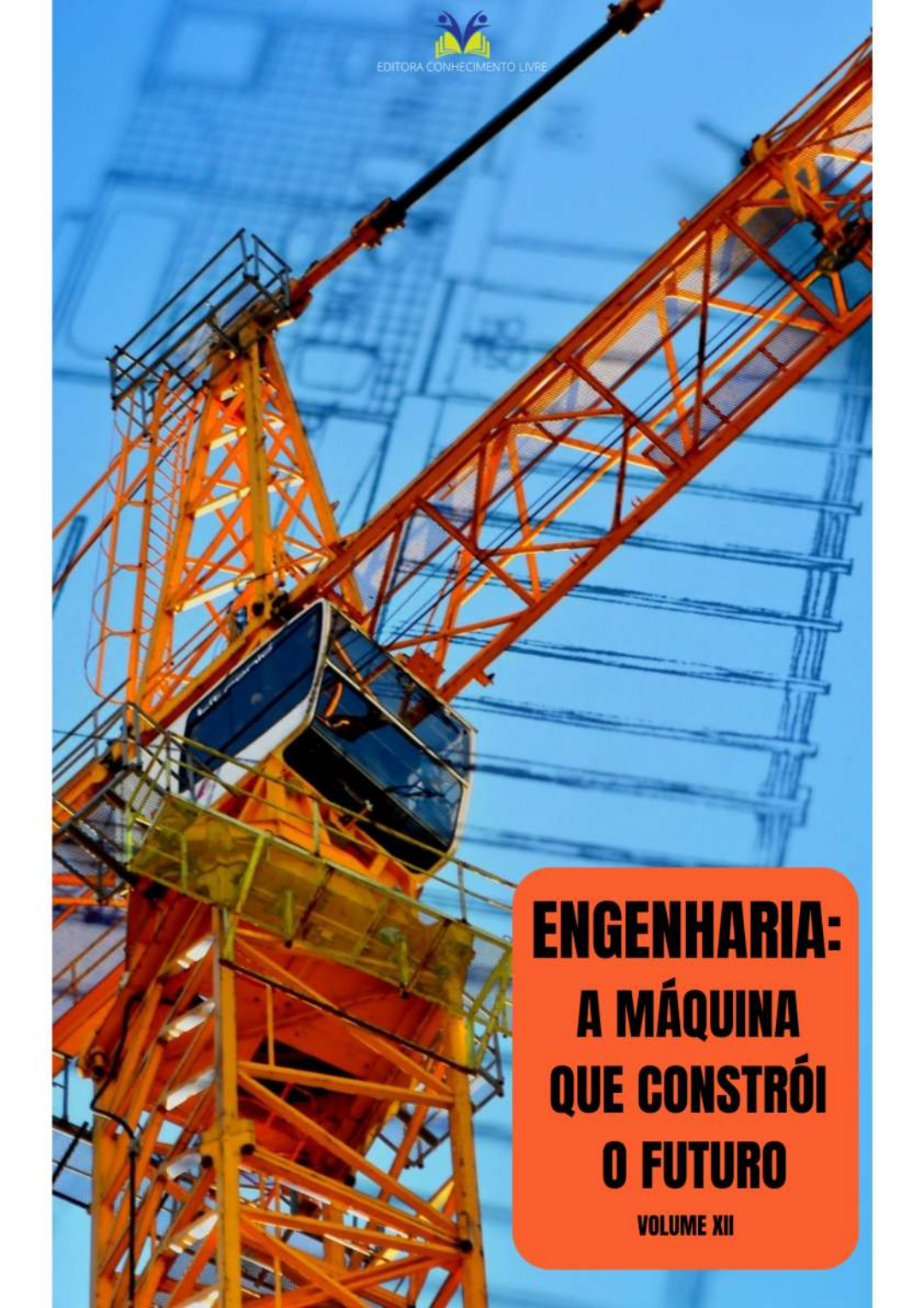




ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XII

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

12^a ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

12ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2024

100 f.: il

DOI: 10.37423/2024.edcl1021

ISBN: 978-65-5367-577-3

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2024.edcl1021>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	5
MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS E GEOPOLÍMERICOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
Ricardo Augusto dos Santos Horta	
Lorena Cristine Soares	
Wesley Eunathan Fernandes Lima	
Luciana Silva Vilela	
Marília Dias de Souza Inácio	
Regis Alkim Mota	
DOI 10.37423/241009401	
CAPÍTULO 2	31
ANÁLISE DE CUSTO DE CICLO DE VIDA EM GUINDASTES	
Lucas Emanuel Cardoso Soares	
Elson Cesar Moraes	
DOI 10.37423/241009402	
CAPÍTULO 3	70
AVALIAÇÃO DE PLANO PREVENTIVO EM CAMINHÕES DE UMA EMPRESA DE TRANSPORTE DE REFRESCOS	
David Luis Coelho da Silva	
Elson Cesar Moraes	
DOI 10.37423/241009403	

Capítulo 1



10.37423/241009401

MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS E GEOPOLÍMERICOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ricardo Augusto dos Santos Horta

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Lorena Cristine Soares

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Wesley Eunathan Fernandes Lima

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Luciana Silva Vilela

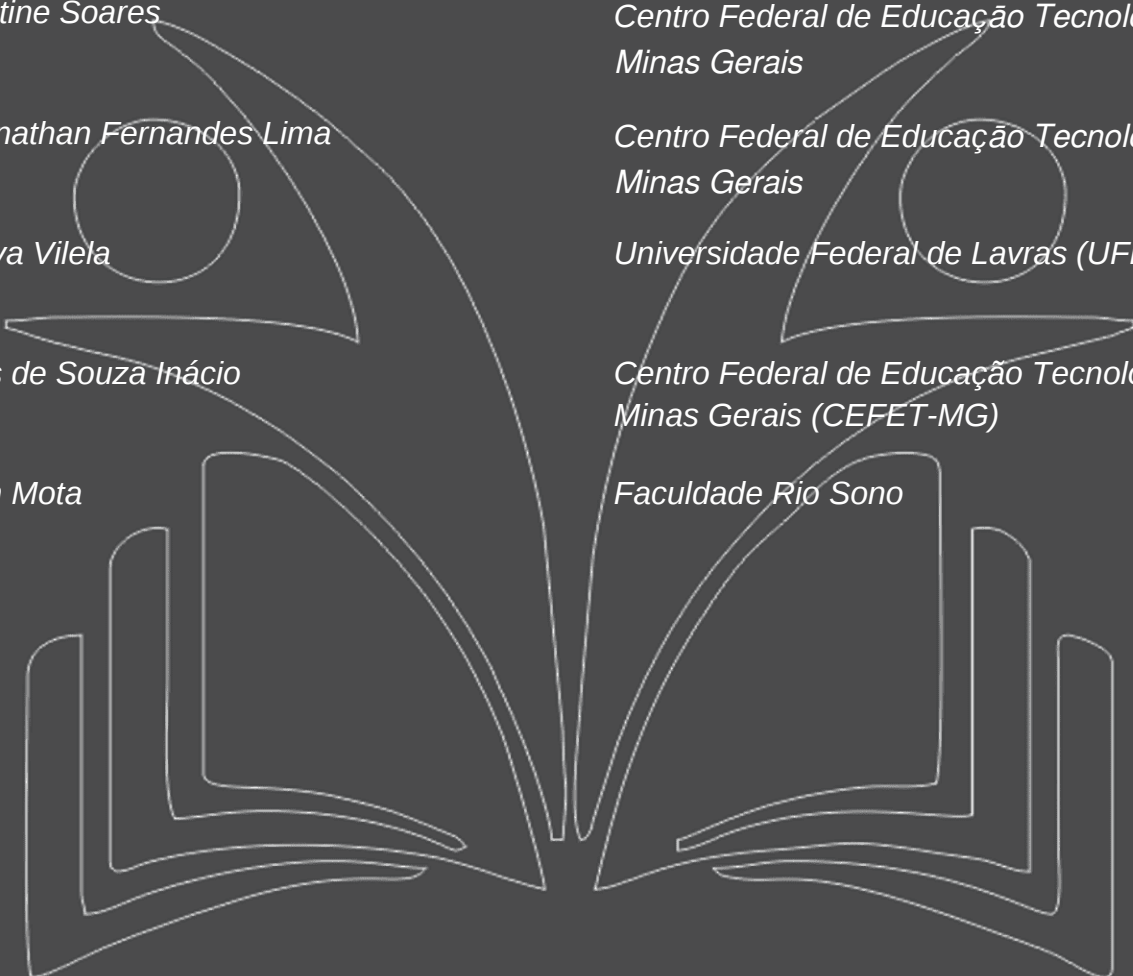
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Marília Dias de Souza Inácio

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais (CEFET-MG)*

Regis Alkim Mota

Faculdade Rio Sono



Resumo: Os materiais álcali-ativados e geopolímeros têm se destacado como alternativas sustentáveis ao cimento Portland, cuja produção é intensiva em emissões de CO₂ e consumo energético. Esses materiais são sintetizados a partir da combinação de precursores ricos em sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), como escória de alto forno, cinza volante e metacaulim, com ativadores alcalinos, que promovem reações químicas formando uma matriz de aluminosilicatos com propriedades ligantes. Este artigo revisa os fundamentos teóricos desses materiais, abordando conceitos, histórico de desenvolvimento, mecanismos de ativação alcalina, estrutura química e suas principais aplicações. Os geopolímeros, uma subclasse dos materiais álcali-ativados, destacam-se por sua alta resistência mecânica, estabilidade química e térmica, além de sua menor pegada de carbono, já que sua produção não depende da calcinação de calcário ou da queima de combustíveis fósseis. Com base em estudos recentes, identificou-se que a utilização de resíduos industriais e agrícolas como matéria-prima, como cinzas de bagaço de cana e rejeitos de mineração, amplia significativamente as possibilidades de aplicação industrial, incluindo concreto de alta performance, produção de blocos cerâmicos, fabricação de misturas asfálticas ou produção de material de reforço para a estabilização de solos e taludes. Dessa forma, a substituição do cimento Portland por esses ligantes alternativos representa um importante passo rumo à construção sustentável, promovendo a economia circular e a redução de impactos ambientais globais.

Palavras-chave: Geopolímeros. Ligantes álcali-ativados. Materiais álcali-ativados.

