



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE FALHA APLICADA EM UM MOTOR DE EMPILHadeira DE
CARGAS**

ANDRESSA DA SILVA COELHO

**Tucuruí – PA
2022**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DE FALHA APLICADA EM UM MOTOR DE EMPILHADEIRA DE
CARGAS**

ANDRESSA DA SILVA COELHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Engenheiro Mecânico.

Orientador:
Prof. Me. Maciel da Costa Furtado

Tucuruí – PA
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D111a da Silva Coelho, Andressa.

ANÁLISE DE FALHA APLICADA EM UM MOTOR DE
EMPILHADEIRA DE CARGAS / Andressa da Silva

Coelho. —2022.

51 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Maciel da Costa Furtado

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2022.

1. Análise de falha. 2. Motor diesel. 3.
Confiabilidade. I. Título.

CDD 620



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ANÁLISE DE FALHA APLICADA EM UM MOTOR DE EMPILHadeira DE CARGAS

ANDRESSA DA SILVA COELHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 11:05)

MACIEL DA COSTA FURTADO

*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matricula: ###033#8*

Orientador

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 17:49)

WALTER DOS SANTOS SOUSA

*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matricula: ###112#8*

Membro Interno

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 15:50)

WASSIM RAJA EL BANNA

*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
NDAE (11.16.16)
Matricula: ###858#5*

Membro Interno

**Conceito: Excelente
Tucuruí, 23 junho de 2022.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dá forças, saúde, por me iluminar e por cumprir as promessas que fez em minha vida.

Agradeço a minha família em especial os meus pais José e Helen por todo amor, orações e carinho, que mesmo diante das dificuldades sempre fizeram o possível e o impossível para que pudéssemos conquistar o nosso sonho. E as minhas irmãs Heloisa e Vanessa, por todo amor e parceria.

Agradeço ao Giordane Jr meu namorado e parceiro de vida, que sempre esteve do meu lado me incentivando quando nem eu mesma tinha forças para acreditar.

Agradeço ao meu orientador Maciel Furtado, por todo conhecimento compartilhado, pela orientação, confiança e incentivo em continuar esse trabalho.

Agradeço a todos os professores da FEM, em especial professor Wassim e Walter por terem sido além de excelentes professores e contribuintes na formação do conhecimento que adquiri na universidade, mas também grandes amigos.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de curso, pela amizade e companheirismo durante essa trajetória. Em especial ao meu grande amigo José Everaldo Neto (in memoriam) que durante as adversidades sempre esteve presente com sua amizade, apoio e alegria contagiante, nos motivando a seguir em frete.

ANÁLISE DE FALHA APLICADA EM UM MOTOR DE EMPILHADEIRA DE CARGAS

RESUMO

A mineração no Brasil tem uma participação significativa no desenvolvimento econômico do país. Atualmente o Brasil tem a maior mina de ferro a céu aberto do mundo. No âmbito da mineração são utilizados equipamentos auxiliares para otimizar suas atividades de manutenção, produção e movimentação de cargas. No entanto, falhas ocorridas nesses equipamentos auxiliares acabam afetando diretamente a disponibilidade dos ativos. Além de realizar as manutenções e colocar o equipamento em um estado que possa desempenhar suas funções requeridas, é necessário realizar a prevenção dessas falhas e propor ações para bloquear a recorrência das mesmas. O presente trabalho consiste em uma investigação técnica de causas motivadoras da falha de um motor diesel de uma Empilhadeira utilizada em atividades de movimentação de cargas em uma oficina de manutenção de equipamentos pesados. Para identificação da causa raiz, foram empregadas ferramentas de qualidade, tais como Cinco Porquês e Diagrama de Ishikawa. A utilização destas ferramentas permite que o engenheiro de manutenção elimine causas improváveis, e separe efeitos de causas, concebendo uma análise robusta, embasada e assertiva. Após a identificação da causa primária da falha, serão propostas ações que visam reduzir ou mitigar a probabilidade de reincidência do evento, permitindo que os equipamentos operem com maior confiabilidade e disponibilidade.

Palavras-chave: Análise de Falha, Motor Diesel, Confiabilidade.

FAILURE ANALYSIS APPLIED TO A LOAD FORKLIFT ENGINE.

ABSTRACT

The mining activity in Brazil has a significant participation in the country's economic development, currently Brazil has the largest open pit iron mine in the world. In the mining field, auxiliary equipment is used to optimize the maintenance, production, and cargo handling activities. However, failures that occur in this auxiliary equipment end up directly affecting the availability of assets. In addition make the maintenance and putting the equipment in a state that can perform its required functions, it is necessary to carry out the treatment of these failures and propose actions to block their recurrence. The present work consists of a technical investigation of the motivating causes of the failure of a diesel engine of a Forklift used in cargo handling activities in a heavy equipment maintenance workshop. To identify the root cause, quality tools such as the Five Whys and Ishikawa Diagram will be used. The use of these tools allows the maintenance engineer to eliminate unlikely causes, and separate effects from causes, conceiving a robust, informed and assertive analysis. After identifying the primary cause of the failure, actions will be proposed to reduce or mitigate the probability of recurrence of the event, allowing the equipment to operate with greater reliability and availability.

Keywords: *Failure Analysis, Diesel Engine, Reliability.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Dashboard de PCM.....	14
Figura 2. Equipamentos manuais de movimentação de cargas.	18
Figura 3. Equipamentos motorizados: (a) empilhadeira, (b) guindautos e (c) guindastes.	19
Figura 4. Motor de combustão interna.	20
Figura 5. Cabeçote do motor.....	20
Figura 6. Bielas, pistões e virabrequim.	21
Figura 7. Folga de lubrificação dos casquilhos.....	22
Figura 8. Lubrificação dos componentes de força.	22
Figura 9. Superfícies desgastadas por deslizamento.	25
Figura 10. Roda ferroviária desgastadas por rolamento.	25
Figura 11. Desgaste adesivo.....	26
Figura 12. Desgaste abrasivo em corpos e três corpos.....	27
Figura 13. Desgaste corrosivo em aço inoxidável.....	27
Figura 14. Método dos cinco porquês.....	31
Figura 15. Método dos cinco porquês aplicado a falha de uma embreagem de um trator de esteiras.....	32
Figura 16. Diagrama de Ishikawa para perda de produtos.	33
Figura 17. a) Registro da empilhadeira após a ocorrência e b) Motor diesel falhado.	34
Figura 18. a) Quebra da quinta biela do motor; b) Fratura do bloco do motor.	35
Figura 19. Desgaste nos anéis de vedação e de lubrificação do pistão.....	36
Figura 20. Casquilho deslocado e fundido com o munhão.	37
Figura 21. Desconfiguração do mecanismo biela/manivela.....	37
Figura 22. Fratura frágil da quinta biela do motor	38
Figura 23. Diagrama de Ishikawa.	38
Figura 24. Aplicação dos 5 porquês.....	40
Figura 25. Cronologia dos fatos da falha.	40
Figura 26. Função densidade de probabilidade	42
Figura 27. Curva de confiabilidade do motor ao longo do tempo.	43
Figura 28. Distribuição de Poisson para identificação do parque reserva ideal.	44
Figura 29. Monitoramento da tendência dos elementos do óleo do motor.	45
Figura 30. Comparação das estratégias de substituição corretiva e preventiva dos motores.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Os tipos de Manutenção.....	17
Tabela 2. Metais e respectivas origens do desgaste.....	24
Tabela 3. Equipe multidisciplinar envolvida na análise.....	34
Tabela 4. Plano de ação.	41

LISTA DE SIGLAS

KPIs – Key Performance Indicator

MTBF – Mean Time Between Failures

NBR – Norma Brasileira

PCM – Planejamento e Controle de Manutenção

RCA – Root Cause Analysis

LISTA DE SÍMBOLOS

λ – Taxa de Falhas

Σ – Somatório

θ – Parâmetro de escala

N – Quantidade de componentes em operação

k – Quantidade de componentes reservas

$R(t)$ – Confiabilidade em relação ao tempo

β – Fator de forma.

t_0 – Tempo isento de falha

t – Tempo

w – Tempo característico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.2	JUSTIFICATIVA	11
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	Objetivos gerais	11
1.3.2	Objetivos específicos	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	PLANEJAMENTO E CONTROLE DE MANUTENÇÃO – PCM	13
2.1.1	Tipos de manutenção	14
2.1.1.1	<i>Manutenção Sistemática</i>	15
2.1.1.2	<i>Manutenção Corretiva</i>	15
2.1.1.3	<i>Manutenção Condicional</i>	16
2.2	MOVIMENTAÇÃO E IÇAMENTO DE CARGAS	17
2.2.1	Equipamentos Manuais	18
2.2.2	Equipamentos Motorizados	18
2.3	COMPONENTES DO MOTOR DE UMA EMPILHADEIRA MOTORIZADA	19
2.3.1	Sistema de Lubrificação em Motores de Combustão Interna	22
2.3.2	Análise de Óleo do Motor	23
2.3.2.1	Físico-química	23
2.3.2.2	Espectrofotométrica	23
2.3.2.3	Morfológica das Partículas	23
2.4	ANÁLISE DE FALHA	24
2.4.2	Falha por Desgastes	24
2.4.2.1	Desgaste por Fadiga	25
2.4.2.2	Desgaste Adesivo	25
2.4.2.3	Desgaste Abrasivo	26
2.4.2.4	Desgaste Corrosivo	27
2.5	ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE	27
2.5.1	Modelo de Poisson	28
2.5.1.1	A distribuição de Poisson	28
2.5.2	Distribuição de Weibull	28
2.6	FERRAMENTAS DE QUALIDADE	30
2.6.1	Método dos 5 porquês	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	VERIFICAÇÃO DO PROBLEMA	33
3.2	INSPEÇÃO DOS COMPONENTES	35
4	RESULTADOS	42
4.1	DEFINIÇÃO DA VIDA ÚTIL DOS MOTORES	42
4.2	DEFINIÇÃO DO PARQUE RESERVA DE MOTORES	43
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DE ANÁLISE DE ÓLEO	44
5	CONCLUSÕES	47
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a manutenção ocupa um papel muito importante na indústria, não sendo mais sinônimo de custos ou prejuízos para uma empresa, mas sim como um modo de redução de gastos e serviços. Além disso, também é uma forma de melhorias nos processos e aumento da qualidade, resultando em ativos com maiores produtividades, menos riscos de falhas, clientes satisfeitos e maior lucro para a empresa, possibilitando o aumento de seus ativos e funcionários (KARDEC e NASCIF, 2010).

Segundo Freitas (2016), existe diferentes tipos de manutenção no setor de manutenção, tais como: Corretiva, Preventiva e Preditiva, sendo considerada uma área estratégica dentro da empresa, não apenas operacional. Por conta disso, o processo de manutenção precisa ser estratégico e eficaz, não atuando somente no reparo dos equipamentos, mas também é preciso que mantenha a sua disponibilidade e reduza a probabilidade de uma parada não programada (KARDEC e NASCIF, 2010).

Lage (2021) explicou que dentro do contexto da mineração, existem equipamentos que precisam de atenção, sendo em partes manuais como carrinho de mão de duas rodas, carrinho de quatro rodas, transpaleteira manual, empilhadeira manual e motorizados, como guindastes, guindautos, esteiras transportadoras e empilhadeiras motorizadas (SCHMIDT, 2019). A disponibilidade desses equipamentos que atuam na produção direta é imprescindível para a garantia da entrega do minério dentro dos prazos. Neste contexto, é de extrema importância que as atividades de manutenção destes ativos sejam otimizadas, que todos os ofensores da garantia operacional da frota sejam eliminados e que ferramentas de qualidade que tem utilização mundial sejam empregadas para a execução de uma atividade mais segura, confiável e com maior produtividade (LAGE, 2021).

Dentre os diversos tipos de equipamentos disponíveis para movimentação de cargas, as empilhadeiras estão em posição de destaque. Elas podem ser manual ou automática e são responsáveis pela logística eficiente de movimentação de carga, aliada a segurança e agilidade (SCHMIDT, 2019). Desse modo, uma falha destes equipamentos secundários implica em indisponibilidade operacional de ativos críticos para o processo, ocasionando maiores tempos de paradas e dificultando o atingimento de metas, sejam estas de produção ou KPIs (*Key Performance Indicator*) de manutenção.

Uma das maneiras de se encontrar as falhas e corrigir problemas está relacionado com o uso do método RCA (*Root Cause Analysis*). O uso do método RCA possibilita que ações

sejam implantadas para administrar ou não permitir que voltem a ocorrer as falhas, reduzindo custos de manutenção e aumentando a confiabilidade dos ativos (ANDRADE, 2020).

1.2 JUSTIFICATIVA

Com a otimização dos sistemas produtivos, onde cada vez mais, os ativos pertencentes ao processo são demandados, necessitando que esses encontrem-se confiáveis e disponíveis por mais tempo, as estratégias de manutenção necessitaram readequar-se ao novo cenário, passando por uma constante modernização, assegurando sempre aos equipamentos maior segurança operacional e reduzindo os custos envolvidos no processo.

