

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - CAMPUS BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Eduardo Avancini

ANÁLISE DE FALHA: Uma revisão no campo da mineração

**BETIM
2025**

EDUARDO AVANCINI

ANÁLISE DE FALHA: Uma revisão no campo da mineração

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

BETIM

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

A946a Avancini, Eduardo

Análise de falha: uma revisão no campo da mineração / Eduardo Avancini. – 2025

46 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Betim, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

1. Análise de falhas. 2. Mineração. 3. Manutenção. 4. Engenharia Mecânica. I. Avancini, Eduardo. II. Título.

CDU: 658.58



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Rua Itamarati, 140 - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135325921 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 27 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 21h00, nas dependências do IFMG - Campus Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho e demais membros, Profa. Âmara Fuccio de Fraga e Silva e Prof. Ismael Nogueira Rabelo de Melo. Nesta ocasião o discente Eduardo Avancini do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0055538 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "ANÁLISE DE FALHA: Uma revisão no campo da mineração" e foi APROVADO, com 75 (setenta e cinco) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 45 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às 22h00. Para constar, eu, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 01 de abril de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, Professor**, em 03/04/2025, às 15:16, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Ismael Nogueira Rabelo de Melo, Professor**, em 03/04/2025, às 15:26, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Amara Fuccio de Fraga e Silva, Professora**, em 03/04/2025, às 22:18, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2251045** e o código CRC **FA45777**.

23792.000437/2025-36

2251045v1

A Deus, que me fortaleceu e me concedeu sabedoria para agarrar as boas oportunidades da vida. "Até aqui nos ajudou o Senhor" (1 Samuel 7:12), e sei que continuará a guiar meus passos.

À minha querida esposa, Thamires, por seu amor, paciência e apoio incondicional ao longo dessa caminhada.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, minha eterna gratidão.

RESUMO

A indústria de mineração desempenha um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico, além de fornecerem bens e matérias primas imprescindíveis ao desenvolvimento de outros setores, auxiliando no progresso das civilizações. Além disso, pesquisas indicam que, até 2030, a população mundial aumentará para 8,3 bilhões de pessoas e portanto, o consumo total de minerais (cobre, níquel, chumbo, zinco, alumínio e ferro) aumentará para mais de 700 milhões de toneladas. Diante desse cenário, a interrupção em qualquer etapa do processo produtivo pode gerar grandes prejuízos. A concepção de componentes que operem com baixas taxas de falha ao longo de toda a sua vida útil é de vital importância. Considerando que eventuais falhas podem ser introduzidas desde a fase de concepção até a sua utilização, a análise de falhas configura-se como uma ferramenta essencial para garantir a disponibilidade, a confiabilidade e o cumprimento dos prazos e custos estabelecidos. Essa prática não só minimiza os riscos operacionais, mas também proporciona um posicionamento estratégico em um mercado altamente competitivo, evidenciando que a análise de falhas é mais do que uma boa prática, é uma necessidade imperativa para grandes corporações. Para realizar a análise de falhas, a seleção criteriosa de uma metodologia garante a execução de um fluxo estruturado de ações, que permite identificar a causa raiz dos problemas e fundamentar decisões. Entre as metodologias disponíveis, destacam-se o FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) e o RCFA (Root Cause Failure Analysis). Ambas são amplamente reconhecidas por sua capacidade de identificar e bloquear as causas fundamentais dos problemas. Com o intuito de explorar essa temática, foi realizada uma revisão com foco na carregadeira de rodas, um equipamento importante no setor de mineração. O estudo abordou as possíveis falhas associadas a esse máquina, bem como as metodologias utilizadas para sua análise e correção. Por fim, ficou evidente que, a aplicação de planos de manutenção é essencial para manter a longevidade dos equipamentos, além de assegurar uma produção contínua e redução nos custos operacionais. Não se justifica o mercado resistir à dinâmica do setor sem a adoção de tais métodos. É de grande importância o investimento em pesquisas que explorem novos métodos de análise para verificar falhas em equipamentos pouco estudados.

Palavras-chave: Falha, FMEA, RCFA, Manutenção.

ABSTRACT

The mining industry plays a crucial role in socioeconomic development, in addition to providing essential goods and raw materials necessary for the advancement of other sectors, thereby supporting the progress of civilizations. Furthermore, research indicates that by 2030, the global population will increase to 8.3 billion people, and as a result, total mineral consumption (including copper, nickel, lead, zinc, aluminum, and iron) will rise to over 700 million tons. In light of this scenario, any interruption in the production process can lead to incalculable losses. In this context, the design of components that operate with low failure rates throughout their service life becomes imperative. Considering that failures may be introduced at any stage, from design to operation, failure analysis emerges as an essential tool to ensure availability, reliability, and compliance with established deadlines and costs. This practice not only minimizes operational risks but also provides a strategic advantage in a highly competitive market, demonstrating that failure analysis is more than a best practice—it is an imperative need for large corporations. To carry out failure analysis, the careful selection of a suitable methodology ensures the execution of a structured flow of actions that enables the identification of root causes and supports sound decision-making. Among the available methodologies, FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) and RCFA (Root Cause Failure Analysis) stand out. Both are widely recognized for their effectiveness in identifying and addressing the root causes of problems. To explore this topic, a literature review was conducted focusing on the wheel loader, a critical piece of equipment in the mining sector. The study addressed the possible failures associated with this machine, as well as the methodologies applied for their analysis and correction. Ultimately, it became clear that the implementation of maintenance plans is essential to ensure equipment longevity, continuous production, and reduced operational costs. It is inconceivable for the market to withstand the dynamic nature of the sector without adopting these methods. Therefore, investing in research that explores new methodologies and investigates failures in less-studied equipment is imperative.

Keywords: Failure, FMEA, RCFA, Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização do método FTA.....	14
Figura 2 - Esquematização do método FMEA.....	14
Figura 3 – Representação da abordagem RCFA/RCA.....	15
Figura 4 - Exemplificação do diagrama de Ishikawa.	16
Figura 5 - Ilustrações dos equipamentos utilizados na mineração.	18
Figura 6 - Carregadeiras Volvo - utilização e modelos.....	19
Figura 7 - Etapas do processo de fadiga.....	21
Figura 8 - Marcas de praia sinalizando a fratura por fadiga.	21
Figura 9 - Microscopia de varredura de uma fratura de fadiga em uma estrutura de alumínio.....	22
Figura 10 - Desgaste em peças de maquinário.....	23
Figura 11 - Desgaste por adesão em componentes.....	24
Figura 12 - Demonstração do desgaste erosivo.....	24
Figura 13 - Desgaste por fadiga - pitting.	25
Figura 14 - Desgaste por fadiga - spalling.....	25
Figura 15 - Desgaste por fadiga – fretting.	26
Figura 16 - Ilustração dos diferentes métodos de nitretação e a modificação gerada na superfície do material.	27
Figura 17 - Representação ordenada dos meios e estruturas empregados para a realização da cementação líquida, gasosa e sólida.	28
Figura 18 - Elementos de um motor alternativo.....	30
Figura 19 - Representação de um Virabrequim.....	31
Figura 20 - Visão do virabrequim após a falha - Estudo Witek et al., 2017.....	33
Figura 21 - Local de falha do virabrequim – Estudo Fonte et al. 2013.....	34
Figura 22 - Virabrequim após a falha – Estudo Fonte et al. 2019.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivo	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1	Ferramentas da qualidade utilizadas para análise de falhas	13
2.2	Gestão da Manutenção	16
2.2.1	<i>Manutenção preventiva</i>	17
2.2.2	<i>Manutenção preditiva</i>	17
2.2.3	<i>Manutenção corretiva</i>	17
2.3	Pesquisas relacionadas ao tema	18
2.4	Mecânica da fratura	20
2.5	Fenômenos de desgaste	22
2.5.1	<i>Desgaste abrasivo</i>	23
2.5.2	<i>Desgaste adesivo</i>	23
2.5.3	<i>Desgaste erosivo</i>	24
2.5.4	<i>Desgaste por fadiga</i>	25
2.6	Tratamentos térmicos de superfície	26
2.6.1	<i>Nitretação</i>	26
2.6.2	<i>Cementação</i>	27
2.6.3	<i>PVD / CDV</i>	28
2.7	Motores de combustão interna	29
3	METODOLOGIA	32
4	DISCUSSÃO	33
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A mineração está intrinsecamente associada à história e à formação do estado de Minas Gerais. No contexto global, o Brasil se destaca como um dos principais produtores de minério, com um potencial que se desenvolveu ao longo dos anos. O país ocupa uma posição de relevância, tanto em termos de produção quanto de reservas. Em 2019, o valor da produção mineral no Brasil representou 16,8% do PIB industrial (IBRAM, 2020). A eficiência operacional é o elemento fundamental que alavanca a competitividade entre as empresas, para tal, é fundamental controlar a disponibilidade dos equipamentos, maximizar as horas operacionais, reduzir os custos, aumentar a confiabilidade, segurança e eficiência dos processos. (XENOS, 2014).

Desde a fase de desenvolvimento do projeto, falhas podem ser introduzidas devido a erros de interpretação, execução ou concepção. No entanto, mesmo que essa etapa seja realizada corretamente, a utilização inadequada do equipamento pode igualmente resultar em altos índices de falhas. Fatores como operação imprópria, prolongamento indevido da vida útil e manutenção deficiente podem comprometer o desempenho do equipamento, ocasionando falhas catastróficas e interrupções nas atividades (PASSAMAI e CASTILHO, 2007).

A norma NBR 5462 (1994, p.3) define falha como o "término da capacidade de um item em desempenhar a função requerida", e cabe ao engenheiro prever e planejar considerando possíveis falhas e, caso ocorra, analisar suas causas e implementar medidas preventivas adequadas para evitar futuros incidentes (CALLISTER e RETHWISCH, 2016). Esta análise envolve a coleta de dados, a inspeção do componente falhado, a realização de testes laboratoriais e a aplicação de técnicas para determinar a raiz do problema. Com base nessa investigação, são gerados registros detalhados que permitem o acompanhamento contínuo e o controle eficaz dos planos de ação. Além disso, a análise de falhas pode resultar em modificações no projeto, otimização dos processos de manutenção ou até mesmo na reestruturação das práticas de gestão da empresa (PASSAMAI e CASTILHO, 2007).