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que a construção civil seja responsável pelo consumo de 40% de toda a matéria prima produzida no planeta, além de contribuir com 40-50% de todas as emissões globais de gases de efeito estufa e chuva ácida na atmosfera (YEPES, 2014). Além disso, o ciclo de vida das edificações representa cerca de 40% da demanda global de energia (INGRAO *et al.*, 2016). Ao longo dos anos, estes impactos resultaram em alterações no meio ambiente e no clima do planeta. Eventos climáticos extremos como ondas de calor, tempestades e inundações têm aumentado de intensidade e atingido os grandes centros urbanos com bastante frequência, a ponto da qualidade de vida no planeta estar ameaçada.

O cimento é o segundo material mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água. Em 2014, a produção global de cimento atingiu o nível recorde de 4,2 bilhões de toneladas, e vem se mantendo neste patamar elevado desde então (IEA, 2020). A manufatura de 1 tonelada de cimento é responsável pela emissão de 0,94 toneladas de gás carbônico na atmosfera (5-8% das emissões globais de CO₂), além das emissões de gases como SO₃ e NO_x, que podem provocar o efeito estufa e a chuva ácida (RASHAD, 2011). Além disto, o processo de produção do cimento é energeticamente intenso, e, apesar de ter sofrido uma melhoria na sua eficiência na última década, apresenta um consumo médio de energia térmica de 3,4 GJ por tonelada de clínquer produzido (IEA, 2020).

Frente à emergência da crise ambiental, o setor da construção civil é convocado a adequar seus processos produtivos. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas, nos últimos anos, visando reduzir o impacto ambiental da indústria da construção civil, envolvendo desde a utilização de materiais cimentícios suplementares como substituição parcial do cimento (à exemplo da escória de alto forno e da cinza volante), até o desenvolvimento de uma nova classe de ligantes sem o uso de cimento: os materiais álcali-ativados (LI *et al.*, 2010; VAN DEVENTER *et al.*, 2010; KEUN-HYEOK Y *et al.*, 2013; KEN P. W. *et al.*, 2015; PROVIS *et al.*, 2015; KOTWICA, L. *et al.*, 2018.).

O termo “material álcali-ativado” é utilizado para definir os materiais sintetizados pela combinação de materiais ricos em sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), como metacaulim (origem geológica), cinza volante (resíduo da queima do carvão em centrais termelétricas) e escória de alto forno (sub-produto da produção do ferro gusa), com um ativador alcalino: silicatos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos ou óxidos de alumínio (VAN DEVENTER *et al.*, 2010; PROVIS; BERNAL, 2014; PROVIS, 2018). O meio alcalino é responsável por dissolver as moléculas de sílica e alumina e induzir a formação de uma estrutura polimérica amorfa de aluminosilicato, com capacidade ligante e resistência mecânica similar ou maior que o concreto de cimento Portland comum. (DAVIDOVITS, 1994a).

Entretanto, como tal nomenclatura é muito abrangente, essa categoria dos materiais geralmente é dividida em duas classes de acordo com a composição química de seus precursores. A primeira classe é composta por precursores ricos em cálcio (Ca), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), tendo a escória de alto forno como principal representante, e a sua ativação com solução alcalina de baixa concentração dá origem a um gel de aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) com estrutura parecida à tobermorita (PROVIS *et al.*, 2015). Davidovits nomeou este primeiro grupo como cimentos álcali-ativados. Já a segunda classe é formada por precursores ricos em sílica e alumina porém com pouco ou nenhum teor de cálcio disponível, casos do metacaulim e da cinza volante. Sua ativação com solução de média a alta alcalinidade dá origem a um gel de aluminossilicato alcalino hidratado (N-A-S-H), com uma estrutura altamente reticulada semelhante à zeólita (mineral natural rico em aluminossilicatos hidratados, capaz de acomodar em sua estrutura porosa uma grande variedade de metais alcalinos). Davidovits nomeou esse segundo grupo como geopolímeros devido ao fato de apresentarem estrutura polimérica (PROVIS *et al.*, 2015).

Os geopolímeros têm recebido considerável atenção devido ao seu baixo custo de produção, estabilidade química, resistência à corrosão, capacidade ligante, rápido ganho de resistência mecânica e estabilidade térmica (PAN; SANJAYAN; RANGAN, 2011; KASHANI *et al.*, 2017), sendo muitas vezes retratados como cimentos de terceira geração, depois da cal e do cimento Portland (MEHTA, A.; SIDDIQUE, R 2016).

Além disto, por meio de análises de ciclo de vida, alguns pesquisadores apontam que o potencial de aquecimento global dos geopolímeros é 40-70% inferior ao do cimento Portland, pelo fato do seu processo de produção envolver menor consumo energético, dispensar a etapa de calcinação do calcário, não haver a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia, além de preservar as reservas naturais de calcário e argila. A produção desses ligantes pode gerar até 5 vezes menos CO_2 do que a produção de cimento Portland (cerca de 0,18 toneladas de CO_2 por tonelada de geopolímero produzido) (WEIL; DOMBROWSKI; BUCHWALD, *et al.*, 2009; MCLELLAN *et al.*, 2011; KEUN-HYEOK; JIN-KYU; KEUM-II, 2013). Desta forma, a substituição do cimento Portland por ligantes alternativos tem se mostrado uma medida necessária para o desenvolvimento sustentável.

Existem inúmeros co-produtos gerados pela atividade industrial que são adequados para utilização na produção de geopolímeros, que vão desde resíduos da produção agrícola como cinzas de casca de arroz e cinzas do bagaço de cana, até resíduos industriais, como escória de alto forno, cinza volante, argilas calcinadas e rejeitos da mineração. Estes materiais têm em comum o fato de apresentarem um

alto teor de aluminossilicatos em sua composição (CHEN *et al.*, 2012; AHMARI e ZHANG, 2012; AYDIN, BARADAN, 2012; JOSEPH e MATHEW, 2012; HE *et al.*, 2013).

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo principal elaborar uma revisão bibliográfica sobre os materiais álcali-ativados, incluindo conceitos principais, contexto histórico da produção, tipos de aluminossilicatos empregados na produção dos ligantes alcalinos e mecanismo de ativação alcalina. Além disso, o trabalho também foca na caracterização dos geopolímeros, por meio de definições básicas, mecanismo de geopolimerização, apresentação da estrutura química e aplicações potenciais na indústria.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS

3.1.1. CONCEITOS PRINCIPAIS

O termo “material álcali-ativado” é utilizado para definir os materiais sintetizados pela combinação de materiais ricos em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), notadamente subprodutos industriais como escória de alto forno (derivada da indústria siderúrgica), cinzas volantes (derivadas da combustão do carvão) e metacaulim (processado a partir de resíduos da indústria de papel ou calcinação de argilas naturais), com um ativador alcalino: silicatos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos ou óxidos de alumínio (DUXSON E PROVIS, 2008; VAN DEVENTER *et al.*, 2010; PROVIS; BERNAL, 2014; PROVIS, 2018). O meio alcalino é responsável por dissolver as moléculas de sílica e alumina e induzir a formação de uma estrutura polimérica amorfa de aluminossilicato, com capacidade ligante e resistência mecânica similar ou maior que o concreto de cimento Portland comum. (DAVIDOVITS, 1994b).

Entretanto, como tal nomenclatura é muito abrangente, essa categoria dos materiais geralmente é dividida em duas classes de acordo com a composição química de seus precursores. A primeira classe é composta por precursores ricos em cálcio, sílica e, em menor proporção, alumina ($\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), tendo a escória de alto forno como principal representante, e a sua ativação com solução alcalina de baixa concentração dá origem a um gel de aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H), com estrutura parecida à tobermorita. Davidovits nomeou este primeiro grupo como cimentos álcali-ativados (CAA's). Já a segunda classe é formada por precursores ricos em sílica e alumina ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), porém com pouco ou nenhum teor de cálcio disponível, casos do metacaulim e da cinza volante

(sistemas de baixo cálcio). Sua ativação com solução de média a alta alcalinidade dá origem a um gel de aluminossilicato alcalino hidratado (N-A-S-(H)), cuja estrutura altamente reticulada se assemelha à zeólita (mineral natural rico em aluminossilicatos hidratados, capaz de acomodar em sua estrutura porosa uma grande variedade de metais alcalinos). Davidovits nomeou esse segundo grupo como geopolímeros (GP) devido ao fato de apresentarem estrutura polimérica (DAVIDOVITS, 1994b; PALOMO, A., GRUTZEK, M.W., BLANCO, M.T., 1999; PROVIS *et al.*, 2015

3.1.2. CONTEXTO HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DOS LIGANTES ÁLCALI-ATIVADOS

Aglutinantes preparados pela reação de uma fonte alcalina e aluminossilicato sólido foram patenteados já em 1908 (KUHL, H., 1908). No entanto, esses materiais foram produzidos pela primeira vez em escala significativa por Purdon na década de 1940 (PURDON, 1940).

O conhecimento desta tecnologia começou a se desenvolver apenas na década de 1950 com o trabalho desenvolvido por Glukhovsky na Europa Oriental, que investigou a natureza química dos aglutinantes usados nas pirâmides do Egito e em antigos templos romanos (GLUKHOVSKY, 1994). Glukhovsky concluiu que estas estruturas eram formadas por aluminossilicatos cálcicos hidratados, à semelhança do que ocorre nas fases cristalinas do tipo analcite ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$), uma rocha existente na crosta terrestre e que explicaria a durabilidade dessas construções. Ele chamou os ligantes de “solo-cimento” e os concretos correspondentes de “solo-silicatos” (TORGAL *et al.*, 2009). Desde a década de 1960, o Instituto de Pesquisa Glukhovsky na Ucrânia desenvolveu esta tecnologia de maneira suficiente para que dormentes ferroviários, seções, tubulações, canais de drenagem e irrigação, pisos para fazendas, lajes e blocos pré-moldados, fossem produzidos e colocados em serviço por mais mais de 40 anos utilizando escória de alto-forno ativada por álcali como único aglutinante, em uma escala de centenas de milhares de toneladas do material (SHI *et al.* 2006).

No final da década de 1970, os muitos incêndios ocorridos na França motivaram o trabalho pioneiro do químico francês Joseph Davidovits, interessado em reduzir o potencial de dano do fogo às construções, bem como eliminar os gases provenientes da combustão dos materiais, que provocavam intoxicação da população. Em suas pesquisas sobre polímeros resistentes ao fogo, o cientista buscou entender a origem da excelente durabilidade apresentada por estruturas antigas na Europa, que permaneciam intactas após os incêndios enquanto as modernas entravam em colapso. Como resultado, ele introduziu o conceito de geopolímero, que foi cunhado para descrever uma família de ligantes de aluminossilicatos ativados por álcalis (DAVIDOVITS, 2011). A formação do geopolímero foi

baseada na reação entre as duas partes dos materiais: o ativador alcalino e o precursor de silicato de alumínio reativo, que era principalmente o metacaulim nas primeiras idades do desenvolvimento da pesquisa.

