independente do valor do parâmetro de forma  $\gamma$ .

Isso ocorre devido à natureza da distribuição Weibull e à relação entre a função de confiabilidade e os parâmetros da distribuição.

A distribuição Weibull é comumente utilizada para modelar a vida útil de produtos e sistemas, sendo amplamente aplicada em engenharia e análise de confiabilidade. A função de confiabilidade (ou função de sobrevivência) de uma distribuição descreve a probabilidade de um sistema ou componente sobreviver além de um determinado tempo.

Quando  $\gamma = 1$ , a função de confiabilidade se torna:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)} \quad (7)$$

Nesse caso, a função de confiabilidade é uma função exponencial decrescente, e pode-se observar que quando  $t = \theta$ ,  $R(t) = e^{-1}$ . Portanto, para  $\gamma = 1$ , a função de confiabilidade da distribuição Weibull está sempre no ponto  $(\theta, e^{-1})$ .

Essa propriedade se mantém independentemente do valor de  $\gamma$ , o que significa que todas as funções de confiabilidade da distribuição Weibull passam pelo ponto  $(\theta, e^{-1})$ , mesmo que tenham diferentes inclinações e formas. Essa característica pode ser útil na análise e interpretação de dados de confiabilidade, facilitando a compreensão e a comparação das curvas de confiabilidade para diferentes valores de  $\gamma$ .

### 2.3.2.1 Método da Máxima Verossimilhança

De acordo com Teles Filho (2013), o método da máxima verossimilhança se baseia nos resultados obtidos pela amostra, para determinar qual a distribuição, dentre todas as definidas pelos possíveis valores de seus parâmetros, com maior possibilidade de ter gerado a amostra. Tal método pode ser utilizado para determinar os valores de  $\gamma$  e  $\theta$  que melhor se encaixam na aplicação fornecida, dados os valores da amostra obtida.

Tal método necessita de equações matemáticas para calcular os parâmetros  $\gamma$  e  $\theta$  da distribuição de Weibull e as equações que calculam tais parâmetros são dadas por Rocha (2011):

$$\gamma = \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^k \ln(x_i))}{(\sum_{i=1}^n x_i^k)} - \frac{(\sum_{i=1}^n \ln(x_i))}{n} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\theta = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (9)$$

Onde:

$n$  - Número de amostras;

$x_i$  - Indica o valor de  $x$  no intervalo  $i$ ;

$k$  - É dado por  $\sqrt{n}$ .

### 2.3.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)

A manutenção centrada na confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance - RCM*) é uma metodologia que consiste em estudar minuciosamente um equipamento ou sistema, analisar suas possíveis falhas e determinar a melhor forma de executar a manutenção para prevenir essas falhas ou minimizar os danos decorrentes delas (KARDEC e NASCIF, 2013).

De acordo com Gregório (2018), a manutenção centrada na confiabilidade é um método que contribui para priorizar esforços, garantindo que os ativos desempenhem suas funções necessárias, levando em consideração o ambiente e o processo nos quais estão inseridos.

Os programas de MCC têm sido reconhecidos como a abordagem mais eficiente para lidar com questões de manutenção, graças à sua abordagem racional e sistemática. Eles permitem que as empresas alcancem excelência nas atividades de manutenção, aumentando a disponibilidade dos equipamentos e reduzindo os custos associados a acidentes, defeitos, reparos e substituições (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

Fogliatto e Ribeiro (2009) destacam que a manutenção centrada na confiabilidade é uma ferramenta de suporte à decisão gerencial, envolvendo as seguintes etapas:

- a) Seleção do sistema;
- b) Definição das funções e padrões de desempenho;
- c) Identificação das falhas funcionais e padrões de desempenho;
- d) Análise dos modos e efeitos das falhas;
- e) Revisão do histórico de manutenção e documentação técnica;
- f) Determinação das ações de manutenção.

Além disso, segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), ao aplicar a manutenção centrada na confiabilidade a um item específico, é importante responder a algumas perguntas fundamentais, tais como:

1. Quais são as funções e padrões de desempenho do item no contexto operacional?
2. Como o item pode falhar em cumprir sua função?
3. Quais são as causas de cada falha operacional?
4. Quais são as consequências de cada falha?
5. Qual é a importância de cada falha?
6. O que pode ser feito para prevenir cada falha?
7. O que fazer se não for encontrada uma tarefa preventiva?

Metas e indicadores são essenciais para o gerenciamento do programa de MCC. Inicialmente, é necessário definir os indicadores relevantes, que geralmente envolvem métricas de tempo de parada, disponibilidade dos equipamentos e qualidade do processo. Para fins de gestão, esses indicadores podem ser definidos considerando os principais equipamentos ou trechos do processo (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

Segundo Kardec e Nascif (2009), a MCC utiliza outras ferramentas para identificar falhas, suas causas e formas de tratamento, como a Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) e a Análise Probabilística de Risco.

### **2.3.3.1 Métodos, técnicas e ferramentas da qualidade aplicadas à MCC**

#### **2.3.3.1.1 Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial (FMEA)**

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), a FMEA em inglês *Failure Mode and Effect Analyse* é um método de confiabilidade que tem como objetivos:

- i. Reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo;
- ii. Identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas;
- iii. Documentar o estudo, criando um referencial técnico que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo.

O FMEA é uma técnica que define, identifica e elimina falhas conhecidas ou potenciais, de sistemas, projetos, processos, máquinas e/ou serviços, antes que atinjam o cliente (STAMATIS, 2003).

A técnica FMEA evoluiu ao longo do tempo, e isso se deve ao fato dela ser uma das ferramentas mais utilizadas no setor de confiabilidade (DUSSAULT, 1984).

De acordo com Gregório (2018), o método FMEA auxilia no processo de priorização e, assim, permite concentrar esforços e definir a estratégia mais adequada de manutenção. Para selecionar a estratégia mais adequada de manutenção, a MCC propõe alguns diagramas que podem auxiliar no processo de tomada de decisão. A Figura 8 apresenta um modelo de diagrama de decisão.

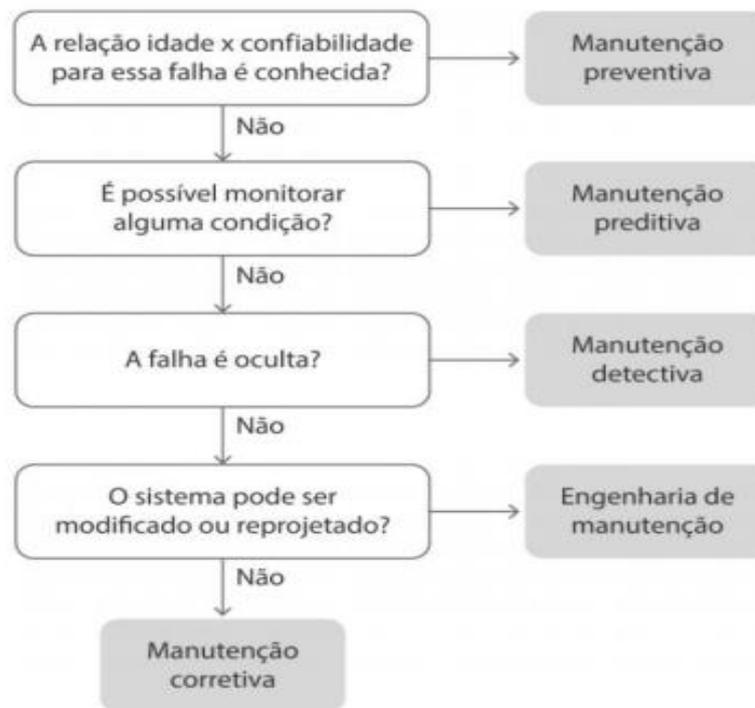


Figura 8: Diagrama de seleção dos tipos de manutenção a serem aplicados.  
Fonte: Pinto e Xavier (2012).

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), a elaboração do FMEA ajuda a identificar de forma qualitativa, pontos em um sistema que tem maior probabilidade de falha e necessitam de uma ação preventiva, para evitar que a falha ocorra, conforme ilustra a Figura 8 pode-se decidir a partir de uma pergunta simples qual método de manutenção deve-se utilizar. Fornece ideias para testes incorporados ao projeto, reduz eventos não previstos durante o planejamento de um processo, fornece referência rápida para resolução de problemas e identifica as preocupações de segurança a serem abordadas.

A ferramenta ainda verifica cada modo de falha através de índices, que avaliam quantitativamente a gravidade de cada um deles. Abaixo segue uma definição dos três índices utilizados pelo FMEA (RIGONI, 2019):

- a) Severidade: Impacto para ao sistema que o produto está inserido caso ocorra a falha. Pode ser considerado como impacto na confiabilidade, segurança, custo, parada do sistema e outros fatores importantes do sistema;
- b) Ocorrência: probabilidade de ocorrência de um determinado tipo de falha;
- c) Detecção: Probabilidade de identificação da falha durante o processo de reparo e/ou montagem de sistema.

### 2.3.3.1.2 Análise de causa raiz da falha (RCA)

Segundo Rooney e Vanden Heuvel (2004), o RCA é uma ferramenta projetada para o uso investigativo na identificação da causa raiz de um evento, o qual pode ser com segurança, saúde, meio ambiente, qualidade e impactos na produção. A investigação do evento utilizando a ferramenta RCA busca identificar não somente como o evento ocorreu, mas também porque ele aconteceu.

*Failure Tree Analysis* (FTA ou também, Análise de Árvores de Falha) apresenta-se muito eficaz sob a ótica de melhoria contínua da qualidade. É uma técnica que se destina a auxiliar a busca pela excelência de produto e de processo, servindo de linha mestra para a disseminação e direcionamento de informações e esforços de melhoria. Os objetivos principais da FTA são (Ribeiro, 1995):

- i. Identificar, a partir de efeitos indesejáveis, todas as possíveis combinações de eventos que possam ser causadoras de tais problemas;
- ii. Estudar a probabilidade de ocorrência de cada causa e, a partir de tais informações, conhecer a probabilidade de ocorrência do efeito final, indesejável;
- iii. Priorizar ações de melhoria para a minimização ou, preferencialmente, a eliminação de tais causas.

Já para Passamai (2007), a análise destas falhas visa que as fases de funcionamento sejam realizadas com êxito e sem interrupções ou falhas, observando e esclarecendo o motivo pelo qual os eventos passados ocorreram e tomando medidas para impedir a ocorrência desses eventos. Dessa forma, os eventos passados constituem as causas embrionárias ou causas raízes, em contrapartida das causas emergenciais e imediatas das falhas.

Márquez, Bona e Alija (2009) utilizam o RCA na determinação do evento responsável pela ocorrência de uma falha catastrófica em um sistema de exaustão em uma indústria petroquímica. Baseado no método RCA reconstitui a sequência do evento identificando o fator físico que iniciou a falha, baseado nas evidências encontradas no evento e nas informações levantadas nos históricos das intervenções.

Para Rooney e Vanden Heuvel (2004), o primeiro passo na análise é coletar os dados. Sem informação completa e uma compreensão do evento, não podem ser identificados os fatores causais e causas raiz associadas com o evento. A maior parte do tempo da análise é empenhada analisando o evento e juntando os dados.

### 2.3.3.1.3 Diagrama de causa e efeito (Diagrama de Ishikawa)

O Diagrama de Ishikawa, segundo Bastiani (2018) apresenta a relação existente entre o resultado indesejado ou não conforme de um processo (efeito) e os diversos fatores (causas) que podem contribuir para que esse resultado tenha ocorrido. Sua relação com a imagem de uma espinha de peixe se dá devido ao fato que se pode considerar suas espinhas as causas dos problemas levantados, que contribuirão para a descoberta de seu efeito, além do formato gráfico que muito se assemelha ao desenho de um esqueleto de peixe.

Segundo Almeida (2014), para facilitar a utilização do Diagrama de Ishikawa na indústria, foi desenvolvida uma variação denominada Diagrama de 4M que considera na análise das prováveis causas do problema quatro fatores básicos da indústria de manufatura:

- Máquina: analisa fatores relacionados ao estado de conservação ou manutenção de máquinas e equipamentos;
- Mão de obra: são as prováveis causas de problemas que podem ser originados pelo operador ou preparador, dependendo da máquina, decorrentes de fatores 34 técnicos, emocionais ou problemas pessoais do colaborador ou grupo de colaboradores envolvidos no processo;
- Método: analisa as causas que podem ser originadas pelo planejamento inadequado do processo de fabricação ou operação realizada;
- Material: são os problemas originados pelos materiais envolvidos no processo ou serviços executados, desde os insumos até a matéria-prima utilizada. As causas dos problemas podem ser a dificuldade de usinar um determinado material, por exemplo, ou a especificação de um material que não é adequado para uma determinada aplicação. Nessa etapa considera-se também as ferramentas de corte, fluidos de corte ou lubrificantes. A seguir um exemplo de Diagrama de Causa e Efeito pode ser observado na Figura 9.

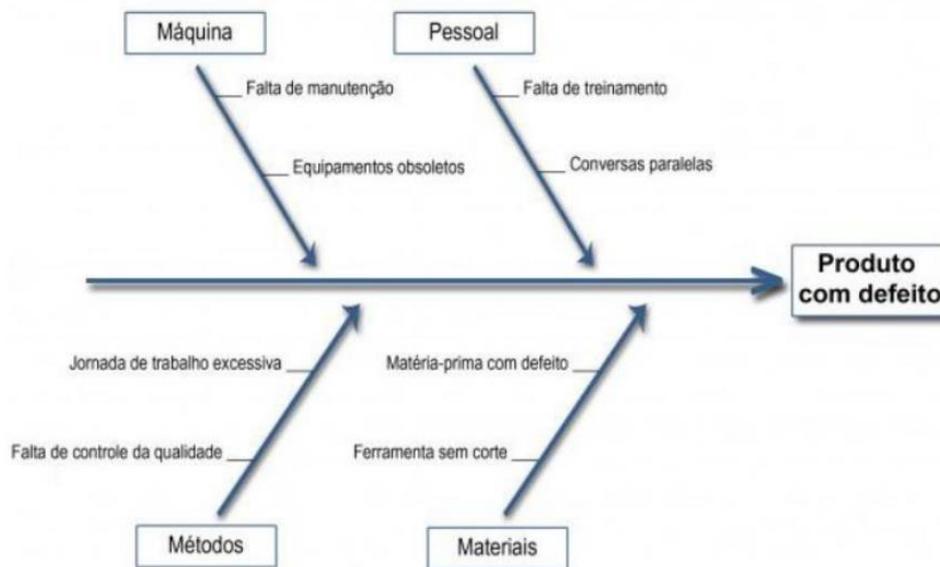


Figura 9: Exemplo de Diagrama de Causa e Efeito.  
Fonte: Blog da Qualidade (2018).

É possível observar na Figura 9, que O Diagrama de Ishikawa segundo Bastiani (2018) apresenta a relação existente entre o resultado indesejado ou não conforme de um processo (efeito) e os diversos fatores (causas) que podem contribuir para que esse resultado tenha ocorrido. Sua relação com a imagem de uma espinha de peixe se dá devido ao fato que se pode considerar suas espinhas as causas dos problemas levantados, que contribuirão para a descoberta de seu efeito, além do formato gráfico que muito se assemelha ao desenho de um esqueleto de peixe.

#### 2.3.3.1.4 Diagrama de Pareto

Para Alonso (2021), o Diagrama de Pareto consiste em uma ferramenta gráfica que auxilia na identificação da relação entre causa e efeito. Ao ser analisado, os principais 36 problemas dos processos passam a ser identificados. Baseado no princípio de Pareto, Joseph Juran implementou o Diagrama de Pareto para explicar que 80% dos efeitos são decorrentes de 20% das causas.

Pode ser observado na Figura 10 um exemplo de aplicação da ferramenta da qualidade.