Para realizar uma análise de falhas eficaz, a escolha da metodologia adequada é fundamental. Entre as principais abordagens, destacam-se o FTA (Fault Tree Analysis), o FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) e o RCFA (Root Cause Failure Analysis). Dentre elas, o FMEA e o RCFA são amplamente utilizados na indústria, pois

possibilitam a identificação e o bloqueio das causas fundamentais das falhas encontradas. Quando combinadas com práticas de manutenção, sejam elas preventivas, preditivas ou corretivas, essas metodologias fortalecem a confiabilidade operacional, contribuindo para a melhoria contínua dos processos e a redução das falhas recorrentes (PASSAMAI e CASTILHO, 2007; ZONTA et al., 2020). No setor de mineração, a manutenção preventiva é especialmente valorizada por sua capacidade de reduzir custos e aumentar a confiabilidade operacional (SIMARD e DOYON-POULIN, 2024).

Este estudo se concentra nas carregadeiras de rodas, equipamentos críticos para a exploração mineral, que demandam inspeções frequentes e representam desafios operacionais e de manutenção devido à sua complexidade. A pesquisa direciona-se à análise de falhas nos subconjuntos que compõem o equipamento, como avarias internas em motores, comprometimento de componentes do trem de força e desgaste acelerado de partes sujeitas a esforços mecânicos intensos. A abordagem adotada tem por finalidade identificar as melhores práticas de gestão e manutenção, ajustando-as às particularidades de cada caso, conforme evidenciado por meio das pesquisas presentes na literatura.

1.1 Justificativa

A confiabilidade operacional de maquinários pesados é um fator crítico para a eficiência e a competitividade da indústria da mineração. Nesse setor, falhas em componentes estruturais, como virabrequins e eixos de tração, podem ocasionar paralisações não programadas, prejuízos financeiros expressivos, danos ambientais e riscos à segurança. Esses eventos, muitas vezes, decorrem de falhas mecânicas associadas à fadiga, desgaste prematuro ou manutenção inadequada, conforme evidenciado por diversos estudos presentes na literatura técnica. A análise de falhas, quando conduzida de forma estruturada e com o apoio de metodologias adequadas, permite não apenas identificar a causa raiz dos problemas, mas também propor soluções eficazes e evitar sua reincidência. No entanto, a escolha da abordagem mais adequada depende do contexto operacional, do tipo de falha envolvida e das condições de manutenção. Neste sentido, este trabalho se justifica pela necessidade de reunir, comparar e discutir evidências técnicas sobre as falhas mais recorrentes em maquinários pesados, avaliando os métodos utilizados para diagnosticá-las e as estratégias aplicadas para mitigá-las. A partir dessa análise crítica, busca-se fortalecer a tomada de decisões no campo da manutenção industrial, promovendo práticas que aumentem a vida útil dos equipamentos, reduzam os custos operacionais e garantam maior segurança nas operações.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão crítica dos principais mecanismos de falha em componentes de máquinas pesadas, com ênfase no virabrequim e nos eixos de tração, a partir de estudos de caso disponíveis na literatura. Busca-se identificar as causas predominantes de falha, avaliar as estratégias de manutenção empregadas e comparar a aplicabilidade de diferentes metodologias de análise, como o RCFA, o FMEA e o FTA. Ao final, propõem-se diretrizes para a adoção de ferramentas de gestão e estratégias de manutenção mais eficazes, com o intuito de prevenir a reincidência de falhas, melhorar o desempenho operacional e reduzir os custos associados à indisponibilidade de equipamentos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo fornecer, de maneira concisa, o embasamento teórico necessário para sustentar as discussões e a análise dos resultados apresentados nesta dissertação. Os conceitos principais serão organizados em seções, abordando temas como: ferramentas da qualidade utilizadas para análise de falhas, pesquisas relacionadas ao tema, a mecânica da fratura e os fenômenos de desgaste além dos equipamentos de mineração a serem estudados.

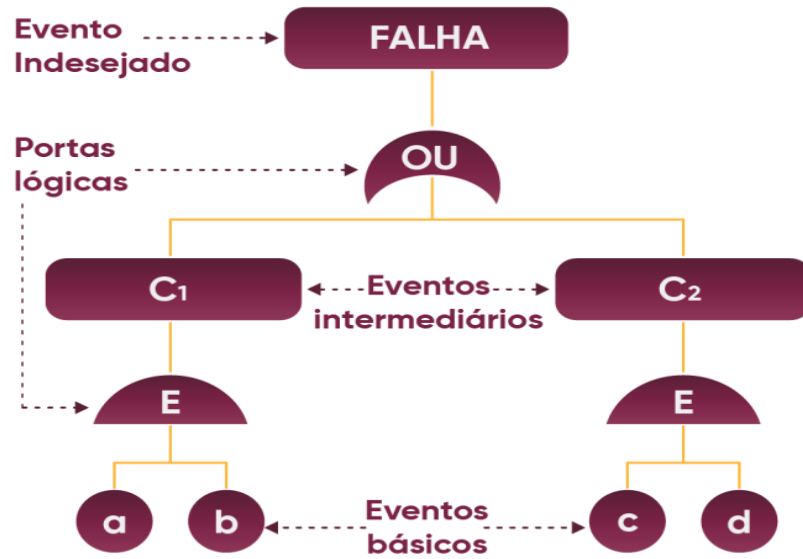
2.1 Ferramentas da qualidade utilizadas para análise de falhas

A análise de falhas é fundamental para garantir a confiabilidade do produto, assegurando a eficiência e continuidade da cadeia produtiva. Um sistema de gestão eficaz garante que o equipamento desempenhe suas funções dentro de um período determinado e sob condições operacionais específicas, sem apresentar falhas (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

Para atingir esses objetivos, diversas metodologias e técnicas podem ser empregadas para minimizar, identificar ou eliminar falhas. Entre os procedimentos mais utilizados se destacam o FMEA (Failure Mode and Effect Analysis ou Análise dos Modos e Efeitos de Falhas) e o FTA (Fault Tree Analysis ou Análise da Árvore de Falhas).

O FTA, conforme demonstrado na Figura 1, permite a análise detalhada das falhas em cada componente da máquina. Segundo Matos e Milan (2009), o FTA organiza os componentes de maneira estruturada, utilizando operadores lógicos para calcular a probabilidade de falha entre eles, possibilitando a obtenção de um diagnóstico do sistema e eliminação ou minimização dos riscos associados.

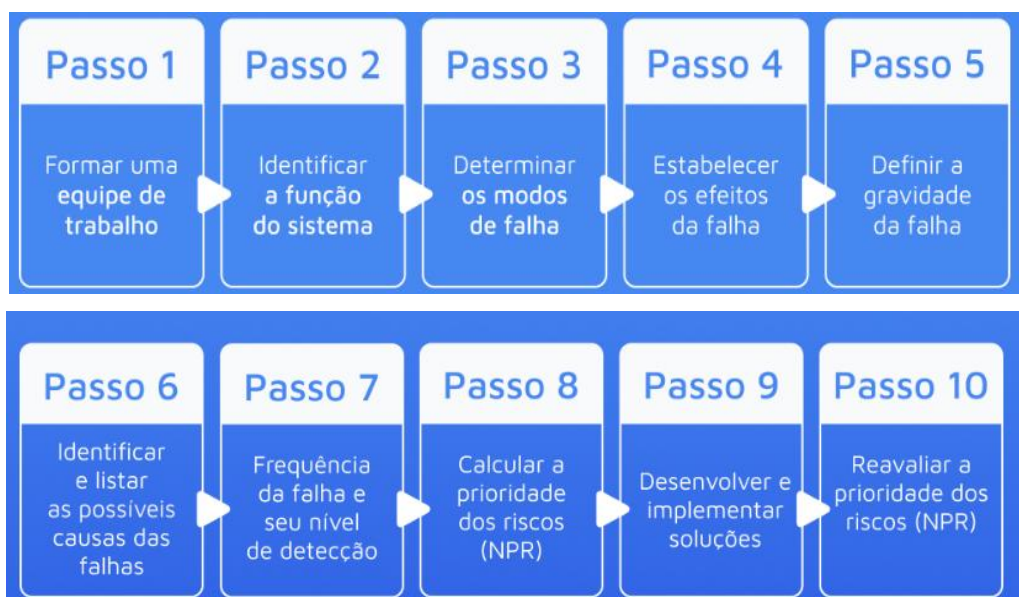
Figura 1 - Esquematização do método FTA.



Fonte: Dynamax (2023).

Em contraste, o método FMEA (Figura 2) identifica as falhas mais prováveis, avalia a gravidade de suas consequências e a facilidade de detecção, além de sugerir ações corretivas para mitigá-las, priorizando aquelas de maior criticidade (OLIVEIRA et al., 2010).

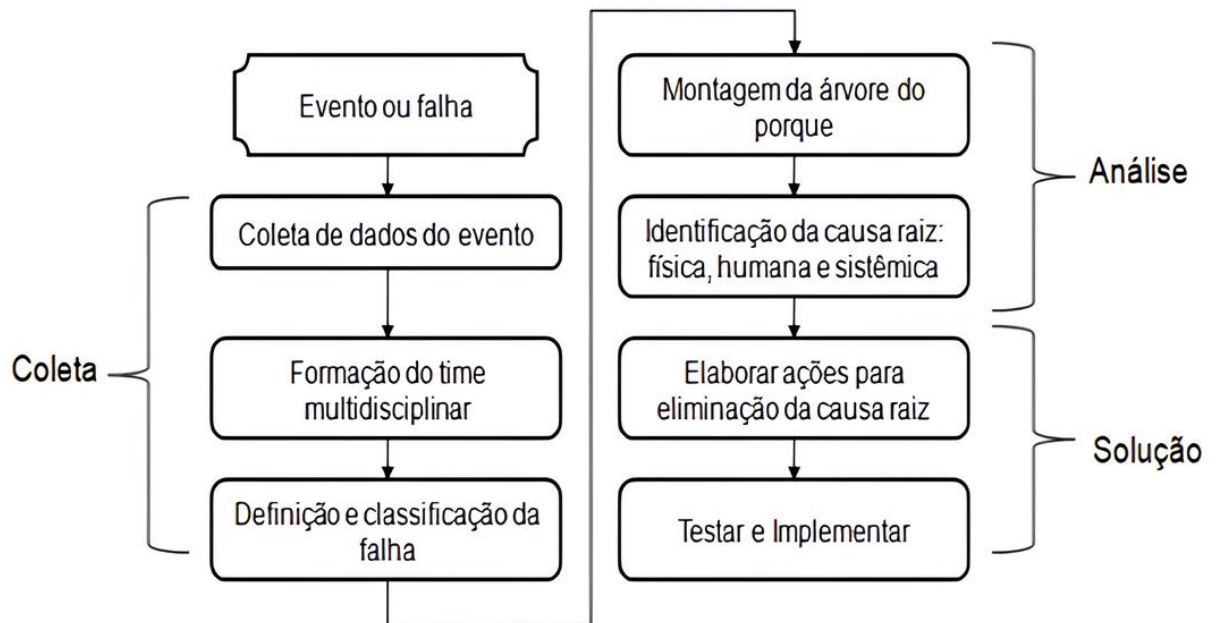
Figura 2 - Esquematização do método FMEA.