Devido à elevada durabilidade e desempenho ambiental superior ao cimento Portland, os cimentos ativados por álcalis encontraram uma variedade de aplicações. Krivenko (1997) resume as inúmeras aplicações de cimentos ativados por álcalis, nos setores de transporte, indústria, construções residenciais, mineração, cimentação de poços de petróleo, aplicações de alto volume e assim por diante. Além disso, uma das principais aplicações recentes é em gestão de resíduos, incluindo contenção e imobilização de resíduos radioativos e metais tóxicos (CHO, K.W., IOKU, K. GOTO, S., 1999; DEJA, J., 2002; QIAN, G., SUNAN, D.D., TAY, J.H., 2003).

Em decorrência do aumento de demanda, o rol de matérias-primas que podem ser utilizadas para a fabricação de grandes volumes dos geopolímeros foi significativamente ampliado ao longo dos últimos anos. Materiais ricos em aluminossilicatos, como cinza volante e escória de alto forno, ganharam destaque e se juntaram ao metacaulim. Na sequência, pó de forno de cimento, cinzas da queima de resíduos agrícolas (bagaço da cana de açúcar e casca de arroz, principalmente) e argilas calcinadas de baixa qualidade foram incorporadas no processo de geopolimerização. Mais recentemente, rejeitos provenientes da mineração do ferro, cobre e do alumínio também passaram a ser empregados na produção dos ligantes álcali-ativados (AHMARI e ZHANG, 2013; ZHANG, M. *et al.*, 2016).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais eventos históricos que contribuíram para o desenvolvimento dos ligantes álcali-ativados e suas respectivas autorias.

Tabela 1: História bibliográfica dos principais eventos sobre ligantes álcali-ativados.

Autor	Ano	Evento histórico
Feret	1939	Escórias são utilizadas como adições em cimentos
Purdon	1940	Combinação de escórias e álcalis
Glukhovsky	1959	Base teórica e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovsky	1965	Definição do termo “cimentos alcalinos”
Davidovits	1979	Definição do termo “geopolímeros”
Malinowski	1979	Caracterização de antigos aquedutos
Davidovits e Sawyer	1985	Patente U.S 4.509.985 – “Pyrament”, Polímero mineral de alta resistência inicial
Talling e Brandstetr	1989	Escória álcali-ativada
Glukhovsky	1994	Antigos, modernos e futuros concretos

Krivenko	1994	Cimentos alcalinos
Wang and Scivener	1995	Microestrutura da escória e materiais álcali-ativados
Shi	1996	Resistência mecânica, porosidade e permeabilidade de escória
Krivenko	1997	Cimentos alcalinos: classificação terminológica, aspectos de durabilidade
Fernández-Jiménez e Puertas	1997	Estudos da cinética da reação de cimentos de escória álcali ativados
Davidovits	1999	Química dos sistemas geopoliméricos e suas tecnologias
Roy	1999	Cimentos álcali-ativados: oportunidades e desafios
Palomo	1999	Cinza volante álcali-ativada – um cimento para o futuro
Gong and Yang	2000	Cimento de escória de lama vermelha ativada por álcali
Bakharev	2001	Concreto de escória álcali-ativada
Duxson	2007	Tecnologia dos geopolímeros: estado atual da arte
Hajimohammadi, Provis and Deventer	2008	Geopolímero de uma parte
Provis e Deventer	2009	Geopolímeros: estrutura, processamento, propriedades e aplicações industriais

Fonte: Adaptado de Roy, D.M., (1999) e Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., (2008).

3.1.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ALUMINOSSILICATOS PRECURSORES

A Tabela 2 apresenta a composição química dos aluminossilicatos mais utilizados na produção de ligantes alcalinos.

Tabela 2: Composição química dos aluminossilicatos mais comuns utilizados na produção de ligantes alcalinos.

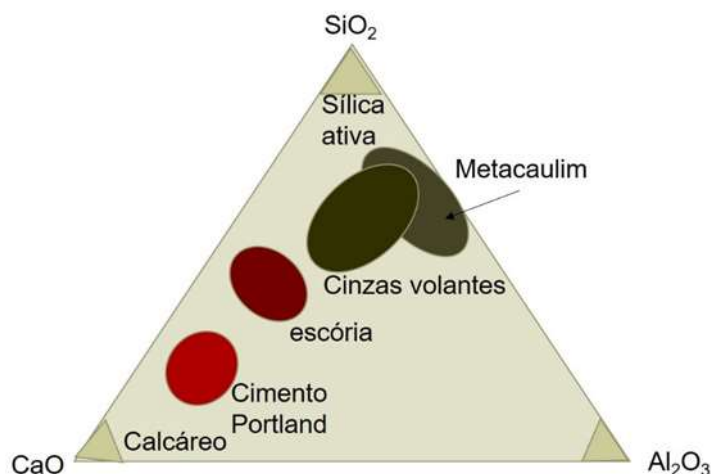
Material	Percentual em massa (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	álcalis	perda ao fogo
Escória de alto-forno	30-40	8-13	0,1-2	35-45	8-20	0,5-1	0,3-2
Cinza volante	50-65	20-29	5-10	1-7	1-2	1-3	0,5-3,5
Sílica ativa	90-98	0,06-2,5	0,03-2,5	0,1-0,8	0,2-3	0,1-2,5	2,5-3,5
Cinza de casca de arroz	90-94	0,3-1,0	0,2-0,5	0,3-0,5	0,2-0,4	2-3	2-3
Metacaulim	41-55	35-45	1,0-1,5	1,5-2,5	0,1-0,3	0,3-0,6	1,5-2,5

Fonte: RAMACHANDRAM, V.S. (1995).

Lothenbach, Scrivener, Hooton (2011) classificou esses materiais em relação ao cimento Portland em função dos teores de CaO, SiO₂ e Al₂O₃, por meio de um diagrama ternário (Figura 1). O diagrama

representa o somatório de três sistemas binários: (i) sistema CaO-SiO_2 (silicato de cálcio presente no cimento portland), (ii) o sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ (aluminossilicato de cálcio presente no cimento aluminoso) e (iii) $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (aluminossilicatos alcalinos presente no sistema alcalino).

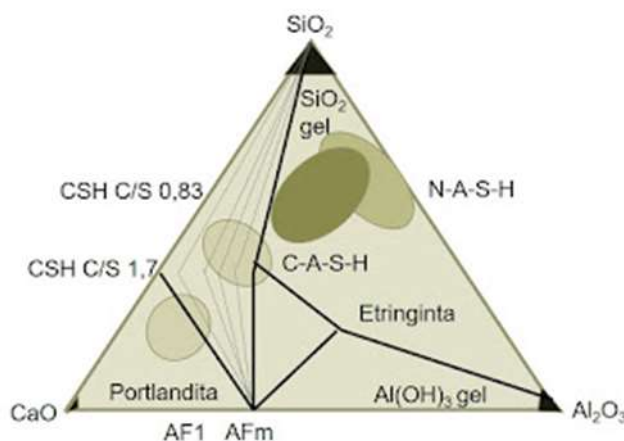
Figura 1 – Diagrama ternário dos materiais cimentícios e ligantes alcalinos.



Fonte: LOTHENBACH, SCRIVENER, HOOTON (2011).

A Figura 2 apresenta os produtos formados após a hidratação, conforme o teor de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 .

Figura 2 – Diagrama dos produtos de hidratação, conforme o teor de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 .



Fonte: LOTHENBACH, SCRIVENER, HOOTON (2011).

Observa-se que os materiais alcalinamente ativados estão situados no diagrama em regiões distintas com relação aos produtos do cimento Portland. A hidratação do cimento Portland dá origem ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pelas propriedades de resistência mecânica e durabilidade das matrizes cimentícias. A hidratação de cimentos aluminosos, como aqueles preparados com alto teor de escória (Cimento Portland de Alto Forno, ou CP-III, com 35-75% de escória), dá origem ao

aluminosilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H). Já a ativação de materiais ricos em sílica e alumina com baixo teor de cálcio, como o metacaulim e a cinza volante, dá origem a um gel de aluminossilicato alcalino, que, segundo Davidovits (1979), tem a fórmula química $M_n[-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$, ou, simplificada, N-A-S-(H), quando o metal alcalino é o sódio proveniente da solução de hidróxido de sódio. Então o gel de aluminossilicato alcalino (N-A-S-(H)) cresce e eventualmente inicia o processo de cristalização para formar estruturas tridimensionais semelhantes às zeólitas ((DUXSON *et al.*, 2007).

3.1.4. MECANISMO DE ATIVAÇÃO ALCALINA

De acordo com Glukhovsky, Rostovskaja e Rumyna (1980), o mecanismo de ativação alcalina é composto por um conjunto de reações de destruição-coagulação-condensação-cristalização. O estágio inicial consiste na quebra das ligações covalentes entre as entidades Si-O-Si e Al-O-Si presentes no precursor mineral, o que ocorre quando o pH da solução alcalina aumenta, sendo obtida então uma fase coloidal. Em seguida, ocorre o acúmulo das unidades estruturais, que são pouco estáveis e interagem entre si formando estruturas coaguladas. A terceira e última fase consiste na geração de uma estrutura condensada e cristalizada.

Segundo Jaarsveld, Deventer e Lukey (2002), a formação dos geopolímeros é uma reação exotérmica e segue o mesmo processo dos zeólitos: (a) dissolução da sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) dos minerais de origem devido à presença de íons hidróxido; (b) re-orientação das espécies dissolvidas; (c) condensação e endurecimento da estrutura em um sistema polimérico inorgânico.

Em seu artigo, Palomo, Gruzek, Blanco (1999) subdivide a geopolimerização em quatro estágios distintos: uma fase inicial de dissolução da sílica e da alumina, seguido pelos estágios de transporte, nucleação (formação dos primeiros oligômeros de aluminossilicatos) e crescimento por policondensação. No entanto, estes processos ocorrem quase que simultaneamente, impedindo a sua análise individual. A Figura 3 apresenta o processo de síntese dos materiais álcali-ativados, também conhecido como ativação alcalina:

Figura 3 – Processo de síntese dos materiais álcali-ativados (ativação alcalina).