Nesse contexto, ferramentas de qualidade foram desenvolvidas para balizarem a melhoria do processo, e cada vez mais vêm sendo empregadas para otimização não só do sistema produtivo, mas também da função manter os equipamentos das companhias. Sendo assim, essas ferramentas necessitam ser empregadas em todas as perdas identificadas no processo, e as falhas, por causarem longas indisponibilidades nos ativos, demandam um tratamento especial para identificação dos fatores causais, permitindo ao engenheiro de manutenção implementar políticas que impeçam reincidência dessas ocorrências.

Diante disso, surge a necessidade de avaliar as falhas e utilizar ferramentas de qualidade, a fim de encontrar a causa raiz. Dessa forma, o presente trabalho propõe uma análise de falha aplicada ao bloco do motor de uma empilhadeira de cargas. O equipamento é utilizado em atividades de movimentação de cargas em uma mineradora multinacional localizada em Carajás-PA.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos geral

Avaliar e diagnosticar a ocorrência de falha em um motor diesel de uma empilhadeira de cargas.

1.3.2 Objetivos específicos

Para a realização do objetivo geral, alguns objetivos específicos foram definidos e irão nortear o desenvolvimento deste trabalho, são eles:

- Identificação das falhas ocorridas no motor diesel da empilhadeira;

- Utilização de ferramentas de qualidade que melhor se adaptem ao tipo de falha identificado, como o diagrama de Ishikawa e o método dos cinco porquês;
- Obtenção da causa raiz que desencadeou a falha do equipamento;
- Proposição de ações que reduzam ou mitiguem a probabilidade de reincidência do evento no ativo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está composto por cinco capítulos, sendo eles: o capítulo 1, onde é apresentado a introdução ao tema, justificativa do trabalho e os objetivos gerais e específicos. No capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica onde se expõe todo o embasamento teórico utilizado para a concepção do trabalho. Nele estão os tipos de manutenções, ferramentas de qualidade, modos de falhas, motores diesel e confiabilidade. No terceiro capítulo está a metodologia do trabalho utilizada na empresa em que foi realizado o estudo em questão para o desenvolvimento da análise de falha. No quarto capítulo serão mostrados os resultados obtidos e o plano de ação. E no quinto e último capítulo será exposto as conclusões obtidas no trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DE MANUTENÇÃO – PCM

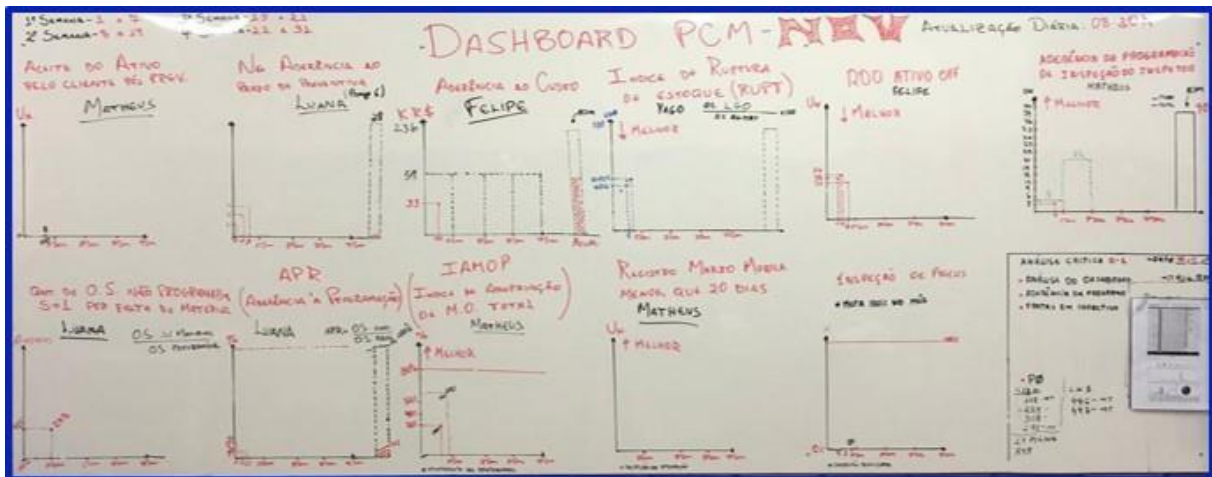
O setor de Planejamento e Controle de Manutenção é a área responsável por coordenar todos os serviços de manutenção dentro de uma empresa, otimizando processos, garantindo a disponibilidade dos ativos e a confiabilidade (MOREIRA, 2015).

Para Viana (2012), o PCM dentro da indústria tem a função de planejar, programar e acompanhar os resultados da execução das atividades de manutenção e em casos de desvios, propor medidas para correção. A área de Planejamento e Controle de manutenção é imprescindível dentro das organizações e funciona como o coração da manutenção. Com um PCM eficiente, a saúde da empresa melhora na disponibilidade dos ativos, confiabilidade e custos menores.

Para Almeida (2017), a manutenção é um conjunto de ações que tem por objetivo garantir o bom funcionamento e reparo dos equipamentos. Entretanto, a manutenção tem que ir além da execução de correção das falhas, ela deve seguir em busca da melhoria dos seus processos. O PCM desempenha papel crucial nessa busca, pois é ele quem fornece os recursos e a propõe otimização e melhoria dos processos.

Conforme Moreira (2015), além do planejamento e controle dos processos, é necessário que haja a mudança na cultura, que tenha uma visão estratégica e valendo-se de ferramentas de gestão que dão resultados eficazes. E a consolidação do entendimento de que a manutenção deve existir de maneira planejada e que manutenções não programadas impactam diretamente na disponibilidade dos ativos e conseqüentemente nos custos para a empresa. Na figura 1, tem-se a demonstração de um “painel de controle” ou também chamado de *dashboard* de PCM, que é utilizado para acompanhar a performance da manutenção e controle dos indicadores diários, como aderência à programação, disponibilidade física, total de equipamentos em manutenção, custos e índice de apropriação de mão de obra.

Figura 1. Dashboard de PCM



Fonte: Autoria própria (2021).

Segundo Viana (2012), dentre as responsabilidades do PCM estão:

- Planejamento, aprovisionamento de materiais, programação de manutenção e acompanhamento da execução dos serviços;
- Minimizar os custos de manutenção;
- Definição de metas e controle de indicadores de desempenho;
- Definição de procedimentos e periodicidades da manutenção;
- Elaboração de planos de ação para mitigação de falhas.

2.1.1 Tipos de manutenção

De acordo com Kumar (2013), um dos principais desafios enfrentados pelas empresas corresponde à escolha das melhores estratégias operacionais para aprimorar suas capacidades atuais, reduzindo os custos de manutenção e o alcançando a competitividade desejada, ligada a uma boa avaliação da eficiência e eficácia. Diante disso a “identificação da demanda” é uma etapa que auxilia no processo de aperfeiçoamento da melhor observação das demandas da manutenção.

O processo de identificação da demanda consiste em uma das bases para o macroprocesso de manutenção a qual está atrelada a capacidade de assimilar as informações adquiridas no campo, bem como, advinda dos planos de manutenção e realizar o direcionamento adequado das atividades a serem tratadas.

Para o processo de identificação das demandas são consideradas 3 (três) tipos de atividades de manutenção:

- Manutenção Sistemática;
- Manutenção Corretiva;
- Manutenção Condicional.

2.1.1.1 Manutenção Sistemática

Quando uma manutenção é realizada de acordo com critérios pré-estabelecidos e mantém uma frequência, com objetivo de minimizar as falhas de um ativo ou sua degradação, ela é intitulada de manutenção preventiva. Esse tipo de manutenção é realizado antes da falha ocorrer e permite que haja um controle sobre o funcionamento dos ativos, como também a diminuição de custos relacionados a manutenções não programadas (MIRSHAWKA e OLMEDO, 1993).

Para Xenos (2004), o segredo para uma manutenção sistemática efetiva está na determinação dos intervalos de manutenção. Quanto maior o intervalo, menor serão os custos de manutenção sistemática, porém os riscos de falhas aumentam. Dessa forma, os intervalos devem ser considerados conforme a frequência de falhas esperadas e os custos de reparos e perdas de produção.

2.1.1.2 Manutenção Corretiva

Para Nunes (2001), a manutenção corretiva é a manutenção após a ocorrência de falha do equipamento e tem como objetivo colocá-lo em condição de exercer a sua requerida função. É necessário que a intervenção seja realizada emergencialmente a fim de mitigar as consequências causadas por essa parada não programada. Contudo, esse tipo de manutenção não planejada acaba geralmente um custo significativo para a empresa e impacta diretamente na disponibilidade do equipamento. Segundo Moreira (2015), a manutenção corretiva pode ser considerada de 2 (dois) tipos:

1. *Corretiva Emergencial* – É composta por ações imprevisíveis que ocorrem durante o processo produtivo, com o intuito de reparar um equipamento/item devido a algum tipo de falha ou deficiências descobertas, onde essa manutenção é imprescindível para a continuidade da produção.
2. *Corretiva Programada* – É quando já existe o entendimento por parte da equipe de manutenção de provável falha, seja devido um acompanhamento preditivo, detectivo ou por solicitação da supervisão. Por exemplo, em uma situação em

que um equipamento não é utilizado de modo contínuo, é mais vantajoso programar a execução do serviço em uma data mais favorável e por ser planejada, tende a ter um custo menor que a corretiva emergencial.

2.1.1.3 Manutenção Condicional

Para Purohit e Lad (2016), a manutenção condicional consiste no monitoramento através de testes, análises e medições que visam identificar o momento em que o equipamento poderá falhar. Esse tipo de manutenção utiliza dados de registros que informam os desgastes ou processo de degradação do equipamento, avaliando assim o tempo de vida útil dos componentes, detendo a finalidade de prolongar a vitalidade dos mesmos.

De acordo com Baptista (2016) o monitoramento das condições pode ser dividido em dois grupos: monitoramento subjetivo e objetivo. O primeiro é realizado de forma sensitiva, ou seja, visão, audição, tato e olfato de uma pessoa que detenha habilidades no processo de manutenção. A segunda forma de monitoramento é aquela em que necessita de instrumentos de medição, para avaliar algum parâmetro em específico. Alguns testes realizados nesse tipo de monitoramento são: análise de vibração, ultrassom, análise de óleo, temperatura, etc.

A manutenção condicional é baseada no monitoramento da condição que consiste no levantamento das condições atuais do equipamento, do detalhamento das tarefas e recursos necessários para a execução das manutenções. Atualmente na manutenção existem a aplicação de 2 (duas) técnicas:

1. Sensitiva: quando são suportadas pelos 4 sentidos do inspetor (tato, audição, visão e olfato) aliados a conhecimentos técnicos a fim de identificar defeitos
2. Preditiva: quando são suportadas pelas técnicas de análise de vibrações mecânicas, análise de óleo, análise termográfica e ultrassom.

Na tabela 1 temos um resumo dos tipos de manutenção, suas frequências e ações, conforme Lafraia (2001) definiu.

Tabela 1. Os tipos de Manutenção.

TIPOS DE MANUTENÇÃO		
TIPO DE MANUTENÇÃO	FREQUÊNCIA	AÇÃO
SISTEMÁTICA	Determinada por intervalos de tempos que podem ser tanto por data calendário, quanto por horas de operação.	Manter a disponibilidade do ativo através da prevenção de falhas.
CORRETIVA	Determinada pela confiabilidade do ativo.	Eliminar a falha e retornar o equipamento ao estado operacional.
CONDICIONAL	Varia em função do monitoramento do estado do equipamento.	Manter o equipamento em estado operacional, através da predição de falhas.

Fonte: Adaptado de Lafraia (2001).

2.2 MOVIMENTAÇÃO E IÇAMENTO DE CARGAS

Para Tamasaukas (2000), os setores industriais têm buscado cada vez mais, maneiras de otimizar os seus processos e reduzir os custos operacionais. Uma das formas propostas é a diminuição do percurso realizado pelos materiais e/ou equipamentos que devem ter uma atenção especial, não apenas pelo valor monetário como pelo local onde será acondicionado, sendo necessário um eficiente sistema de movimentação de cargas.

Conforme Nassar (2004), a movimentação de cargas dentro de uma empresa, pode influenciar não só nos custos, como em operações mais eficientes. A mecanização dos processos de movimentação, vem proporcionando o crescimento desse ramo nos mais diversos setores, sejam eles a mineração, indústria, portuário e comércio. Esse crescimento vem influenciando direta ou indiretamente o crescimento econômico, devido a exigência por métodos e equipamentos cada vez mais especificados.

No ramo da movimentação de cargas, existem uma variedade de equipamentos auxiliares que podem facilitar esse tipo de atividade. Segundo Moura (1998), os equipamentos de movimentação de cargas podem ser divididos em:

- Equipamentos manuais;
- Equipamentos motorizados.