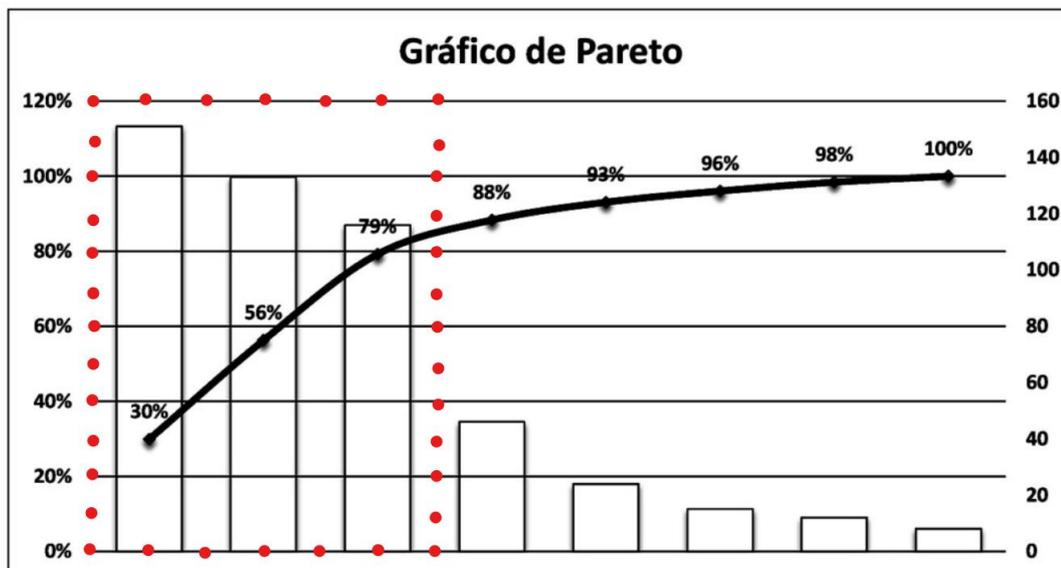


Figura 10: Exemplo de Diagrama de Pareto.  
Fonte: Adaptado de Terzoni (2018).

Pode ser observado na Figura 10, os sistemas que mais falharam num período. Com posse desses dados, pode-se inferir que a maioria dos problemas causados por falhas, por exemplo, são ocasionadas por uma pequena parte dos problemas, ou de maneira análoga a teoria de Pareto, 80% dos efeitos são gerados por 20% das causas em média.

### 2.3.3.2 Indicadores de MCC

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), o cálculo da confiabilidade de uma unidade pode ser realizado ao considerar o período de tempo decorrido desde o momento em que um equipamento é colocado em operação até sua primeira falha (tempo entre falhas) como uma variável que varia aleatoriamente ao longo do tempo e/ou do espaço.

Conforme destacado por Teles (2021), a medição do desempenho é um elemento fundamental para a gestão de qualquer empresa, incluindo o setor industrial. Essa atividade desempenha um papel crucial na identificação das discrepâncias entre o desempenho alcançado e o desejado, fornecendo indicações sobre quais ações devem ser priorizadas e o que deve ser feito para atingir os objetivos almejados.

Além disso, conforme ressaltado por Teles (2021), o uso de indicadores de manutenção industrial é uma prática essencial para avaliar o progresso dos processos na indústria. Esses indicadores analisam diversos aspectos, como paradas de máquinas, disponibilidade de equipamentos, gastos com manutenção, entre outros, com o objetivo de alcançar a efetividade

da cadeia produtiva. A seguir, são apresentados os indicadores que têm um impacto significativo na confiabilidade.

#### 2.3.3.2.1 MTBF (Tempo Médio Entre Falhas ou do inglês *Mean Time Between Failures*)

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), um parâmetro importante a ser quantificado em análises de confiabilidade é o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), que é a medida do intervalo médio de tempo em que o sistema, conjunto ou componente tem um desempenho como o especificado antes que uma falha ocorra.

O MTBF, segundo Teles (2021), é um dos indicadores mais importantes para o setor de manutenção. Através dele pode-se enxergar globalmente como a manutenção está sendo administrada de um modo geral. Esse indicador consiste basicamente em medir o tempo médio entre uma falha e outra. A forma mais eficiente de administrar esse indicador é aplicá-lo a cada equipamento, dessa forma, as ações podem ser aplicadas de forma individual, facilitando as ações.

O cálculo do indicador pode ser realizado utilizando a equação 9:

$$MTBF = \frac{\sum \text{Horas de trabalho em bom funcionamento}}{\text{Número total de falhas}} \quad (9)$$

#### 2.3.3.2.2 MTTR (Tempo Médio Para Reparo ou do inglês *Mean Time To Repair*)

De acordo com Mendes (2019), tempo médio de reparo (MTTR) é uma medida da capacidade de manutenção de um item reparável, que informa o tempo médio necessário para reparar um item ou componente específico e retorná-lo ao status normal de trabalho. É uma medida básica da manutenção de equipamentos e peças. Isso inclui o tempo de notificação, o diagnóstico e o tempo gasto no reparo real, além de outras atividades necessárias para que o equipamento possa ser usado novamente.

Ainda segundo Mendes (2019), o tempo médio de reparo representa quanto tempo leva para que o equipamento volte à condição de trabalho, levando em consideração a notificação inicial da falha, o tempo necessário para enviar o equipamento para reparos, diagnóstico, tempo real de reparo, montagem, calibração, teste e depois enviá-lo de volta ao campo. Basicamente, abrange o tempo desde o momento em que um usuário envia o item para reparos até o usuário recuperar o item.

De acordo com Teles (2021), o MTTR analisa o tempo que os colaboradores colocarão uma máquina novamente em funcionamento, ou seja, mede a habilidade da equipe em consertar a falha.

O cálculo do indicador pode ser realizado utilizando a equação 10:

$$MTTR = \frac{\sum \text{Horas de manutenção}}{\text{Número total de reparos}} \quad (10)$$

### 2.3.3.2.3 MTTF (Tempo Médio Para Falhas ou do inglês *Mean Time To Failure*)

O indicador MTTF tem por objetivo mensurar o tempo que o sistema esteve funcionando desde o início da operação até a sua falha. O MTTF é uma das muitas maneiras de avaliar a confiabilidade de sistemas.

O cálculo do indicador pode ser realizado utilizando a equação 11:

$$MTTF = \frac{\sum \text{Horas de operação}}{\text{Número total de falhas}} \quad (11)$$

### 2.3.3.2.4 DF (Disponibilidade Física)

De acordo com Teles (2021), calcular a disponibilidade de equipamentos industriais é uma tarefa fundamental para que o setor de Planejamento e Controle da Manutenção possa traçar as estratégias corretas no momento de definir qual equipamento merece prioridade dentro do ambiente industrial quando se trata de atividades de manutenção.

Ainda segundo Teles (2021), o cálculo de disponibilidade de um equipamento ou instalação tem muito a dizer sobre os seus processos de manutenção e operação. O objetivo principal do PCM é garantir e elevar a disponibilidade e confiabilidade dos ativos, otimizando a produtividade.

Segundo Mendes (2019), A disponibilidade de um dispositivo é matematicamente dada pela equação 12:

$$DF = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (12)$$

Analisar, através dos métodos de confiabilidade apresentados, o comportamento da falha através de dados qualitativos e quantitativos é essencial para tentar modelar a confiabilidade de sistemas, com isso acarretando aumento na eficiência da manutenção. No capítulo 3 será apresentado os procedimentos utilizados neste estudo para podermos atingir os resultados no capítulo 4.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Tipo de Pesquisa**

Existem três tipos de pesquisa, classificados de acordo com seus objetivos: pesquisa descritiva, explicativa e exploratória (GIL, 2017).

Este trabalho adota uma abordagem de pesquisa exploratória, que visa registrar fatos e ideias para obter familiaridade com o problema em questão, tornando-o mais conciso e explícito. Essa abordagem envolve a utilização de procedimentos sistemáticos para a análise de dados. A coleta de dados é realizada por meio de fontes secundárias, levantamento de experiências, estudo de casos e observação do evento. O pesquisador estabelece critérios e técnicas para desenvolver e modificar conceitos e concepções ao longo do estudo. Essa abordagem exploratória permite uma compreensão mais aprofundada do tema investigado, uma vez que o objetivo principal é explorar os dados do sistema de banco de dados da empresa. Após o tratamento desses dados, será realizada uma análise abrangente, visando propor melhorias em termos de confiabilidade.

Existem duas formas de abordagem na pesquisa: quantitativa e qualitativa. A pesquisa quantitativa utiliza instrumentos estatísticos para coletar e analisar dados, enquanto a pesquisa qualitativa emprega técnicas não estatísticas, focando na compreensão e interpretação dos fenômenos (RICHARDSON, 2017).

Este trabalho combina elementos dessas duas abordagens. É considerado uma pesquisa quantitativa, pois utiliza dados estatísticos e técnicas de confiabilidade quantitativas, como a distribuição estatística de Weibull. Além disso, pode ser classificado como qualitativo, uma vez que também utiliza técnicas de análise dos modos de falha do componente, que não são baseadas em mensurações estatísticas, mas sim em análises interpretativas e compreensivas.

Através da aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), são analisados os indicadores de qualidade dos equipamentos industriais em estudo. Além disso, são realizadas medidas quantitativas de confiabilidade e previsão, utilizando ajustes estatísticos baseados em

análise de dados de vida (*Life Data Analysis* - LDA). Dessa forma, o estudo incorpora tanto aspectos quantitativos, por meio das medidas estatísticas, quanto aspectos qualitativos, por meio da análise dos indicadores de qualidade e do uso da metodologia MCC.

Quanto aos procedimentos técnicos abordados em uma pesquisa, podem ser de forma de estudo de caso, pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, pesquisa-ação e pesquisa participante (SEVERINO, 2018).

Para realizar esta pesquisa, foram adotados diferentes procedimentos, incluindo pesquisa bibliográfica, pesquisa documental e estudo de caso. A pesquisa bibliográfica consistiu na análise de livros, artigos e publicações relevantes sobre o tema, proporcionando embasamento teórico para o estudo. A pesquisa documental envolveu a coleta de dados relacionados aos indicadores dos pneus e ao descarte dos equipamentos, utilizando documentos e registros disponíveis. O estudo de caso, por sua vez, focou em um tema específico e seguiu uma metodologia de análise de dados de vida do componente, permitindo uma investigação mais aprofundada. Esses diferentes procedimentos foram empregados de forma complementar para obter informações abrangentes e consistentes para o desenvolvimento desta pesquisa.

### **3.2 Materiais e Métodos**

A pesquisa teve início com a formulação de um problema que questionava o uso da confiabilidade nos pneus de caminhões fora-de-estrada. Em seguida, foi realizada uma revisão bibliográfica para embasar teoricamente o estudo e definir a metodologia a ser adotada.

O trabalho incluiu uma descrição detalhada do componente pneu, bem como a coleta e análise de informações em um banco de dados de uma mineradora. Os dados obtidos foram relacionados ao sucateamento de pneus e aos seus modos de falhas, que foram estratificados e codificados.

Com base nesses dados, foi realizado um modelamento utilizando *software* especializado, permitindo a análise das faixas de vida útil, confiabilidade e efeitos das falhas. Essas análises foram fundamentais para a conclusão do estudo e permitiram a sugestão de medidas para minimizar e corrigir as falhas, com base nos resultados encontrados.

Os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa estão detalhados na Figura 11, fornecendo uma visão geral das etapas e técnicas adotadas no estudo.

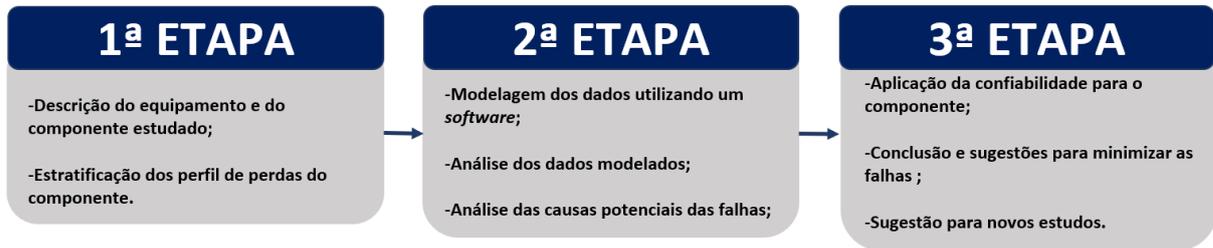


Figura 11: Fluxograma dos materiais e métodos.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

### 3.3 Variáveis e Indicadores

As variáveis são elementos ou características mensuráveis ou potencialmente mensuráveis que são distintas em um estudo (KÖCHE, 2014).

Por outro lado, os indicadores são utilizados como ferramentas de controle e melhoria da qualidade dos processos. Eles têm a finalidade de mensurar os processos e o desempenho dos equipamentos, permitindo monitorar e quantificar desvios (DOCKHORN, 2019). A Tabela 1 apresenta as variáveis e indicadores utilizados nesta pesquisa.

Tabela 1: Variáveis e indicadores

VARIÁVEIS	INDICADORES
Manutenção Centrada na Confiabilidade	Diagrama de Pareto FCA Indicadores de Performance FMEA
Pneu do caminhão fora-de-estrada	Dimensões Limites de Vida Útil por LDA

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Conforme demonstrado na Tabela 1, a variável adotada foi a manutenção centrada na confiabilidade (MCC) e o pneu do caminhão fora de estrada e os indicadores adotados, respectivamente, como diagrama de Pareto, análise de falhas e taxa de falhas para MCC e modos de falhas, calibragem e condições de uso para o pneu.

### 3.4 Instrumento de Coleta de Dados

O presente estudo foi conduzido com base em dados documentados e disponibilizados pela mineradora no período de janeiro de 2022 a dezembro de 2022, como por exemplo: relatórios de manutenção e de controles de troca de componentes.

Com isso, os instrumentos de coleta de dados consistem na análise direta das informações contidas nas planilhas de sucateamento dos pneus a fim de entender seus principais modos de falhas.

### 3.5 Tabulação dos Dados

A tabulação dos dados foi realizada utilizando o *software Microsoft Excel*, que permitiu o preenchimento e organização das informações utilizadas nos cálculos posteriores. Para realizar o cálculo das faixas de confiabilidade e suas respectivas funções, bem como a elaboração de diagramas e gráficos, utilizou-se os *softwares Weibull++* e *ProConf 2000*, o primeiro foi utilizado na empresa e o segundo por ser um *software* livre versão estudantil foi para complementar os resultados. Esses *softwares* são comumente empregados para ajustar distribuições de tempo de falha a dados de confiabilidade, fornecendo estimativas dos parâmetros da distribuição, intervalos de confiança, taxa de risco e confiabilidade para um determinado tempo.

Adicionalmente, o *software Microsoft Power BI* foi utilizado para gerar gráficos mais visuais e de fácil compreensão. É importante ressaltar que todos os tipos de componentes passaram pelo mesmo processo de obtenção e tratamento dos dados, visando obter resultados confiáveis e realistas.

### 3.6 Considerações Finais do Capítulo

No terceiro capítulo, foram apresentados os diferentes tipos de pesquisa e especificados aqueles utilizados neste trabalho, bem como os materiais, métodos, variáveis, indicadores, instrumentos de coleta de dados e técnicas de tabulação dos dados.

No próximo capítulo, será abordado o estudo de caso, que envolve a descrição do equipamento industrial analisado, o desenvolvimento da aplicação da metodologia adotada neste estudo e a análise e discussão dos resultados obtidos.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Características da Empresa

A empresa estudada é uma mineradora de grande porte que atua na extração de minério de ferro. O minério de ferro hematítico, composto principalmente por hematita, magnetita e goethita, juntamente com minerais de ganga, é encontrado em forma de rochas nas instalações da mineradora. A operação de extração envolve o uso de perfuratrizes, escavadeiras, pás carregadeiras e caminhões fora-de-estrada.

As perfuratrizes são máquinas utilizadas para fazer furos em solos ou rochas, permitindo a colocação de cargas explosivas e a realização de furos de sondagem. As escavadeiras e pás carregadeiras são equipamentos empregados na escavação e movimentação de grandes quantidades de minério, por meio de braços articulados, auxiliando no carregamento dos caminhões fora-de-estrada. Os caminhões fora-de-estrada desempenham um papel fundamental no transporte do minério até a planta de beneficiamento. A planta tem como objetivo classificar, separar e concentrar o minério de ferro.

A empresa possui uma logística interna bem estruturada e gerenciada para a movimentação de materiais, priorizando o máximo desempenho dos equipamentos utilizados na extração e transporte do minério. O principal objetivo é evitar paradas não programadas, a fim de não comprometer as metas de produção.

A atividade da mineradora inicia-se com o desmonte do solo, que é realizado pelas escavadeiras e tratores. Quando necessário, ocorre a detonação prévia do solo, utilizando as perfuratrizes para fazer perfurações nas rochas e inserir explosivos. Após a detonação, as pás carregadeiras e escavadeiras são utilizadas para a escavação do solo e auxiliam no carregamento dos caminhões fora-de-estrada. Além dos equipamentos mencionados, a frota da mineradora inclui tratores de pneus, motoniveladoras, retroescavadeiras e caminhões pipa para atividades de condicionamento da mina.

A Figura 12 ilustra a movimentação interna de minério em caminhões fora-de-estrada.