Fonte: Adaptado de (ZHUANG, Y. *et al.*, 2016).

3.2. GEOPOLÍMEROS

3.2.1. DEFINIÇÃO

Como uma sub-classe dos materiais álcali-ativados, os geopolímeros são polímeros inorgânicos resultantes da interação de materiais ricos em sílica (SiO_4) e alumina (AlO_4), com pouco ou nenhum teor de cálcio disponível, com um ativador alcalino de média a elevada alcalinidade, cujas propriedades aglutinantes se assemelham às do cimento Portland. O processo de ativação alcalina, também conhecido como geopolimerização, ocorre à temperatura ambiente ou ligeiramente elevada (DAVIDOVITS, 1994b).

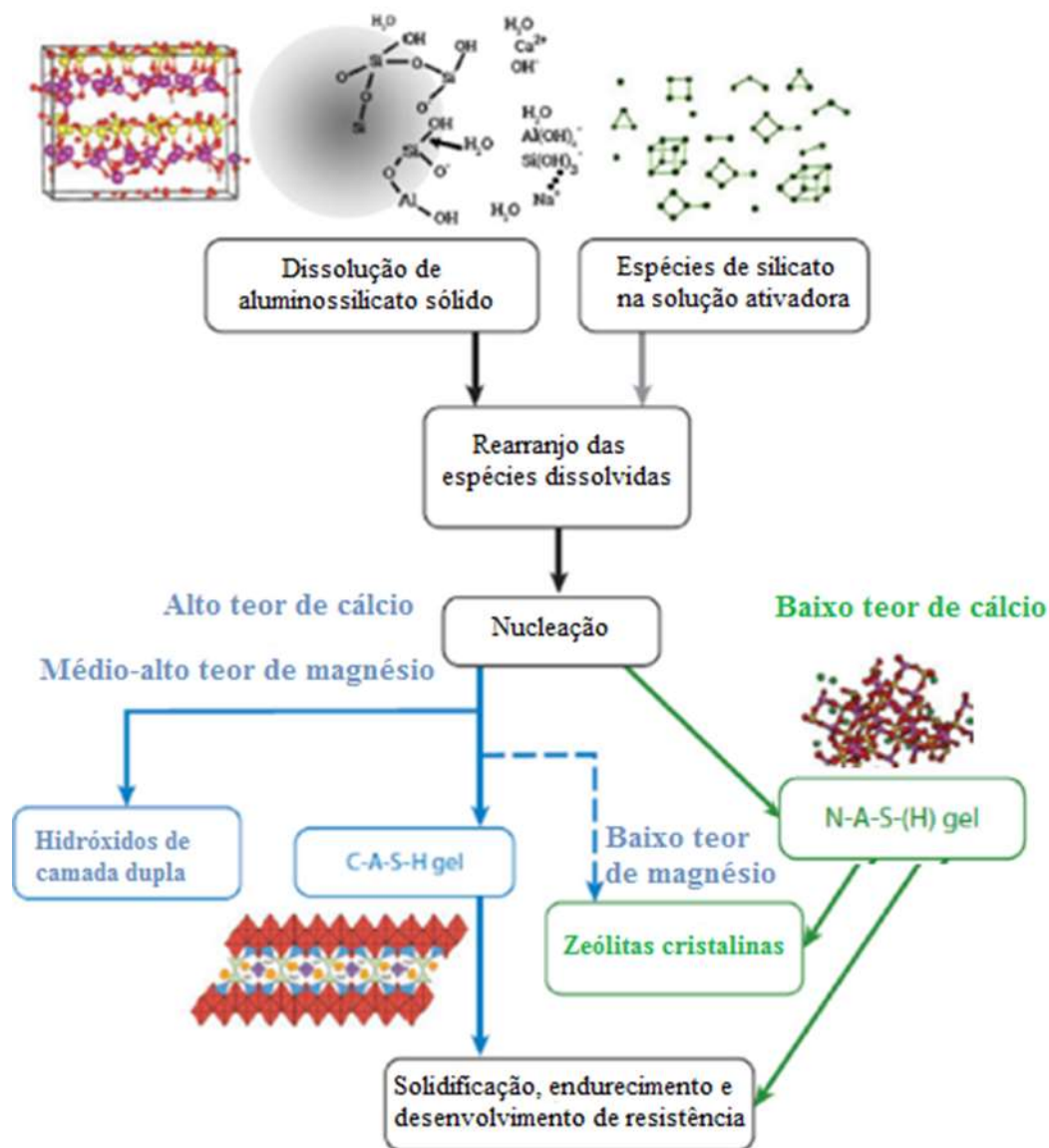
Segundo Feng, Provis e Van Deventer (2012), os geopolímeros são estruturas produzidas pela condensação de unidades tetraédricas de SiO_4 e AlO_4 ligadas através do compartilhamento de átomos de oxigênio, com íons de metais alcalinos balanceando as cargas associadas ao alumínio tetraédrico.

O prefixo “geo” advém do fato de que este material é constituído principalmente por óxidos de alumínio e de silício, que são os principais constituintes da crosta terrestre. Já o sufixo “polímero” remete ao processo de síntese deste material: a polimerização (BUCHWALD *et al.*, 2005; DAVIDOVITS, 2011).

3.2.2. MECANISMOS DE GEOPOLIMERIZAÇÃO

Provis e Deventer (2009) resumiram o processo de ativação alcalina específico para o caso dos geopolímeros (também denominado geopolimerização): o ataque alcalino na estrutura do metacaulim resulta na liberação de espécies de silicato e aluminato em solução, com o Al de número de coordenação 6 sendo convertido para número de coordenação 4 após a dissolução (DUXSON *et al.*, 2005). Tanto o silício quanto o alumínio estão localizados em coordenação tetraédrica após a dissolução. A liberação inicial de Al pode ser mais rápida do que aquela de Si (WENG, L., SAGOE-CRENTSIL, K., 2007). O Al dissolvido pode reagir com qualquer silicato inicialmente fornecido pela solução ativadora, conduzindo à formação de oligômeros de aluminossilicato, motivo pelo qual a utilização de solução de silicato de sódio ou potássio (Na_2SiO_3 ou K_2SiO_3) como ativador alcalino proporciona melhores propriedades mecânicas do que o respectivo hidróxido (NaOH ou KOH). A carga negativa, gerada quando o silício tetraédrico é substituído pelo alumínio tetraédrico, é equilibrada com cátions alcalinos da solução ativadora. Então o gel de aluminossilicato alcalino hidratado (N–A–S–(H)) cresce e eventualmente inicia o processo de cristalização para formar estruturas tridimensionais semelhantes às zeólitas ((DUXSON *et al.*, 2007). A Figura 4 apresenta o mecanismo de ativação alcalina de sistemas de alto teor e de baixo teor de cálcio.

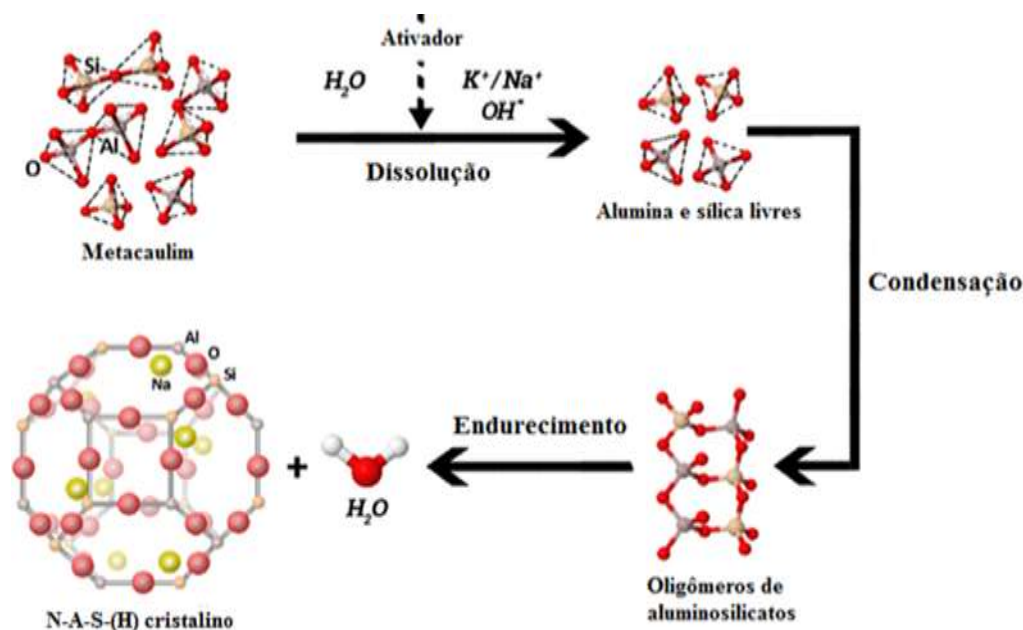
Figura 3 – Mecanismo de ativação alcalina de sistemas de alto teor e de baixo teor de cálcio.



Fonte: Adaptado de (PROVIS e BERNAL, 2014).

A Figura 5 apresenta o caso específico de ativação do metacaulim para obtenção de estruturas cristalinas de N-A-S-(H) semelhantes às zeólitas:

Figura 5 – Polimerização por condensação do metacaulim na presença de íons Na^+ produzindo N-A-S-(H) cristalino.

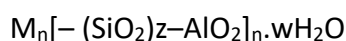


Fonte: Adaptado de (MABROUM, S. *et al.*, 2020).

3.2.3. ESTRUTURA QUÍMICA DOS GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros apresentam estrutura amorfa a semicristalina com redes poliméricas Si–O–Al (também denominados polisialatos) tridimensionais. Sua estrutura é composta por ânions tetraédricos de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ligados por compartilhamento dos átomos de oxigênio, com íons alcalinos como (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+}) compensando a carga elétrica do Al^{3+} (após a desidroxilação, o alumínio muda de coordenação 6 (octaédrico) para coordenação 4 (tetraédrico)) (YUN-MING *et al.*, 2016).