2.2.1 Equipamentos Manuais

Nos equipamentos manuais de movimentação de cargas a força física utilizada é fornecida pelo trabalhador. É a alternativa empregada quando o material a ser movimentado não precisa de elevação e/ou quando não é possível o investimento em equipamentos motorizados. Para Moura (1998), quando o material a ser movimentado é de custo elevado, frágil, leve e pequeno acaba tornando os equipamentos manuais são uma opção recomendada. Na Figura 2, tem-se a demonstração de alguns equipamentos manuais de movimentação de cargas.

Figura 2. Equipamentos manuais de movimentação de cargas.



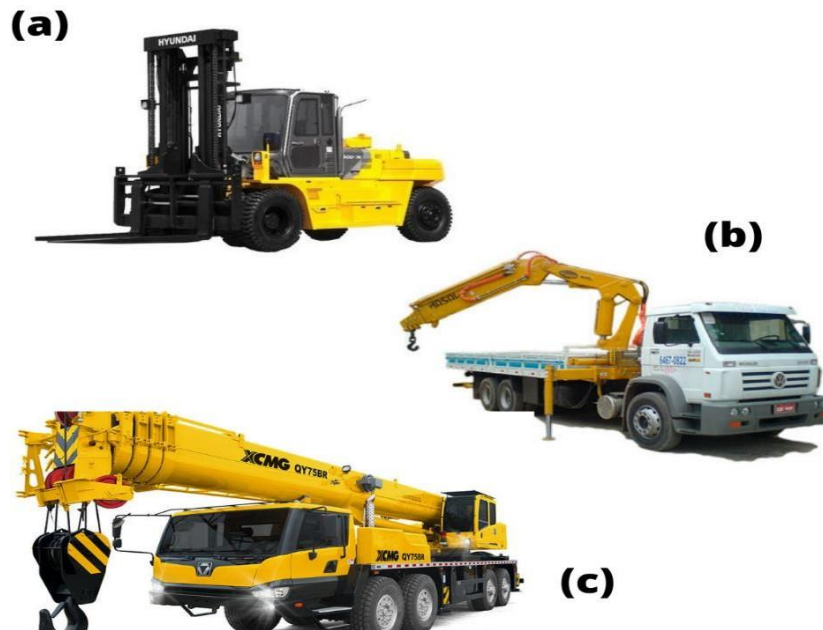
Fonte: Adaptado de Butta (2020).

2.2.2 Equipamentos Motorizados

A movimentação de cargas abrange não só materiais leves, como também cargas mais pesadas e que acabam tornando a movimentação manual inapropriada. Assim, os equipamentos motorizados e sua facilidade de desempenhar atividades de forma segura e ágil são a melhor opção para otimizar essa atividade. Na Figura 3, está ilustrado alguns exemplos de equipamentos motorizados e são eles:

- a) Empilhadeiras;
- b) Guindautos;
- c) Guindastes.

Figura 3. Equipamentos motorizados: (a) empilhadeira, (b) guindautos e (c) guindastes.



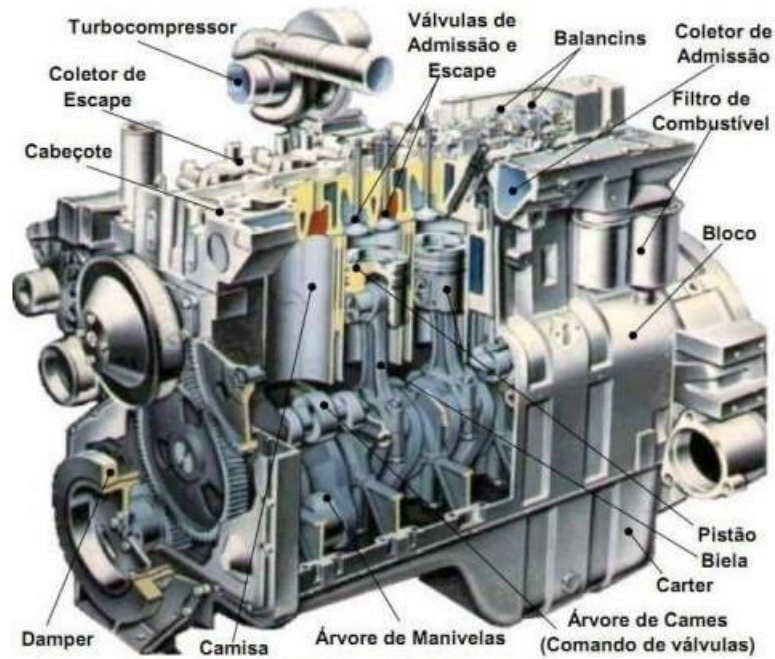
Fonte: Adaptado de Butta (2020).

Segundo Ballou (2007), no ramo da movimentação onde a agilidade e produtividade são essenciais, o equipamento motorizado mais utilizado é a empilhadeira devido sua eficiência, celeridade e carregamento de cargas em variadas alturas. No âmbito da mineração, as empilhadeiras atuam como equipamentos auxiliares nas atividades de manutenção e movimentação de peças e componentes.

2.3 COMPONENTES DO MOTOR DE UMA EMPILHADEIRA MOTORIZADA

O motor diesel das empilhadeiras motorizadas, são compostos por partes fixas e móveis que estão em constante contato para realizar a transformação da energia térmica em mecânica. Conforme Mahle (2019), os motores devem ter capacidade de suportar temperaturas e pressões elevadas e podem ser subdivididos em: cabeçote, bloco e cárter. Conforme mostrado na Figura 4, dentre as principais partes-componentes de um motor a combustão têm-se: válvulas de admissão e escape, comando de válvulas, pistão, biela, virabrequim e casquilhos.

Figura 4. Motor de combustão interna.



Fonte: Meirelles (2007).

O cabeçote é a parte superior do motor onde são instaladas as válvulas de admissão e escape, bicos injetores e funciona como um tipo de tampa para os cilindros.

Figura 5. Cabeçote do motor.



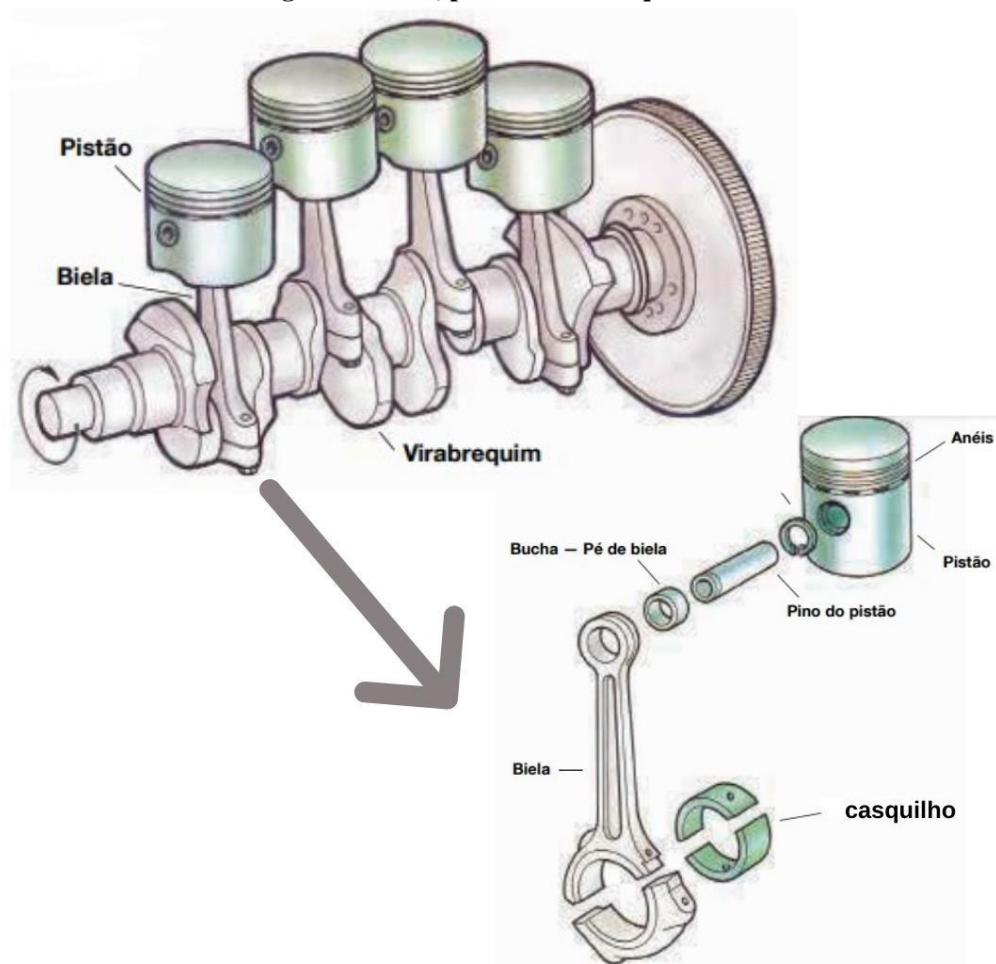
Fonte: Varella e Santos (2010).

Na parte central do motor temos o bloco que é onde são posicionados os cilindros ou câmaras de combustão, onde os pistões realizam o seu movimento, é nos cilindros que ocorre a compressão e a explosão do ar/combustível para geração da energia.

O pistão e o biela são as partes móveis localizados no interior da câmara de combustão motor. O pistão possui ranhuras e anéis de seguimento com função de vedação e lubrificação. Os anéis de vedação impedem a passagem dos gases de compressão, resíduos da queima para o cárter, retiram o excesso de óleo e depositam no cárter que é o reservatório de óleo

lubrificante. As bielas são responsáveis por enviar o movimento do pistão para o eixo virabrequim. Essas, são fixadas no eixo e de forma a evitar o desgaste, estão posicionados os casquilhos entre a biela e o virabrequim.

Figura 6. Bielas, pistões e virabrequim.

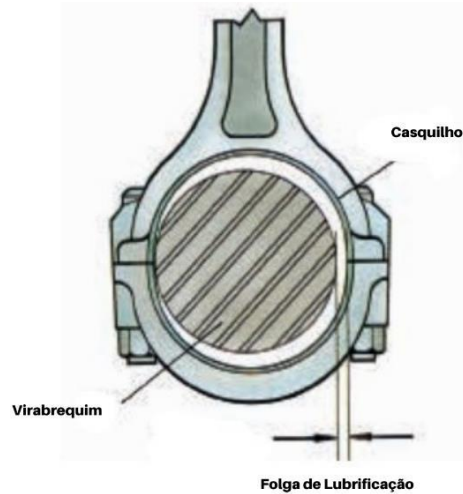


Fonte: Mahle (2019).

O virabrequim por sua vez recebe o movimento alternativo do pistão enviado pelas bielas e converte em rotativo para o comando de válvulas que é o eixo responsável pela abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape.

Conforme Mahle (2019), entre o casquilho e o virabrequim deve haver um filme de óleo para que o calor seja dissipado.

Figura 7. Folga de lubrificação dos casquilhos.

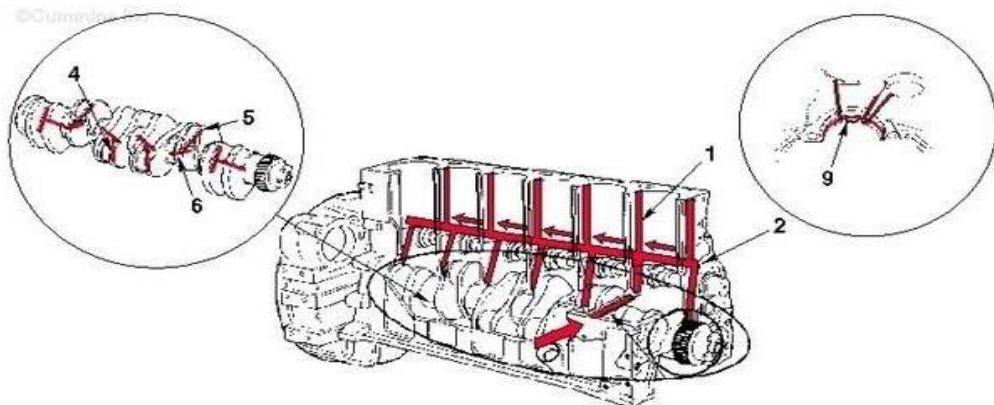


Fonte: Mahle (2019).

2.3.1 Sistema de Lubrificação em Motores de Combustão Interna

A lubrificação em um motor tem como objetivo evitar o desgaste, atrito e aquecimento. De acordo com Rodrigues (2009), há duas formas do óleo lubrificante circular no motor e são elas: a lubrificação por pressão e lubrificação por salpico. Na lubrificação por pressão o óleo é pressurizado e percorre os mancais do virabrequim e eixo de válvulas. Os pinos do pistão e as camisas do cilindro são lubrificadas através de orifícios na biela em conexão com virabrequim, como ilustrado na figura 8. Já a lubrificação por salpico o óleo é transportado através dos pescadores acoplados nas bielas e devido ao movimento projetam o óleo nas partes móveis.