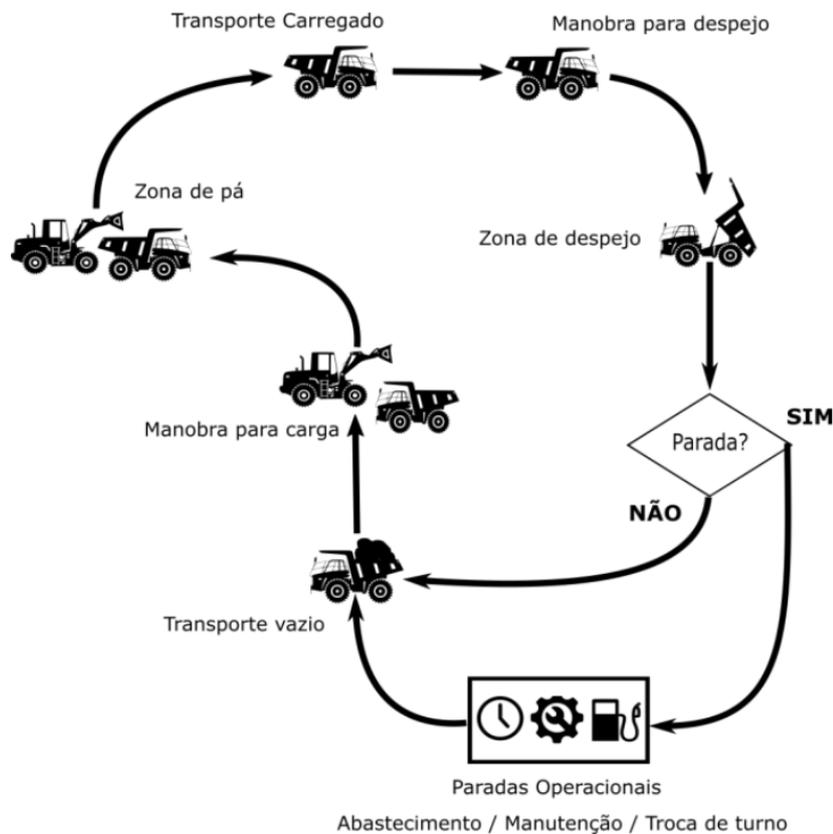


Figura 12: Ciclo de carregamento e transporte de uma mina a céu aberto.  
Fonte: Lopes e Maia (2020).

O caminhão fora-de-estrada é carregado com minério por uma carregadeira. Em seguida, o caminhão se dirige até o ponto destinado a pilha de minérios onde são formados os lotes para a usina de beneficiamento como mostrado na Figura 12. Primeiramente, os blocos de minério sofrem redução granulométrica ao serem triturados em um britador de mandíbula. Em seguida, o material é classificado por granulometria através de conjunto de peneiras. Por último, o minério é transportado por caminhões basculantes para o porto e escoado para clientes no exterior.

A gerência de engenharia de mina é responsável por frotas de equipamentos móveis entre eles estão perfuratrizes, pás carregadeiras, escavadeiras, motoniveladoras, retroescavadeiras, tratores de pneu, caminhões basculantes e caminhões fora-de-estrada. As equipes são subdivididas em dois grupos distintos:

O processo de extração e beneficiamento do minério na mineradora envolve diversas etapas. Inicialmente, o caminhão fora-de-estrada é carregado com minério pela carregadeira. Em seguida, o caminhão transporta o minério até a pilha de minérios, onde são formados os lotes para a usina de beneficiamento, conforme ilustrado na Figura 12.

Na usina, os blocos de minério passam por uma redução granulométrica, sendo triturados em um britador de mandíbula. Em seguida, o material é classificado por granulometria utilizando um conjunto de peneiras. Por fim, o minério é transportado por caminhões basculantes até o porto, onde é escoado para clientes no exterior.

A gerência de engenharia de mina é responsável por coordenar as frotas de equipamentos móveis, que incluem perfuratrizes, pás carregadeiras, escavadeiras, motoniveladoras, retroescavadeiras, tratores de pneu, caminhões basculantes e caminhões fora-de-estrada. Essa gerência é responsável pela organização, manutenção e operação eficiente desses equipamentos. As equipes de trabalho são subdivididas em dois grupos distintos.

A Figura 13 ilustra a interação desses grupos e como eles se encaixam no contexto geral da operação da mineradora. Essa estrutura organizacional permite uma abordagem integrada para a gestão eficiente dos equipamentos e processos, buscando alcançar os objetivos de produção e qualidade estabelecidos pela empresa.

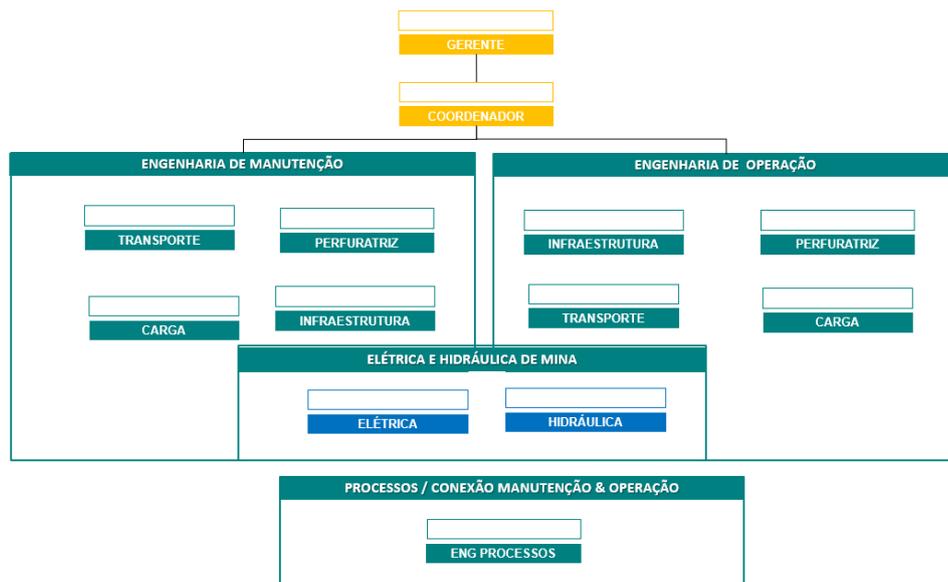


Figura 13: Organograma da Gerência de Engenharia de Mina.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Pode-se observar na Figura 13 as seguintes equipes:

Equipe de operação: é responsável por operar os equipamentos móveis, como perfuratrizes, pás carregadeiras, escavadeiras, motoniveladoras, retroescavadeiras, tratores de pneu, caminhões basculantes e caminhões fora-de-estrada. Eles desempenham atividades como perfuração, escavação, carregamento e transporte do minério de ferro dentro da mina.

Equipe de manutenção: é responsável por garantir o bom funcionamento e a disponibilidade dos equipamentos. Realizam manutenção preventiva, corretiva e preditiva nos equipamentos, visando minimizar paradas não programadas e garantir a confiabilidade operacional. A equipe de manutenção é composta por técnicos e especialistas que realizam inspeções, reparos e substituição de peças conforme necessário.

Ambas as equipes trabalham em conjunto para garantir o desempenho adequado dos equipamentos, maximizar a produção e reduzir os custos operacionais. Existem dois grupos distintos que desempenham funções específicas:

Grupo de intersecção hidráulica e elétrica: é responsável por lidar com as questões relacionadas aos sistemas hidráulicos e elétricos dos equipamentos. Eles realizam a manutenção e reparo desses sistemas, garantindo seu bom funcionamento. Além disso, são responsáveis por identificar e solucionar problemas relacionados à parte hidráulica e elétrica dos equipamentos, visando manter sua confiabilidade e eficiência.

Grupo de gerenciamento do processo: tem a responsabilidade de gerenciar o processo de extração e beneficiamento do minério de forma global. Eles coordenam as atividades das equipes de operação e manutenção, monitoram os indicadores de desempenho, planejam e programam as atividades diárias, semanais e mensais. Além disso, eles estão envolvidos na definição de estratégias para otimizar a produção, reduzir os custos operacionais e garantir a segurança no ambiente de trabalho.

A estrutura organizacional da gerência de engenharia de mina é composta por supervisões, conforme ilustrado na Figura 13. Cada supervisão é responsável por uma equipe específica, que se dedica a atividades direcionadas para a melhoria contínua e a confiabilidade das frotas de equipamentos de transporte, perfuratriz, carga e infraestrutura.

A supervisão de coordenação desempenha um papel fundamental no processo. Ela é responsável por realizar análises de falhas, monitorar os indicadores de manutenção e desempenho, elaborar projetos de redução de custos, promover melhorias contínuas, elaborar relatórios de manutenção e fornecer suporte nos processos de planejamento, programação e controle da manutenção.

No contexto deste trabalho, foram realizadas análises de dados que foram alimentados com informações provenientes de várias fontes, incluindo inspeção detectiva, manutenção corretiva, manutenção preventiva, planejamento e controle de manutenção. O objetivo dessas análises foi auxiliar na compreensão das falhas dos pneus da frota de caminhões fora-de-estrada

utilizados no transporte de minério na mineradora, bem como determinar com precisão a vida útil desse componente. Essas informações são essenciais para embasar ações de melhoria e otimização dos processos de manutenção e desempenho dos equipamentos.

## 4.2 Descrição do Componente Estudado: Pneu

### 4.2.1 Descrição do Equipamento

Os caminhões fora de estrada, também chamados de caminhões *off-highway*, são veículos desenvolvidos com o propósito de transportar grandes quantidades de materiais. Eles desempenham um papel essencial em setores industriais, especialmente na mineração de minério de ferro em minas a céu aberto. Esses caminhões são especialmente projetados e utilizados para operações de movimentação de materiais em larga escala, com capacidade para trabalhos pesados. A Figura 14 ilustra um exemplo de um desses modelos de caminhões.



Figura 14: Caminhão fora de estrada.  
Fonte: Catálogo Caterpillar (2013).

Como pode-se observar na Figura 14, os caminhões fora de estrada, também conhecidos como caminhões *off-highway*, destacam-se pela sua impressionante capacidade, força e tamanho excepcionais. Essas características vão além do comum e, por isso, esses veículos não são adequados para utilização em rodovias ou vias urbanas convencionais. Eles são projetados e fabricados especificamente com características mecânicas especiais, capazes de suportar trabalhos pesados e ambientes desafiadores (RICARDO e CATALANI, 2007).

Neste estudo, é de extrema importância a análise das frotas de caminhões fora de estrada e os modelos de pneus utilizados, pois esses elementos desempenham um papel fundamental

no sucesso das operações. O estudo foi realizado utilizando as frotas de caminhões dos modelos Caterpillar 777G, Caterpillar 789C, Caterpillar 789D e Komatsu 730E.

Os dados técnicos gerais da frota de caminhões fora de estrada estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados gerais técnicos.

<b>CAMINHÕES FORA DE ESTRADA</b>				
<b>Frota</b>	<b>777G</b>	<b>789C</b>	<b>789D</b>	<b>730E</b>
<b>Modelo do Motor</b>	Cat® C32 ACERT™	Cat® 3512B EUI	Cat® 3516C EUI	Komatsu® SSA16V159
<b>Potência Bruta</b>	765 kW	1.417 kW	1.566 kW	1.492 kW
<b>Potência Nominal</b>	683kW	1.320 kW	1.468 kW	1.388 kW
<b>Carga útil nominal</b>	89,4 ton	177 ton	181 ton	186 ton
<b>Capacidade de caçamba</b>	64,1 m³	105 m³	120 m³	77 m³

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A frota 777G é composta por caminhões que utilizam pneus do modelo 27.00R49. Na frota 789C, os caminhões são equipados com pneus do modelo 37.00R57. Já na frota 789D, os pneus empregados são do modelo 40.00R57. Além disso, na frota 730E, também são utilizados pneus do modelo 40.00R57.

Essas frotas de caminhões, comumente empregadas em grandes mineradoras, possuem uma configuração padrão que engloba diversos componentes essenciais. Entre eles estão o chassi, sistema elétrico, comunicação, compartimento do operador, trem de força, sistema de suspensão, sistema de arrefecimento, além das rodas e pneus *off the road* (OTR).

#### **4.2.2 O Pneu OTR**

Recentemente, ocorreram progressos significativos na tecnologia de fabricação de pneus para caminhões fora de estrada, resultando em um aumento no tamanho desses veículos, que agora possuem capacidades de carregamento que variam de 20 toneladas a mais de 450 toneladas. Esses caminhões são equipados com diferentes modelos de pneus para atender às necessidades específicas de cada atividade (LOPES, 2010).

Os pneus utilizados em caminhões fora de estrada são projetados especificamente para circulação em terrenos irregulares e são conhecidos como pneus *off the road* (OTR). Existem dois padrões de fabricação predominantes: pneus radiais e pneus diagonais.

De acordo com a Michelin (2023), os pneus diagonais possuem uma carcaça feita de cabos de lona em camadas, dispostos de forma cruzada, criando uma estrutura uniforme. Por outro lado, os pneus radiais possuem uma construção diferente, em que os cabos da lona

irradiam a partir do centro do pneu. Além disso, a coroa do pneu é formada por camadas que se organizam em formato de cinto.

Essas diferenças de construção entre os pneus de carcaça radial e diagonal podem ser observadas na Figura 15.

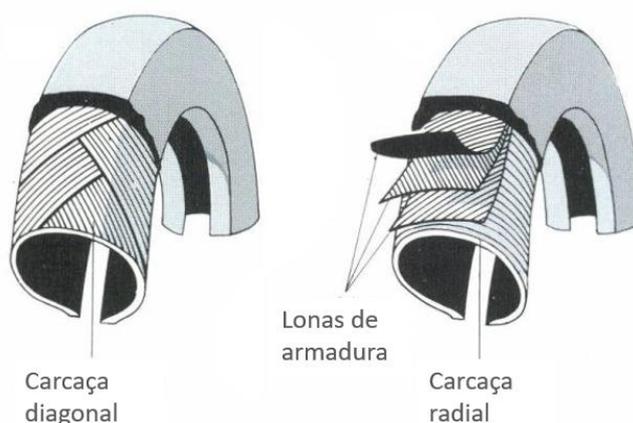


Figura 15: Construção dos pneus radial e diagonal.  
Fonte: Adaptado Michelin (2023).

Conforme exemplificado na Figura 15, os pneus radiais e diagonais apresentam características distintas em relação à sua construção e desempenho. Abaixo estão algumas características de cada tipo:

#### **Pneus Radiais:**

1. **Construção:** Os cabos da lona interna são dispostos radialmente, irradiando do centro do pneu em direção à banda de rodagem.
2. **Cintura de Aço:** Os pneus radiais possuem uma cintura de aço na região da banda de rodagem, proporcionando maior estabilidade e resistência.
3. **Distribuição de Carga:** A construção radial permite uma distribuição uniforme da carga sobre toda a superfície da banda de rodagem, resultando em melhor aderência e tração.
4. **Baixa Resistência ao Rolamento:** Os pneus radiais têm menor resistência ao rolamento, o que contribui para economia de combustível e menor desgaste.
5. **Conforto de Rodagem:** A estrutura radial absorve melhor os impactos e irregularidades da estrada, proporcionando uma condução mais suave e confortável.

### Pneus Diagonais:

1. **Construção:** Os cabos da lona interna são dispostos em ângulos diagonais em relação à direção do pneu, cruzando-se em um padrão de sobreposição.
2. **Resistência:** Os pneus diagonais possuem uma construção robusta, o que os torna mais resistentes a cortes, perfurações e impactos.
3. **Durabilidade:** Esses pneus são conhecidos por sua durabilidade e capacidade de lidar com condições extremas e terrenos acidentados.
4. **Baixo Custo:** Em geral, os pneus diagonais têm um custo menor em comparação aos radiais.
5. **Rigidez Lateral:** Devido à sua construção, os pneus diagonais têm uma rigidez lateral maior, o que pode ser vantajoso em determinadas situações de condução *off-road*.

Os pneus diagonais são robustos e duráveis, sendo ideais para enfrentar terrenos acidentados e condições extremas na mineração. Eles oferecem resistência a cortes, perfurações e impactos, suportando cargas pesadas e trabalho pesado. Já os pneus radiais possuem distribuição uniforme de carga, menor resistência ao rolamento, economia de combustível e maior conforto de rodagem. Eles proporcionam excelente tração e aderência.

Como evidenciado na figura 16, é possível observar as vantagens do pneu radial em relação ao pneu diagonal, o que o torna mais amplamente utilizado na indústria da mineração devido às suas qualidades essenciais superiores em comparação ao outro modo de construção.