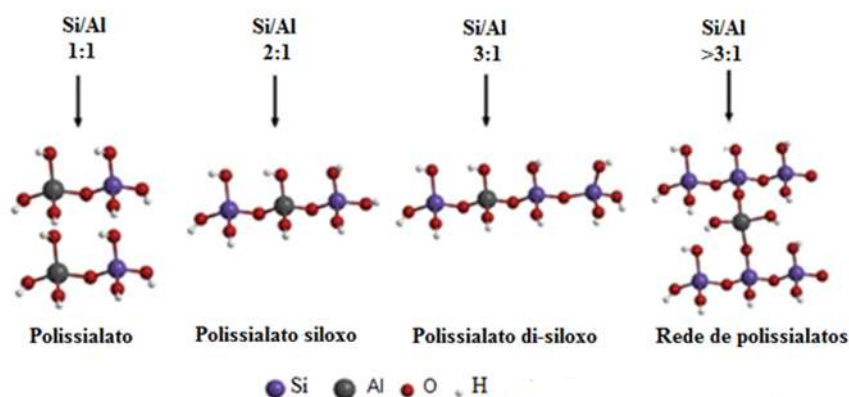
Os geopolímeros, ou polisialatos, têm a seguinte fórmula empírica:



Em que n representa o grau de polimerização, z é a relação molar Si/Al, w é o grau de hidratação e M é o cátion de um metal alcalino, mais comumente sódio, potássio ou cálcio (PALOMO *et al.*, 1999):

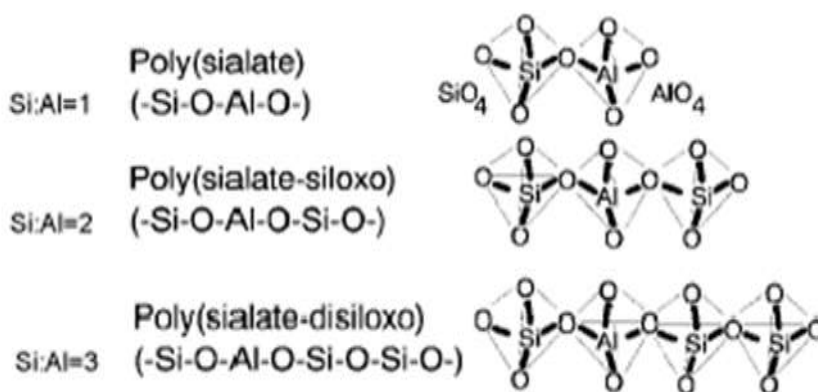
Dependendo da relação molar Si/Al, diferentes cadeias de aluminossilicatos são formadas, conforme mostra as Figuras 6 e 7:

Figura 6 – Diferentes sistemas geopoliméricos com base no número de unidades siloxo (Si–O).



Fonte: Adaptado de (ZHUANG, Y. *et al.*, 2016).

Figura 7 – Representação esquemática dos monômeros base dos geopolímeros.



Fonte: DAVIDOVITS, 2002.

Os geopolímeros são também caracterizados por serem multifásicos, heterogêneos e cristalograficamente desordenados em todas as escalas de comprimento (também considerados pseudo-zeólitos desordenados), sendo formados, na maioria das situações, por precursores sólidos de difícil caracterização, a exemplo das cinzas volantes (PROVIS; BERNAL, 2014; PROVIS, 2018).

3.2.4. APLICAÇÕES POTENCIAIS DOS GEOPOLÍMEROS NA INDÚSTRIA

Neste tópico serão apresentados alguns estudos que atestam as diversas possibilidades de aplicação dos geopolímeros.

Puligilla e Mondal (2013) produziram pastas geopoliméricas a partir da ativação alcalina de misturas de cinza volante e escória de alto forno. Foram observadas melhorias no desenvolvimento

microestrutural e um aumento na taxa de endurecimento durante a reação de pega conforme aumentou-se o teor de escória.

Young and Yang (2019) demonstraram a possibilidade de utilização de rejeitos da mineração do ferro em substituição à argila na produção de clínquer por meio de um processo de sinterização convencional. Os autores identificaram que o clínquer produzido apresentava melhor qualidade que o material convencional. Andrade *et al.*(2010) e Zheng *et al.* (2013) deram outros exemplos de utilização de rejeitos da mineração do ferro como matéria prima na produção do clínquer de cimento.

Yliniemi *et al.* (2017) utilizaram as técnicas de granulação de alto cisalhamento e ativação alcalina para converter cinzas volantes e rejeitos da mineração em agregados geopoliméricos leves, para utilização em substituição ao agregado miúdo (argila expandida) em argamassas e concretos. A argamassa e o concreto preparados com agregados geopoliméricos apresentaram maior resistência mecânica, maior módulo de elasticidade dinâmico e maior densidade do que o concreto produzido com argila expandida, mantendo a mesma reologia e trabalhabilidade.

Zhao, Fan e Sun (2014) investigaram o uso de rejeitos da mineração do ferro em substituição ao agregado natural em concretos de ultra-alta resistência, e analisaram os impactos que vários níveis de substituição provocam sobre suas propriedades mecânicas. Considerando níveis de substituição de até 40%, o comportamento mecânico das misturas de rejeitos foi comparável ao da mistura de controle no ensaio de compressão realizado com 90 dias de cura em temperatura ambiente.

Ahmari e Zhang (2012) comprovaram a viabilidade de utilização de rejeitos da mineração do cobre na produção de tijolos ecológicos com base na tecnologia de geopolimerização. Os resultados obtidos atenderam aos requisitos da norma ASTM (*American Society of Testing and Materials*). Kuranchie, Shukla e Habibi (2016) realizaram a ativação alcalina de rejeitos da mineração do ferro para utilização na produção de tijolos, evitando o processo tradicional de calcinação de solos arenosos com alto teor de argila. Os tijolos geopoliméricos produzidos atenderam tanto aos requisitos da norma ASTM (*American Society of Testing and Materials*) quanto aos requisitos da norma AS (*Australian Standards*) nos ensaios de controle de qualidade. Yang *et al.* (2010); Li *et al.* (2017) e Kim *et al.* (2019) deram outros exemplos de produção de tijolos autoclavados e de alta porosidade a partir do reaproveitamento de rejeitos da mineração e lama vermelha.

Na construção de estradas, os geopolímeros podem ser usados para melhoria e estabilização do solo. Ojuri *et al.* (2017) utilizaram misturas de rejeitos da mineração e cal-cimento para estabilizar solos lateríticos na construção de rodovias. Etim *et al.* (2017) utilizaram mistura de rejeitos de cal e minério

de ferro para estabilizar o solo de algodão preto. Oluwasola *et al.*(2015) e Oluwasola *et al.* (2016) utilizaram escória de aciaria e rejeitos da mineração do cobre em substituição a agregados convencionais como material para pavimentos de estradas e rodovias. Os resultados obtidos mostraram que a substituição de agregados de granito natural por escória de aciaria e rejeitos da mineração do cobre melhorou as propriedades de misturas asfálticas.

Cheng *et al.* (2012) verificaram em seus experimentos que geopolímeros fabricados a partir da ativação alcalina do metacaulim (MK-GP) são capazes de adsorver uma série de metais pesados (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} e Cd^{2+}) presentes em soluções aquosas. Dos metais testados, a adsorção ótima do geopolímero ocorreu para o Pb^{2+} . Esta descoberta pode facilitar o desenvolvimento de procedimentos otimizados para o tratamento de águas residuais, proporcionando assim uma solução alternativa aos danos ambientais causados por metais pesados. López *et al.* (2014) descreveram o comportamento de adsorção dos MK-GP's para metais pesados e mostraram que existem vários tipos de sítios de ligação na superfície do MK-GP que podem imobilizar diferentes tipos de metais pesados.

Quanto ao potencial de imobilização radioativa dos geopolímeros, os radionuclídeos Cs^+ e Sr^{2+} são os mais comuns investigados em estudos de resíduos de geopolímeros e têm sido investigados por muitos anos (KUENZEL *et al.*, 2015; VANDEVENNE *et al.*, 2018; TIAN e SASAK, 2019).

LI *et al.* (2013) analisou o comportamento de solidificação do $^{133}Cs^+$ por geopolímeros à base de cinzas volantes. Testes de lixiviação (realizados em soluções de água deionizada, ácido sulfúrico e sulfato de magnésio) revelaram que a solidificação do geopolímero apresentou menor concentração cumulativa de lixiviação (CCL) de $^{133}Cs^+$ do que o cimento de referência. A estabilidade térmica (resistência a altas temperaturas e ciclos de congelamento-descongelamento) e a resistência a ácidos do geopolímero também foram melhores do que a do cimento. A morfologia e as fases minerais do geopolímero e do bloco de solidificação do geopolímero foram caracterizadas por MEV e DRX, e a análise EDX indicou que a maior parte do Cs está associado ao gel de geopolímero amorfo. Estes resultados fazem com que a cinza volante seja um material candidato de baixo custo e elevada eficiência na imobilização de rejeitos radioativos.

Além disso, alguns outros cátions radionuclídeos, incluindo Pb, Cu, Cd, Th, U e Ca, existentes em águas residuais radioativas, podem ser incorporados em geopolímeros (El-ESWED *et al.*, 2017; WALKLEY *et al.*, 2020).

Arbel Haddad *et al.* (2017) realizou estudos com geopolímeros à base de metacaulim de baixo teor de Si curados a temperaturas de 40°C na presença de íons Cs. Por meio de análises de espectroscopia

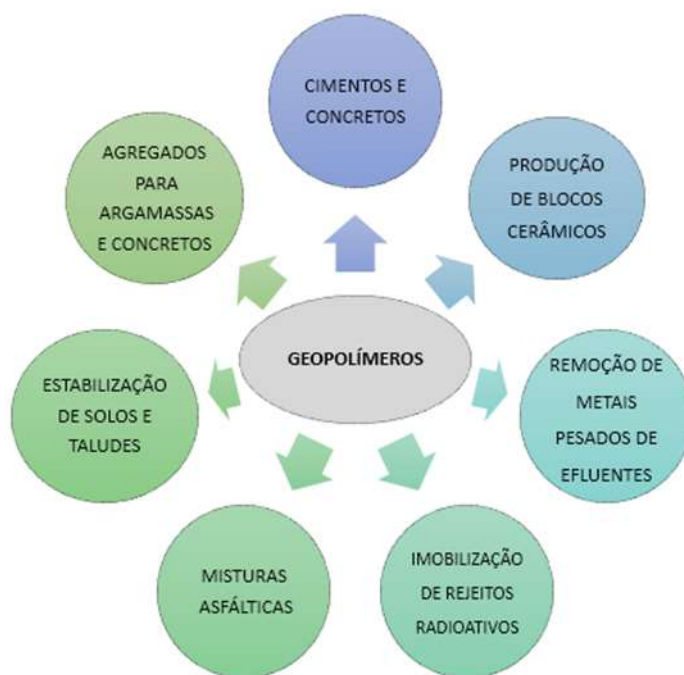
NRM e difração de raios X, identificou a formação de misturas de fases amorfas e cristalinas, incluindo uma fase cristalina denominada zeólita F $((\text{Cs}, \text{Na})\text{AlSiO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O})$, que proporcionou a imobilização eficiente e seletiva de Cs.