Fonte: Fractal, 2023.

A RCFA ou RCA (*Root Cause Failure Analysis* ou *Análise da Causa Raiz de Falha*) é uma metodologia que investiga a influência de fatores físicos, sistêmicos e humanos na causa raiz de uma falha. Esta abordagem coleta informações após a ocorrência da falha e visa compreender as circunstâncias e processos que levaram ao evento. A Figura 3 demonstra um exemplo representativo desse método (SCHMITT e LIMA, 2015).

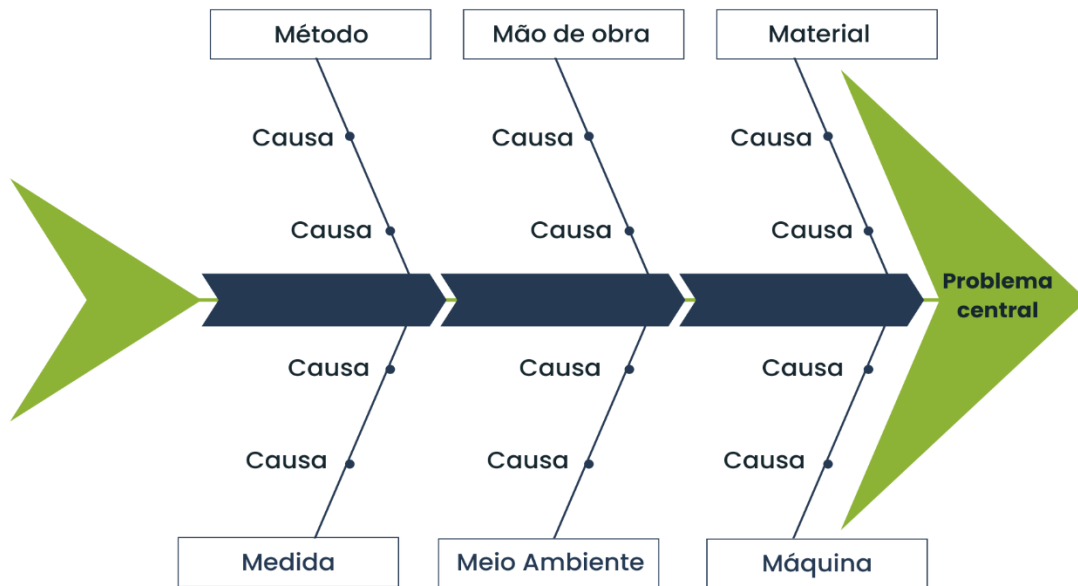
Figura 3 - Representação da abordagem RCFA/RCA.



Fonte: Schmitt e Lima (2015).

O Diagrama de Ishikawa (Figura 4), também conhecido como Diagrama de Espinha de Peixe ou Diagrama de Causa e Efeito, oferece uma visão abrangente das causas reais e específicas que contribuem para um determinado efeito. Sua estrutura é composta por espinhas principais que representam as causas primárias e ramificações que indicam causas secundárias ou relacionadas a processos anteriores (MONTEIRO et al., 2019).

Figura 4 - Exemplificação do diagrama de Ishikawa.



Fonte: Realizzare (2024).

Os mecanismos que possibilitam a análise das possíveis falhas permitem intervenções eficazes e podem ser aplicados em qualquer fase do projeto. Além disso, esses mecanismos facilitam a escolha do tipo de manutenção mais apropriado seja ela, corretiva, preventiva ou preditiva (SAKURADA, 2001). Dessa forma, a adoção de métodos preventivos torna-se crucial para reduzir falhas e prejuízos, além de aumentar a vida útil dos equipamentos e promover maior confiabilidade e eficiência no mercado cooperativo.

2.2 Gestão da Manutenção

A manutenção tem a finalidade de manter os equipamentos e instalações em condições ideais para a operação, a fim de atender as diversas necessidades e demandas do setor produtivo. Por meio da gestão da manutenção, é possível se programar quanto a interrupção de operação do equipamento evitando custos indesejados (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009). Na indústria, são empregadas diferentes metodologias de manutenção, cada uma com suas peculiaridades, cabe à engenharia definir qual o melhor modelo a ser aplicado para cada situação (DOS SANTOS, 2022).

2.2.1 Manutenção preventiva

Conforme a NBR 5462-1994 a manutenção preventiva é aquela realizada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. Essa abordagem antecipa possíveis problemas e realiza ajustes, como substituições de peças desgastadas e lubrificantes. Dessa forma, a manutenção preventiva assegura que os equipamentos operem em plenas condições, prologando sua vida útil (SANTOS, 2018).

2.2.2 Manutenção preditiva

Essa manutenção fundamenta-se na projeção do estado futuro de um equipamento ou sistema, através dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica. Esses dados são coletados, por meio de análises que avaliam a temperatura, a vibração, a físico-química de óleos, os ensaios por ultrassom, a termografia, entre outros. O monitoramento desses parâmetros objetiva a intervenção no momento ideal, ou seja, antes que o equipamento falhe, evitando a falha funcional ou, ao menos, minimizar suas consequências (DOS SANTOS, 2022).

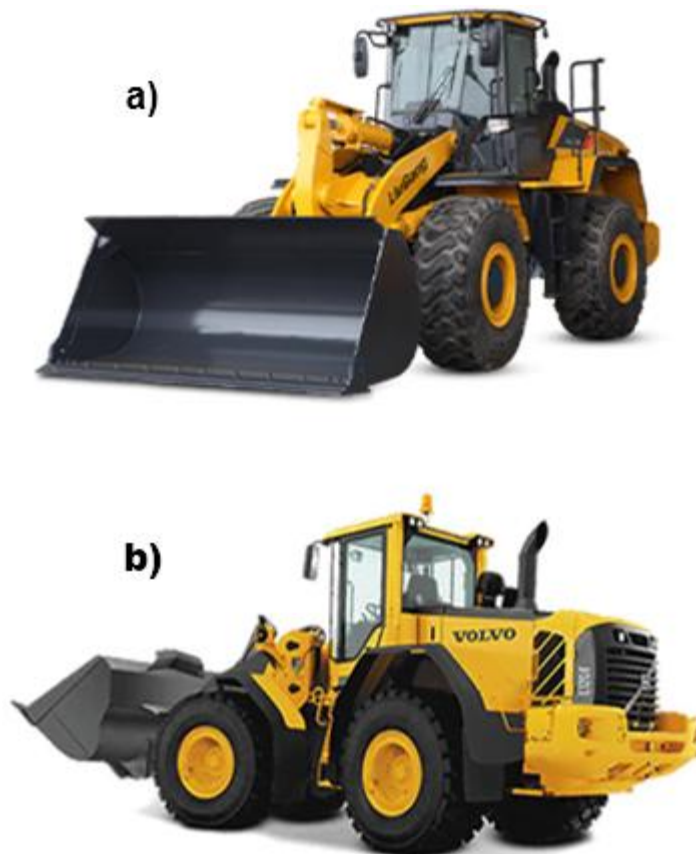
2.2.3 Manutenção corretiva

A NBR 5462-1994 explica que a manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função determinada. Dessa forma, ela é uma intervenção obrigatória para correção e redução de consequências aos equipamentos de produção. Essa manutenção aguarda a ocorrência de um erro para que seja realizada, seguindo uma premissa de que não se deve mexer no que está operando corretamente (DOS SANTOS, 2022).

2.3 Pesquisas relacionadas ao tema

Maquinários robustos e eficientes são indispensáveis na mineração a fim de garantir a extração de minérios e a logística de grandes volumes de material. Dentre os diversos equipamentos utilizados, as carregadeiras de rodas se destacam, elas são projetadas para suportar condições extremas e operar em terrenos acidentados, sendo utilizadas principalmente para carregamento de caminhões e transporte de pilhas de minério (ALMEIDA, 2009; REVISTA M&T, 2012). Na Figura 5 são apresentados alguns modelos de carregadeiras utilizadas nas operações de mineração.

Figura 5 - Ilustrações dos equipamentos utilizados na mineração.



Fonte: Liu Gong (2025); Volvo CE (2025); (a) Carregadeira de rodas LIUGONG 855N; (b) Carregadeira de rodas VOLVO L90F.

As carregadeiras constam de um chassi dianteiro articulável para permitir livre movimentação do sistema de elevação de carga. Como acessório de trabalho, a caçamba é a mais trivial neste tipo de equipamento, ela apresenta um movimento basculante para frente, a fim de atacar o material, encher-se do mesmo e depois descarregá-lo sobre o caminhão basculante ou fora-de-estrada, no entanto, também podem ser utilizados diversos opcionais de acordo com a necessidade da operação (Figura 6). Esses maquinários apresentam grande eficiência e capacidade de manobra em áreas confinadas, sendo ideais para atividades que exigem agilidade no carregamento de materiais (ALMEIDA, 2009; FREITAS, 2014).

Figura 6 - Carregadeiras Volvo - utilização e modelos.