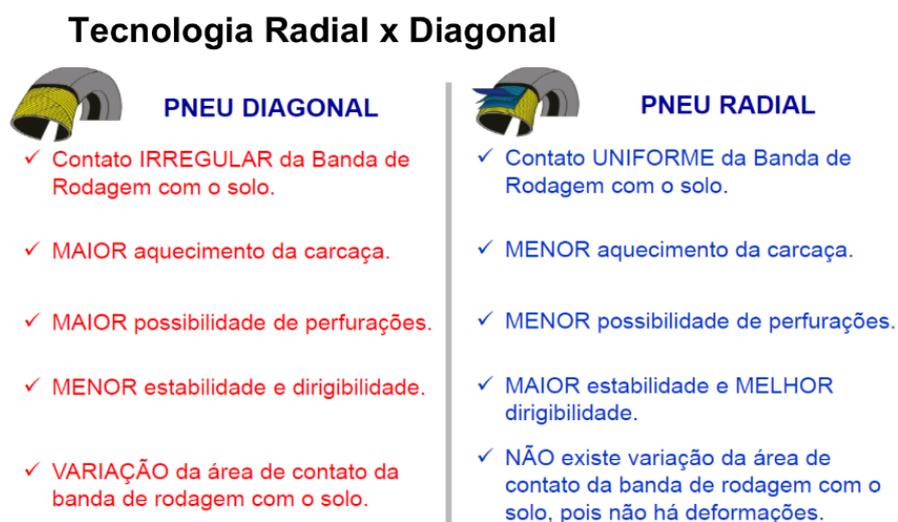


Figura 16: Comparação de tecnologia dos pneus radial e diagonal.  
Fonte: Michelin (2023).

A Figura 16 fornece uma explicação sobre a preferência pelos pneus radiais em comparação ao modelo de construção diagonal, levando em consideração vários fatores tecnológicos. A escolha adequada entre esses modelos depende das condições do terreno, dos requisitos operacionais, da durabilidade desejada e dos custos envolvidos. É de extrema importância selecionar os modelos de pneus adequados para otimizar o desempenho, a segurança e a eficiência das operações de mineração. Além disso, é essencial considerar aspectos como a estrutura dos pneus, a profundidade dos sulcos e a pressão correta, a fim de reduzir o desgaste e garantir a segurança dos operadores e do ambiente de trabalho.

Os dados técnicos gerais dos pneus da frota de caminhões fora de estrada estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados gerais técnicos dos pneus.

Descrição	Sulco	Aro	Carga	Pressão	Dimensões [mm]		Peso
			Max.	Max.	Diâmetro	Largura	
	[mm]	[pol.]	[ton.]	[KPa]			[Kg]
27.00R49	63	49	27.25	650	2690	740	1340
37.00R57	87	57	53	725	3400	1020	3010
40.00R57	93	57	60	725	3560	1130	3600

Fonte: Adaptado de Xthra (2011).

Conforme apresentado na Tabela 3, pode-se observar algumas características distintas de cada modelo de pneu utilizado neste estudo. Essas características incluem dimensões, capacidade de carga, pressão de inflação recomendada e outras informações relevantes. A análise dessas informações é crucial para entender as especificações técnicas de cada modelo de pneu e sua adequação para as operações de caminhões fora de estrada.

O modelo de pneu 27.00R49 possui dimensões e características específicas que o tornam adequado para aplicações em caminhões fora de estrada. As dimensões "27.00R49" indicam seu tamanho e construção radial. Aqui estão algumas características gerais deste modelo:

1. Tamanho: O pneu 27.00R49 possui um diâmetro externo de 2690 mm, uma largura de seção de 740 mm e é projetado para ser montado em uma roda de 49 polegadas.
2. Construção radial: Esse tipo de pneu é fabricado com uma estrutura radial, em que as camadas de cordões de tecido são dispostas de forma radial a partir do

centro do pneu. Essa construção proporciona maior estabilidade, resistência e distribuição uniforme da carga.

3. Capacidade de carga: O pneu 27.00R49 é projetado para suportar cargas pesadas. Com a pressão de inflação adequada, considerando a velocidade e o tipo de trabalho realizado, o pneu 27.00R49 possui uma capacidade de carga de aproximadamente 27 toneladas. É fundamental ajustar corretamente a pressão de inflação do pneu a 700 kPa, levando em conta os requisitos específicos da operação, para garantir sua capacidade máxima de carga e o desempenho seguro durante o transporte de cargas pesadas.

O modelo de pneu 37.00R57 possui dimensões e características específicas que o tornam adequado para aplicações em caminhões fora de estrada. Aqui estão algumas informações gerais sobre esse modelo:

1. Tamanho: O pneu 37.00R57 possui um diâmetro externo de 3400 mm, uma largura de seção de 1020 mm e é projetado para ser montado em uma roda de 57 polegadas.
2. Construção radial: Assim como o modelo anterior, esse pneu também possui uma construção radial, em que as camadas de cordões de tecido são dispostas de forma radial a partir do centro do pneu. Essa construção oferece maior estabilidade, resistência e distribuição uniforme da carga.
3. Capacidade de carga: O pneu 37.00R57 é projetado para suportar cargas pesadas. Com a pressão de inflação adequada, considerando a velocidade e o tipo de trabalho realizado, o pneu 37.00R57 possui uma capacidade de carga de até 53 toneladas. É crucial ajustar corretamente a pressão de inflação do pneu a 725 kPa, levando em conta os requisitos específicos da operação, para garantir sua capacidade máxima de carga e um desempenho seguro durante o transporte de cargas pesadas.

O modelo de pneu 40.00R57 também é amplamente utilizado em caminhões fora de estrada de grande porte. Aqui estão algumas informações sobre suas dimensões e características:

1. Tamanho: O pneu 40.00R57 possui um diâmetro externo de aproximadamente 3560 mm, uma largura de seção de 1130 mm e é projetado para ser montado em uma roda de 57 polegadas.

2. Construção radial: Assim como os modelos anteriores mencionados, esse pneu também possui uma construção radial, em que as camadas de cordões de tecido são dispostas de forma radial a partir do centro do pneu. Essa construção oferece maior estabilidade, resistência e distribuição uniforme da carga.
3. Capacidade de carga: O pneu 40.00R57 é projetado para suportar cargas extremamente pesadas. Considerando a pressão de inflação apropriada, a velocidade e o tipo de trabalho realizado, o pneu 37.00R57 possui uma capacidade de carga de até 60 toneladas. É importante ajustar corretamente a pressão de inflação do pneu a 725 kPa, de acordo com os requisitos específicos da operação, garantindo assim sua capacidade máxima de carga e um desempenho seguro durante o transporte de cargas pesadas.

### 4.3 Estratificação do Perfil de Perdas

A análise do perfil de perdas dos pneus de quatro frotas distintas de caminhões fora de estrada da mineradora foi realizada com base em um extenso histórico de paradas ocorridas no período de 1 de janeiro de 2022 a 31 de dezembro de 2022. O objetivo desse estudo foi identificar os principais padrões de falhas e perdas relacionados aos pneus utilizados nessas frotas.

Para facilitar a análise e o gerenciamento dos dados, todas as informações foram organizadas em formato de planilha, utilizando o *software Microsoft Excel*. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os dados coletados, incluindo informações sobre as horas trabalhadas, frota, os modos de falha dos pneus e medidas.

A escolha do *Microsoft Excel* como ferramenta para a coleta e organização dos dados se deu pela sua ampla utilização e familiaridade por parte da equipe responsável pela análise. O *software* oferece recursos para organização dos dados, o que possibilitou uma análise mais eficiente e detalhada posterior utilizando essa fonte de dados.

Em suma, o perfil de perdas dos pneus utilizando dados organizados em planilhas do *Microsoft Excel* proporcionou uma visão abrangente das ocorrências.

Tabela 4: Manutenção corretiva dos pneus da frota 777G.

Frota	Horas Trabalhadas	Medida, fabricante, descrição	Motivos de Sucateamento
777G	8873	PNEU MICHELIN 27.00R49	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
777G	8608	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	8074	PNEU MICHELIN 27.00R49	3 Corte por estouro. Devido impacto
777G	7695	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	7269	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	7228	PNEU MICHELIN 27.00R49	18 Desgaste na zona baixa. Sobrecarga
777G	7065	PNEU MICHELIN 27.00R49	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
777G	7051	PNEU MICHELIN 27.00R49	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
777G	6538	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	6536	PNEU MICHELIN 27.00R49	11 Corte na banda de rodagem Sem carga
777G	6518	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	6490	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	6490	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	6378	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	6319	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	5952	PNEU MICHELIN 27.00R49	18 Desgaste na zona baixa. Sobrecarga
777G	5906	PNEU MICHELIN 27.00R49	11 Corte na banda de rodagem Sem carga
777G	5827	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	5815	PNEU MICHELIN 27.00R49	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
777G	5815	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	5607	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	5565	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	5550	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	5508	PNEU MICHELIN 27.00R49	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
777G	5105	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	4967	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	4767	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	4653	PNEU MICHELIN 27.00R49	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
777G	4504	PNEU MICHELIN 27.00R49	15 Falha na reparação. Reparo "1.50"
777G	4028	PNEU MICHELIN 27.00R49	11 Corte na banda de rodagem Sem carga
777G	3755	PNEU MICHELIN 27.00R49	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
777G	3140	PNEU MICHELIN 27.00R49	4 Corte na lateral. Ocasionado por o
777G	2630	PNEU MICHELIN 27.00R49	14 Separação Lyne Excesso de flexão

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na Tabela 4, é possível observar na linha destacada que um pneu 27.00R49, pertencente à frota 777G, foi submetido a um total de 3140 horas de trabalho antes de apresentar uma falha. Essa falha ocorreu devido a um corte na lateral do pneu, sendo identificada pelo código de sucateamento número 4, que representa esse tipo específico de modo de falha.

Tabela 5: Manutenção corretiva dos pneus da frota 789C.

Frota	Horas Trabalhada	Medida, fabricante, dese	Motivos de Sucateamento
789C	9455	PNEU MICHELIN 37.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789C	8695	PNEU MICHELIN 37.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789C	8565	PNEU MICHELIN 37.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789C	8548	PNEU MICHELIN 37.00R57	4 Corte na lateral. Ocasionado por ob
789C	8228	PNEU MICHELIN 37.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789C	8013	PNEU MICHELIN 37.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789C	7916	PNEU MICHELIN 37.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789C	7825	PNEU MICHELIN 37.00R57	20 Separação térmica. Deformação e
789C	7789	PNEU MICHELIN 37.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789C	5703	PNEU MICHELIN 37.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na Tabela 5, pode-se verificar na linha destacada que um pneu 37.00R57, pertencente à frota 789C, foi utilizado por um total de 7825 horas antes de ocorrer uma falha. Essa falha foi causada pela separação térmica do pneu e identificada pelo código de sucateamento número 20, que indica esse tipo específico de modo de falha.

Tabela 6: Manutenção corretiva dos pneus das frotas 789D e 730E.

Frota	Horas Trabalhadas	Marca, fabricante, desenho e tamanho	Motivos de Sucateamento
730E	12630	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	11813	PNEU MICHELIN 40.00R57	12 Separação da banda de rodagem
789D	11216	PNEU MICHELIN 40.00R57	18 Desgaste na zona baixa. Sobreca
730E	11076	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	10926	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinage
789D	10727	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	10677	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	10502	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	10414	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	10284	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecanica no pacote de
789D	10254	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	10098	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecanica no pacote de
730E	9917	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9859	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9797	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9671	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9551	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9493	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9466	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9440	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	9405	PNEU MICHELIN 40.00R57	18 Desgaste na zona baixa. Sobreca
789D	9225	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
730E	9177	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8796	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8765	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8687	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8638	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinage
789D	8574	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8499	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8471	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8394	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinage
789D	8358	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8318	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8306	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	8193	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecanica no pacote de
789D	8091	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

**Na Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é possível observar na linha destacada que um pneu 40.00R57, pertencente à frota 789D, foi submetido a um total de 8091 horas de trabalho antes de apresentar uma falha. Essa falha foi causada pelo desgaste normal do pneu, sendo identificada pelo código de sucateamento número 1, que representa esse tipo específico de modo de falha.

Tabela 7: Manutenção corretiva dos pneus das frotas 789D e 730E.

789D	8047	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	7905	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	7828	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	7774	PNEU MICHELIN 40.00R57	10 Quebra do talão. Ocasionalmente por
789D	7749	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	7666	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	7578	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	7578	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	7572	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	7514	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	7466	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	7457	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	7393	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	7205	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	7205	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	7153	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	7123	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	7034	PNEU MICHELIN 40.00R57	11 Corte na banda de rodagem Sem c
789D	6763	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	6757	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	6757	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	6369	PNEU MICHELIN 40.00R57	12 Separação da banda de rodagem f
789D	6292	PNEU MICHELIN 40.00R57	12 Separação da banda de rodagem f
789D	6256	PNEU MICHELIN 40.00R57	11 Corte na banda de rodagem Sem c
789D	6061	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	5973	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	5293	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	5254	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	5254	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	4910	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	4749	PNEU MICHELIN 40.00R57	11 Corte na banda de rodagem Sem c
789D	4749	PNEU MICHELIN 40.00R57	11 Corte na banda de rodagem Sem c
789D	4709	PNEU MICHELIN 40.00R57	13 Separação mecânica no pacote de
789D	4635	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	4635	PNEU MICHELIN 40.00R57	1 Desgaste normal. Final de vida útil.
789D	4631	PNEU MICHELIN 40.00R57	2 Desgaste forçado. Devido patinagem
789D	4503	PNEU MICHELIN 40.00R57	11 Corte na banda de rodagem Sem c

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na Tabela 7, é possível observar na linha destacada que um pneu 40.00R57, pertencente à frota 789D, foi submetido a um total de 4503 horas de trabalho antes de apresentar uma falha. Essa falha foi causada pelo corte na banda de rodagem do pneu, sendo identificada pelo código de sucateamento número 11, que representa esse tipo específico de modo de falha.

Para obter esses dados, foi realizada a filtragem e estratificação dos dados contidos num *dashboard* do *Power BI*, que abrangia informações detalhadas sobre todas as paradas dos pneus e seus respectivos modos de falha.

Com base nessas informações, foi possível realizar uma análise minuciosa do perfil de perdas dos pneus, identificando os principais modos de falha, as causas subjacentes e os períodos de maior incidência de falhas. Esses *insights* são de extrema importância para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preventiva e melhoria contínua, visando otimizar a vida útil dos pneus, reduzir custos operacionais e maximizar a disponibilidade dos equipamentos.

Após o levantamento do histórico de trocas do componente e o preenchimento das tabelas para organização dos dados, os mesmos foram inseridos nos softwares *Weibull ++* e *Proconf* 2000 para o cálculo das faixas de confiabilidade e suas respectivas funções.

#### **4.4 Modelagem dos dados utilizando os *Softwares* Estatísticos**

##### **4.4.1 Frota 777G (Pneu: 27.00R49)**

Para a análise da primeira frota 777G, que utiliza pneus do modelo 27.00R49, foram utilizados dados de falhas de pneus, totalizando 33 casos em que ocorreram falhas corretivas. Os dados considerados foram completos, totalizando 33 ocorrências de falhas, sem nenhuma suspensão à direita ou tempo censurado, o que indica que houve substituição de pneus sem falha ou pneus em operação durante o período analisado.

Para realizar a análise, os dados foram inseridos nos *softwares Weibull++* e *ProConf* 2000. Essas ferramentas processam os dados e realizam cálculos das funções de confiabilidade, utilizando estimativas de verossimilhança máxima para os parâmetros  $\gamma$  e  $\theta$  da distribuição de Weibull. O objetivo é determinar qual distribuição, dentre todas as possíveis definidas pelos valores dos parâmetros, tem a maior probabilidade de ter gerado a amostra analisada. Os valores escolhidos para os parâmetros da distribuição de Weibull são apresentados em uma das abas do *software*, conforme ilustrado pela Figura 17.