El-Kamash, El-Naggar e El-Dessoukyd (2006) investigaram a possibilidade de solidificação dos radionuclídeos Cs^{137} e Sr^{90} em misturas de cimento Portland e zeólitas. Os resultados obtidos mostraram que a presença de zeólita nos resíduos cimentados finais melhora as características mecânicas da matriz cimentícia solidificada (resistência mecânica e tempos de pega) em relação aos requisitos de segurança e reduz consideravelmente as taxas de lixiviação de radionuclídeos.

Niu, X. *et al.* (2022) analisou a capacidade de imobilização do MK-GP não apenas para radionuclídeos catiônicos (Cs^+ , Sr^{2+} e Co^{2+}) mas também para radionuclídeos aniônicos (I^- , IO_3^- , SeO_3^{2-} e SeO_4^{2-}), devido ao seu alto potencial de troca iônica. Parâmetros como potencial zeta, ligação de radionuclídeos e lixiviação de álcalis foram utilizados para avaliar o mecanismo de absorção em geopolímeros fabricados a partir da ativação alcalina do metacaulim de duas fontes minerais distintas.. Os resultados mostraram que o MK-GP não possui a capacidade de incorporar radionuclídeos aniônicos, independente da fonte de metacaulim utilizada, porém ambos os tipos de geopolímeros possuem alta capacidade de imobilizar radionuclídeos catiônicos.

A Figura 8 apresenta, de maneira sucinta, as principais aplicações dos geopolímeros identificadas na literatura.

Figura 8 – Aplicações potenciais dos geopolímeros na indústria.



Fonte: Adaptado de (KRISHNA *et al.*, 2021).

4. CONCLUSÃO

Os materiais álcali-ativados e geopolímeros apresentam-se como soluções promissoras para mitigar os impactos ambientais da construção civil, setor este que figura entre os principais responsáveis pelo consumo de recursos naturais e emissões de gases de efeito estufa.

A revisão apresentada no artigo demonstra que esses materiais, sintetizados a partir de precursores ricos em sílica e alumina combinados com ativadores alcalinos, possuem propriedades técnicas competitivas, como elevada resistência mecânica, estabilidade química e térmica, além de um ciclo de vida ambientalmente mais sustentável quando comparados ao cimento Portland tradicional.

A utilização de resíduos industriais e agrícolas como matéria-prima para a produção desses materiais não apenas promove a economia circular, mas também reduz a necessidade de exploração de recursos naturais, atendendo aos princípios de sustentabilidade. Além disso, as aplicações potenciais dos geopolímeros, que vão desde a construção civil até a contenção de resíduos tóxicos e radioativos, reforçam sua versatilidade e importância estratégica em diversos setores industriais. Entretanto, ainda existem desafios a serem superados, como a padronização de métodos de síntese, a ampliação do uso em escala industrial e a avaliação de desempenho em longo prazo. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento, aliados a políticas públicas de incentivo, podem viabilizar a transição para o uso massivo desses materiais, consolidando-os como uma alternativa viável e sustentável ao cimento

Portland. Assim, a utilização dos materiais álcali-ativados e geopolímeros representa não apenas um avanço tecnológico na construção civil, mas também um compromisso com o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMARI S., ZHANG L. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Construction and Building Materials*. v.29, p. 323–331, 2012.
- ARBEL HADDAD, M., OFER-ROZOVSKY, E., BAR-NES, G., BOROKOVICH, E.J.C., NIKOLSKI, A., MOGILIANSKY, D., KATZ, A. Formation of zeolites in metakaolin-based geopolymers and their potential application for Cs immobilization. *J. Nucl. Mater.* V.493, P.168–179. 2017.
- ANDRADE, F.R.D., PECCHIO, M., BENDORAITIS, D.P., MONTANHEIRO, T.J., KIHARA, Y. Basalt mine-tailings as raw-materials for Portland clinker. *Ceramica*. v., 56, p.337, 2010.
- BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. Development of Geopolymer Concrete Supported by System Analytical Tools. *Proceeding of the 2nd Int. Symposium of Non-tradition Cement and Concrete*. ed. By Bilek and Kersner, 25-35, 2005.
- CHENG, T. W., LEE, M.L, KO, M.S., UENG, T.H., YANG, S.F. The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*. v. 56. p. 90-96, 2012.
- CHO, K.W., IOKU, K. GOTO, S. Effect of PbII and CrVI on the hydration of slag-alkaline cement and the immobilization of these heavy metal ions, *Adv. Cem. Res.* V. 11, p.111–116, 1999.
- DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymers Applications. *Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.*
- DAVIDOVITS, J. *Geopolymer Cement, a review*, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2013. Disponível em: <http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/21-geopolymer-cement-review-2013>. Acesso em fev. 2021.
- DAVIDOVITS, J. *Geopolymers – chemistry and applications*. 3. ed. In: Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2011.
- DAVIDOVITS J. Geopolymer chemistry and sustainable development. The poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. In: *Proceedings of 2005 geopolymer conference*, vol. 1, p. 9–15, 2005.
- DAVIDOVITS, J. Synthesis of new high temperature geopolymers for reinforced plastics/composites. *SPEPACTEC79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center*, p.151-154, 1979.
- DRECHSLER, M., GRAHAM, A. Geopolymers – an innovative materials technology bringing resource sustainability to construction and mining industries an innovative materials technology bringing resource sustainability to construction and mining industries. *48th Inst. Quarr. Conf.* 12. 2005.
- DUXSON, P. PROVIS, J.L. Designing precursors for geopolymer cements, *J. Am. Ceram. Soc.* V.91, p. 3864–3869, 2008.
- DUXSON, P., FERNANDEZ-JIMENEZ, A., PROVIS, J.L., LUKEY, G.C., PALOMO, A., DEVENTER, J.S.J. Geopolymer technology: the current state of the art, *J. Mater. Sci.* V. 42 (9), p. 2917–2933, 2007.

DUXSON, P., LUKEY, G.C., SEPAROVIC, F., VAN DEVENTER, J.S.L. Effect of alkali cations on aluminum incorporation in geopolymeric gels. *Ind. Eng. Chem. Res.* V.44 (4), P. 832–839, 2005.

DUXSON, P., MALLICOAT, S.W. LUKEY, G.C., KRIVEN, W.M., VAN DEVENTER, J.S.L.P. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin based geopolymers, *Colloids Surf., A*, V. 292, p.8–20, 2007.

EL-ESWED, B.I., ALDAGAG, O.M., KHALILI, F.I. Efficiency and mechanism of stabilization/solidification of Pb(II), Cd(II), Cu(II), Th(IV) and U(VI) in metakaolin based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* v.140, p.148–156. 2017.

EL HAFID, K., HAJJAJI, M., EL HAFID, H. Influence of NaOH concentration on microstructure and properties of cured alkali-activated calcined clay. *J. Build. Eng.* V. 11, P.158–165, 2017.

EL-KAMASH, A.M., EL-NAGGAR, M.R., EL-DESSOUKYD, M.I. Immobilization of cesium and strontium radionuclides in zeolite-cement blends. *J. Hazard. Mater.* v.136, p.310–316. 2006.

EL-NAGGAR, M., AMIN, M. Impact of alkali cations on properties of metakaolin and metakaolin/slag geopolymers: microstructures in relation to sorption of ¹³⁴Cs radionuclide. *J. Hazard Mater.* V.344, p.913–924, 2018.

ETIM, R.K., EBEREMU, A.O., OSINUBI, K.J.. Stabilization of black cotton soil withlime and iron ore tailings admixture. *Transp. Geotech.* v.10, p. 85–95, 2017.

FENG, D.; PROVIS, J. L.; van DEVENTER, J. S. J. Thermal activation of albite for the synthesis of one-part mix geopolymers. *Journal American Ceramic Society*, v. 95, p. 565-572, 2012.

GLUKHOVSKY, V. Ancient, modern and future concretes. In Krivenko, P.V. (Ed.) *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*. Kiev, Ukraine, VIPOK Stock Company. 1994.

GLUKHOVSKY, V., ROSTOVSKAJA, G., RUMYNA, G. High strength slag alkaline cements. In: *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*, vol. 3, p. 164–8, 1980.

JAARSVELD, J.G.S., DEVENTER, J., LUKEY, G.C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. *Chemistry Engineering Journal*, v. 89, p.63–73, 2002.

JI, Z., PEI, Y. Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: a review. *J. Environ. Manag.* 231, 256–267, 2019.

KIM, Y., LEE, Y., KIM, M., PARK, H. Preparation of high porosity bricks by utilizing red mud and mine tailing. *J. Clean. Prod.* V. 207, p. 490–497. 2019.

KOT'ÁTKOVÁ, J., ZATLOUKAL, J., REITERMAN, P., KOL'AR, K. Concrete and cement composites used for radioactive waste deposition. *J. Environ. Radioact.* P. 178–179, 147–155, 2017.

KRISHNA, R.S., SHAIKH, F., MISHRA, J., LAZORENKO, G., KASPRZHITSKII, A. Mine tailings-based geopolymers: Properties, applications and industrial prospects. *Ceramics International*. V. 47, P. 17826-17843, 2021.

KRIVENKO, P. Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability, in: H. Justnes (Ed.), Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, Amarkai and Congrex Göteborg, Gothenburg, Sweden, 1997.

KUENZEL, C., CISNEROS, J.F., NEVILLE, T.P., VANDEPERRE, L. J., SIMONS, S.J.R., BENSTED, J. CHEESEMAN, C.R. Encapsulation of Cs/Sr contaminated clinoptilolite in geopolymers produced from metakaolin. J. Nucl. Mater. V. 466, p. 94–99. 2015.

KUHL, H. Slag cement and process making the same, US Patent 900,939, 1908.

KURANCHIE F., SHUKLA S. e HABIBI D. Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. v. 30, 2016.

LEE, N.-K., KHALID, H.R., LEE, H.-K. Adsorption characteristics of cesium onto mesoporous geopolymers containing nano-crystalline zeolites. Microporous Mesoporous Mater. V.242, p.238–244, 2017.