Fonte: Volvo CE (2024).

O dimensionamento e a combinação dos equipamentos, como carregadeiras, escavadeiras ou caminhões articulados, são cruciais para assegurar a ininterrupção das atividades, a segurança, a otimização da produtividade o sucesso e a sustentabilidade. Esses equipamentos devem ser examinados e selecionados de acordo com os critérios operacionais, sendo eles: produção requerida, a distância e caminho de transporte, capacidade calculada, cálculo do tempo do ciclo, capacidade calculada, interação para incrementar a produtividade, cálculo do tamanho da frota e iteração para redução de custos de aquisição e operacionais (FREITAS, 2014; SILVA, 2008).

2.4 Mecânica da fratura

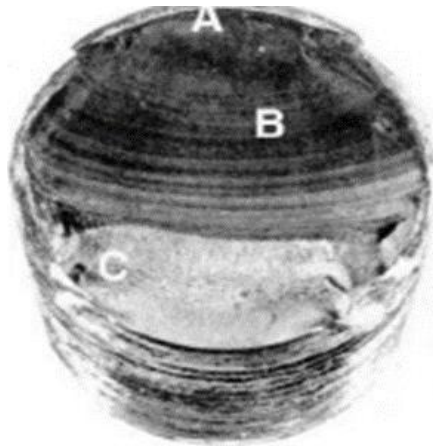
A mecânica da fratura é um campo de estudo que se concentra em analisar o comportamento dos materiais, em condições semelhantes às encontradas na prática, que apresentam uma fissura de uma dada dimensão verificando o seu início, sua propagação e o grau de segurança que esse componente possui no que diz respeito a ruptura por fraturamento (DOS SANTOS, 2004). Os equipamentos empregados no carregamento, escavação e transporte no campo da mineração, estão expostos regularmente a ambientes de alta carga e condições adversas que podem acelerar o surgimento de defeitos como as trincas, principalmente nas regiões submetidas a tensões elevadas, o que posteriormente, podem resultar em falhas estruturais (MOREIRA, 2018).

Falha é um termo genérico utilizado para um componente que se tornou completamente inoperante ou que, continua operante, mas se tornou incapaz de desempenhar de maneira adequada a sua função, ou está seriamente comprometido a ponto de se tornar um risco a sua utilização (ASM Handbook – Ninth edition, Metals Handbook, volume 11 – Failure analysis and prevention).

Existem diversas razões que podem levar à falha dos componentes, como desgaste, corrosão e fluência. No entanto, a mais frequente é a fadiga do material, ela normalmente ocorre de maneira imprevista e abrupta, o que a torna particularmente crítica. Esse tipo de falha é ainda mais significativo em equipamentos de mineração, devido às repetidas cargas cíclicas que esses veículos experimentam ao transportar material pesado em terrenos irregulares (MOREIRA, 2018).

De acordo com Zolin (2011), a fadiga é uma diminuição gradual da capacidade de carga, resultante da ruptura lenta do material devido ao avanço quase infinitesimal das fissuras que formam em seu interior. As cargas variáveis, sejam elas cíclicas ou não, fazem com que, em alguns pontos tenham deformações plásticas que variam com o tempo. Essas deformações ocasionam uma deterioração progressiva, ocasionando as trincas, que crescem até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca e com características macroscópicas de uma fratura frágil. O processo de fadiga ocorre em três etapas: nucleação da trinca, propagação da trinca e fratura. A Figura 7 esquematiza, sucessivamente, por meio das letras A, B e C as regiões de ocorrência de cada estágio (MOREIRA, 2018).

Figura 7 - Etapas do processo de fadiga.



Fonte: Norton (2006).

Macroscopicamente, a fadiga apresenta um aspecto visual indicativo, denominado marcas de praia, também conhecidas como “beach marks” ou “clamshell marks” (Figura 8). A aparência similar as ondas ocorrem devido às alterações de variáveis do ciclo de tensões (pico de tensão, amplitude, frequência), essas marcas não se cruzam e indicam a posição da trinca em um determinado instante (PELLICCIONE et al., 2012, apud FORTE, 2013).

Figura 8 - Marcas de praia sinalizando a fratura por fadiga.

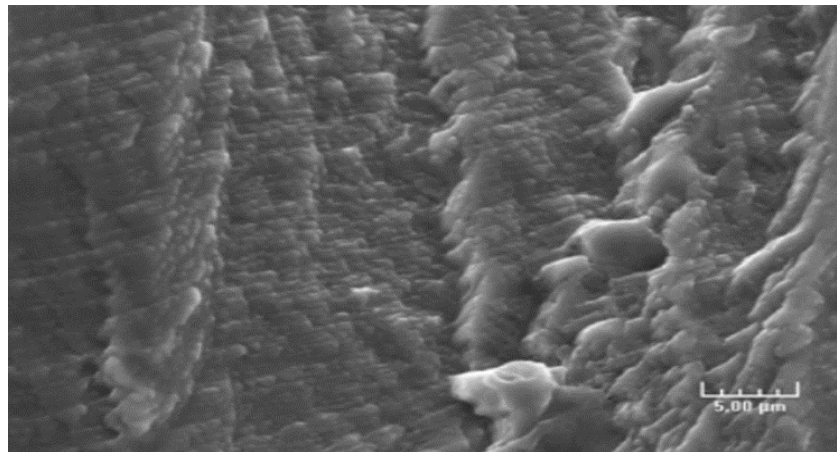


Fonte: Ferreira (2014).

Contudo, essas marcas não são exclusivas do processo da fadiga, podendo surgir em qualquer propagação descontínua de uma trinca, como aquelas geradas por corrosão sob tensão. Todavia, a falha por fadiga apresenta alterações exclusivas

chamadas de “estrias” (Figura 9), porém, elas são visíveis apenas por microscopia eletrônica de varredura (PELLICCIONE et al., 2012, apud FORTE, 2013).

Figura 9 - Microscopia de varredura de uma fratura de fadiga em uma estrutura de alumínio.



Fonte: Forte (2013).

2.5 Fenômenos de desgaste

Desgaste pode ser classificado como uma perda progressiva e inevitável de matéria da superfície de um corpo sólido em função do contato e movimento relativo com um outro corpo, seja ele, sólido, líquido ou gasoso. O desgaste é um fenômeno complexo e depende das circunstâncias de deslizamento e propriedades dos materiais. Esta perda de material pode resultar em diminuição da vida útil da peça e conseqüentemente do equipamento no qual está inserido. Como o desgaste é comum na grande maioria dos componentes mecânicos, a sua ocorrência pode ser o fator determinante na quantificação do tempo de operação de tais dispositivos. Diversos mecanismos podem ser observados em situações práticas, com o destaque para o de abrasão, adesão, erosão e fadiga (SANTOS, et al. 2015).

2.5.1 *Desgaste abrasivo*

O desgaste por abrasão (Figura 10) ocorre devido à presença de partículas (produto do processamento e sujeira) ou protuberâncias duras e micro irregularidades na superfície de componentes mecânicos que estão em contato sob movimento relativo, e que apresentam durezas distintas. Essas partículas podem provocar arranhões, deslocamentos ou amassamentos nas superfícies em contato, resultando na remoção de material. O desgaste abrasivo é considerado um dos mecanismos mais frequentes e responsáveis por perdas consideráveis na indústria (SANTOS et al. 2015).

Figura 10 - Desgaste em peças de maquinário.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

2.5.2 *Desgaste adesivo*

O desgaste adesivo (Figura 11), ocorre quando a ligação entre as superfícies em contato é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Esse processo acontece nas áreas de contato das asperezas, onde a pressão pode ser extremamente alta que provoca deformações plásticas. Essas deformações podem gerar trincas, que, ao se expandirem, criam um terceiro corpo e por consequência a transferência de material. Este fenômeno é frequentemente encontrado em condições inadequadas de lubrificação (DO AMARAL, 2016).

Figura 11 - Desgaste por adesão em componentes.



Fonte: Adams (2020).

2.5.3 Desgaste erosivo

O desgaste erosivo (Figura 12) consiste na remoção do material de uma superfície submetida a colisões recorrentes de partículas sólidas ou líquidas, deformando-o e danificando-o. As partículas responsáveis por esse fenômeno são denominadas agentes erosivos e a intensidade do desgaste pode variar de acordo com a natureza dessas partículas (tamanho, forma e dureza) (ANTALA, 2021).

Figura 12 - Demonstração do desgaste erosivo.



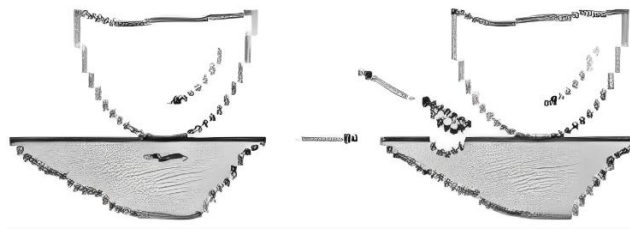
Fonte: Rijeza (2020).

2.5.4 Desgaste por fadiga

É o processo de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a alteração de tensões e deformações que pode culminar em trincas ou completa fratura. O desgaste por fadiga pode se manifestar de diversas formas, sendo as mais comuns o pitting, o spalling e o fretting (KOPELIOVICH, 2015).

O pitting (Figura 13) ocorre por meio do contato entre duas superfícies em movimento de rolamento na presença de um lubrificante. Esse processo resulta em tensões cisalhantes abaixo da superfície do material. Em razão disso, trincas podem se propagar devido ao carregamento cíclico, gerando cavidades por meio da remoção de material (KOPELIOVICH, 2015).

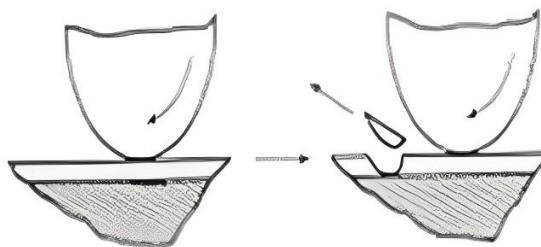
Figura 13 - Desgaste por fadiga – Pitting.



Fonte: Rijeza (2020).