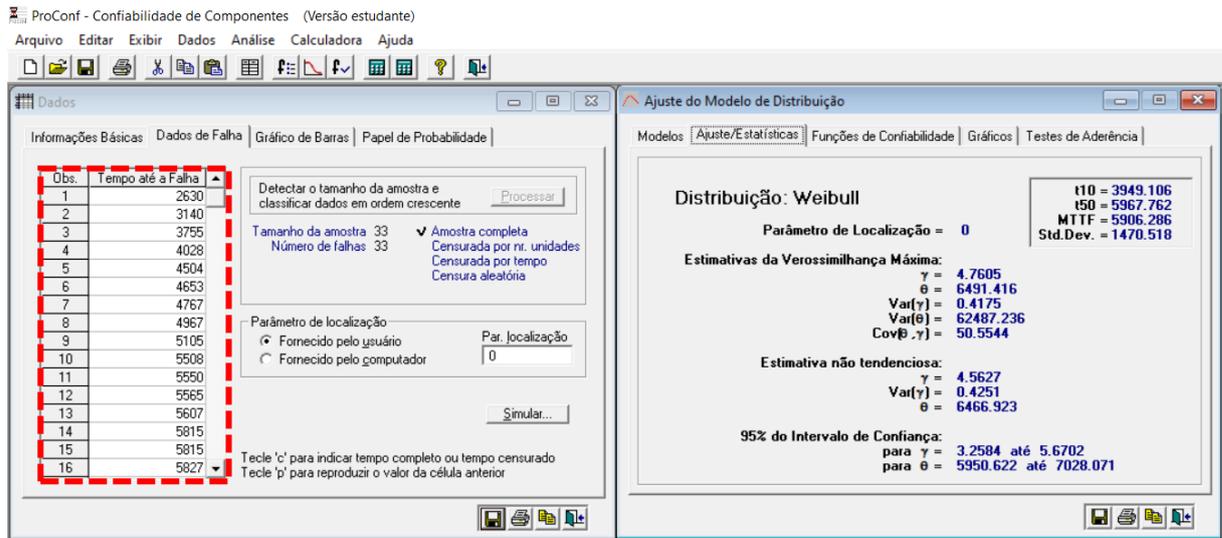


Figura 17: Dados da frota 777G inseridos na tela principal do software ProConf 2000.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Na análise das funções de confiabilidade dos diferenciais, é possível observar na Figura 17: Dados da frota 777G inseridos na tela principal do software ProConf 2000. que os parâmetros foram calculados utilizando o método da verossimilhança máxima, resultando nos valores de  $\gamma = 4,7605$  e  $\theta = 6491,416$ . Esses parâmetros são essenciais para modelar a confiabilidade.

Para obter os valores de  $\gamma$  (parâmetros de forma) e  $\theta$  (parâmetros de escala), foram utilizados os tempos de falha destacados na Figura 17. O software realiza os cálculos dos parâmetros de forma e escala com base no número de amostras fornecidas.

A análise resulta na geração de uma tabela com as faixas de confiabilidade, conforme ilustrado na Tabela 7. Além disso, são apresentados gráficos para visualização dos resultados. O gráfico do fator de confiabilidade em percentil é plotado no ambiente do *software Weibull++* (Figura 18), permitindo uma melhor visualização dos pontos de ocorrência de falha. Já o gráfico da densidade de probabilidade de falha ou  $f(t)$  (Figura 19) e o gráfico da taxa de falha ou  $h(t)$  (Figura 20) são plotados no *software ProConf 2000*.

A faixa de confiabilidade utilizada como base para as comparações é de 50%, conforme estabelecido previamente pelo *software*. Esses gráficos e tabelas proporcionam uma representação visual clara dos resultados da análise de confiabilidade.

Tabela 8: Faixas de confiabilidade para o pneu 27.00R49

Probabilidade Falha [%]	Confiabilidade [%]	Hora Trabalhada	LC Inferior	LC Superior
5	95	3,530	2,878	4,330
10	90	4,077	3,516	4,727
20	80	4,746	4,268	5,277
30	70	5,223	4,777	5,711
40	60	5,625	5,192	6,095
50	50	5,994	5,566	6,455
60	40	6,355	5,930	6,811
70	30	6,732	6,307	7,187
80	20	7,161	6,725	7,626
90	10	7,734	7,248	8,252
95	5	8,188	7,618	8,800

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Tabela 8 é gerada pelo *software Weibull++*, o qual utiliza os dados dos tempos de falha inseridos para plotar a curva de confiabilidade em relação ao tempo. Além disso, o *software* gera, por meio de aproximações, as curvas dos limites superior e inferior.

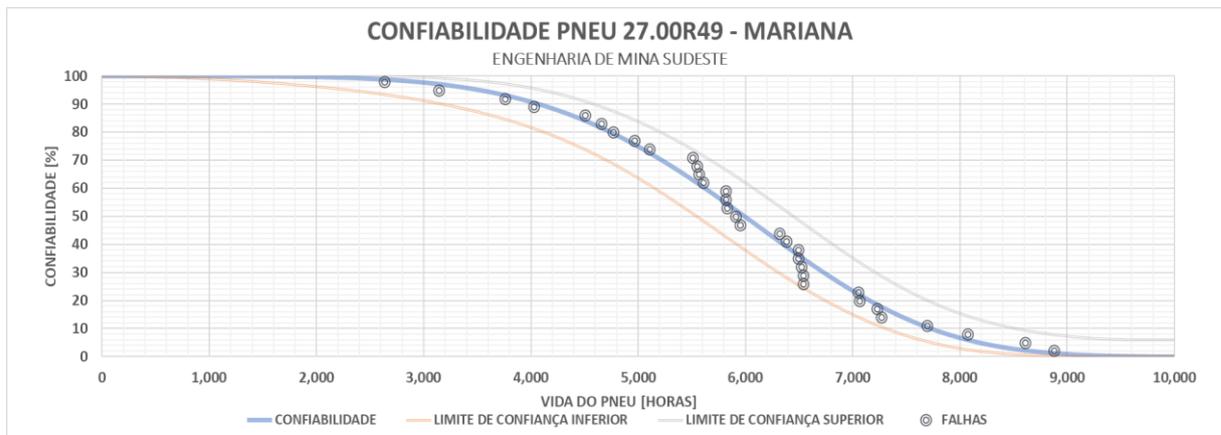


Figura 18: Confiabilidade em função do tempo.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Figura 18 apresenta a curva de confiabilidade em relação ao tempo, plotada pelo software. Essa curva mostra como a confiabilidade do sistema varia ao longo do tempo. Ela fornece informações sobre a probabilidade de o sistema estar em funcionamento adequado em determinado ponto do tempo. A curva de confiabilidade é uma ferramenta importante para avaliar a performance e a vida útil de um sistema.

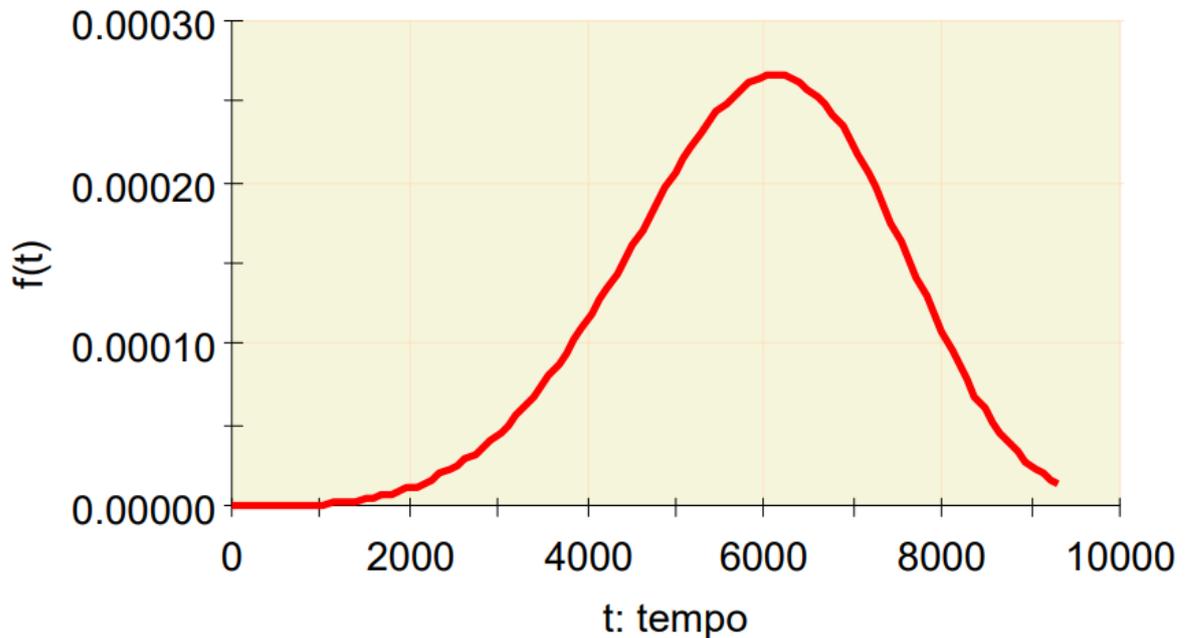


Figura 19: Densidade de probabilidade de falha em função do tempo.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Figura 19 mostra a densidade de probabilidades de falhas, representando a distribuição das falhas ao longo do tempo. É possível observar que a densidade de probabilidades está aproximadamente centrada em torno de 6000 horas. Isso sugere que a maior concentração de falhas ocorre nesse intervalo de tempo. A análise da densidade de probabilidades de falhas é útil para entender a distribuição dos eventos de falha e auxiliar na identificação de padrões ou tendências temporais.

Tabela 9: Faixas de limites técnicos de vida para o pneu 27.00R49.

Limite Mínimo	Confiabilidade	Limite Médio	Confiabilidade	Limite Máximo	Confiabilidade
5.625	60%	5.813	55%	5.994	50%

Fonte: Pesquisa direta (2023).

De acordo com os padrões estabelecidos pela empresa para a faixa de confiabilidade aceitável de ativos móveis de mineração, que varia entre 50% e 60%, foram determinadas as vidas úteis dos pneus conforme apresentado na Tabela 9. A vida útil dos pneus foi estimada entre 5.500 e 6.000 horas de trabalho, considerando um valor normalizado, levando em conta o risco estabelecido para o negócio de ativos.

Com o objetivo de obter uma compreensão mais aprofundada do comportamento de falha dos pneus analisados, foram examinadas as características da curva de taxa de falha obtida por meio do *software ProConf 2000*, conforme ilustra a Figura 20. Esse estudo permitiu uma melhor compreensão das tendências e padrões de falha dos pneus ao longo do tempo.

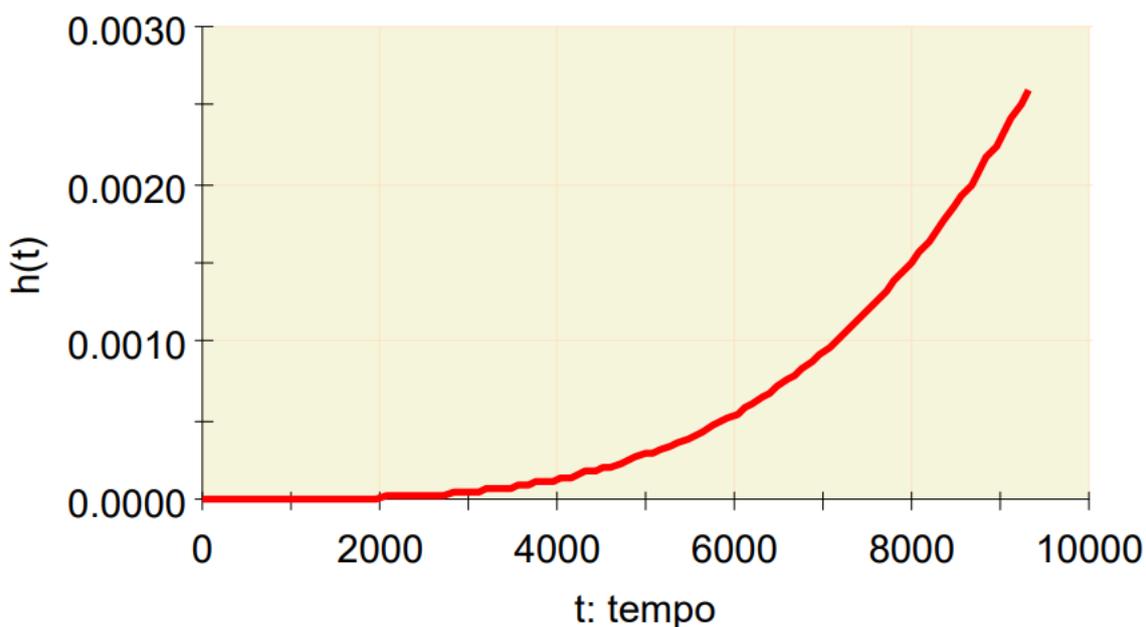


Figura 20: Taxa de falha em função do tempo.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Observa-se no gráfico da Figura 20 que a taxa de falhas aumenta à medida que as horas trabalhadas aumentam. Esse comportamento é típico de modos de falha relacionados à fadiga ou desgaste. Portanto, há evidências estatísticas de que os componentes que falharam apresentam o comportamento característico de envelhecimento do componente devido ao esforço das horas trabalhadas.

#### 4.4.2 Frota 789C (Pneu: 37.00R57)

No estudo da segunda frota, que utiliza pneus do modelo 37.00R57, foram analisados dados de falhas, totalizando 10 casos de falhas corretivas. Todos os dados disponíveis foram considerados, totalizando 10 ocorrências de falhas, sem nenhuma suspensão à direita ou tempo censurado. Isso indica que não houve substituição de pneus sem falha ou pneus em operação durante o período analisado.

Para realizar essa análise, os dados foram inseridos nos softwares *Weibull++* e *ProConf2000*. Essas ferramentas processaram os dados e calcularam as funções de

confiabilidade, utilizando o método de verossimilhança máxima para estimar os parâmetros  $\gamma$  e  $\theta$  da distribuição de Weibull. O objetivo foi determinar qual distribuição, dentre todas as possíveis definidas pelos valores dos parâmetros, tem a maior probabilidade de ter gerado a amostra analisada. Os valores seleccionados para os parâmetros da distribuição de Weibull são apresentados em uma das abas do software, conforme mostrado na Figura 21.

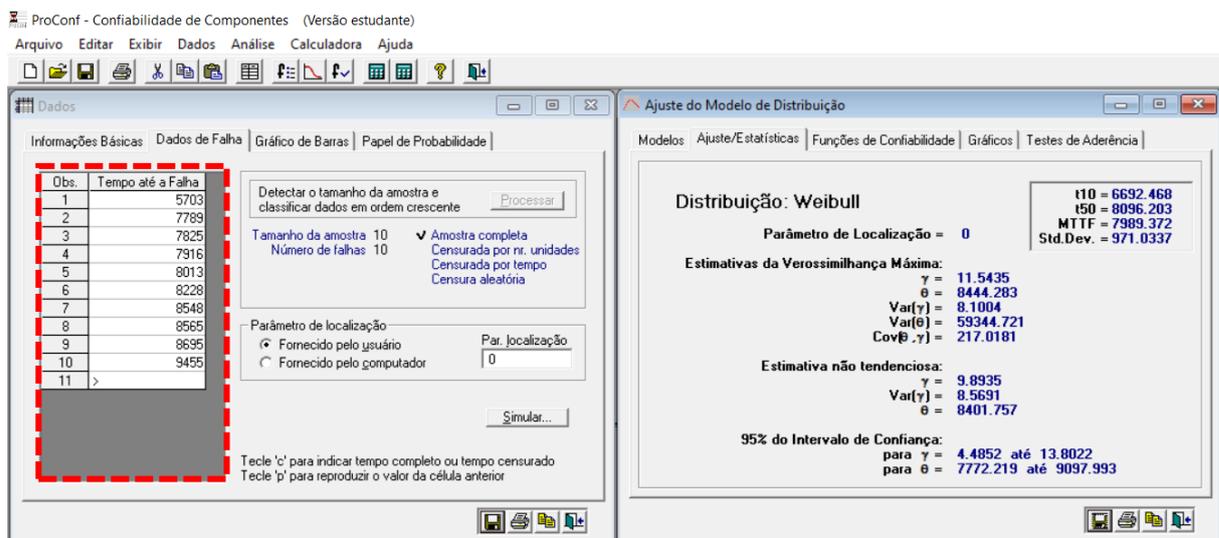


Figura 21: Dados da frota 789C inseridos na tela principal do software ProConf 2000. Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Na análise das funções de confiabilidade, foi utilizado o método da verossimilhança máxima para calcular os parâmetros, resultando nos valores de  $\gamma = 11,5435$  e  $\theta = 8444,283$ , conforme demonstrado na Figura 21. Esses parâmetros são fundamentais para modelar a confiabilidade dos diferenciais.

Para obter os valores de  $\gamma$  (parâmetros de forma) e  $\theta$  (parâmetros de escala), foram utilizados os tempos de falha destacados na Figura 21. O software realiza os cálculos dos parâmetros de forma e escala com base no número de amostras fornecidas.

A análise resulta na geração de uma tabela com as faixas de confiabilidade, conforme ilustrado na Tabela 9. Além disso, são apresentados gráficos que permitem visualizar os resultados de forma mais clara. O gráfico do fator de confiabilidade em percentil é plotado no ambiente do *software Weibull++* (Figura 22), o que possibilita uma melhor compreensão dos pontos de ocorrência de falha ao longo do tempo. Já o gráfico da densidade de probabilidade de falha ou  $f(t)$  (Figura 23) e o gráfico da taxa de falha ou  $h(t)$  (Figura 24) são plotados no *software ProConf 2000*.