LI, Q., SUN, Z., TAO, D., XU, Y., LI, P., CUI, H., ZHAI, J. Immobilization of simulated radionuclides-133Cs+by fly ash-based geopolymer. J. Hazard. Mater. V.262, p.325–331. 2013.

LI, C., WEN, Q., HONG, M., LIANG, Z., ZHUANG, Z., YU, Y. Heavy metals leaching in bricks made from lead and zinc mine tailings with varied chemical components. Construction and Building Materials. v. 134, p.443–451, 2017.

LÓPEZ, F.J., SUGITA, S., KOBAYASHI, T. Cesium-adsorbent geopolymer foams based on silica from rice husk and metakaolin. Chem. Lett. V. 43, P.128–130, 2014.

LÓPEZ, F.J., SUGITA, S., TAGAYA, M., KOBAYASHI, T. Metakaolin-based geopolymers for targeted adsorbents to heavy metal ion separation. J. Mater. Sci. Chem. Eng. 02, 16–27. 2014.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R.D. Supplementary Cementitious Materials. Cement and Concrete Research, p. 1244–1256, 2011.

MABROUM, S., MOUKANNAA, S., EL MACHI, A., TAHA, Y., BENZAAZOUA, M., HAKKOU, R. Mine wastes based geopolymers: A critical review. Cleaner Engineering and Technology. v.1, 100014, 2020.

NIU, X. ELAKNESWARANA, Y., ISLAMAN, C., PROVIS, J. SATO, T. Adsorption behaviour of simulant radionuclide cations and anions in metakaolin-based geopolymer. Journal of Hazardous Materials. V. 429, p.128–373. 2022.

OJURI, O., ADAVI, A., OLUWATUYI, O. Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction. Transp. Geotech. v. 10, p. 1–12, 2017.

OLUWASOLA, E.A., HAININ, M.R., AZIZ, M.M.A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. Transp. Geotech. v. 2, p.47–55, 2015.

OLUWASOLA, E.A., HAININ, M.R., AZIZ, M.M.A. Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings. J. Clean. Prod. V.122, p.315–325, 2016.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J. P.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*. v. 22, p. 1305–1314, 2008.

PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S. Ligantes Geopoliméricos. Uma Alternativa ao Cimento Portland. *Revista Ingenium*, Portugal, p.66-68, Nov./dez. 2009.

PALOMO, A., BLANCO-VARELA, M.T., GRANIZO, M.L., PUERTAS, F., VASQUEZ, T., GRUTZECK, M.W., Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*. v. 29, p.997-1004, 1999.

PALOMO, A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., CRIADO, M. Geopolymers: same basic chemistry, different microstructures. *Mater. Constr.* V.54 (275), p.77–91, 2004.

PALOMO, A., GRUZEK, M.W., BLANCO, M.T. Alkali-activated fly ashes: a cement for the future, *Cem. Concr. Res.* V. 29, p.1323–1329. 1999.

PARK SANG-SOOK; KANG WA-YOUNG. Characterization of fly ash-pastes synthesized at different activator conditions. *Korean J Chem Eng.* V.25(1); p.78–83. 2008.

PERA, J. Metakaolin and calcined clays, *Cem. Concr. Compos.* V.23, 2001.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J.L, LUKEY, G.C, VAN DEVENTER, J.S.J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results, *Chem. Mater.* V. 17 (12), P. 3075–3085 , 2005.

PROVIS, J.L., VAN DEVENTER, J. J. *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing Limited, UK, 2009.

PULIGILLA, S., MONDAL, P. Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer. *Cement and Concrete Research*. v. 43, p. 70–80, 2013.

PURDON, A. The action of alkalis on blastfurnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry - Transactions and Communications*. V. 59, p.191-202. 1940.

QIAN, G., SUNAN, D.D., TAY, J.H. Characterization of mercury- and zincdoped alkaliactivated slag matrix, part II, Zinc. *Cem. Concr. Res.* V. 33 (8), p.1257–1262, 2003.

ROCHA, R. A. Effect of high temperature in concretes: A review of literature. *InterScientia*. V. 6, nº1, 2018.

ROY, D.M. Alkali-activated cements: opportunities and challenges, *Cem. Concr. Res.* V.29, p.249–254,1999.

ROZEK, P., KRÓL, M., MOZGAWA, W. Geopolymer-zeolite composites: a review, *J. Clean. Prod.* V. 230, P. 557–579, 2019.

SÁ RIBEIRO, M. G., SÁ RIBEIRO, M. G., KEANEA, P. F., SARDELAD, M. R., KRIVENA, W. M., SÁ RIBEIRO, R. A. Acid resistance of metakaolin-based, bamboo fiber geopolymer composites. *Construction and Building Materials*. V. 302, p.124-194, 2021.

SHI, C., KRIVENK, P., & ROY, D. *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Abingdon, UK: Taylor & Francis. 2006.

SILVA, P., SAGOECCRENTIL, K., SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cem. Concr. Res.* V.37 (4), p.512–518, 2007.

SIYAL, A.A., SHAMSUDDIN, M.R., KHAN, M.I., RABAT, N.E., ZULFIQAR, M., MAN, Z., SIAME, J., AZIZLI, K.A. A review on geopolymers as emerging materials for the adsorption of heavy metals and dyes. *J. Environ. Manag.* 224, 327–339, 2018.

SOUTSOS, M., BOYLE, A.P., VINAI, R., HADJIERAKLEOUS, A., BARNETT, S.J. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers, *Constr. Build. Mater.* V. 110, P.33–368, 2016.

TIAN, Q. NAKAMA, S., SASAKI, K. Immobilization of cesium in fly ash-silica fume based geopolymers with different Si/Al molar ratios, *Sci. Total Environ.* V.687, p.1127–1137, 2019.

TIAN, Q., SASAKI, K. Application of fly ash-based geopolymer for removal of cesium, strontium and arsenate from aqueous solutions: kinetic, equilibrium and mechanism analysis. *Water Sci. Technol.* V. 79, p. 2116–2125. 2019.

THOMAS, J.J., CHEN, J.J., ALLEN, A.J., JENNINGS, H.M. Effects of decalcification on the microstructure and surface area of cement and tricalcium silicate pastes, *Cement Concr. Res.* V.34, p.2297–2307, 2004.

WALKLEY, B., KE, X., HUSSEIM, O.H., BERNAL, S.A., PROVIS, J.L. Incorporation of strontium and calcium in geopolymer gels. *J. Hazard. Mater.* V. 382, 121015, 2020.

WENG, L., SAGOECCRENTSI, K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I — low Si/Al ratio systems, *J. Mater. Sci.*, p. 2997–3006, 2007.

YANG J., YANG, X., LIU, W., ZHU, X., LIU, J., Preparation of autoclaved bricks based on gold mine tailings. *Fresenius Environ. Bull.* 2010.

YLINIEMI, PAIVA, FERREIRA, TIAINEN, ILLIKAINEN. Development and incorporation of lightweight waste-based geopolymer aggregates in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. v. 131, p.784–792. 2017.

YOUNG, G., YANG, M. Preparation and characterization of Portland cementclinker from iron ore tailings. *Constr. Build. Mater.* V. 197, p.152–156, 2019.

YUN-MING L., CHENG-YONG H., AL BAKRI M. M., HUSSIN K. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A Review. *Progress in Materials Science*. v. 83, p.595–629. 2016.

ZHANG, Z. PROVIS, J.L. MA, X., REID, A., WANG, H. Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*. V. 92, p.165–177, 2018.

ZHAO, S., FAN J., SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*. v. 50, p. 540–548. 2014.

ZHENG, Y.C., LI, Q., LIU, Y.J. Mine tailing as alternative to clay for producing belite cement clinker. *Adv. Mater. Res.* p. 726-731, 2013.

ZHENG, Z., LI, Y., CUI, M., YANG, J., WANG, H., MA, X., CHEN, Y. Insights into the effect of NaOH on the hydration products of solidified cement- NaNO_3 matrices and leaching behavior of Sr^{2+} , *Sci. Total Environ.* V. 755, 142581, 2021.

ZHENG, Z., LI, Y., ZHANG, Z., MA, X. The impacts of sodium nitrate on hydration and microstructure of Portland cement and the leaching behavior of Sr^{2+} , *J. Hazard Mater.* V. 388, 121805, 2020.

ZHUANG YU, X. CHEN L., KOMARNENI, S., ZHOU H., TONG S., YANG MIN H., YU H, WANG H. Fly ash-based geopolymers: clean production, properties and Applications. *Journal of Cleaner Production* v. 125, p. 253-267, 2016.

ZHU, Y., HU, J., WANG, J. Removal of Co^{2+} from radioactive wastewater by polyvinyl alcohol (PVA)/chitosan magnetic composite. *Prog. Nucl. Energy*. v.71, p.172–178. 2014.

ZHU, Y., ZHENG, Z., DENG, Y., SHI, C., ZHANG, Z. Advances in immobilization of radionuclide wastes by alkali activated cement and related materials. *Cement and Concrete Composites*. V. 126, 104377, 2022.