O spalling (Figura 14) apresenta o mesmo fundamento que o mecanismo de pitting, todavia, ele ocorre em peças em que a superfície apresenta uma camada de revestimento (KOPELIOVICH, 2015).

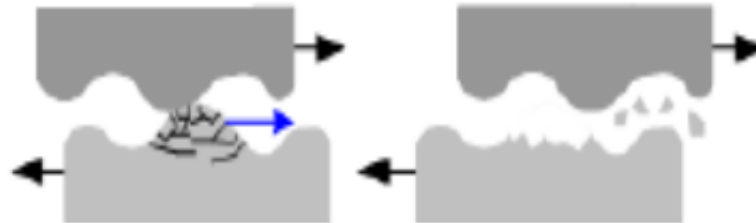
Figura 14 - Desgaste por fadiga - Spalling.



Fonte: Rijeza (2020).

Já o fretting (Figura 15) ocorre quando duas superfícies em contato deslizam uma em relação à outra com movimentos de baixa amplitude. Esse processo produz forças de compressão e tração que, gradualmente, podem resultar na fadiga superficial.

Figura 15 - Desgaste por fadiga – Fretting.



Fonte: Kopeliovich (2015).

2.6 Tratamentos térmicos de superfície

Durante a elaboração dos projetos de componentes mecânicos e motores, um dos fatores cruciais para seu sucesso é determinar condições seguras de trabalho contra tensões que causam deformações elásticas e plásticas indesejadas que podem progredir para fraturas. Os tratamentos termoquímicos visam aumentar a resistência à fadiga e ao desgaste, mantendo o núcleo tenaz, por meio de processos de endurecimento superficial que promoverão mudanças volumétricas geradoras de alta tensão compressiva na camada superficial do material (POLI-USP, 2011).

2.6.1 Nitretação

A nitretação (Figura 16) é um tratamento que consiste na aplicação de nitrogênio na superfície de um material metálico. Durante o processo, o metal fica exposto a uma atmosfera rica em nitrogênio dentro de uma câmara de nitretação, sob temperaturas controladas. O nitrogênio reage com os elementos do substrato formando precipitados de nitretos em sua camada externa. Um dos principais benefícios dessa técnica é que ela não altera as dimensões do metal, ou seja, não

causa deformações significativas. Das técnicas de nitretação existentes, a nitretação líquida, gasosa e por plasma se destacam (CASTRO et al. 2007).

Figura 16 - Ilustração dos diferentes métodos de nitretação e a modificação gerada na superfície do material.



Fonte: AN, (2024); Pinto, et al. (2013); (A) Nitretação a plasma; (B) Nitretação gasosa; (C) Nitretação Líquida; (D) Metalografia da nitretação.

2.6.2 Cementação

A cementação é realizada através da adição de carbono a aços que possuem baixo teor deste elemento. O metal é exposto a um ambiente rico em carbono, a temperaturas entre 900°C e 950°C, quando o aço se encontra em sua forma austenítica. A diferença do gradiente de concentração de carbono entre a superfície e o interior do metal, promove a difusão deste componente. A profundidade de penetração do carbono é dependente da temperatura, tempo e a composição do agente de cementação. Existem três processos de cementação amplamente utilizados: cementação líquida, gasosa e sólida. A Figura 17 ilustra, de maneira sequencial, os ambientes e equipamentos onde cada um desses métodos é realizado (DE LIMA e FRAGA, 2017).

Figura 17 - Representação ordenada dos meios e estruturas empregados para a realização da cementação líquida, gasosa e sólida.



Fonte: De Lima e Oliveira (2013); Itaraí (2025).

2.6.3 PVD / CDV

A deposição física de vapores (PVD - Physical Vapor Deposition) ocorre em uma câmara rarefeita e consiste em transportar o material no estado sólido entre o material alvo e o substrato a ser revestido. Já a deposição química de vapores (CVD - Chemical Vapor Deposition), é realizado por meio da adição de reagentes gasosos no interior de um reator, que levam a ocorrência de reações químicas na camada superficial do metal a ser revestido (MONTEIRO, 2005).

No Quadro 1, pode ser visualizado um resumo comparativo dos tratamentos térmico de superfície.

Quadro 1 - Resumo comparativo dos tratamentos térmicos de superfície

Tratamento	Descrição Resumida	Vantagens
Nitretação	Introdução de nitrogênio na superfície do metal.	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da dureza superficial - Maior resistência ao desgaste - Não altera significativamente as dimensões da peça
Cementação	Introdução de carbono em aços de baixo teor de carbono.	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da dureza superficial - Maior resistência à fadiga - Formação de camada externa dura com núcleo tenaz
PVD (Physical Vapor Deposition)	Deposição física de vapores em ambiente rarefeito.	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimentos finos e uniformes - Alta aderência ao substrato - Resistência ao desgaste e corrosão
CVD (Chemical Vapor Deposition)	Deposição química de vapores em alta temperatura.	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimentos espessos e resistentes - Boa aderência e uniformidade - Resistência ao desgaste e à oxidação

Fonte: Adaptado de CASTRO et al. 2007; MONTEIRO 2005; LIMA e FRAGA 2017.

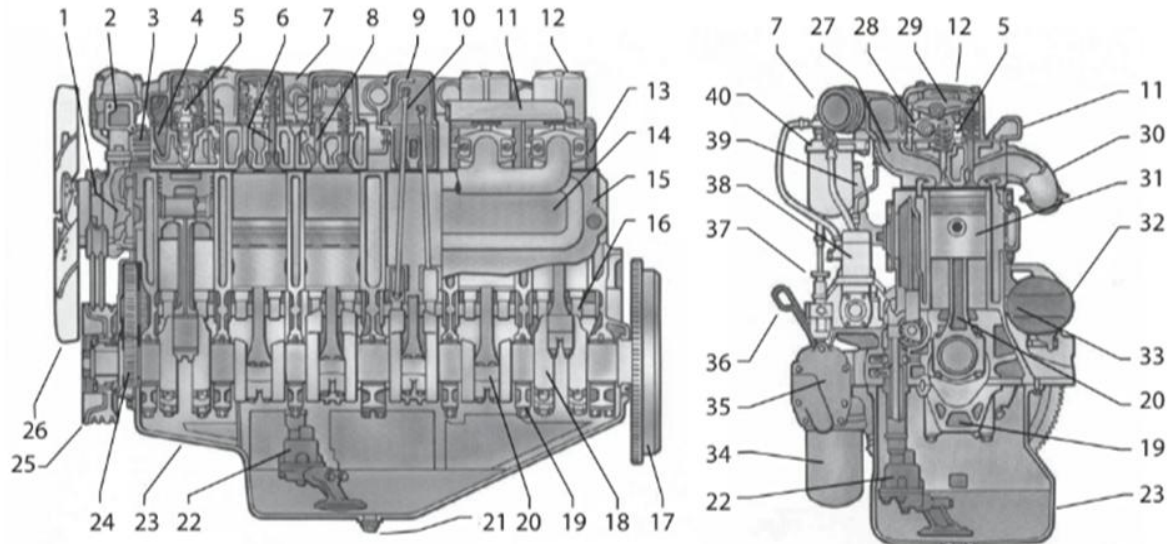
2.7 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas que transformam calor em trabalho por meio da combustão de uma mistura de ar-combustível dentro de uma câmara de combustão. Nesse processo, a queima da mistura gera gases quentes que se expandem adiabaticamente, convertendo a energia térmica em energia mecânica.

Motores alternativos são classificados de acordo com a forma como obtêm trabalho mecânico. Os motores alternativos recebem essa denominação porque o trabalho é gerado pelo movimento cíclico de avanço e retorno de um pistão, que está acoplado a um conjunto biela-virabrequim, permitindo a conversão desse movimento em rotação contínua do sistema (BRUNETTI, 2018).

Na Figura 18 e no Quadro 2, são apresentados os principais elementos que compõem um motor alternativo de combustão interna.

Figura 18 - Elementos de um motor alternativo



Fonte: Brunetti (2018).

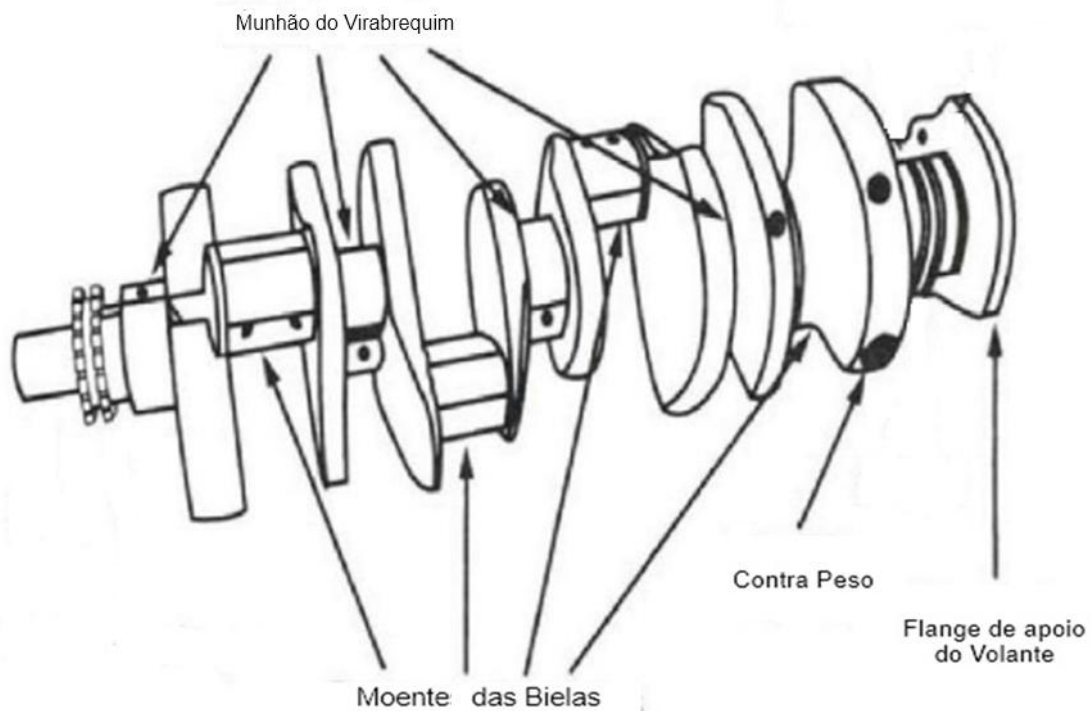
Quadro 2 - Elementos de um motor alternativo

Nº	Componente	Nº	Componente	Nº	Componente
1	Bomba d'água	2	Válvula termostática	3	Compressor de ar
4	Duto de admissão	5	Injetor de combustível	6	Válvula de escapamento
7	Coletor de admissão	8	Válvula de admissão	9	Linha de combustível
10	Haste de válvula	11	Duto de água	12	Tampa de válvula
13	Cabeçote	14	Tampa lateral	15	Bloco
16	Eixo comando de válvulas	17	Volante	18	Virabrequim
19	Capa de mancal	20	Biela	21	Bujão do cárter
22	Bomba de óleo	23	Cárter	24	Engrenagem do virabrequim
25	Amortecedor vibracional	26	Ventilador	27	Duto de admissão
28	Balancim da válvula de admissão	29	Balancim da válvula de escapamento	30	Coletor de escapamento
31	Pistão	32	Motor de partida	33	Dreno de água
34	Filtro de óleo	35	Radiador de óleo	36	Vareta de nível de óleo
37	Bomba manual de combustível	38	Bomba injetora de combustível	39	Respiro do cárter
40	Filtro de combustível				

Fonte: Adaptado de Brunetti, 2018.