A faixa de confiabilidade utilizada como base para comparações é de 50%, conforme estabelecido previamente pelo *software*. Esses gráficos e tabelas fornecem uma representação visual clara dos resultados da análise de confiabilidade realizada.

Tabela 10: Faixas de confiabilidade para o pneu 37.00R57.

Probabilidade Falha [%]	Confiabilidade [%]	Hora Trabalhada	LC Inferior	LC Superior
5	95	6,366	5,340	7,391
10	90	6,878	6,038	7,717
20	80	7,411	6,755	8,068
30	70	7,745	7,192	8,298
40	60	8,001	7,518	8,483
50	50	8,218	7,785	8,650
60	40	8,416	8,019	8,814
70	30	8,611	8,234	8,987
80	20	8,817	8,447	9,187
90	10	9,072	8,685	9,459
95	5	9,259	8,844	9,674

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Tabela 10 é gerada pelo *software Weibull++*, o qual utiliza os dados dos tempos de falha inseridos para plotar a curva de confiabilidade em relação ao tempo. Além disso, o *software* gera, por meio de aproximações, as curvas dos limites superior e inferior.

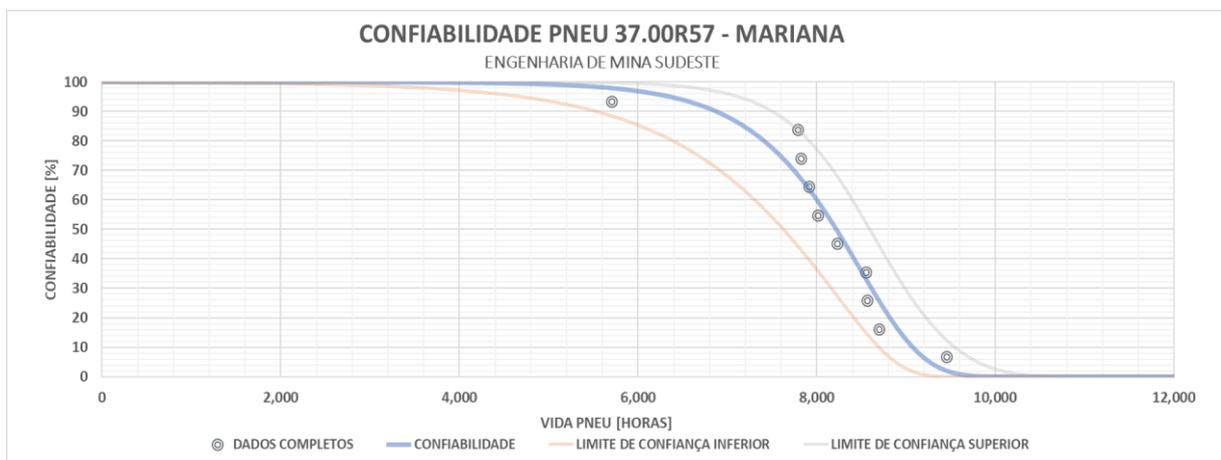


Figura 22: Confiabilidade em função do tempo.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Figura 22 apresenta a curva de confiabilidade em relação ao tempo, plotada pelo *software*. Essa curva mostra como a confiabilidade do sistema varia ao longo do tempo. Ela fornece informações sobre a probabilidade de o sistema estar em funcionamento adequado em determinado ponto do tempo. A curva de confiabilidade é uma ferramenta importante para avaliar a performance e a vida útil de um sistema.

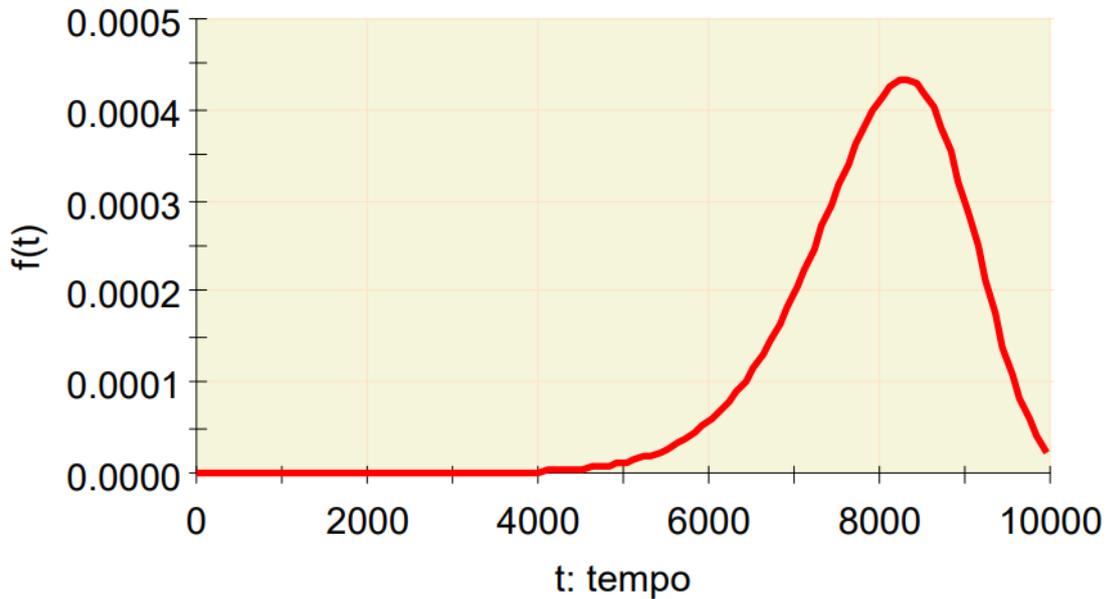


Figura 23: Densidade de probabilidade de falha em função do tempo.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Figura 23 mostra a densidade de probabilidades de falhas, representando a distribuição das falhas ao longo do tempo. É possível observar que a densidade de probabilidades está aproximadamente centrada em torno de 8250 horas. Isso sugere que a maior concentração de falhas ocorre nesse intervalo de tempo. A análise da densidade de probabilidades de falhas é útil para entender a distribuição dos eventos de falha e auxiliar na identificação de padrões ou tendências temporais.

Tabela 11: Faixas de confiabilidade para o pneu 37.00R57.

Limite Mínimo	Confiabilidade	Limite Médio	Confiabilidade	Limite Máximo	Confiabilidade
8.001	60%	8.113	55%	8.218	50%

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Seguindo os critérios estabelecidos pela empresa para a faixa de confiabilidade aceitável de ativos móveis de mineração, que varia entre 50% e 60%, foram determinadas as vidas úteis dos pneus, conforme apresentado na Tabela 11. A vida útil estimada dos pneus está compreendida entre 8.000 e 8.250 horas de trabalho, considerando um valor normalizado, levando em consideração o risco estabelecido para o negócio de ativos.

Com o intuito de aprofundar nossa compreensão do comportamento de falha dos pneus analisados, examinamos as características da curva de taxa de falha obtida por meio do *software*

*ProConf 2000*, conforme ilustrado na Figura 24. Esse estudo nos proporcionou uma melhor compreensão das tendências e padrões de falha dos pneus ao longo do tempo.

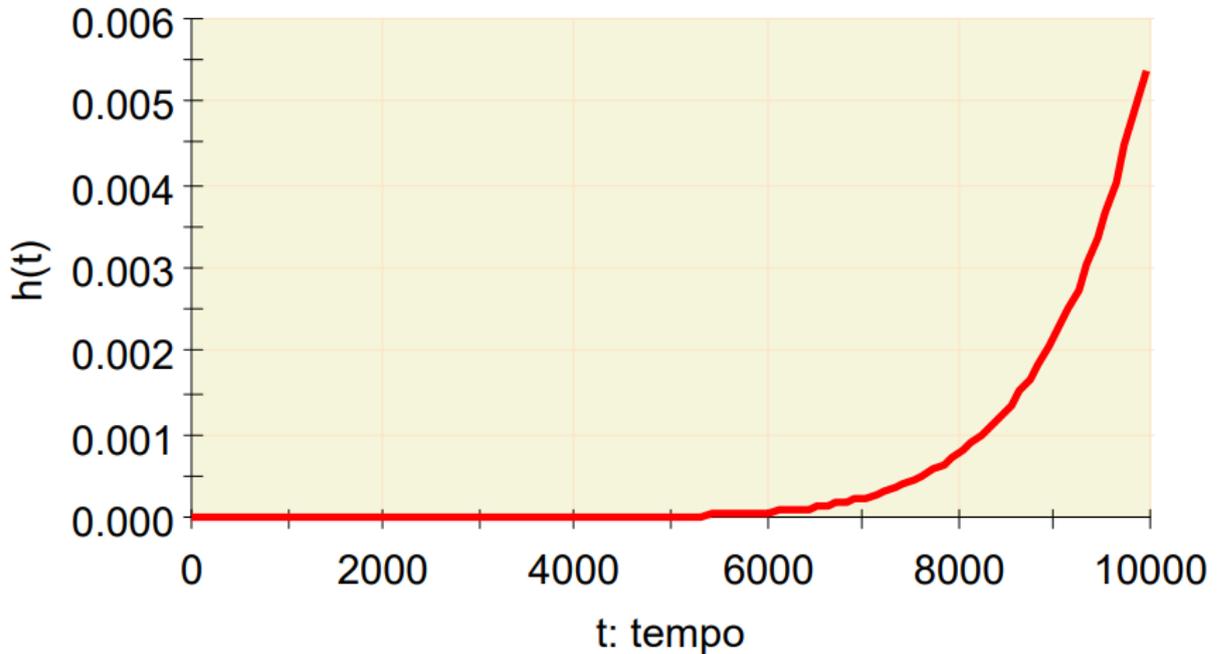


Figura 24: Taxa de falha em função do tempo.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Ao analisar o gráfico da Figura 24, é perceptível que a taxa de falhas apresenta um aumento proporcional ao aumento das horas trabalhadas. Essa tendência é comumente associada a modos de falha relacionados à fadiga ou desgaste. Essa evidência estatística confirma que os componentes falhados exibem o comportamento típico de envelhecimento devido ao acúmulo de horas trabalhadas. Isso reforça a importância de monitorar e gerenciar adequadamente o tempo de uso dos componentes para evitar falhas prematuras.

#### 4.4.3 Frota 789D e 730E (Pneu: 40.00R57)

No estudo da terceira e quarta frota, em que os dados foram analisados em conjunto devido ao compartilhamento do mesmo modelo dimensional de pneu (40.00R57), foram analisados os registros de falhas, totalizando 73 casos de falhas corretivas. Todos os dados disponíveis foram considerados, resultando em 73 ocorrências de falhas, sem nenhuma suspensão à direita ou tempo censurado. Isso indica que não ocorreram substituições de pneus sem falhas ou pneus em operação durante o período analisado.

Para realizar essa análise, os dados foram inseridos nos softwares *Weibull++* e *ProConf2000*. Essas ferramentas processaram os dados e calcularam as funções de confiabilidade, utilizando o método de verossimilhança máxima para estimar os parâmetros  $\gamma$  e  $\theta$  da distribuição de Weibull. O objetivo foi determinar qual distribuição, dentre todas as possíveis definidas pelos valores dos parâmetros, apresentava a maior probabilidade de ter gerado a amostra analisada. Os valores selecionados para os parâmetros da distribuição de Weibull estão apresentados em uma das abas do *software*, conforme ilustrado na Figura 25.

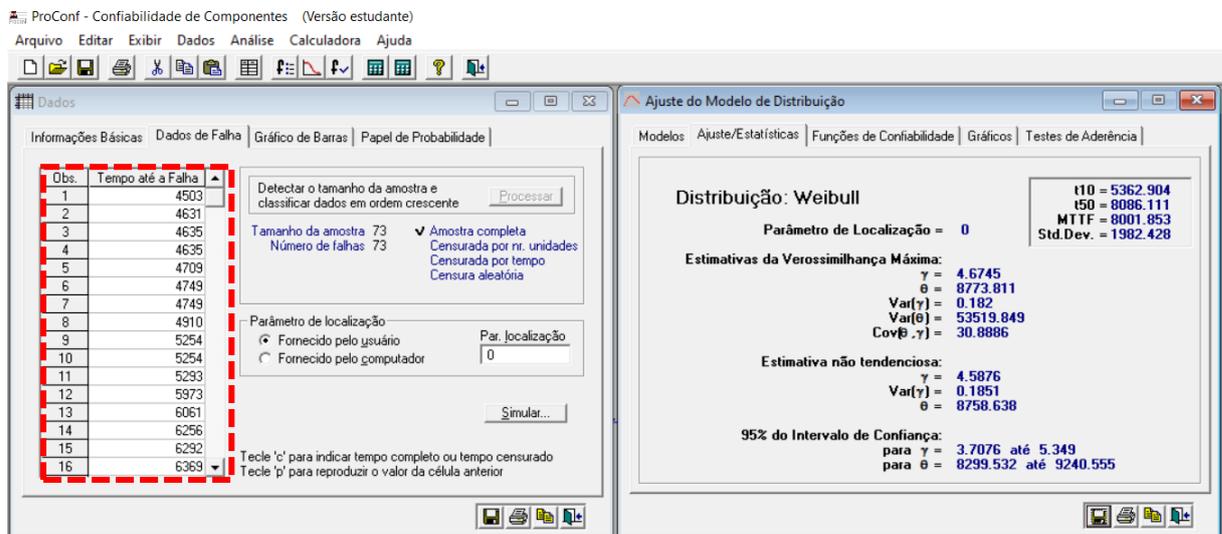


Figura 25: Dados das frotas 789D e 730E inseridos na tela principal do software ProConf 2000. Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Na análise das funções de confiabilidade, utilizou-se o método da verossimilhança máxima para calcular os parâmetros, resultando nos valores de  $\gamma = 4,6745$  e  $\theta = 8773,811$ , conforme demonstrado na Figura 25. Esses parâmetros são essenciais para modelar a confiabilidade dos diferenciais.

Para obter os valores de  $\gamma$  (parâmetros de forma) e  $\theta$  (parâmetros de escala), foram utilizados os tempos de falha destacados na Figura 25. O software realiza os cálculos dos parâmetros de forma e escala com base no número de amostras fornecidas.

A análise resulta na geração de uma tabela com as faixas de confiabilidade, conforme ilustrado na Tabela 11. Além disso, são apresentados gráficos que permitem uma visualização mais clara dos resultados. O gráfico do fator de confiabilidade em percentil é plotado no ambiente do *software Weibull++* (Figura 26), o que possibilita uma melhor compreensão dos pontos de ocorrência de falha ao longo do tempo. Já o gráfico da densidade de probabilidade

de falha ou  $f(t)$  (Figura 27) e o gráfico da taxa de falha ou  $h(t)$  (Figura 28) são plotados no software *ProConf 2000*.

A faixa de confiabilidade utilizada como base para comparações é de 50%, conforme estabelecido previamente pelo software. Esses gráficos e tabelas fornecem uma representação visual clara dos resultados da análise de confiabilidade realizada.

Tabela 12: Faixas de confiabilidade para o pneu 40.00R57.

Probabilidade Falha [%]	Confiabilidade [%]	Hora Trabalhada	LC Inferior	LC Superior
5	95	4,758	4,293	5,289
10	90	5,473	5,014	5,985
20	80	6,367	5,931	6,842
30	70	7,017	6,604	7,461
40	60	7,568	7,174	7,988
50	50	8,076	7,695	8,479
60	40	8,576	8,201	8,970
70	30	9,099	8,720	9,497
80	20	9,696	9,295	10,116
90	10	10,494	10,035	10,976
95	5	11,127	10,601	11,682

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Tabela 12 é gerada pelo *software Weibull++*, o qual utiliza os dados dos tempos de falha inseridos para plotar a curva de confiabilidade em relação ao tempo. Além disso, o *software* gera, por meio de aproximações, as curvas dos limites superior e inferior.