Figura 8. Lubrificação dos componentes de força.



02900187

Fonte: Cummins (2022).

Na figura 8 temos a cadeia principal de óleo lubrificante indicada na posição 2 e que fornece a lubrificação para 1,4, 5, 6, 9 que são respectivamente o trem de válvulas, munhão da biela, casquilho da biela, munhão principal do virabrequim e o bico do arrefecimento o pistão.

2.3.2 Análise de Óleo do Motor

A análise de óleo é essencial para a identificação de possíveis alterações no óleo e desgastes de componentes do motor, devido os testes para avaliar os níveis de concentração de ferro, bronze, cromo, alumínio e etc. Conforme Zmozinski (2010), quando há um contato do óleo com agentes contaminantes ou as componentes desgastam devido o tempo ou falta de lubrificação, partículas metálicas se desprendem e são depositadas no óleo. Com a avaliação da concentração dos metais, é possível identificar se há desgaste em algum componente e conforme o percentual encontrado, pode-se determinar qual componente está sofrendo desgaste e auxiliando assim, em intervenções antes que a falha ocorra. Essas análises podem ser físico-química, espectrofotométrica e morfologia das partículas.

2.3.2.1 Físico-química

Na análise físico-química são realizados testes de fuligem, viscosidade e TBN&TAN que determina a alcalinidade e acidez do óleo. Quando os lubrificantes entram em contato com contaminantes, temperaturas elevadas, oxigênio e água, ele tende a se degradar (CARVALHO, 2015).

2.3.2.2 Espectrofotométrica

A espectrometria é o procedimento que identifica os teores de ferro, alumínio, cromo, chumbo e cobre presentes na amostra de óleo, e pode ser feita através dos métodos de absorção atômica ou emissão ótica.

2.3.2.3 Morfológica das Partículas

A análise morfológica das partículas é realizada para identificar possíveis contaminações do ambiente e desgastes dos componentes.

A Tabela 2 traz a ilustração da relação dos metais com os componentes, onde o aumento do teor pode está indicando desgastes no respectivo componente.

Tabela 2. Metais e respectivas origens do desgaste.

Metal	Origem do desgaste
Ferro	Engrenagens, virabrequim, bomba de óleo, rolamentos, eixo de comando de válvulas, cilindro, anéis.
Cobre	Rolamentos, arruelas de encosto, mancais, anéis de pistão, guias de válvulas.
Alumínio	Bombas, pistões, tuchos, rolamentos.
Cromo	Rolamentos, cilindros, anéis, componentes do sistema hidráulico.
Níquel	Válvulas e engrenagens revestidas de níquel.
Chumbo	Mancais.

Fonte: Adaptado de Cidade (2016).

2.4 ANÁLISE DE FALHA

Para uma gestão eficiente da manutenção, onde as atividades vão além de apenas manter as condições de funcionamento do equipamento, são necessárias algumas práticas de apoio e dentre elas está a análise de falha, conforme Xenos (2014).

A ABNT (1994) em sua norma NBR 5462:1994 definem a falha como o no termino da capacidade de um equipamento ou componente em exercer a sua função requerida levando a indisponibilidade do equipamento, ou seja, são todos os eventos que contribuem para a parada do equipamento.

Conforme Silveira (2021), quando uma falha acontece intervenções corretivas são realizadas a fim de eliminar o sintoma da falha. Entretanto, remover o sintoma da falha não garante que não tenha reincidência e para evitar que isso ocorra, é necessário que medidas sejam tomadas para inibir a causa raiz da falha através da análise de falha.

Com a análise de falha é possível reduzir os índices de quebras, paradas inesperadas e aumento da disponibilidade do equipamento (HANDBOOK, 2002). Para o melhor desempenho são utilizados os conhecimentos em ferramentas de qualidade e tipos de falhas mecânicas.

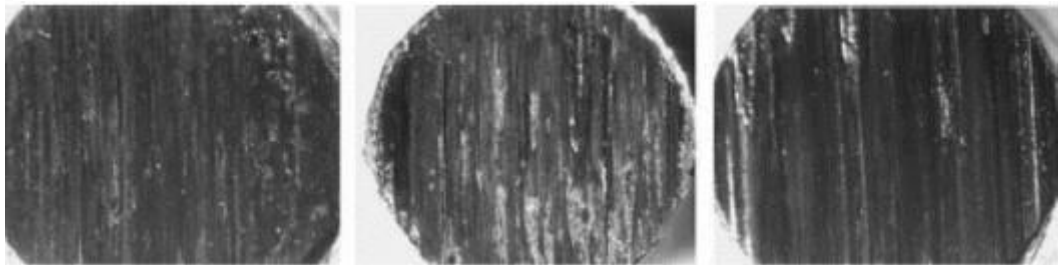
2.4.2 Falha por Desgastes

Desgaste é o dano sofrido pelo movimento entre duas superfícies de contato, resultando ou não na perda de material. Há quatro tipos principais de desgaste e são eles: Desgaste por fadiga, desgaste adesivo, desgaste abrasivo e desgaste corrosivo (DESSBESELL, 2017).

2.4.2.1 *Desgaste por Fadiga*

Segundo Suski (2004), o desgaste por fadiga é gerado devido a exposição a ciclos de tensão e podem ter origem em desgaste por deslizamento ou desgaste por rolamento. O desgaste por deslizamento é ocasionado quando a tensão está na direção onde há o deslizamento e resulta na perda de material. Por outro lado, o desgaste por rolamento ocorre quando a tensão aplicada está perpendicular a superfície resultando na perda significativa de material devido a flexão causada pela carga.

Figura 9. Superfícies desgastadas por deslizamento.



Fonte: Almeida (2017).

Figura 10. Roda ferroviária desgastadas por rolamento.



Fonte: Amorim (2018).

2.4.2.2 *Desgaste Adesivo*

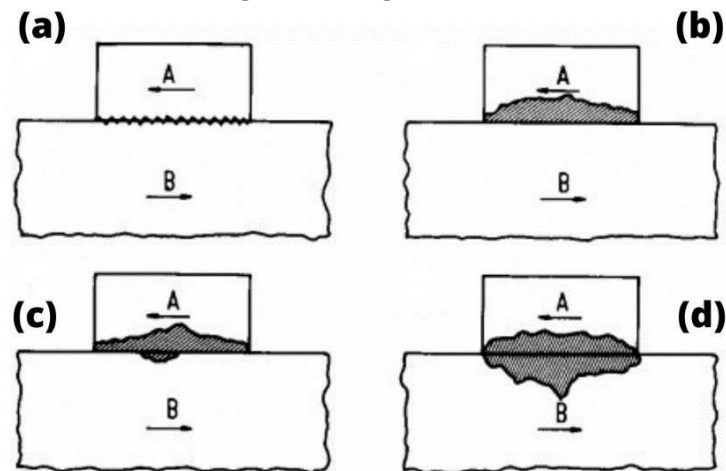
O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies de contatos não são lisas e são resistentes ao deslizamento. Conforme Suski (2004), ocorre uma deformação plástica na região de contato e conseqüentemente surge uma trinca que pode gerar um terceiro corpo e

consequentemente a transferência de material entre as superfícies. O desgaste adesivo ocorre quando as forças atômicas entre as superfícies de materiais sob uma certa carga são mais fortes que as propriedades do material de qualquer uma das superfícies.

Para Morillo (2015), o desgaste adesivo é o mais comum dos desgastes, pois ele ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam entre si, podendo ou não estarem lubrificadas. Esse tipo de desgaste é considerado básico pois não existem materiais totalmente lisos, todos possuem protuberâncias em níveis microscópicos.

Na Figura 11 tem-se a ilustração do desgaste adesivo entre duas superfícies sólidas. No caso (a) há lubrificante entre as superfícies, minimizando o desgaste nos materiais, que será mínimo se as tensões não ultrapassarem o limite de escoamento. No caso (b) a resistência do material A é inferior a resistência do B e ultrapassando o limite de escoamento do material A, ocorrendo desgaste apenas no material A. No caso (c) a resistência do material A é inferior que a do material B, entretanto não teve seu limite de escoamento ultrapassado, dessa forma o material A sofrerá mais desgaste que o B. No caso (d) ocorre o desgaste igualmente em ambos os materiais, devido compartilharem as mesmas propriedades mecânicas.

Figura 11. Desgaste adesivo.

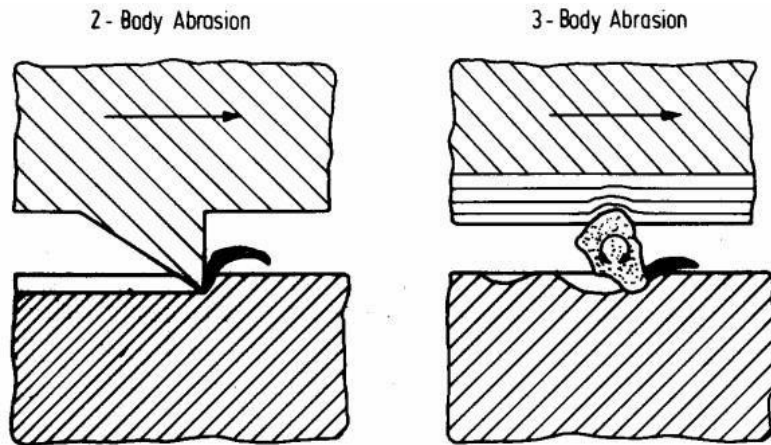


Fonte: Adaptado de Tschiptschin (2022).

2.4.2.3 Desgaste Abrasivo

É o desgaste que ocorre quando protuberâncias duras deslizam sobre superfícies de menor dureza. As protuberâncias podem ser originadas por fragmentos metálicos encruados, partículas oriundas da usinagem ou minérios. Na Figura 12 temos abrasão entre dois e três corpos.

Figura 12. Desgaste abrasivo em corpos e três corpos.

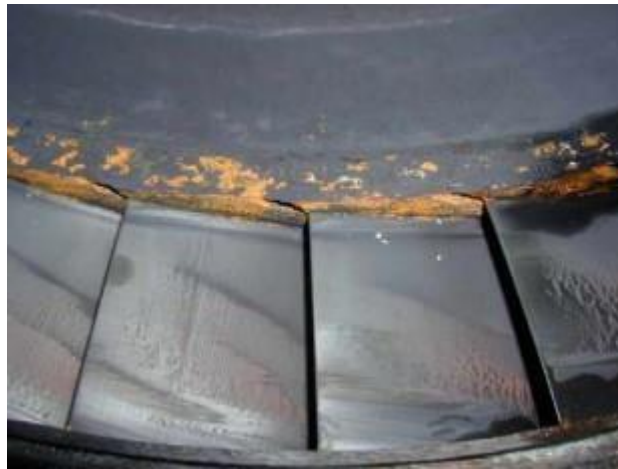


Fonte: Tschiptschin (2022).

2.4.2.4 Desgaste Corrosivo

É o desgaste causado pela degradação do material quando o mesmo entra em interação com o ambiente que está inserido.

Figura 13. Desgaste corrosivo em aço inoxidável.



Fonte: Tschiptschin (2022).

2.5 ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Conforme a ABNT em sua norma NBR 5462:1994, confiabilidade é a capacidade de um item em desempenhar sua função, sob condições específicas durante um dado intervalo de tempo. A engenharia da confiabilidade é a área onde utiliza a estatística e a probabilidade, para avaliar e otimizar a confiabilidade dos sistemas. Existem diversos modelos de distribuições

estatísticas que são utilizados para modelar matematicamente o comportamento de uma função de probabilidade.

2.5.1 Modelo de Poisson

Os componentes mecânicos dos motores, apresentam ao longo da vida uma taxa de falhas crescente, o que é explicado pela degradação de seus itens internos, pela sua condição de estresse estrutural e pelos desgastes de elementos vitais para seu funcionamento. Entretanto, na região de vida útil, é possível utilizar-se de uma hipótese simplificadora considerando taxa de falha constante, o que implica em tempos de funcionamento exponencialmente distribuídos. (BILLINTON, 1983).

Quando um motor falha, o retorno do equipamento ao seu estado operacional ocorre normalmente pela substituição do motor por um motor novo (ou reformado), liberando o equipamento principal para voltar a desempenhar sua função inicial. Dessa forma, o modelo de Poisson permite avaliar a confiabilidade dos equipamentos e/ou componentes com um estoque inicial definido e permitindo assim validar a quantidade mínima de componentes reservas para garantir a confiabilidade do ativo.