O virabrequim, conforme listado no quadro 2 (N° 18), também chamado de eixo de manivelas ou cambota, é um elemento de geometria complexa no motor, responsável por converter o deslocamento alternativo do pistão em um movimento rotativo. Durante sua vida útil, o virabrequim passa por um grande número de ciclos de carga, sendo especialmente suscetível a falhas por fadiga. Ele consiste em um eixo que gira sobre os mancais principais do bloco do motor, em contato com os moentes do virabrequim. Os moentes das bielas transmitem o movimento cíclico das bielas aos pistões, descrevendo um caminho circular ao redor dos centros dos mancais principais. O deslocamento desse caminho define o 'curso' do pistão, ou seja, a distância que ele percorre para cima e para baixo dentro do cilindro (SOLANKI, 2011).

Figura 19 - Representação de um Virabrequim.



Fonte: Adaptado de SOLANKI (2011).

3 METODOLOGIA

Realizou-se uma revisão narrativa da literatura explorando as plataformas de pesquisa eletrônicas, como SciELO (Scientific Electronic Library Online), Google Acadêmico e bibliografia especializada, com o objetivo de reunir informações essenciais para a realização do estudo em relação aos equipamentos analisados. As palavras-chave utilizadas na pesquisa, em português e inglês, incluíram os termos: “falhas”, “análise”, “desgaste”, “virabrequim”, “carregadeiras”, “ensaios”, “mineração”, “qualidade”, “manutenção”, “fadiga”, e “eixo de tração”, entre outros, associados ao tema.

A metodologia adotada incluiu critérios de elegibilidade e exclusão, coleta de dados, síntese dos resultados e elaboração do texto final. O estudo abrange informações, argumentos e teses associados a falhas mecânicas em equipamentos pesados da linha amarela, com ênfase nos motores alternativos, com destaque para o virabrequim e o eixo de tração. Foram considerados três tipos de estudo: revisão sistemática, estudo transversal e revisão narrativa.

Para a seleção das fontes, adotaram-se os seguintes critérios: capítulos de livros, artigos publicados em periódicos científicos nacionais e internacionais que empregassem diferentes metodologias de pesquisa, bem como trabalhos acadêmicos. Além disso, foram incluídos apenas estudos publicados entre 2000 e 2025 que apresentassem dados qualitativos. Estudos que não atendiam aos critérios de elegibilidade foram excluídos.

Após a leitura íntegra das informações selecionadas, os resultados foram apresentados por meio de uma síntese qualitativa a qual foi estruturada de forma a organizar os dados de maneira temática, agrupando as principais causas de falhas mecânicas, padrões de desgaste e estratégias de manutenção relacionadas.

4 DISCUSSÃO

As falhas são inerentes aos processos de produção, podendo impactar o desempenho das atividades de diferentes formas. Em alguns casos, é crucial que não ocorram falhas, a fim de evitar catástrofes, danos materiais, prejuízos financeiros, impactos ambientais e comprometimento da segurança (OLIVEIRA, 2010).

Um exemplo de falha crítica em máquinas pesadas, como as carregadeiras, ocorre no virabrequim, componente fundamental dos motores. Esse elemento é responsável por transferir as cargas das bielas, além de desempenhar um papel central no processo de locomoção do veículo. No entanto, devido às elevadas cargas mecânicas e condições operacionais adversas, o virabrequim está sujeito a falhas que, em muitos casos, resultam na diminuição da vida útil por fadiga de outros componentes do motor (WITEK et al., 2017). Estudos realizados por Yu e Xu (2005), Fonte et al. (2013), Witek et al. (2017) e Fonte et al. (2019) observaram que o virabrequim apresenta uma alta incidência de falhas, indicando que a fadiga é o mecanismo predominante nesse componente.

As causas de falhas no virabrequim são multifatoriais e variam conforme as condições de operação e manutenção. Witek et al. (2017) destacaram que a ocorrência da falha está associada à amplitude elevada de tensões de tração na região crítica, que, no estudo em questão, corresponde aos moentes das bielas (Figura 20). Segundo os autores, a combinação entre altas tensões e um grande número de ciclos de carga culminou na falha, a qual pode ter sido acelerada por um processo de endurecimento superficial inadequado.

Figura 20: Visão do virabrequim após a falha – Estudo Witek et al., 2017.



Fonte: Witek et al. (2017).

Em consonância com esses achados, Yu e Xu (2005) constataram que a ausência parcial da camada nitretada na região de junção entre o segundo munhão e o segundo moente do virabrequim resultou em uma redução significativa da resistência à fadiga, levando à ocorrência da falha.

Fonte et al. (2013) identificaram que a ausência de tratamento térmico na superfície do moente da biela, especialmente após reparos, associado a uma inadequada adição de liga metálica para restaurar seu diâmetro nominal, desalinhamento do virabrequim nos mancais de apoio e o desequilíbrio do virabrequim causado pela retificação profunda, contribuíram para falhas estruturais, conforme demonstrado na Figura 21.

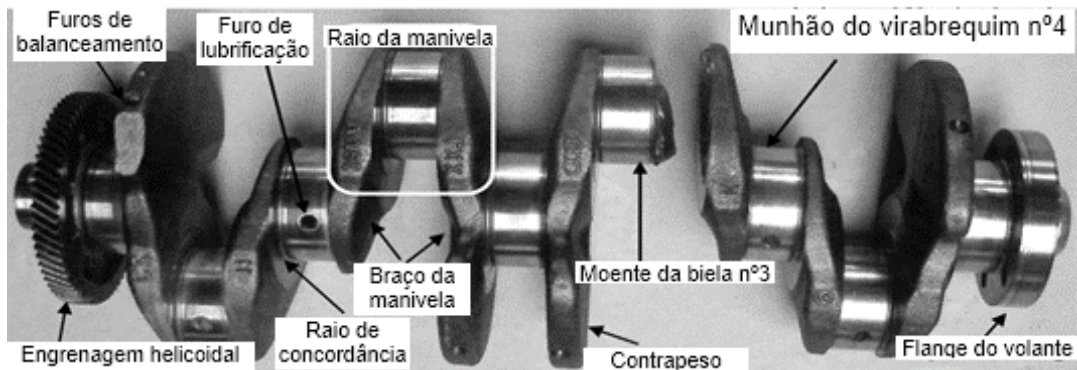
Figura 21: Local de falha do virabrequim – Estudo Fonte et al. 2013.



Fonte: Fonte et al. (2013).

O estudo realizado por Fonte et al. (2019) identificou que a falha por fadiga foi associada ao aperto inadequado (torque) dos parafusos de fixação de um dos mancais do munhão (mancal principal). A aplicação incorreta do torque resultou no surgimento de uma trinca no mancal, que, progressivamente, evoluiu para uma ruptura completa. Quando o mancal se soltou do conjunto devido ao aperto excessivo dos parafusos, ocorreu um desalinhamento crítico no sistema, comprometendo a capacidade de sustentação das cargas no eixo virabrequim. Como consequência direta desse desalinhamento, o virabrequim passou a ser submetido a cargas de flexão alternadas, decorrentes do movimento cíclico das bielas durante o funcionamento do motor. Esse carregamento repetitivo, associado às deflexões cíclicas, induziu um estado de fadiga no material, culminando em um rompimento catastrófico no moente da biela mais próxima do munhão, de acordo com a Figura 22 é possível observar a falha.

Figura 22: Virabrequim após a falha – Estudo Fonte et al. 2019.



Fonte: Fonte et al. (2019).

Cabe destacar que os autores dos estudos apresentam métodos que podem contribuir para a solução da problemática discutida, os quais estão sintetizados no Quadro 3.

Quadro 3: Métodos sugeridos na literatura para solução do problema.

ESTUDO	SOLUÇÃO PROPOSTA
Witek et al., 2017	Melhoria do processo de tratamento térmico, para obter dureza e tensão de escoamento constantes no material da superfície do virabrequim.
Yu e Xu, 2005	Utilização da moagem mecânica de forma controlada para corrigir as falhas na camada nitretada ou preparar a superfície para retratamentos.
Fonte et al., 2013	Substituição do virabrequim
Fonte et al., 2019	Melhoria do controle de qualidade no processo de produção das peças e um aperto adequado dos parafusos.

Fonte: Adaptado de Yu e Xu (2005); Fonte et al. (2013); Witek et al. (2017); Fonte et al. (2019).