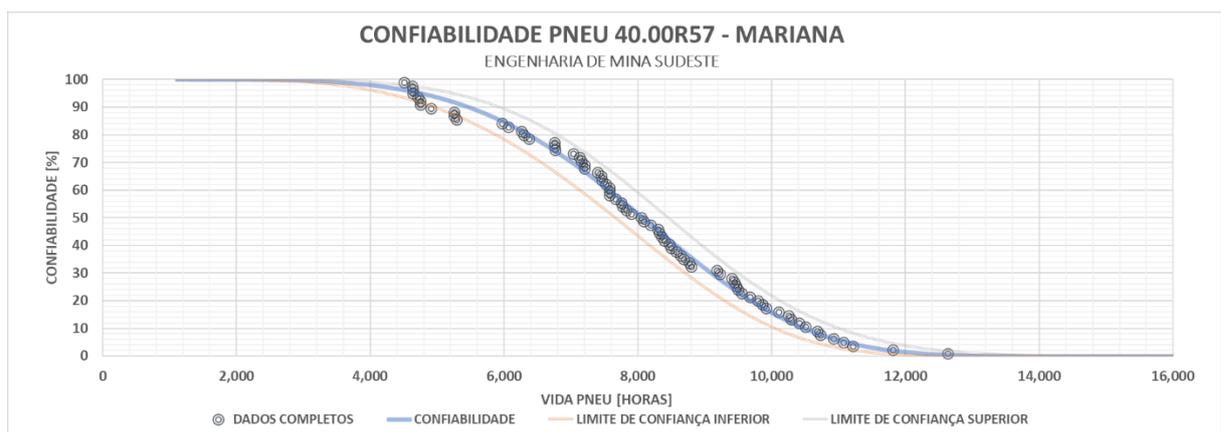


Figura 26: Confiabilidade em função do tempo.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Figura 26 apresenta a curva de confiabilidade em relação ao tempo, plotada pelo *software*. Essa curva mostra como a confiabilidade do sistema varia ao longo do tempo. Ela fornece informações sobre a probabilidade de o sistema estar em funcionamento adequado em

determinado ponto do tempo. A curva de confiabilidade é uma ferramenta importante para avaliar a performance e a vida útil de um sistema.

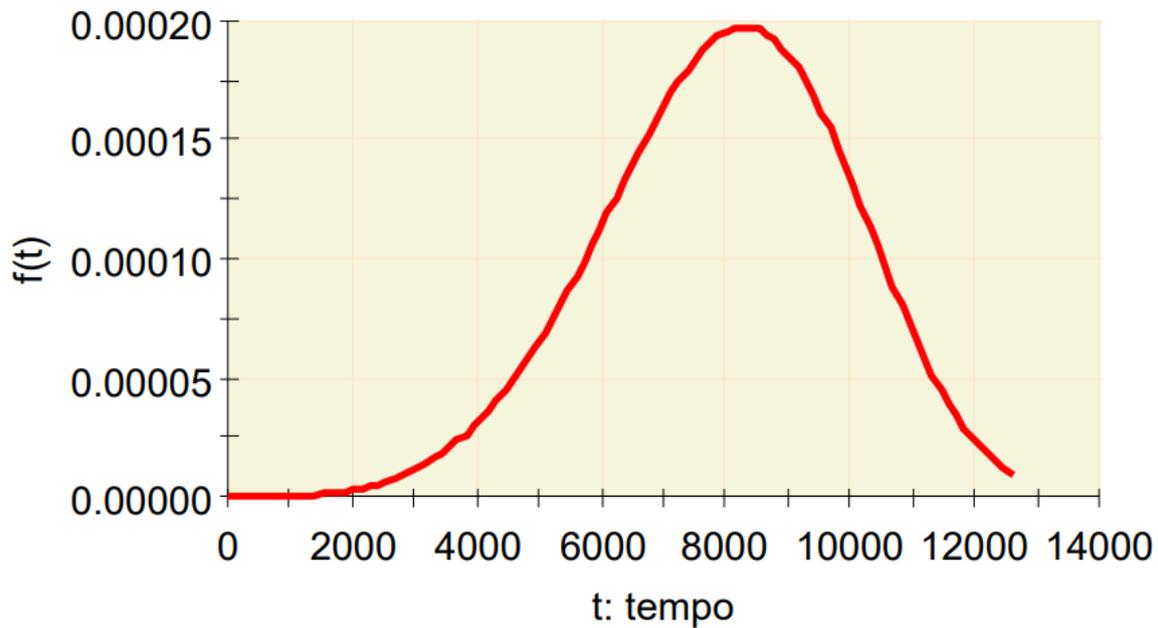


Figura 27: Densidade de probabilidade de falha em função do tempo.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Figura 27 mostra a densidade de probabilidades de falhas, representando a distribuição das falhas ao longo do tempo. É possível observar que a densidade de probabilidades está aproximadamente centrada em torno de 8000 horas. Isso sugere que a maior concentração de falhas ocorre nesse intervalo de tempo. A análise da densidade de probabilidades de falhas é útil para entender a distribuição dos eventos de falha e auxiliar na identificação de padrões ou tendências temporais.

Tabela 13: Faixas de limites técnicos de vida para o pneu 40.00R57.

Limite Mínimo	Confiabilidade	Limite Médio	Confiabilidade	Limite Máximo	Confiabilidade
7.568	60%	7.826	55%	8.076	50%

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

De acordo com os critérios estabelecidos pela empresa para a faixa de confiabilidade aceitável de ativos móveis de mineração, que varia entre 50% e 60%, foram determinadas as vidas úteis dos pneus, conforme apresentado na Tabela 13. A vida útil estimada dos pneus situa-se entre 7.500 a 8.000 horas de trabalho, considerando um valor normalizado, levando em consideração o risco estabelecido para o negócio de ativos.

Com o objetivo de aprofundar nossa compreensão do comportamento de falha dos pneus analisados, examinamos as características da curva de taxa de falha obtida por meio do *software ProConf 2000*, conforme ilustrado na Figura 28. Esse estudo nos proporcionou uma melhor compreensão das tendências e padrões de falha dos pneus ao longo do tempo.

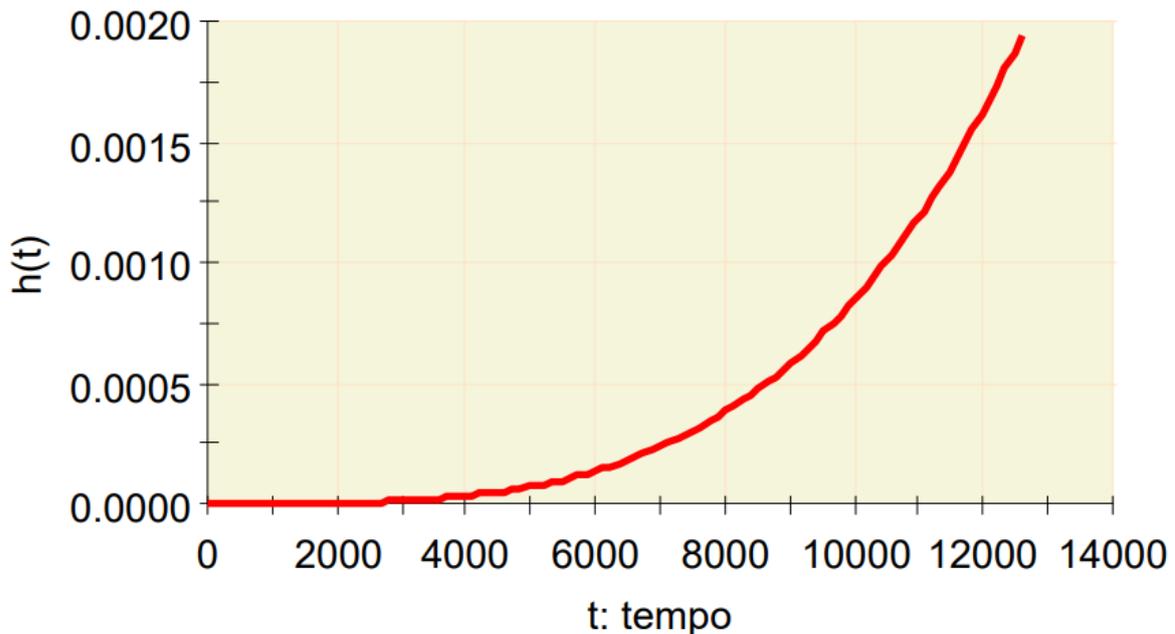


Figura 28: Taxa de falha em função do tempo.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Ao analisar o gráfico da Figura 28, fica evidente que a taxa de falhas aumenta proporcionalmente às horas trabalhadas. Esse padrão é comumente associado a modos de falha relacionados à fadiga ou desgaste. Essa evidência estatística confirma que os componentes falhados apresentam o comportamento característico de envelhecimento.

#### 4.5 Análise das Causas Potenciais de Falhas

Após uma análise quantitativa usando métodos estatísticos, foi constatado que os modos de falha dos pneus estudados estão principalmente relacionados ao tempo de trabalho e desgaste normal devido ao envelhecimento decorrente das horas trabalhadas. Agora, para uma abordagem qualitativa mais detalhada, será utilizado gráficos de Pareto para identificar as principais ocorrências de causas de falha dos pneus nas frotas 777G, 789C, 789D e 730E, que empregam os modelos de pneu 27.00R49, 37.00R57 e 40.00R57. Os gráficos de Pareto (Figuras 29, 30 e 31) fornecem uma visão clara das causas mais significativas de falha nesses componentes.

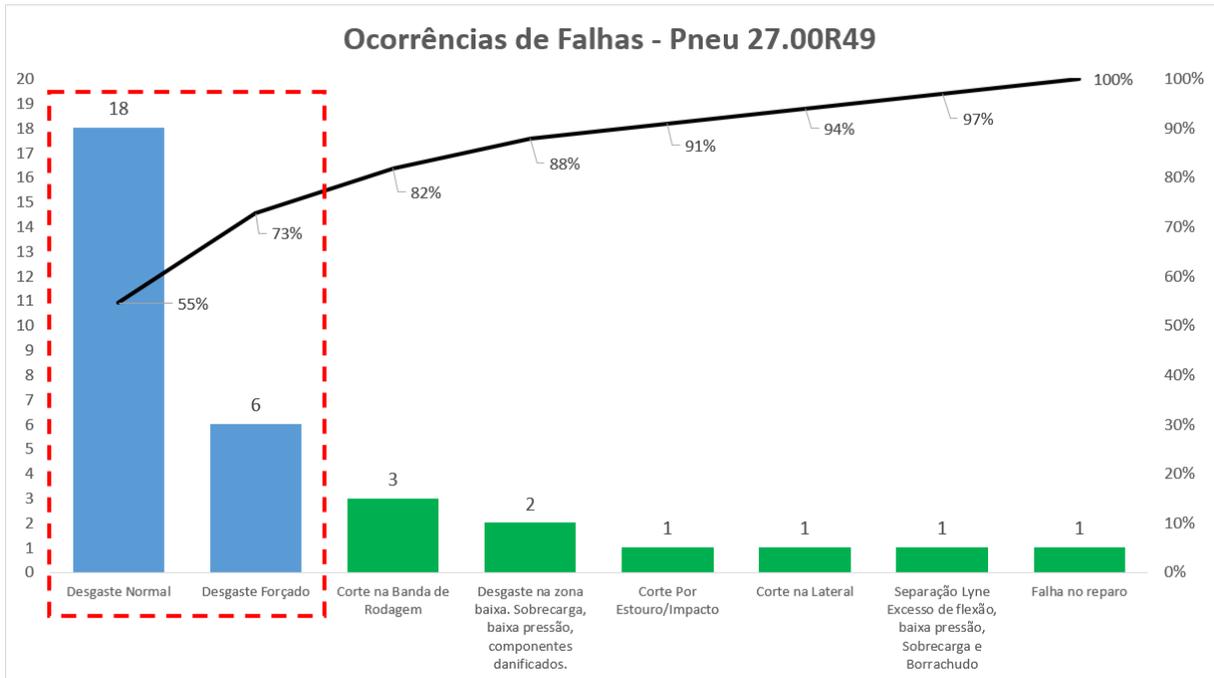


Figura 29: Ocorrência de falhas dos pneus 27.00R49 da frota 777G.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Na Figura 29, fica claro que os principais modos de falha estão relacionados ao desgaste normal e forçado do pneu 27.00R49. Essas falhas são responsáveis pela deterioração e redução significativa da vida útil do sistema.

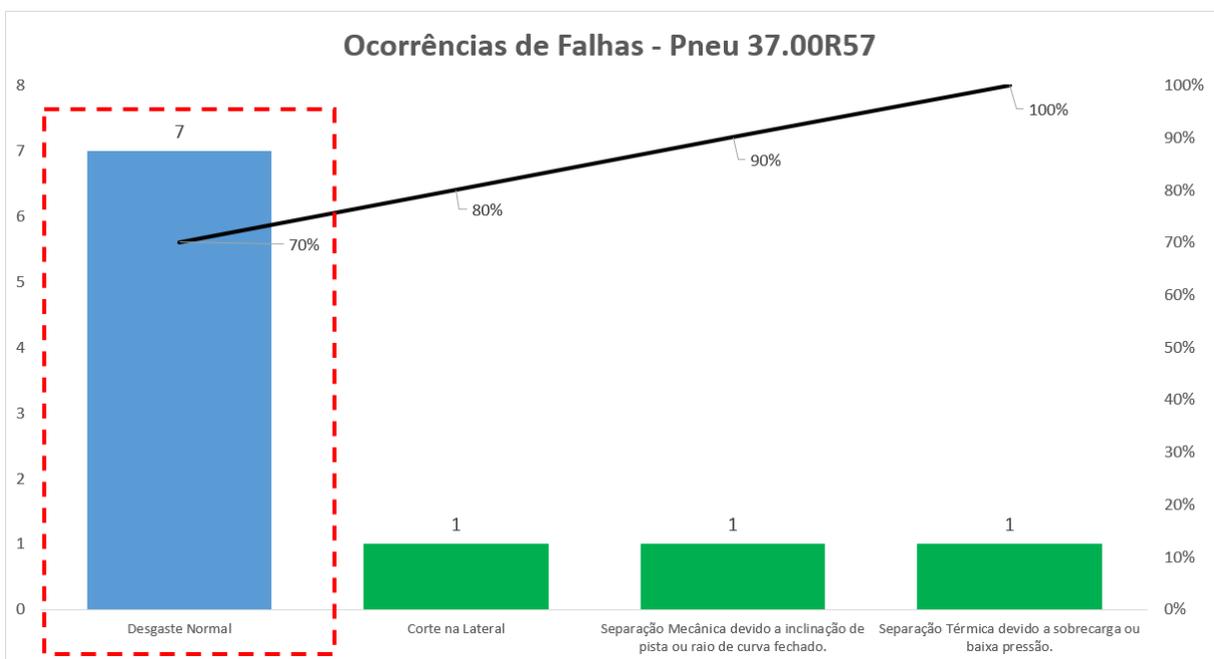


Figura 30: Ocorrência de falhas dos pneus 37.00R57 da frota 789C.  
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Na Figura 30, é evidente que o principal modo de falha está relacionado ao desgaste normal do pneu 37.00R57. Essa falha é responsável pela deterioração e redução significativa da vida útil do sistema. É importante implementar estratégias de manutenção adequadas para combater esse modo de falha e assegurar um desempenho prolongado e confiável do pneu.

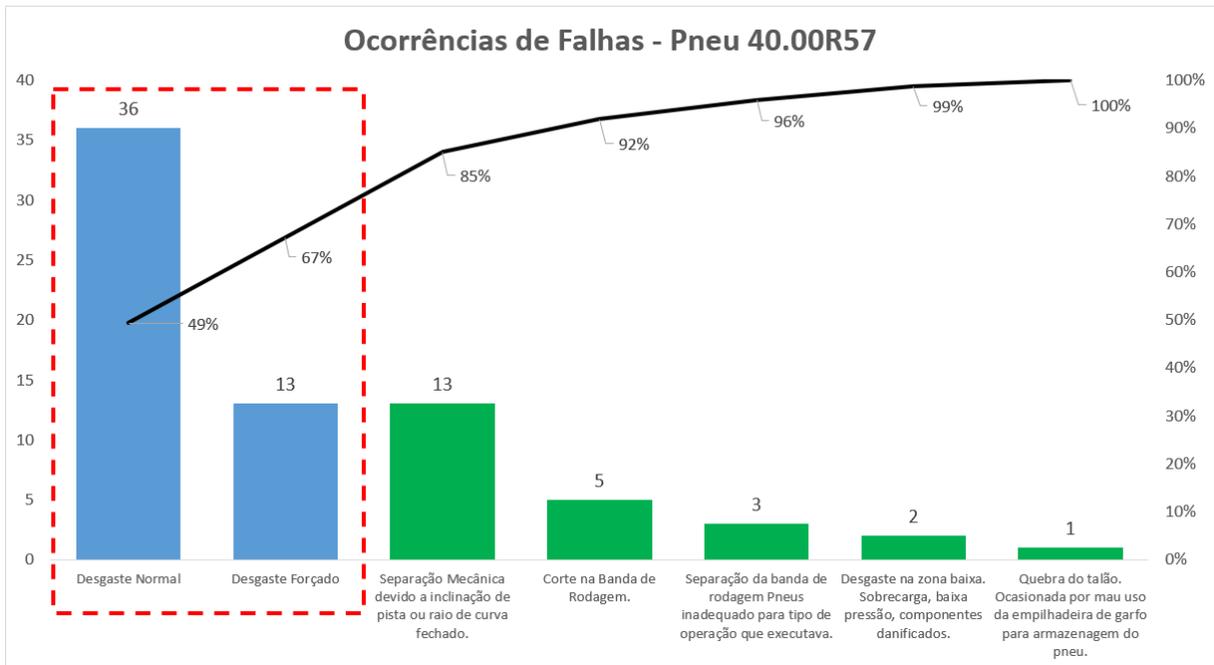


Figura 31: Ocorrência de falhas dos pneus 40.00R57 da frota 789D e 730E. Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Na Figura 31, fica claro que os principais modos de falha estão relacionados ao desgaste normal e forçado do pneu 40.00R57. Essas falhas são responsáveis pela deterioração e redução significativa da vida útil do sistema.