2.5.1.1 A distribuição de Poisson

Conforme Billinton (1983), a distribuição de Poisson é uma distribuição estatística que permite calcular a probabilidade de um evento ocorrer um determinado número de vezes dentro de um intervalo de tempo definido. A equação a seguir apresenta a probabilidade de um equipamento com N componentes em operação, de taxa de falha λ falhar em um intervalo de tempo t, na condição de k componentes reservas.

$$R(t) = e^{-N\lambda t} \sum_{k=0}^n \frac{(N\lambda t)^k}{k!} \quad (1)$$

Neste caso, assume-se que após a falha o componente falhado seja substituído por outro idêntico imediatamente, retornando à probabilidade de sucesso R(t).

2.5.2 Distribuição de Weibull

De acordo com Papoulis (1991), uma variável aleatória obedece ao comportamento da distribuição Weibull desde que sua função de densidade de probabilidade seja dada por:

$$f(x; \beta; w) = \begin{cases} \frac{k}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

onde w é denominado o tempo característico, t o tempo e β é denominado o fator de forma da distribuição.

O uso da distribuição é importante e amplamente aceito em virtude de sua flexibilidade, pois permite a modelagem de diferentes comportamentos para a função de risco $h(t)$. O valor de seu fator de forma β define se o risco da falha é crescente ($\beta > 1$), decrescente ($\beta < 1$) ou constante ($\beta = 1$). Outra característica importante deste tipo de distribuição é que ela permite a modelagem de sistemas sujeitos à n modos de falha em série, o que ocorre constantemente em equipamentos utilizados na mineração. Por exemplo, está metodologia admite à implementação de valores suspensos ou não de vida referentes à uma falha em um conversor de torque influenciada por uma contaminação no fluido advindo da transmissão. Deste modo, a falha ocorre quando o primeiro de n modos de falha, que competem entre si se materializa. (LEWIS, 1984).

Neste sentido, de acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), o modelo de confiabilidade baseado na distribuição Weibull segue as expressões dadas pela equação:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta-1} e \left[- \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\beta \right] \quad (3)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

$$R(t) = e - \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\beta \quad (5)$$

$$MTBF = t_0 + \theta^{\frac{1}{\beta}} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (6)$$

onde t_0 é o tempo isento de falha, θ o parâmetro de escala e t o tempo até a falha.

2.6 FERRAMENTAS DE QUALIDADE

Para Rodrigues (2010), com o aumento do grau de dificuldade para solucionar os problemas nos setores das organizações devido à complexidade das atividades, as ferramentas de qualidades surgem para potencializar as habilidades das equipes multidisciplinares, dispondo de métodos e técnicas para verificação dos problemas e proposição de soluções.

Moreira (2015) identifica as ferramentas de qualidade como formas de identificar, compreender e gerar soluções para inibir as falhas e otimizar processos na empresa. Dessa forma, antes de propor medidas são realizadas análises dos fatos que influenciaram ou precederam a falha.

Segundo Aguiar (2014) entende-se por controle da qualidade o processo de gestão universal para conduzir operações necessárias para a produção de bens e serviços, estabelecendo nelas estabilidade, ou seja, prevenindo mudanças não desejadas e mantendo o status de operação. Dessa forma, sabe-se que falhas afetam a estabilidade e status de operação e frente a um cenário como esse, estratégias de análises devem ser tomadas para sanar a falha de forma rápida e efetiva de forma a garantir a retomada de função por uma máquina ou componente danificado.

A norma NBR ISO 31010 (2012) lista os principais tipos de ferramentas de análise que podem ser utilizadas para auxiliar no desenvolvimento estruturado da investigação de uma certa causa raiz responsável por desencadear uma certa falha (ABNT, 2012).

- Método dos cinco porquês;
- Análise do modo e efeito de falhas;
- Análise de árvore de falhas;
- Diagrama de Ishikawa;
- Análise de Pareto;
- Mapeamento de causa raiz.

Aguiar (2014) ressalta a importância da utilização de ferramentas adequadas para a condução de uma análise de causa raiz bem estruturada, dando ênfase na utilização de duas das ferramentas citadas pela norma NBR ISO 31010:2012, sendo estas, o método dos cinco porquês e o diagrama de Ishikawa.

2.6.1 Método dos 5 porquês

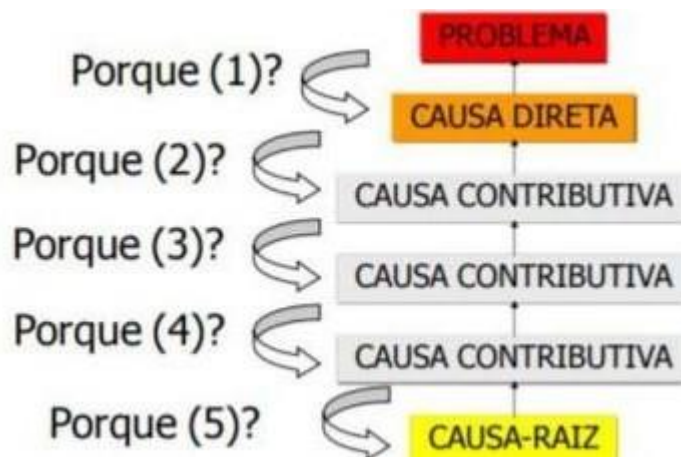
Com origem em um problema, o método dos 5 porquês consiste em uma abordagem de sucessivos questionamentos (porquês) até que as respostas em cadeia levem a identificação da causa raiz de um problema abordado (Aguiar, 2014).

Segundo Weiss (2011), os passos necessários para aplicação do método são:

1. Iniciar com a afirmação do problema que deseja solucionar;
2. Perguntar por que a afirmação anterior é verdadeira;
3. Para a reação descrita que explica por que a afirmação anterior é verdadeira, pergunte por que novamente;
4. Continue perguntando por que até que não haja mais respostas, com isso chegará à causa direta da falha.

Ohno (1997) ressalta que através do método dos cinco porquês é possível investigar mais a fundo o cenário de falha para que, assim que a causa raiz seja encontrada, o problema possa ser corrigido. A figura 14 mostra essa dinâmica envolvida no método, onde o primeiro porquê dá a causa que relacionamos diretamente ao problema, as causas posteriores são as contributivas, ou seja, que contribuíram para a falha e o último porquê é o que nos dá a causa raiz do problema.

Figura 14. Método dos cinco porquês.



Fonte: Menezes (2013).

De forma sucinta e prática é possível verificar a sucessão dos questionamentos (cinco porquês) em torno de um problema relacionada a parada de uma máquina (OHNO, 1997). A figura 15 traz o método dos cinco porquês aplicado a falha de uma embreagem de um trator de

esteiras, onde o primeiro porquê que dá ligação direta ao problema são os desgastes adesivos dos discos de fricção e placas separadoras, e a causa raiz encontrada é que a embreagem estava sendo armazenada de forma irregular antes da sua instalação no trator.

Figura 15. Método dos cinco porquês aplicado a falha de uma embreagem de um trator de esteiras.



Fonte: Silveira (2021).

É importante ressaltar que para cada causa associada ao seu respectivo porquê, deve ser evidenciado que realmente a causa apontada é existente e não apenas uma hipótese dos investigadores envolvidos. De acordo com Weiss (2011), embora a análise o método se chama cinco porquês, pode-se utilizar menos porquês, ou mais, de acordo com a necessidade do problema em encontrar a causa raiz.

2.6.2 Diagrama de Ishikawa

Conforme Rodrigues (2010), essa ferramenta estabelece a relação entre o efeito e todas as causas do processo. Cada efeito possui diversas categorias de causas e essas, podem ser compostas por outras causas. Essa metodologia permite que se possa identificar como os 6M's utilizados no diagrama de Ishikawa podem contribuir na ocorrência de uma falha ou desempenho dentro dos processos, são os 6M's: Mão de obra, meio ambiente, máquina, método, medição e material.

O diagrama permite estruturar qualquer sistema que necessite de resposta de forma sintética e gráfica, de forma a obter uma melhor visualização e compreensão do conteúdo. Segundo Rodrigues (2010), apesar de ser uma ferramenta largamente utilizada, a sua concepção é dada através das colaborações de diversas pessoas, compartilhando conhecimento e cooperando nas informações recebidas dos demais participantes.

Para concepção do Diagrama são seguidas as seguintes etapas:

- Realizar a identificação da falha do objeto de estudo;
- Descrever as possíveis causas e direcioná-las ao seu respectivo grupo dos 6M's;
- Analisar o diagrama e identificar as verdadeiras causas;
- Corrigir o problema proposto.

Figura 16. Diagrama de Ishikawa para perda de produtos.



Fonte: Souza, 2003.

3 METODOLOGIA

3.1 VERIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A falha na empilhadeira ocorreu durante sua operação de movimentação de carga, onde o equipamento realizava o procedimento de remoção das esteiras de uma escavadeira hidráulica. Neste procedimento, a empilhadeira utiliza os garfos para suspender e sustentar a carga. Durante a atividade, o operador percebeu um ruído acentuado proveniente do motor do equipamento, e após o evento, o equipamento foi imediatamente paralisado a operação, retirado e enviado para a oficina de manutenção, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17. a) Registro da empilhadeira após a ocorrência e b) Motor diesel falhado.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na empresa em estudo é procedimento interno praticado pela mesma, a obrigatoriedade da emissão de um relatório de análise de falha quando a parada não planejada acarreta em uma interrupção de 36 horas de operação do equipamento. O objetivo é fazer com que diretrizes sejam estabelecidas para que não permitam a reincidência da falha.

O tempo estimado para a substituição do motor do ativo é de 22 horas, o que associado ao regime de turnos dos colaboradores, ultrapassaria 36 horas para realização da análise. Entretanto, devido à ausência de um componente reserva para aplicação na empilhadeira, o equipamento passou 316 horas paralisado.

Para condução da análise, estruturou-se um comitê multidisciplinar conforme detalhamento na Tabela 3, objetivando investigar e entender os fatores contribuintes para a falha no motor diesel do equipamento. Os nomes dos integrantes da análise foram omitidos por questões de confidencialidade da informação.

Tabela 3. Equipe multidisciplinar envolvida na análise.

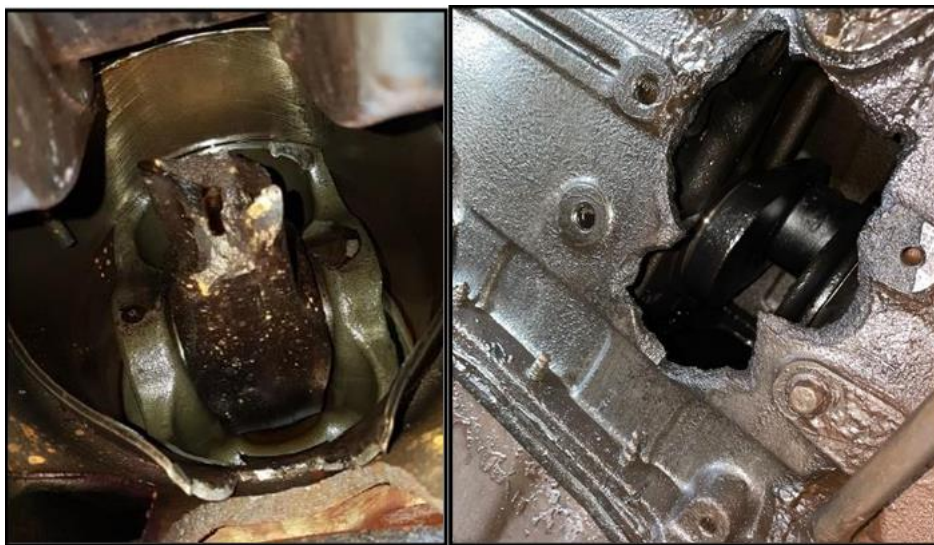
MEMBRO	FUNÇÃO	ÁREA
O autor	Analista de Manutenção	Engenharia de Manutenção
Analista B	Analista de Manutenção	Engenharia de Manutenção
Mecânico A	Eletromecânico	Manutenção Preventiva
Mecânico B	Eletromecânico	Manutenção Corretiva
Inspetor A	Eletromecânico	PCM
Operador A	Operador de Equipamentos	Operação
Técnico A	Técnico de Segurança	Segurança do Trabalho

Fonte: Autoria própria (2022).

3.2 INSPEÇÃO DOS COMPONENTES

Após a ocorrência da falha, o motor foi avaliado pela equipe de manutenção, onde foi enviado para a oficina de componentes para passar por umas perícias técnicas para avaliação de todos os sistemas periféricos do motor. Durante a avaliação, foi constatado uma fratura da quinta biela do motor como mostrado na Figura 18.a. Como consequência da quebra da biela, o impacto gerado após a fratura entre a biela e o bloco do motor fez com que o bloco se quebrasse, inviabilizando assim sua reutilização, como mostrado na Figura 18.b.

Figura 18. a) Quebra da quinta biela do motor; b) Fratura do bloco do motor.



Fonte: Autoria própria (2021).