Com base nos estudos supracitados, observa-se que, as medidas corretivas foram inadequadas ao longo dos processos de manutenção, comprometendo o desempenho operacional. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de adotar estratégias mais robustas para a identificação e mitigação dos danos, uma vez que muitas falhas podem ser evitadas por meio da realização de testes preventivos, da otimização de componentes, do controle das condições de operação, da aplicação

eficaz de tratamentos térmicos e da verificação periódica do estado dos componentes. Diante desse cenário, a abordagem mais eficaz é o RCFA. Esse método não apenas investiga as causas diretas da falha, mas, aprofundam-se nos fatores que a desencadearam. Essa análise detalhada permite não apenas corrigir o problema, mas eliminar suas origens, garantindo que falhas semelhantes não voltem a ocorrer. Além disso, o RCFA pode ser utilizado em conjunto com o Diagrama de Ishikawa, o qual é útil para mapear as causas potenciais de forma visual, auxiliando para um diagnóstico mais abrangente. Por outro lado, o FMEA, foca em analisar falhas potenciais, a qual tem maior aplicabilidade na fase preventiva, mas não se mostra a melhor ferramenta para rastrear falhas já ocorridas, como no caso do virabrequim.

A falha por fadiga nos eixos de tração também é reconhecida como um problema significativo. O eixo é o componente de um veículo responsável por transmitir a potência gerada no motor para as rodas, permitindo seu deslocamento conforme necessidade do operador. Dessa forma, danos a esse componente podem resultar em paradas não programadas, interrupções das atividades e perdas financeiras substanciais.

Croccolo et al. (2016; 2018) descreveram que uma possível causa para a falha por fadiga pode estar relacionada a utilização de espaçadores, como luvas e calços, que pode ocasionar uma dispersão indesejada de torque. Sob condições de folga, uma quantidade maior de torque é transmitida à porca roscada situada na extremidade do eixo do pinhão. Essa situação, aliada à dispersão da pré-carga provocada pelo atrito nas peças roscadas, pode resultar no afrouxamento progressivo da porca, comprometendo a pré-carga e, eventualmente ocasionando a falha do componente.

Em contrapartida, Mokosandip et al. (2024) identificaram danos nas engrenagens planetárias da caixa de satélite no diferencial, atribuídos ao desgaste acelerado devido à falta de manutenção preventiva adequada, a qual deveria ter ocorrido nos intervalos de 1250 e 1500 horas. Ademais, a contaminação do óleo, tanto por resíduos externos quanto por partículas metálicas provenientes do desgaste normal das peças, contribui significativamente para o aumento do desgaste das engrenagens próximas ao pinhão. Ressalta-se que a realização periódica de trocas de óleo, não foi efetuada conforme o planejado. Esses fatores, em conjunto, resultaram no surgimento de ruídos anormais, que motivaram a inspeção inicial e auxiliaram na identificação das falhas iminentes no componente.

As pesquisas apresentam métodos que podem contribuir para a solução da problemática discutida, que serão exemplificados no Quadro 4.

Quadro 4: Abordagens propostas para mitigar os desafios identificados.

ESTUDO	SOLUÇÃO PROPOSTA
Croccolo et al. (2016;2018)	Utilização de um elemento químico “trava rosca” ou um dispositivo de travamento mecânico, assim como evitar a utilização de mangas internas ou utilizar mangas de menor espessura.
Mokosandip et al. (2024)	Manutenção preventiva realizada em tempo hábil e programar trocas regulares de óleo.

Fonte: Adaptado de Croccolo et al. (2016; 2018); Mokosandip et al. (2024).

A análise dos estudos permite inferir a ocorrência de outros mecanismos de desgaste além da fadiga, destacando-se o desgaste abrasivo e o erosivo. Na pesquisa de Mokosandip et al. (2024), a lubrificação inadequada e a contaminação do óleo por partículas metálicas e resíduos podem intensificar um desgaste predominantemente abrasivo, embora também possam apresentar características de desgaste erosivo. Além disso, o desgaste adesivo pode ocorrer em ambos os contextos examinados. A deficiência na lubrificação observada por Mokosandip et al. (2024), pode aumentar o atrito entre os componentes, promovendo a aderência entre as superfícies. Já nos estudos de Croccolo et al. (2016; 2018), o atrito entre peças que operam com folga de contato pode favorecer esse tipo de mecanismo.

Ademais, verifica-se que ambos apresentam deficiências nos processos de manutenção. Na pesquisa de Croccolo et al. 2016, a inadequação da manutenção preditiva se mostra como um fator determinante, uma vez que o problema poderia ter sido identificado antecipadamente por meio do monitoramento da pré-carga e da inspeção da fixação da porca. Já Mokosandip et al. 2024, evidencia que a falha demonstrada é resultado direto da ausência de uma estratégia eficiente de manutenção preventiva. A contaminação do óleo, fator crítico para o desgaste acelerado dos componentes, poderia ter sido evitada por meio de um programa estruturado de monitoramento, incluindo trocas periódicas, análise da composição do óleo e um controle rigoroso de sua qualidade.

Neste contexto, a estratégia mais adequada para a gestão de riscos seria o FMEA, que poderia antecipar falhas críticas e também orientar de forma mais assertiva as ações corretivas e preventivas necessárias. Por outro lado, o FTA também se apresenta como uma abordagem igualmente relevante, pois aborda essas falhas como 'eventos de falha', com múltiplas causas subjacentes. A construção de uma árvore de falhas, possibilita mapear e analisar os diversos fatores que contribuem para o evento. Essa análise abrangente proporciona uma compreensão detalhada dos mecanismos de falha, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias eficazes.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que a análise de falhas constitui uma ferramenta indispensável para a identificação e classificação dos diversos mecanismos de desgaste e padrões de falha, proporcionando subsídios essenciais para a tomada de decisões estratégicas e para a implementação de ações corretivas e preventivas. A integração dessa análise com metodologias como FMEA, FTA e RCA potencializa a capacidade de avaliar cada situação, permitindo a seleção da ferramenta de gestão mais apropriada para cada cenário, considerando as especificidades, os pontos positivos e as limitações inerentes a cada abordagem. Ademais, a aplicação combinada dessas metodologias orienta a definição de práticas de manutenção, sejam elas preventivas, preditivas ou corretivas, contribuindo significativamente para a garantia da eficiência operacional, a redução de custos e o aprimoramento da segurança dos processos industriais, além de promover uma gestão mais sustentável e alinhada às demandas competitivas do setor.

É importante destacar, ainda, que a literatura apresenta uma carência de estudos que abordem a análise de falhas em equipamentos de mineração, em especial no que diz respeito às carregadeiras de rodas. Essa lacuna no campo científico evidencia a necessidade de intensificar investimentos em pesquisas que aprofundem o entendimento das causas e dos mecanismos de falha específicos a esses equipamentos, além de explorar soluções inovadoras que possam ser aplicadas de forma prática no ambiente industrial.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Matthew. **Adhesive wear explained**. Machinery Lubrication, S. I., out.2020. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31928/adhesive-wear>. Acesso em: 23 jan. 2025.

ALMEIDA, Larison Moreira. **Estudo do dimensionamento de equipamentos de carregamento e transporte utilizados na mineração a céu aberto (município de canaã dos carajás-PA)**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Pará, Marabá, 2009. Disponível em: https://repositorio.unifesspa.edu.br/bitstream/123456789/367/1/TCC_Estudo%20do%20dimensionamento%20de%20equipamentos. Acesso em: 6 mai.2024.

AN (AÇOS NOBRE). **Nitretação**. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/nitretacao/>. Acesso em: 02 jan. 2025.

ANTALA. **O que é desgaste em maquinaria**. 2021. Disponível em: <https://www.antala.pt/que-e-desgaste-maquinaria/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

ARMAC. **Plano de Manutenção (Armac) - Escavadeira - Volvo - EC480D**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/745693324/Plano-de-Manutencao-Armac-Escavadeira-Volvo-EC480D>. Acesso em: 7 maio 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462:1994: Confiabilidade e manutenibilidade**, Rio de Janeiro, 1994. p.37.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Trazido por Sergio M. S. Soares. 9º ed. Rio de Janeiro: LCT, 2016. pág 235. ISBN: 978-1-118-32457-8.

CASTRO, G.; FERNÁNDEZ-VICENTE, A.; CID, J. **Influence of the nitriding time in the wear behaviour of an AISI H13 steel during a crankshaft forging process**. *Wear*, v. 264, n. 5-6, p. 575-582, 2007. DOI: 10.1016/j.wear.2007.06.003. Acesso em: 20 set.2024.

CROCCOLO, Dario et al. **A numerical and experimental approach to the design and failure analysis of a pinion shaft for wheel loaders**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 232, n. 8, p. 1493-1504, 2018.

CROCCOLO, Dario et al. **Análise de falhas de um pinhão de engrenagem diferencial para carregadeiras de rodas**. Em: PROCEEDINGS IRF2016 5th International Conference INTEGRITY-RELIABILITY-FAILURE. INEGI/FEUP, 2016. p. 1149-1160.

DE LIMA, R.P.S.L; FRAGA, N.E.F. **Estudo teórico da influência do tempo de tratamento na cementação sólida e do uso do carbonato de cálcio como ativador em aços**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA). Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/9d5b6db1-62a7-4dda-80c3-4f86bcccec58/content>. Acesso em: 27 dez. 2024.

DE LIMA, S. J.; OLIVEIRA, F. F. **Cementação sólida de peças metálicas comerciais**. Corumbá: Instituto Federal do Mato Grosso do Sul – Campus Corumbá, 2013. Disponível em: https://turing.pro.br/anais/FEBRAT-2013/ENGENHARIA/Artigo_cementa%C3%A7%C3%A3o%20pe%C3%A7as%20met%C3%A1licas.pdf. Acesso em: 09 jan. 2025.

DO AMARAL, Caio Soares. **Estudo do efeito das condições de processamento mecânico no desgaste do aço de grão orientado (GO)**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://www.eng-materiais.bh.cefetmg.br/trabalhos-de-conclusao-de-curso-20161o/>. Acesso em: 28 out. 2024.

DOS SANTOS, Campos Teodora Alba. **Redução da tenacidade por intemperismo: mecanismo pré-ruptura de maciços rochosos**. Relatório de Estágio de Campo IV. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

DOS SANTOS, Moreira Willian Maicon. **Análise de falhas de uma frota de equipamentos móveis em uma mineradora do estado de Minas Gerais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/4161>. Acesso em: 12 out. 2024.