Através da análise das Figuras 29, 30 e 31, que apresentam os gráficos de Pareto, constatamos que aproximadamente 80% das falhas dos componentes pneus nas frotas 777G, 789C, 789D e 730E, que utilizam os modelos de pneus 27.00R49, 37.00R57 e 40.00R57, são atribuídas a cerca de 20% das causas identificadas. As principais causas de falha são as seguintes:

1. **Desgaste Normal por final de vida útil:** Esta causa representa uma porcentagem significativa das falhas e está relacionada ao desgaste gradual dos pneus ao longo de sua vida útil. À medida que os pneus se desgastam, sua capacidade de desempenho diminui, levando eventualmente à necessidade de substituição.

2. **Desgaste Forçado devido a patinagem e derrapagem:** Essa causa está associada ao desgaste acelerado dos pneus devido a condições operacionais que envolvem patinagem e derrapagem. Essas situações causam um atrito excessivo entre os pneus e a superfície de trabalho, resultando em desgaste prematuro.

Essas duas causas representam a maioria dos problemas de falha do componente pneu, destacando a importância de monitorar o desgaste e implementar práticas adequadas de operação e manutenção para prolongar a vida útil dos pneus e evitar falhas prematuras.

Além das principais causas de falha mencionadas anteriormente, também pode-se destacar dois tipos adicionais de modos de falha nos pneus das frotas, que tiveram um impacto significativo nas perdas observadas durante o período de coleta de dados analisado. Se não houvesse causas de falha relacionadas ao desgaste normal e desgaste forçado, esses dois modos de falha seriam os principais responsáveis pelas perdas. Esses modos de falha são:

1. **Cortes em Geral:** Essa causa de falha envolve cortes na banda de rodagem dos pneus, nas laterais ou até mesmo estouros. Esses cortes podem ser ocasionados por objetos cortantes na pista ou por condições operacionais que expõem os pneus a riscos de danos. A ocorrência de múltiplos cortes pode resultar na perda prematura do componente.
2. **Separação mecânica em Geral:** Esse tipo de falha ocorre devido a inclinação da pista ou raio de curva muito fechado. Essas condições podem levar a uma separação mecânica nos pneus, onde há um descolamento ou desgaste irregular das camadas do pneu. A separação mecânica compromete a integridade estrutural do pneu, podendo levar a falhas prematuras.

Portanto, além de mitigar os modos de falha relacionados ao desgaste normal e forçado, é essencial implementar medidas para reduzir a ocorrência de cortes nos pneus, como a limpeza adequada das pistas para remover pedras ou objetos cortantes. Além disso, melhorar as condições das pistas, reduzindo inclinações acentuadas ou suavizando as curvas, pode contribuir para minimizar o risco de separação mecânica dos pneus. Essas ações visam prolongar a vida útil dos pneus e garantir uma operação mais segura e eficiente.

#### 4.6 Redução Projetada de Gastos com os Pneus a partir da aplicação da Confiabilidade

Ao implementar medidas para mitigar os tipos adicionais de perdas de pneus mencionados anteriormente, seria possível reduzir 22 falhas prematuras de pneus das 116 perdas totais com todos os modos de falhas identificados durante o período de estudo analisado, que compreendeu de janeiro a dezembro de 2022. Essa redução representa cerca de 19% dos componentes das frotas analisadas.

Essa diminuição significativa resultaria em uma economia de R\$ 4,84 Milhões em gastos com manutenção corretiva dos pneus, conforme indicado na Figura 31. Além disso, a implementação dessas medidas contribuiria para melhorar a confiabilidade dos pneus, reduzir o tempo de inatividade dos veículos e aumentando a eficiência operacional.

Ao adotar ações corretivas direcionadas às principais causas de falha identificadas, é possível otimizar o desempenho dos pneus, prolongar sua vida útil e reduzir os custos operacionais. Essas ações podem incluir melhorias no treinamento dos operadores, programas de manutenção preventiva, monitoramento das condições operacionais e aprimoramento da qualidade das pistas. Com isso, a empresa poderá alcançar ganhos significativos em termos de confiabilidade, economia de custos e eficiência geral das operações.



Figura 32: Dashboard das principais falhas e falhas adicionais dos pneus das frotas.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Esses resultados mostrados na Figura 32 destacam a importância de implementar ações corretivas específicas para as causas adicionais de falhas identificadas, visando melhorar a confiabilidade e eficiência dos pneus, além de reduzir custos operacionais. Com base nas causas de falha identificadas, podem ser adotadas as seguintes medidas de mitigação:

1. **Desenvolvimento de programas de manutenção preventiva:** Implementar um plano de manutenção preventiva adequado, que inclua inspeções regulares, medição do desgaste dos pneus, balanceamento e alinhamento, a fim de identificar e corrigir problemas antes que se tornem graves e causem falhas.
2. **Treinamento:** Fornecer treinamento adequado para os operadores dos veículos, enfatizando as melhores práticas de condução, como evitar patinagem, derrapagem e manobras bruscas, que contribuem para o desgaste acelerado dos pneus.
3. **Monitoramento de condições operacionais:** Implementar um sistema de monitoramento contínuo (Telemetria) das condições operacionais, incluindo temperatura, pressão e carga dos pneus. Isso permitirá detectar desvios ou anomalias que possam levar a falhas prematuras e tomar medidas corretivas imediatas.
4. **Melhoria da qualidade das pistas:** Realizar a manutenção adequada das pistas e estradas utilizadas pelos veículos, visando reduzir inclinações acentuadas, curvas fechadas e presença de pedras ou detritos que possam causar danos aos pneus.

Ao implementar essas ações, não apenas será possível reduzir os custos de manutenção corretiva dos pneus, mas também melhorar a eficiência operacional, reduzir o tempo de inatividade dos veículos e prolongar a vida útil dos pneus. Isso resultará em economia significativa de custos e benefícios substanciais para o negócio como um todo.

Com base nos dados coletados e na análise de confiabilidade aplicada aos pneus, foi possível obter informações valiosas, como a elaboração do gráfico de Pareto e a identificação das principais causas de falhas, além de determinar as curvas de confiabilidade do componente pelo tempo, a densidade de probabilidade e taxa de falhas.

Esses resultados foram essenciais para direcionar ações corretivas e preventivas, visando a redução de custos associados aos pneus. Estima-se que, graças às intervenções realizadas com base nesses dados, tenha sido possível economizar aproximadamente 4,8 milhões de reais em gastos com pneus, que seriam necessários caso eles tivessem atingido toda a sua vida útil.

Essa redução significativa nos custos é um reflexo direto da aplicação de estratégias eficazes de manutenção, que visaram aumentar a vida útil dos pneus e minimizar falhas prematuras. Os resultados alcançados reforçam a importância da análise de confiabilidade na

gestão de ativos e na tomada de decisões embasadas em dados sólidos, contribuindo para a otimização dos recursos financeiros da empresa.

## **5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 CONCLUSÃO**

Com o intuito de analisar a confiabilidade dos pneus dos caminhões o estudo teve o objetivo de utilizar a análise estatística de dados de vidas do componente pneu para auxiliar na análise de falhas que originaram em paradas não programadas de caminhões fora de estrada em uma mineradora. Para alcançar tal objetivo baseou-se em uma fundamentação teórica sobre manutenção, confiabilidade e ferramentas da qualidade. Através da análise e interpretação de dados de um histórico de manutenção em um período de 1 ano, relacionadas a paradas não programadas de quatro frotas de caminhões fora de estrada, foi possível identificar quais modos de falhas mais ocorreram no período estudado. Foi também identificado os pontos que mais necessitam de intervenções preventivas.

O estudo se propôs a responder a seguinte problemática: Como aplicar o estudo da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões fora-de-estrada de uma mineradora?

Neste trabalho, foi realizado um estudo para determinar os valores de confiabilidade e medidas ao longo do tempo para o componente pneu OTR e seus modelos de caminhões fora de estrada em uma mineradora multinacional. Foi utilizada a distribuição estatística de Weibull para calcular e analisar os dados.

O projeto iniciou com uma revisão da literatura para consolidar os conceitos e modelos matemáticos relevantes. Em seguida, foram coletados os valores de vida útil e faixas de confiabilidade para cada modelo de pneu OTR, por meio de análises estatísticas com um software especializado. Foram obtidas as funções de densidade de probabilidade e a taxa de falha para cada modelo de pneu.

O trabalho prosseguiu com a comparação dos resultados de confiabilidade ao longo de um ano de uso dos pneus e a relação com os modos de falha registrados pelos técnicos da área. Isso permitiu analisar os principais modos de falha ao longo do tempo e do percurso percorrido na mineradora, proporcionando insights sobre o desempenho dos pneus e possíveis melhorias na manutenção e operação.

Apesar dos resultados satisfatórios, é recomendável realizar estudos futuros com um maior número de amostras para obter uma análise mais confiável e precisa do comportamento da vida útil dos componentes. Isso fornecerá uma base sólida para tomada de decisões e implementação de estratégias de manutenção mais eficientes.

É importante avaliar os custos envolvidos na implementação de ajustes na pista, considerando os gastos de operação das motoniveladoras e possíveis interrupções das operações. A mineradora deve analisar cuidadosamente os potenciais benefícios econômicos em relação aos custos dessas modificações.

Além disso, é essencial considerar a relação custo-benefício a longo prazo, comparando os ganhos de redução de gastos de manutenção com os investimentos iniciais e os custos contínuos de manutenção das pistas. Uma análise completa de custo-benefício ajudará a determinar a viabilidade e o impacto econômico dessas medidas na eficiência operacional e na rentabilidade global da mineradora.

## **5.2 Recomendações**

Algumas sugestões de futuros estudos sobre confiabilidade de pneus, com foco no estudo LDA (*Life Data Analysis*) dos pneus OTR (*Off-the-Road*) da frota de caminhões fora de estrada:

1. Comparação de marcas de pneus OTR para identificar o desempenho em confiabilidade por fabricante.
2. Análise de causas e estratégias de manutenção para prevenir falhas prematuras em pneus OTR.
3. Monitoramento em tempo real da confiabilidade de pneus OTR para detecção precoce e ações corretivas.

Essas são apenas algumas sugestões de estudos que podem ser realizados para aprofundar a compreensão da confiabilidade dos pneus OTR por meio da metodologia LDA. É importante considerar os recursos disponíveis, a viabilidade e a relevância dos estudos de acordo com as necessidades e objetivos da sua área de pesquisa ou setor de atuação.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462, Confiabilidade e Manutenibilidade - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1994.
- BARRINGER, P.: **Pipe Wall Thickness Decisions Using Weibull Analysis, in Equipment Inspection For Mechanical Integrity**. McNeese State University, Lake Charles, LA, 1997.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. São Paulo: Campus-Elsevier, 2009. 265p.
- CARVALHO, André Moreira; GOMES, Geraldo Messias; BORGES, Marcio de Castro; FERREIRA JÚNIOR, Nilton Bráz. **Implantação de Sistema Informatizado para Planejamento e Controle da Manutenção – Empresa Vileplex**. 2009. 91f. Monografia (Tecnólogo em Manutenção Industrial) – Universidade Vale do Rio Doce, Governador Valadares, 2009.
- QUEVEDO, Johanna Mirelle Gómez. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. 2009. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- OLIVEIRA, Ualison Rebula; PAIVA, Emerson José; ALMEIDA, Dagoberto Alves. **Metodologia integrada para mapeamento de falhas: uma proposta de utilização conjunta do mapeamento de processos com as técnicas FTA, FMEA e a análise crítica de especialistas**. Produção, Santa Catarina, v.20, n.1, p. 77-91, jan./mar. 2010.
- GREGÓRIO, Gabriela Fonseca Parreira. **Engenharia de manutenção [recurso eletrônico]** / Gabriela Fonseca Parreira Gregório, Danielle Freitas Santos, Auricélio Barros Prata; [revisão técnica: André Shataloff]. – Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM - Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002, 192p.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção - Função Estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2013. 440p.
- TRINDADE, Bárbara Silva. **Estudo de Confiabilidade Aplicado à Manutenção de Perfuratrizes de Pequeno Porte: O Caso de uma Empresa de Mineração**. 2015. 104f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

- XENOS, Harilaus Georgius D'Philippus. **Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. 2 ed. Nova Lima: Falconi, 2014. 405p.
- MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Introdução à Gestão da Manutenção**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007, 32p.
- KOMONEN K. **A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and benchmarking**. Int. J. Production Economics 79. 2002.
- KARDEC, Alan; CARVALHO, Claudio Ribeiro. **Gestão estratégica e terceirização**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 106p
- ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção mecânica industrial: conceitos básicos e tecnologia aplicada** / Paulo Samuel de Almeida -- São Paulo: Érica, 2014.
- OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. **A PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE GESTÃO DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL NA BUSCA DA EXCELÊNCIA OU CLASSE MUNDIAL**. Revista Gestão Industrial, v. 4, n. 02, 2008.
- PASCHOAL, Débora Rodrigues de Souza et al. **Disponibilidade e confiabilidade: aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade**. Revista da Engenharia de Instalações no Mar da Fsmar, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p.1-10, jul. 2009.
- SANTOS, Eduardo. **5 principais indicadores de manutenção com MTBF e MTTR. 2017**. Disponível em: < <https://fieldcontrol.com.br/blog/processos/indicadores-de-manutencao/>>. Acesso em: 07 de março de 2023.
- BEZERRA JÚNIOR, Luis Fernando Ker. **Estudo do Sistema de Tratamentos de Falhas para auxiliar na análise e detecção de falhas das perfuratrizes de uma empresa do setor de mineração**. 2019. 91f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- TELES FILHO, Paulo Marcos Carneiro. **Análise de modelos numéricos para cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull: estudo de caso para o Campus do Pici da UFC**. 2013. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- SELLITTO, M. **Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos**. Produção, v.15, n.1, p.44-59, 2005.7
- MARTINS, Ana Patrícia Riberio de Almeida Pires. **A Influência da Manutenção Industrial no Índice Global de Eficiência (OEE)**. 2012. 128 f. Dissertação (Engenharia e Gestão Industrial) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

- XIE, M.; LAI, C.d.. **Reliability analysis using an additive Weibull model with bathtub-shaped failure rate function**. Reliability Engineering & System Safety, [s.l.], v. 52, n. 1, p.87-93, abr. 1996. Elsevier BV
- KÖCHE, José Carlos. **Fundamentos de Metodologia Científica: Teoria da ciência e iniciação à pesquisa**. 34 ed. Petrópolis: Vozes, 2014. 184p.
- DOCKHORN, Fernando da Silva Melo. **Manutenção 4.0 no Contexto da Universidade de Brasília – UnB**. 2019. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 188p.
- RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2017. 424p.
- BASTIANI, Jeison Arenhart. **Diagrama de Ishikawa**. Disponível em: Acesso em: 10 março 2023.
- ALONSO, Guilherme. **As sete ferramentas da qualidade**. Data não publicada. Disponível em < <https://certificacaoiso.com.br/as-sete-ferramentas-da-qualidade/>>. Acesso em 05 de abril de 2023.
- TELES, Jhonata. **Funções de um planejador de manutenção**. 18 de fevereiro de 2023.
- PASSAMAI, B. D. **Nova metodologia de análise de falha em empresa de refrigerante – proposta e estudo de caso**. 2007. 91f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Espírito Santo.
- MENDES, Guilherme. **MTTR, MTBF e MTTF- O que são esses indicadores?** 15 de dezembro de 2019. Disponível em: < <https://www.fm2s.com.br/mtbf-mttr-mttf/>>. Acesso em 10 de março de 2023.