Durante a inspeção dos componentes do motor, notou-se que o pistão estava sob condições de desgaste excessivo. Alguns itens essenciais para o funcionamento adequado do motor estavam danificados, como por exemplo os anéis de vedação e os anéis de lubrificação, como mostrado na Figura 19. Além disso, durante a desmontagem, percebeu-se que a capa da biela havia se fundido ao munhão da árvore de manivelas, impossibilitando sua remoção. A fusão dos itens aponta para um superaquecimento extremo e acima do esperado naquela região.

Figura 19. Desgaste nos anéis de vedação e de lubrificação do pistão.



Fonte: Autoria própria (2021).

Ao avaliar o conjunto do motor, foi possível identificar que o material do casquilho (bronzina) da biela fundiu com o material do munhão em virtude de fricção contínua. Conforme mostrado na Figura 20, a bronzina apresenta indícios de superaquecimento, e a elevação da temperatura foi consequência do atrito entre os metais do casquilho e do munhão. Em condições normais de funcionamento, esse contato é minimizado pela presença de uma película de óleo que atua na lubrificação do conjunto e ajuda na dissipação do calor proveniente das rotações da biela.

Ao avaliar a região de contato do casquilho com o munhão, constatou-se que a bronzina se movimentou, gerando um desalinhamento entre os furos das galerias e interrompendo assim a lubrificação do conjunto. A fixação da bronzina é realizada por meio de estrias presentes na lateral do munhão, e essas estrias garantem que não ocorra o deslocamento deste item. Como as estrias se desgastaram, sua fixação foi perdida, o que possibilitou a movimentação do casquilho. O fluxo de óleo que chega aos casquilhos é orientado por meio de uma galeria de lubrificação cruzada que percorre toda a árvore de manivelas, e a obstrução destes canais culmina em uma falha de lubrificação do conjunto. Após a interrupção da lubrificação, o contato entre os componentes ocorreu de maneira crítica fazendo com que a temperatura das peças fosse elevada. Como o material do casquilho apresenta um revestimento composto de uma liga de bronze, que possui um ponto de fusão abaixo do aço carbono, a bronzina fundiu-se ao material do munhão.

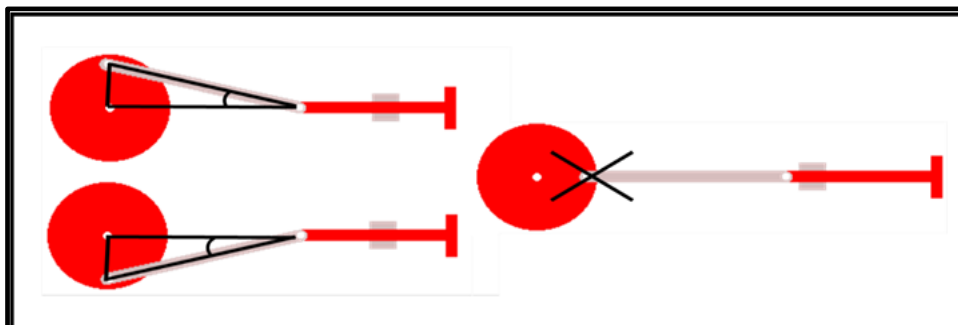
Figura 20. Casquilho deslocado e fundido com o munhão.



Fonte: Autoria própria (2021).

Devido o conhecimento do mecanismo de funcionamento do motor, é sabido que as articulações ativas no sistema são o que garantem o seu funcionamento e a conversão de movimentos necessária. A interrupção na articulação de rotação ocorrida após a fundição do material do casquilho com o virabrequim fez com que o movimento fosse desconfigurado, interrompendo assim a movimentação natural do mecanismo, conforme exemplificado na Figura 21.

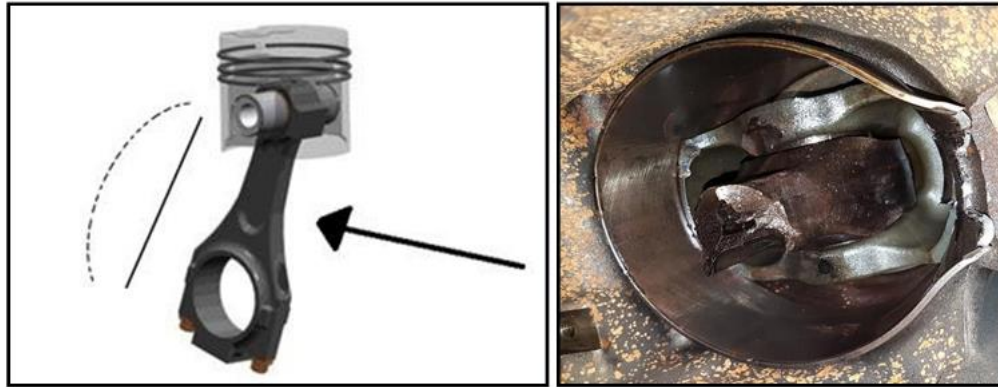
Figura 21. Desconfiguração do mecanismo biela/manivela.



Fonte: Autoria própria (2022).

Diante dessa desconfiguração, a biela que deveria executar um movimento composto (translação e rotação) passou a ter a possibilidade apenas de translação, fazendo com que a biela fosse submetida a um esforço de flexão lateral, levando-a à flambagem. Diante dessa solicitação, a biela sofreu uma carga rápida, vindo à uma fratura frágil por flexão, como mostrado na Figura 22.

Figura 22. Fratura frágil da quinta biela do motor

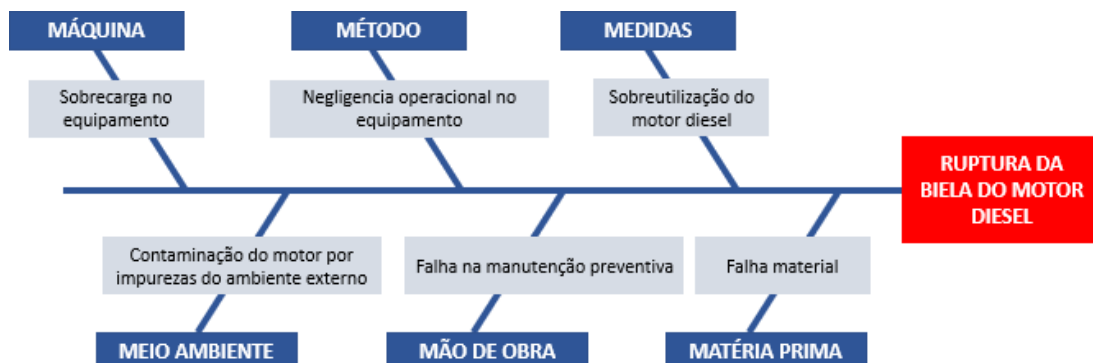


Fonte: Autoria própria (2021).

3.3 DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Para emprego de um método eficaz na investigação da falha, empregou-se a ferramenta Diagrama de Ishikawa para avaliar todos os aspectos que poderiam apresentar influência sobre a ocorrência do evento, conforme mostrado na Figura 23. Cabe mencionar que essa é a primeira etapa do trabalho de análise, realizada durante a coleta de dados e preparação da investigação. Todavia, buscando atribuir ao presente trabalho uma estrutura lógica que facilite seu entendimento, este capítulo foi deslocado para esta posição.

Figura 23. Diagrama de Ishikawa.



Fonte: Autoria própria (2022).

Deste modo, cada um dos pontos levantados no processo de construção das hipóteses foi avaliado, e as hipóteses não validadas foram excluídas da avaliação.

1. Sobrecarga do equipamento: A tara do conjunto da esteira, item que o equipamento estava sustentando durante a falha, é de 14 toneladas, enquanto que a capacidade máxima da empilhadeira é de 16 toneladas. Todavia, cabe citar que parte do conjunto das esteiras permanecia apoiado sobre os roletes, o que reduz a carga atuante sobre os garfos da empilhadeira. Sendo assim, essa hipótese foi descartada.

2. Negligência operacional no equipamento: Conforme relatos do operador e da equipe que acompanhava a intervenção, a operação era realizada conforme o procedimento padrão, sem nenhum desvio evidenciado, o que elimina essa hipótese.

3. Contaminação do motor por impurezas do ambiente externo: Após a ocorrência, foi realizada uma análise no óleo do motor do equipamento, e não foram identificadas quaisquer anomalias, como presença de limalha ou contaminantes de minério de ferro. Deste modo, a possibilidade de falha por contaminação torna-se improvável.

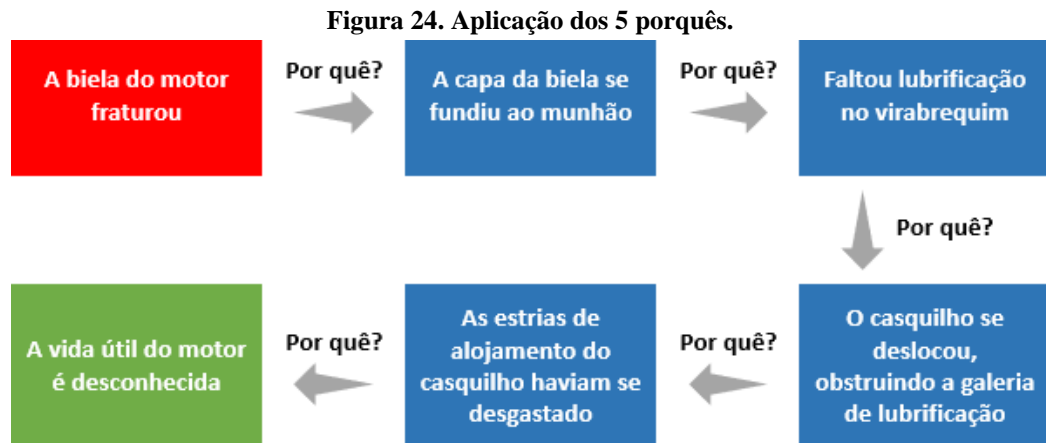
4. Falha na manutenção preventiva: Durante a última intervenção de manutenção preventiva, realizada 4 dias antes da ocorrência da falha, todos os itens da pauta foram executados e substituídos, inclusive foi realizada a complementação dos fluidos do motor. Sendo assim, descartou-se a hipótese de falha na manutenção.

5. Falha material: Uma vez que o motor se encontrava com 19.128 horas trabalhadas (mais de 7 anos de instalado), certamente é improvável afirmar que uma falha material ocasionou a quebra, uma vez que falhas no material ou instalação ocasionam falhas ainda no início da operação do equipamento (período de mortalidade infantil).

6. Sobreutilização do motor diesel: Por último, avaliou-se o tempo de operação do motor diesel. Conforme mencionado anteriormente, este encontrava-se com 19.128 horas trabalhadas, o que é um período de vida extremamente alto se comparado à motores da mesma família. Entretanto, a vida útil desta série de motores é desconhecida, e por este motivo, a empresa trabalha com sua substituição apenas após falhas (estratégia de manutenção corretiva). Sendo assim, determinou-se como causa a degradação do motor ocasionada pela sua utilização excessiva, que se deu devido o desconhecimento da vida útil do motor.

3.4 MÉTODO DOS CINCO PORQUÊS

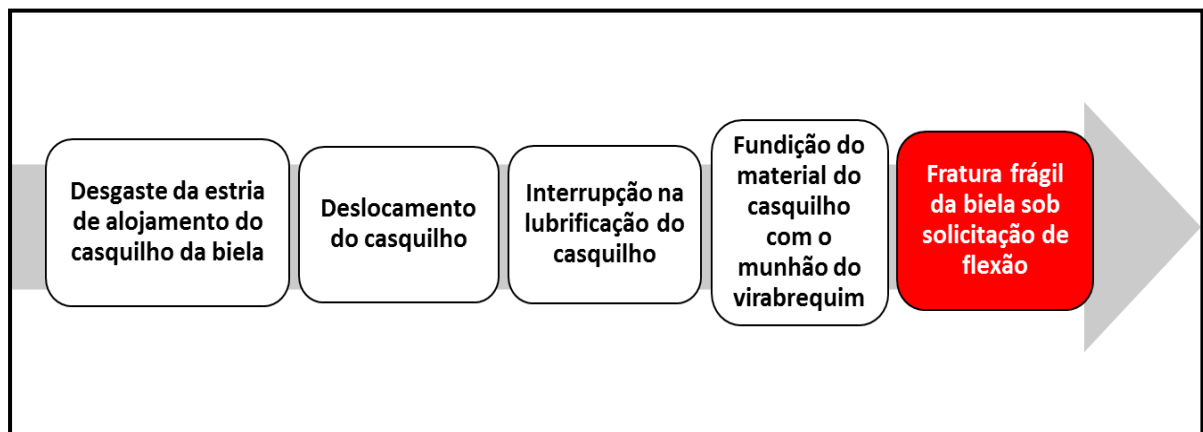
Em seguida, foi realizada a validação da causa raiz encontrada no diagrama de Ishikawa pelo método dos 5 porquês, onde por meio de 5 perguntas, partindo do modo de falha observado no motor, observou-se que o fator causal da falha foi exatamente o mesmo encontrado, conforme mostrado na Figura 24.