DYNAMOX. **Análise da árvore de falhas: como aplicar na sua indústria**. S. l., 28 set. 2023. Disponível em: <https://dynamox.net/blog/analise-da-arvore-de-falhas-como-aplicar-na-sua-industria>. Acesso em: 19 abr. 2024.

FERREIRA, Cunha, Cesar. **Inspeção de equipamentos: estudo de caso**. Inspeção Egipto, S. l., fev. 2014. Disponível em: <https://inspecaoegipto.blogspot.com/2014/02/?m=1>. Acesso em: 16 fev. 2025.

FONTE, M., et al. **Crankshaft failure analysis of a motor vehicle**. Engineering failure analysis, v. 35; p.147-152, 2013.

FONTE, M.; FREITAS, M.; REIS, L. **Failure analysis of a damaged diesel motor crankshaft**. Engineering Failure Analysis, v. 102, p. 1-6, 2019.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FORTE, Mariana de Souza. **Análise e interpretação de falhas mecânicas**. Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2013. Disponível em: https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/mariana-souza-forte.pdf. Acesso em: 09 out. 2024.

FRACTTAL. **O que é o FMEA e como aplica-lo**. S. I., 2023. Disponível em: <https://www.fractal.com/pt-br/manutenpedia/o-que-e-o-fmea>. Acesso em: 16 mai. 2024.

FREITAS, Sulamita Oliveira. **Dimensionamento de equipamentos de lavra**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/710/o/SULAMITA_OLIVEIRA_FREITAS. Acesso em: 15 mai. 2024.

GREGÓRIO, Gabriela Fonseca Parreira. **Manutenção industrial** [recurso eletrônico] / Gabriela Fonseca Parreira Gregório, Aline Moraes da Silveira, [revisão técnica: Henrique Martins Rocha]. – Porto Alegre: SAGAH, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **IBRAM lança 3 publicações sobre políticas públicas para o setor, lições aprendidas com a pandemia e dados consolidados da Economia Mineral 2020**. 24 nov. 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/ibram-lanca-3-publicacoes-sobre-politicas-publicas-para-o-setor-licoes-aprendidas-com-pandemia-e-dados-consolidados-da-economia-mineral-2>. Acesso em: 15 abr. 2024.

ITARAÍ. **Carbonitretação a gás**. [S. I.], 2025. Disponível em: <https://www.itarai.com.br/carbonitretacao-a-gas.html>. Acesso em: 07 jan. 2025.

KOPELIOVICH, D. **Mechanisms of wear**. [S.I.]: [s.n.], 2015. Disponível em: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear. Acesso em: 2 nov. 2024.

MATOS, B.R.; MILAN, M. **Aplicação sistêmica do modo de análise de falhas e efeitos (fmea) para o desenvolvimento de indicadores de desempenho de empresas de pequeno porte**. Viçosa-Minas Gerais. Rev. Árvore, v.33, n.5, p.977-985, 2009.

MOKOSANDIP, Sehat Aldiansyah et al. **Análise kerusakan unidade diferencial carregadeira de rodas Liugong 855n di pt itss kawasan morowali**. In: Seminário Prosidendo Nasional Teknik Mesin. 2024. pág. 267-277.

MONTEIRO, D. F. et al. **Diagrama de Ishikawa: a importância da ferramenta na identificação e controle dos impactos negativos dos processos gerenciais de uma organização**. Revista Científica Online, [S. l.], v. 15, n. 1, 2019. ISSN 1980-6957. Disponível em:
https://www.atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/magazines/1/DIAGRAMA_DE_ISHIKAWA__a_importancia_da_ferramenta_na_identificacao_e_controle_dos_impactos_negativos_dos_processos_gerenciais_de_uma_organizacao. Acesso em: 30 abr. 2024.

MONTEIRO. **Capítulo 2: Deposição Física de Vapores / Pulverização**. 2005. Disponível em:
<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3280/3/Cap%C3%ADtulo%202.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

MOREIRA, WL. **Estudo da propagação de trincas por fadiga em caçambas de recuperadoras de minério**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal de Minas Gerais. 2018. Disponível em:
<http://hdl.handle.net/1843/32526>. Acesso em: 10 set.2024.

NORTON, R.L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**, p. 293-387, 2006.

OLIVEIRA R.U., PAIVA, E.J., ALMEIDA, D.A. **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**. [S.l.]. Rev: Produção, v.20, n.1, p.77-91. jan./mar. 2010. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/S0103-65132010005000004>. Acesso em: 30 abr. 2024.

PASSAMAI, D.B; CASTILHO, B.G. **Nova metodologia de análise de falha em empresa de refrigerante – proposta e estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) Vitória, 2007. Disponível em:
https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2007-1_breno_e_gustavo.pdf.

PINTO, A, R. et al. **Desgaste por deslizamento da camada martensítica obtida por meio do shtpn no aço inoxidável ferrítico aisi 409**. 2013. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/261215490_Desgaste_por_deslizamento_da_camada_martensitica_obtida_por_meio_do_SHTPN_no_aco_inoxidavel_ferritico_AISI_409. Acesso em: 05 jan. 2025.

POLI-USP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). **Tratamentos termo-químicos: cementação, nitretação e cianetação**. 2011. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/geologiaemetalurgia/Revistas/Edi%C3%A7%C3%A3o%2011/artigo11.6.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2025.

REALIZZARE CURSOS. **Diagrama de Ishikawa**. S. I., 2024. Disponível em: <https://www.realizzarecursos.com.br/blog/diagrama-de-ishikawa/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

REVISTA M&T. **Mineração Itambé reformula a frota para aumentar a produção**. Revista M&T, São Paulo: Sobratema, n. 153, dez./jan. 2012. Disponível em: https://revistamt.com.br/Arquivos/Edicoes/MT_153. Acesso em: 6 mai. 2024.

RIJEZA. **Mecanismos de desgaste**. (2020). Disponível em: <https://rijeza.com.br/wpcontent/uploads/2020/08/mecanismos-desgaste-erosao-abrasao-corrosao.pdf>. Acesso em: 22 nov.2024.

ROCHA DE LIMA, Lucas Samuel Pereira; FRAGA, Francisco Edson Nogueira. **Estudo da influência teórica do tempo de tratamento na cimentação sólida e do uso do carbonato de cálcio como ativador em aços**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Mossoró, 2017.2. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/9d5b6db1-62a7-4dda-80c3-4f86bcccec58/content>. Acesso em: 21 nov.2024.

SAKURADA, E. Y. **As técnicas de análises de modos de falhas e seus efeitos e análise de falhas no desenvolvimento e avaliação de produtos**. 2001, 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2001.

SANTOS, Souza Raynne. **Manutenção preventiva e corretiva estudo de caso: máquinas de envase de manteiga em pote em uma fábrica de laticínio**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/23068/3/ManutencaoPreventivaCorretiva.pdf>. Acesso em: 05 out. 2024.

SANTOS, Waldenir Caravantes et al. **Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido**. Revista Matéria, v. 20, n. 2, p. 304-315, 2015. ISSN 1517-7076. DOI: 10.1590/S1517-707620150002.0031. Acesso em: 17 dez. 2024.

SCHMITT, J.C.; LIMA, C.R.C. **Failure analysis method using the integration of tools DMAIC, RCA, FTA and FMEA**. Rev: Espacios. [S.l.] v.37, n. 8, 2016. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a16v37n08/16370804.html>. Acesso em: 20 abr 2024.

SILVA, Henrique Buchhorn Marques. **Dimensionamento de equipamentos de carga para mineração**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/de6edf55-8e9b-4601-affd-f0100faea8b7/Henrique%20Buchhorn%20Marques%20Silva>. Acesso em: 15 mai. 2024.

SIMARD, R.S., DOYON-POULIN, M.G.P. **Development and Usability Evaluation of VulcanH, a CMMS Prototype for Preventive and Predictive Maintenance of Mobile Mining Equipment**. Montreal, Canadá. Rev. MDPI. may 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mining4020019>. Acesso em: 8 abr 2024.

SOARES, Lucas Gabriel. **Proposta de construção de um tribômetro modelo pino sobre disco (“pin-on-disk”)**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28296/1/CP_COEME_2014_1_13.pdf. Acesso em: 16 out. 2024.

SOLANKI, Amit; TAMBOLI, Ketan; ZINJUWADIA, M. J. **Crankshaft design and optimization-a review**. In: National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology. 2011. p. 13-14.

SOUZA, R. C.; SILVA, L. R. **Cementação de peças metálicas: estudo de caso**. In: FEIRA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA (FEBRAT), 2013, Anais... [S. l.]: FEBRAT, 2013. Disponível em: https://turing.pro.br/anais/FEBRAT-2013/ENGENHARIA/Artigo_cementa%C3%A7%C3%A3o%20pe%C3%A7as%20met%C3%A1licas.pdf. Acesso em: 26 nov. 2024.

VOLVO CE. **Caminhão Articulado A30G**. Disponível em: <https://www.volvoce.com/asia/en-as/products/articulated-haulers/a30g/>. Acesso em: 7 maio 2024.

VOLVO CE. **Carregadeira L90F**. Disponível em: <https://www.volvoce.com/asia/en-as/products/wheel-loaders/l90f/>. Acesso em: 7 maio 2024.

VOLVO CE. **Escavadeira EC480D**. Disponível em: <https://www.volvoce.com/asia/en-as/products/excavators/ec480d/>. Acesso em: 7 maio 2024.

WITEK, Lucjan et al. **Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine**. Engineering Failure Analysis, v. 82, p. 703-712, 2017.

XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. 2º Ed. Nova Lima: Falcone, 2014, pág 22. ISBN: 978-85-98254-64-7.

YU, Zhiwei; XU, Xiaolei. **Failure analysis of a diesel engine crankshaft**. Engineering failure analysis, v. 12, n. 3, p. 487-495, 2005.

ZOLIN, I. **Ensaio Mecânico e Análise de Falhas**, p. 15-32, 2011.

ZONTA, T.; COSTA, C.A.; RIGHI, R.R.; LIMA, M.J.; TRINDADE, E.S.; LI, G.P. **Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review**. Rev. Science Direct. [S.l.]. v. 150, oct 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.016>. Acesso em: 4 abr.2024.