Fonte: Autoria própria (2022).

Assim, diante dos fatos e das evidências encontradas, a cronologia provável que representa o desencadeamento da falha é expressa na Figura 25, facilitando a análise e o entendimento da provável causa potencial da falha.

Figura 25. Cronologia dos fatos da falha.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.4 PLANOS DE AÇÕES

Sendo assim, uma vez identificada a causa raiz que desencadeou a falha no motor diesel, o comitê estruturado para a análise da falha estabeleceu ações com o intuito de reduzir ou bloquear ocorrências de mesma natureza, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Plano de ação.

AÇÃO	MOTIVO	QUEM	COMO
Elaborar de estudo para entendimento do momento ótimo de substituição dos motores diesel das empilhadeiras	Desconhecimento da vida útil recomendada para esta família de motores	Analista de Manutenção	Aplicação de ferramentas estatísticas para avaliação
Elaborar estudo de avaliação do parque reserva de motores ideal para a frota de empilhadeiras	Ausência de motor reserva para imediata aplicação após a falha	Engenheira de Manutenção	Aplicação de ferramentas estatísticas para avaliação
Implementar política de análise de óleo em todas as revisões a partir de 500 horas	Inexistência de análises preditivas dos lubrificantes	Engenheira de Manutenção	Contratação de laboratório para análise dos lubrificantes
Implementar estratégia de substituição dos motores por vida útil	Substituição de componentes em manutenções corretivas	Coordenador de PCM	Definir target de horas para substituição do componente

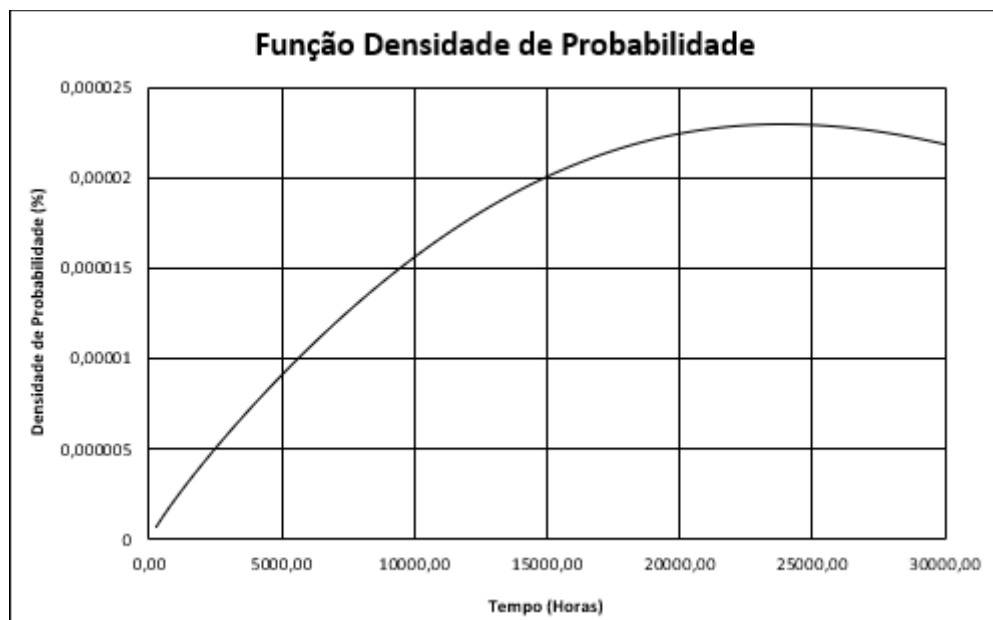
Fonte: Autoria própria (2022).

4 RESULTADOS

4.1 DEFINIÇÃO DA VIDA ÚTIL DOS MOTORES

Para avaliação do momento ótimo para a substituição dos motores por uma estratégia preventiva, utilizou-se da distribuição estatística de Weibull, baseando-se em todo histórico de substituição dos motores de empilhadeiras, horímetros e tempo médio entre falhas. Para simulação da curva de falhas e confiabilidade obtida, utilizou-se o software comercial *Weibull ++*. Conforme observado na Figura 26, a concentração das ocorrências de falha dos motores encontra-se compreendida entre as 20.000 e 25.000 horas trabalhadas, momento no qual a maioria da amostragem apresentou falha catastrófica.

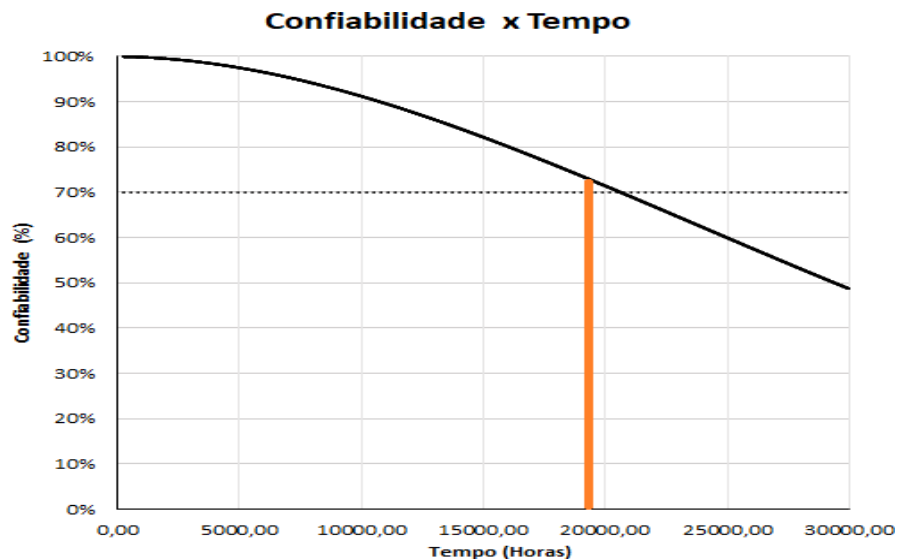
Figura 26. Função densidade de probabilidade



Fonte: Autoria própria (2022).

Além disso, por meio da função Weibull, é possível entender como a confiabilidade do componente se comporta ao longo do tempo. Como observado na Figura 27, para o horímetro da falha observado neste trabalho, o componente apresenta uma confiabilidade de 72%, o que implica em dizer que 28 em cada 100 motores falharão antes deste momento da vida.

Figura 27. Curva de confiabilidade do motor ao longo do tempo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Uma vez que existem penalidades contratuais em ocasiões de indisponibilidade das empilhadeiras, sua paralisação é extremamente custosa para a empresa. Por este motivo, optou-se por adotar uma confiabilidade mais conservadora, na ordem de 85%. Para atingir essa confiabilidade, os motores necessitarão serem substituídos antes de 13.000 horas trabalhadas, sendo este então o momento ótimo para substituição do componente estabelecido nas novas diretrizes de manutenção preventiva.

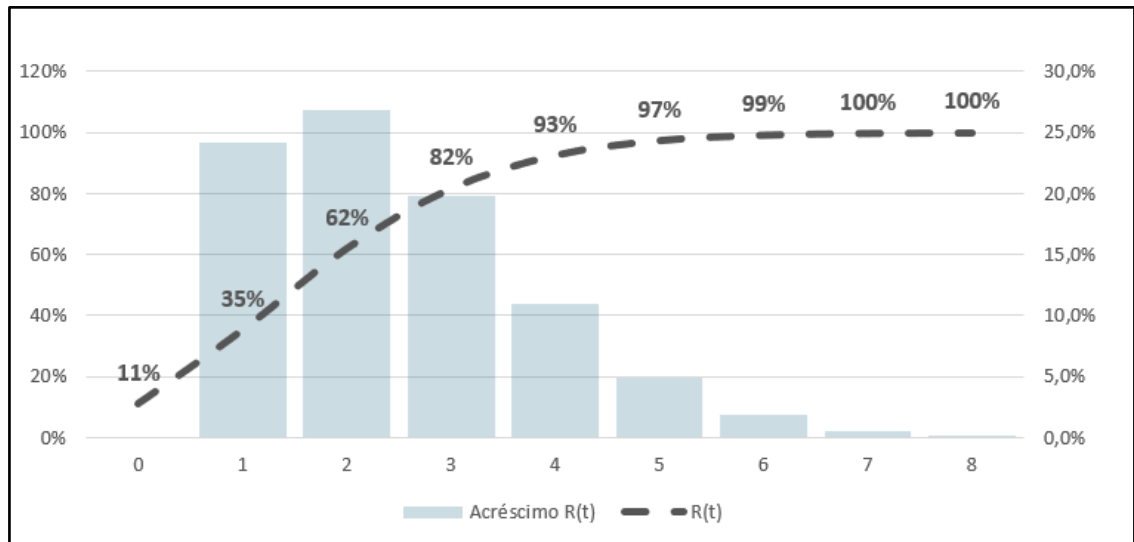
4.2 DEFINIÇÃO DO PARQUE RESERVA DE MOTORES

Com o intuito de garantir que existam componentes reservas que possibilitem o fluxo de reforma dos motores da frota, ou ainda, que após uma parada não planejada (quebra catastrófica) existam componentes que possam suprir aquele evento. Definiu-se como necessária a realização de um estudo para determinar qual a quantidade ideal de motores diesel a manter-se em estoque. Para tal, foram utilizadas constantes conhecidas da distribuição de Poisson e outras calculadas neste trabalho, como o intervalo ótimo de substituição dos motores, obtido na seção anterior.

Para o dimensionamento do parque, considerou-se um componente com vida útil de 13.000 horas, 25 empilhadeiras operantes, 100 dias para reparo dos motores substituídos, 48% de rendimento operacional e uma probabilidade de sucesso de 85%. Deste modo, conforme

mostrado na Figura 28, o número mínimo de motores reservas a manter no estoque estratégico da empresa é de 4 motores, carregando assim ainda uma margem de 7% de chance de insucessos (necessidade de substituir um motor, e naquele momento específico, não dispor de um motor em estado operacional no estoque).

Figura 28. Distribuição de Poisson para identificação do parque reserva ideal.

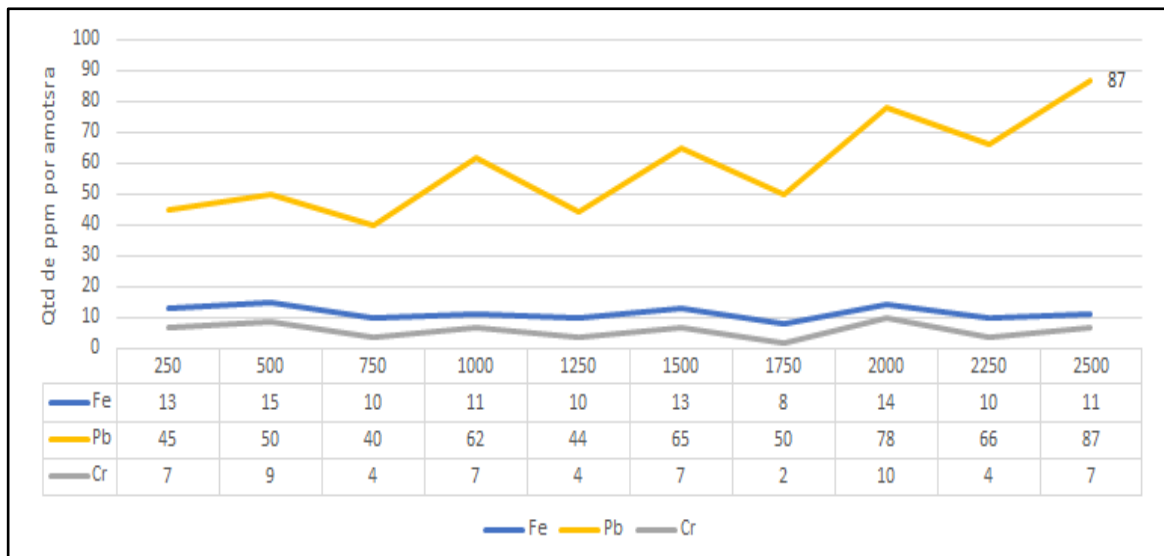


Fonte: Autoria própria (2022).

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DE ANÁLISE DE ÓLEO

Para garantir um acompanhamento da performance dos ativos, e antecipar-se mediante eventos de manutenção indesejáveis ou desconhecidos, foi implementada a política de avaliação periódica da condição dos fluidos dos equipamentos. Esse acompanhamento, por meio do monitoramento da tendência de aumento de alguns elementos, permite que falhas sejam percebidas e mapeadas antes que essas se concretizem. A Figura 29 mostra um dos gráficos de acompanhamento das coletas de óleo do motor, onde percebe-se claramente um aumento no teor de chumbo aspecto característico do mesmo modo de falha evidenciado no evento deste trabalho.

Figura 29. Monitoramento da tendência dos elementos do óleo do motor.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para entendimento, os valores apresentados representam o percentual máximo admitido para aquele determinado elemento no lubrificante. Nos intervalos múltiplos de 500 horas, onde ocorre a substituição do óleo do motor, percebemos queda em todos os elementos, o que é esperado. Todavia, para o chumbo, a tendência é de aumento, chegando na intervenção de 2500 horas muito próximo ao ponto crítico, momento onde foi sinalizada para o planejamento e controle de manutenção a necessidade da substituição imediata do componente.

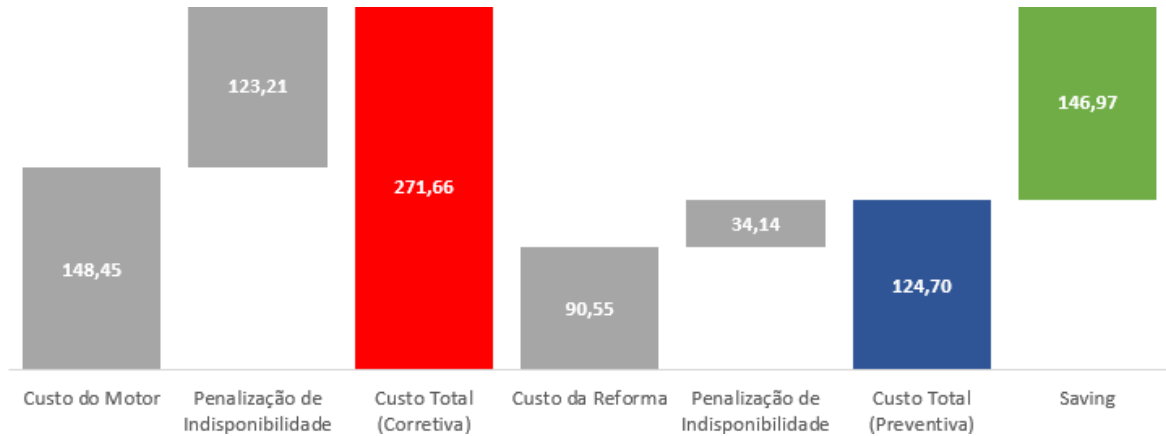
4.3 ALTERAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SUBSTITUIÇÃO DOS MOTORES

Por fim, tendo conhecido o intervalo ótimo de substituição dos motores, foi realizado um racional financeiro para a avaliação da viabilidade econômica da substituição dos componentes seguido uma estratégia preventiva. Deste modo, foram avaliados 2 cenários, o primeiro deles substituindo por condição (após a falha) e o segundo, levando em consideração o intervalo ótimo calculado. Para o primeiro cenário, além do custo de aquisição do motor novo, por este não apresentar condições de reforma para a maioria dos casos, considerou-se uma penalização decorrente da indisponibilidade dos equipamentos, que por ser uma falha catastrófica, leva à um tempo de máquina parada superior ao que aconteceria em uma manutenção planejada.

Para o segundo cenário, como o motor será substituído em estado ainda operacional, poderá ser reformado por um custo inferior ao custo de aquisição de um novo. Além disso, por tratar-se de uma manutenção conhecida, poderá ser conciliada junto à uma revisão do equipamento, diminuindo o tempo de máquina parada, e conseqüentemente a penalização

prevista em contrato para a indisponibilidade do equipamento. A Figura 30 apresenta a comparação dos cenários em BRL Mil.

Figura 30. Comparação das estratégias de substituição corretiva e preventiva dos motores.



Fonte: Autoria própria (2022).

Como pode-se observar, para cada motor substituído preventivamente, estima-se uma economia de R\$ 146.970 reais. Considerando uma frota atualmente instalada de 25 empilhadeiras, e que essas realizarão a substituição planejada uma vez a cada aproximadamente 5 anos, estima-se, desconsiderando o valor da inflação do dinheiro no tempo, uma economia anual de R\$ 734.830 reais com a alteração na estratégia de substituição dos motores.

5 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados pode-se perceber que as ferramentas de qualidade se apresentam como excelentes métodos que, se aplicados corretamente, permitem que o gestor da manutenção identifique os principais desperdícios e os desvios do processo. Pode-se afirmar ainda que o emprego dessas ferramentas em conjunto permite que hipóteses levantadas sejam validadas por diversos meios, atribuindo ao estudo fidedignidade com a natureza das falhas e robustez para as tomadas de decisões.

Pode-se perceber ainda que a engenharia de confiabilidade é um pilar de extrema importância dentro do processo de gestão de manutenção, pois a utilização de ferramentas estatísticas para a predição do comportamento de tendência de falhas permite que o engenheiro direcione sua estratégia de manutenção para diferentes abordagens, uma vez que intervalos contidos entre as trocas de componentes passam a ser conhecidos.

Avaliando o estudo, pode-se ainda concluir que o emprego da manutenção preventiva propicia ao planejamento e controle de manutenção, caso estudos de confiabilidade e viabilidade econômica sejam bem construídos, a possibilidade de reduzir custos de manutenção e aumentar a disponibilidade de seus equipamentos, uma vez que intervenções antes não conhecidas e com grande tempo de máquina parada, agora podem ser associadas à uma parada planejada do equipamento, otimizando o processo e permitindo maior previsibilidade sobre o fluxo da manutenção.

Por fim, conclui-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada futuramente em análises de falha de outros componentes e equipamentos, possibilitando investigar com precisão a natureza da ocorrência de falhas e trata-las em sua raiz, pela implementação de ações que impeçam ou controlem sua reincidência.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo de confiabilidade para os componentes do trem de força da empilhadeira;
- Realizar estudo de viabilidade econômica para substituição preventiva dos componentes do trem de força;
- Elaborar estudo do custo do ciclo de vida das empilhadeiras para identificação da vida econômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31010: Gestão de riscos: Técnicas para o processo de avaliação de riscos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ANDRADE, L. D. **Investigação de causas raiz de falha em uma centrífuga de uma indústria de processamento de alimentos**. 2020. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

AGUIAR M. C. **Análise de causa raiz: Levantamento dos métodos e exemplificação**. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

AMORIM, G. A. **Efeito da adição de vanádio no desgaste por rolamento com deslizamento em rodas ferroviárias**. 2018. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ALMEIDA, L. P. F. **Estudo do desgaste por deslizamento de pares metálicos empregados no contato roda-trilho**. 2017. Tese (Pós graduação em Engenharia mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo.

ALMEIDA, P. S. D. **Gestão da manutenção: Aplicada às áreas industriais, predial e elétrica**. São Paulo: Érica, 2017.

ALMEIDA, M. T. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**. Disponível em: <https://mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>. Acesso em 03 mar. 2022.

BALLOU, Ronald H. **Logística Empresarial: Transportes, administração de materiais e distribuição física**. São Paulo: Atlas, 2007.

BAPTISTA, J. A.. **Manutenção Industrial**. 2ª edição. São Paulo: Lura, 2016.

BILLINTON, R. **Reliability Evaluation of Engineering Systems**, New York, Plenum, 1983.

BUTTA, F. **Equipamentos de movimentação.** 2020. Disponível em <<https://saclogistica.com.br/equipamentos-de-movimentacao-de-carga/>> Acesso em 10/03/2022.

CALLISTER, D. W. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.** 8ª edição. LTC, 2012.

CARREIRA, F. SILVA, L. CANEIRA, T. **Manutenção, evolução e sua importância.** Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Portugal, 2010.

CUMMINS, **Manual de Operação e manutenção dos motores industriais QSB5.9-30.** Disponível em < <https://quickserve.cummins.com/qs3/portal/service/manual/br/br3653305/> > Acesso em 17/02/2022.

DA ROSA, EDSON. **Análise de resistência mecânica: Mecânica da fratura e fadiga.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

DESSBESELL, E. **Estudo e projeto de máquinas para ensaio de desgaste abrasivo em metais.** 2017. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial.** São Paulo, LTC. Vol. 1, 2009.

FREITAS, L. F. "**Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de juiz de fora com base nos conceitos da manutenção preventiva e preditiva**". 2016. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora.

HANDBOOK, ASM. **Failure analysis and prevention**, Volume 11. ASM International; 10ª edição, 2002.

ISHIKAWA, K. **Controle de qualidade total: A maneira japonesa.** Rio de Janeiro, Campus editora, 1993.

KARDEC, A. NASCIF, J. **Manutenção – Função estratégica**. 3ª Edição, Qualitymark, 2010.

KUMAR, U. PARIDA, A. **Maintenace performance metrics: A state-of-the-art Review**. Journal of Quality in Maintenance Engineering. Bingley, 2013. Disponível em: <<https://www.emerald.com/journals.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

LAFRAIA, J. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, Petrobrás, 2001.

LAGE, E. A. **Controle e automação na indústria da mineração, estudo de caso**. 2021. Tese (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

LEWIS, F. L. **“Reachability and Controllability for Descriptor Systems”**. Proc. 27th Midwestern Symp. Circuits and Sys. 1984.

MEIRELLES, P. S., ZAMPIERI, D. E., MENDES, A. S. **“Experimental validation of a methodology for torsional vibration analysis in internal combustion engines.”** 12th IFToMM World Congress. France, 2007.

MEIRELLES, P. S., ZAMPIERI, D. E., MENDES, A. S. **“Mathematical model for torsional vibration analysis in internal combustion engines”** 12th IFToMM World Congress. France, 2007.

MAHLE. **Curso Mahle metal leve motores de combustão interna**. Aftermarket, 2019.

MOURA, R. A. **Sistemas e técnicas de movimentação e armazenagem de materiais**. São Paulo: Manual de Logística - IMAM. Vol. 1, 1998.

MOREIRA NETO, T. C. **A história da evolução da gestão do sistema de manutenção**. Disponível em: <https://www.webartigos.com/artigos/a-historia-da-evolucao-do-sistema-de-gestao-de-manutencao/75650>. Acesso em: 4 fev. 2022.

MIRSHAWKA, V. & Olmedo, N. L., **“Manutenção: Combate ao custo da não- eficácia, A vez do Brasil.”**, São Paulo, Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1993.

MIRSHAWKA, V. **“Manutenção preditiva: caminho para zero defeitos”** São Paulo, Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1991.

MORILLO, A. H. V. **Análise de dados experimentais da literatura sobre desgaste adesivo em aços para rodas ferroviárias.** 2015. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

MOREIRA, V. D. M. **Manutenção industrial atuando de maneira estratégica.** Universidade de São Paulo, 2015.

NASSAR, W. R. **Máquinas de Elevação de transporte.** Universidade de Santa Cecília, 2004.

NUNES, E. L. **Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): Análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada.** 2001. Tese (Mestrado em Engenharia de produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção além da produção em larga escala.** Porto Alegre: Bookman, 1997.

PÁGINA OFICIAL DA ABRAMAN. Disponível em < <http://www.abraman.org.br>>. Acesso em 11 jan. 2022.

PAPOULIS, PILLAI. **Probability, random variables, and stochastic processes.** 4th Edition, 1991.

PIOVESANA, G. R; FERREIRA, F. G. **Análise de fadiga e corrosão em dutos submarinos.** Universidade Estadual Paulista, 2016.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção: Função estratégica.** Rio de Janeiro: Qualitymark, Petrobrás, 2010.

PONTES, A. N. S. **Análise de falhas no processo de descarregamento de uma mineradora através da metodologia FMDS.** 2019. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Maranhão.

PUROHIT, B. S.; LAD, B. K. **Production and maintenance planning: An integrated approach under uncertainties.** Int J. Adv Manuf Technol, 2016.

RADI, P. A. **Tribologia, conceitos e aplicações**. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA. São José dos Campos - SP: 2007.

RODRIGUES, M. V. **Ações para Qualidade**, 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2010.

SCHMIDT, N. C. **Estudo de caso da perspectiva logística: Utilização de uma empilhadeira para movimentação de cargas em uma propriedade rural**. 2019. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi.

SILVEIRA, L. M. V. **Metodologia ACR aplicada a falha de uma embreagem de direção e freio de um trator de esteiras**. 2021. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará.

SILVA, P. S. C. P. **Comportamento mecânico e fratura de componentes e estruturas metálicas**. Universidade Federal do Paraná, 1999.

SOUZA, J. J. **O programa seis sigma e a melhoria contínua**. Fundação Getúlio Vargas – FVG, 2003.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamento e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica a frio**. 2004. Tese (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina.

TAMASAUSKAS, A. **Metodologia do projeto básico de equipamentos de manuseio e transporte de ponte rolante: Aplicação não siderúrgica**. 2000. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica de São Paulo.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Análise de Falhas**. Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2792745/mod_resource/content/2/Aula%203.pdf > Acesso em: 04 jan. 2022.

VARELA & SANTOS. **Noções básicas de motores diesel**. 2010. Disponível em <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/>>. Acesso em 10/02/2022.

VIANA, H. **Planejamento e Controle da manutenção**. São Paulo, QualityMark. Vol. 1, 2012.