Capítulo 2



10.37423/241009402

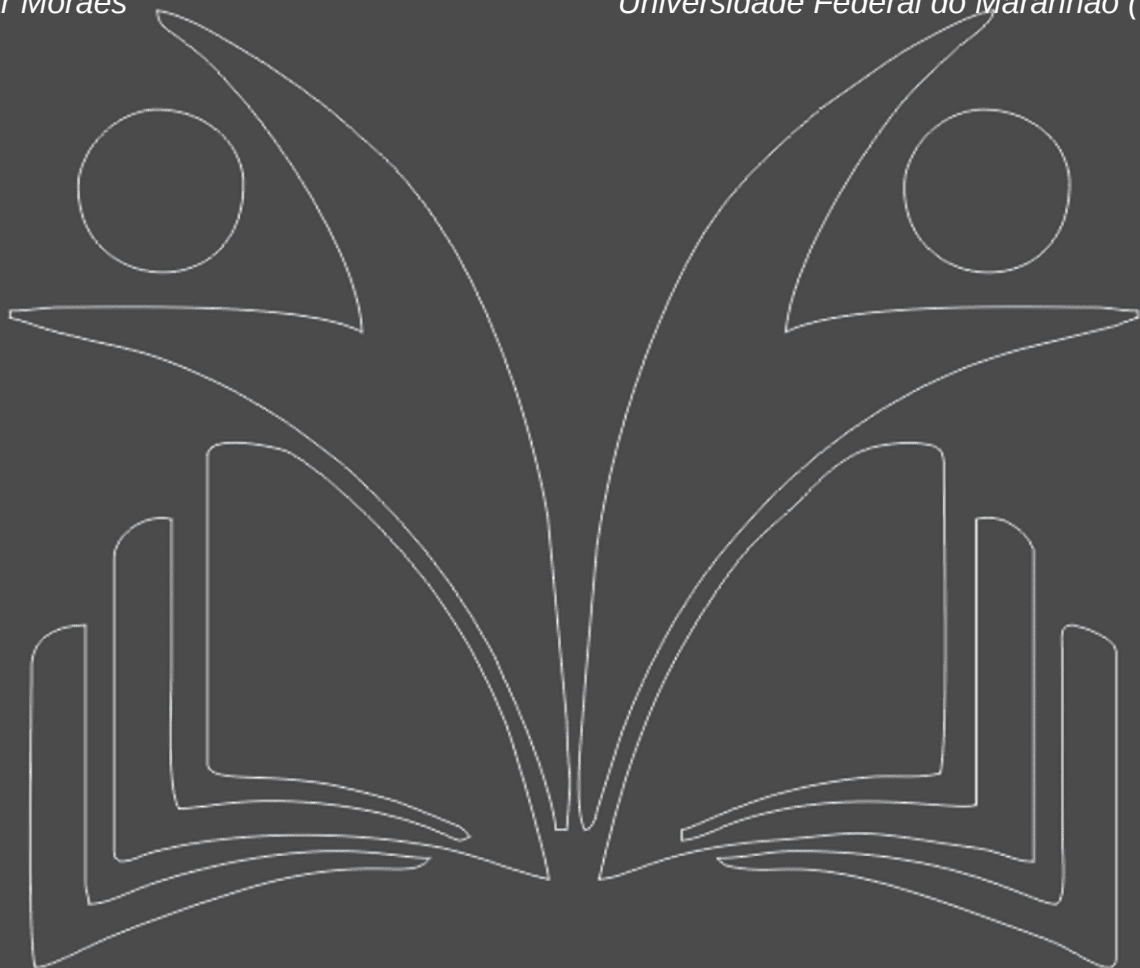
ANÁLISE DE CUSTO DE CICLO DE VIDA EM GUINDASTES

Lucas Emanuel Cardoso Soares

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Elson Cesar Moraes

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)



Resumo: Empresas competitivas buscam a redução de despesas, aliar confiabilidade de ativos e redução de custos é um desafio. No caso de ativos como guindastes móveis em que o investimento na aquisição é elevado, estratégias de redução de custo são imprescindíveis. Para isso, os setores de manutenção possuem dois principais métodos para gestão de ativos, a troca ou aluguel. Para embasar a tomada de decisões realizou-se a análise de disponibilidade de ativos com diferentes tempos de uso. Inicialmente o foco foi a realização de análises de Life Cycle Cost (LCC), mas em virtude da dificuldade de acesso a informações sobre custos, o trabalho foi direcionado ao estudo do ciclo de vida dos ativos. Para isso foram utilizados históricos de manutenção e dados de operação dos equipamentos. Uma análise de falhas com maior impacto no ano de 2022 é construída e a disponibilidade do equipamento demonstrada dentro do período analisado.

Palavras chave: Life Cycle, Guindastes Móveis, Gestão de ativos.

1. INTRODUÇÃO

No caso de estudo serão avaliados os guindastes em uma planta industrial, abordando duas soluções comuns na utilização de equipamentos móveis, a aquisição de dispositivos ou a terceirização (locação). Para analisar qual a solução mais viável para o contexto especificado será utilizada a ferramenta de LCC (custo de ciclo de vida), para isso serão considerados o perfil de perdas, informações técnicas, histórico de manutenção e disponibilidade de guindastes de uma empresa de mineração no período de um ano.

Os guindastes em uma planta industrial, são dispositivos utilizados para içar cargas. Portanto, considerados equipamentos auxiliares de manutenção, realizam o içamento de bobinas de correias transportadoras, redutores, estruturas metálicas, plataformas e outros. O que torna a disponibilidade do equipamento fundamental para a execução da manutenção ou obra em prazos estabelecidos, a indisponibilidade de um guindaste pode impactar negativamente em todo o processo de execução ou manutenção.

É necessário considerar que um equipamento pode falhar até mesmo seguindo o plano de manutenção, por isso é importante observar o impacto de uma falha na produtividade de uma planta industrial e encontrar soluções para suprir a indisponibilidade de um ativo como a adoção de um equipamento reserva ou a realização de estratégias de manutenção centrada na confiabilidade.

Na indústria as decisões devem ser bem fundamentadas, principalmente relacionadas a compra, descarte ou venda de um ativo, mas frequentemente são realizadas sem a devida análise. De modo geral, são avaliadas apenas características como o custo de reparo do ativo usado e o custo de aquisição de um novo ativo. A análise de LCC considera também a operação, descarte, impostos e impactos a produção e outros.

Além da análise quantitativa do LCC é importante realizar o estudo qualitativo do processo de manutenção. É fundamental considerar e debater os principais desafios encontrados no período de análise, como a capacitação de mão de obra, lead time do fornecimento de peças, eventos aleatórios (colisão), erros operacionais, adaptações para cumprir legislações. Desta forma, além dos fatores mencionados anteriormente é necessário considerar que a maneira como os dados são coletados e inseridos pode influenciar na incerteza do resultado de LCC. Dentro do período de analisado foram detectados erros de apontamento de tempo de manutenção, não liberação do equipamento para realização da manutenção preventiva.

Para contextualizar o escopo do trabalho é possível considerar o caso de equipamentos eletrônicos que têm a vida útil programada, pois em muitos casos o reparo tem valor muito próximo ao custo de um equipamento novo. Entretanto, nos casos de equipamentos com custo de aquisição elevado, a vida útil é significativa para determinar a compra, venda e descarte. De modo geral, os equipamentos móveis como caminhões, tratores e guindastes possuem a vida útil de 10 anos como padrão de mercado, mas o presente estudo busca avaliar esse padrão e determinar o período mais adequado. Por fim, subsidiar informações para determinar a opção de vender ou manter um guindaste móvel.

2. JUSTIFICATIVA

Usualmente a escolha de desativação e compra de um equipamento não avalia todos os parâmetros necessários, são levados em consideração apenas aspectos superficiais como o custo de reparo do equipamento antigo e o custo de aquisição de um equipamento novo. Também ocorre o aproveitamento de equipamentos que podem ser inviáveis economicamente. Assim como, o descarte de equipamentos que podem ter reparo economicamente viável.

Os custos são balizadores do desenvolvimento de uma empresa, a redução de gastos com equipamentos é um dos objetivos gerenciais. Portanto, um equipamento confiável e uma boa relação do custo de manutenção são metas sempre almejadas. Assim, o estudo de LCC possibilita avaliar se é viável manter, comprar ou alugar um ativo.

O tema é fundamental para auxiliar na tomada de decisão sobre gestão de equipamentos. Além de guindastes, equipamentos móveis como carretas, tratores, pás carregadeiras e outros como fornos, tornos, pontes rolantes, compressores. Além disso, esse estudo serve para além da vida corporativa, para vida pessoal na aquisição de um veículo ou compra de um imóvel.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar um estudo de custo de ciclo de vida de guindaste móveis. Utilizando do banco de dados de falhas e disponibilidade dos equipamentos no ano de 2022.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Realizar estudo teórico acerca dos conceitos de confiabilidade;
- Avaliar a disponibilidade física dos guindastes no período de um ano;
- Analisar as falhas com maior impacto no período;
- Estudar uma metodologia para análise de custo de

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os guindastes móveis são fundamentais para execução de obras e manutenções, possibilitam içar elementos de grandes dimensões para elevadas alturas sem a necessidade de uma estrutura auxiliar como no caso dos guindastes estacionários. Desta forma, a utilização de guindaste móveis para todos os terrenos é essencial em indústrias, pois os cenários são diversificados. Por exemplo: a necessidade de atuar em pequenos espaços; locais de difícil acesso e realizar atendimentos urgentes. Na Figura 1 é possível destacar duas aplicações de guindastes na construção civil: guindaste móvel e do tipo grua.

Os guindastes atuam como recursos auxiliares, a indisponibilidade do equipamento pode ocasionar efeito em cadeia, de modo a prejudicar o prazo final do serviço e gerar grande prejuízo. Assim é necessário que os ativos sejam confiáveis. Garantir a confiabilidade de guindastes exige conhecimento em diversas áreas como: hidráulica, mecânica, elétrica e eletrônica, são diversos sistemas isolados que conjuntamente possibilitam que o equipamento desempenhe seu deslocamento, içamento da carga com segurança e precisão. Desta forma, a mão de obra para manutenção em guindastes deve ser especializada.

4.1 GUINDASTES

Figura 1 - Guindastes na construção civil



Fonte: Adaptado de ABC (2018).

Os Guindastes são dispositivos mecânicos que possibilitam o içamento de estruturas e consequente montagem. O içamento da carga ocorre pela elevação a partir de cabos de aço que pendem da ponta da lança e transferem o peso da peça para o guincho do equipamento (FILHO,2005).

Os guindastes móveis são utilizados na indústria do transporte para a carga e descarga de mercadorias, na indústria da construção para a circulação de materiais e na indústria de transformação para a montagem de equipamentos pesados. No presente trabalho foi analisada uma frota de guindastes utilizados para a manutenção e construção de correias transportadoras, empilhadeiras de minério, carregadores de navios, viradores de vagões e movimentação de equipamentos pesados como bobinas de correias, redutores, estruturas metálicas, plataformas elevatórias, tratores e outros. Além disso, no Estado do Maranhão os guindastes são utilizados para instalação de turbinas eólicas, construção civil de pontes, galpões e outros.

Os principais tipos de dispositivos de içamento vertical são guias e guindastes. As guias possuem uma torre vertical acoplada conectada a uma lança horizontal. Os guindastes são formados por um veículo que se desloca pelo solo do qual uma lança se projeta para cima e forma diversos ângulos com a horizontal. Guias são utilizadas na montagem de edifícios de múltiplos andares, galpões e em pátios de estocagem de peças. São classificados em estacionários, ascensionais e móveis. A principal diferença entre guias e guindastes é que nas guias a lança nasce em uma cota acima do solo (FILHO,2005).

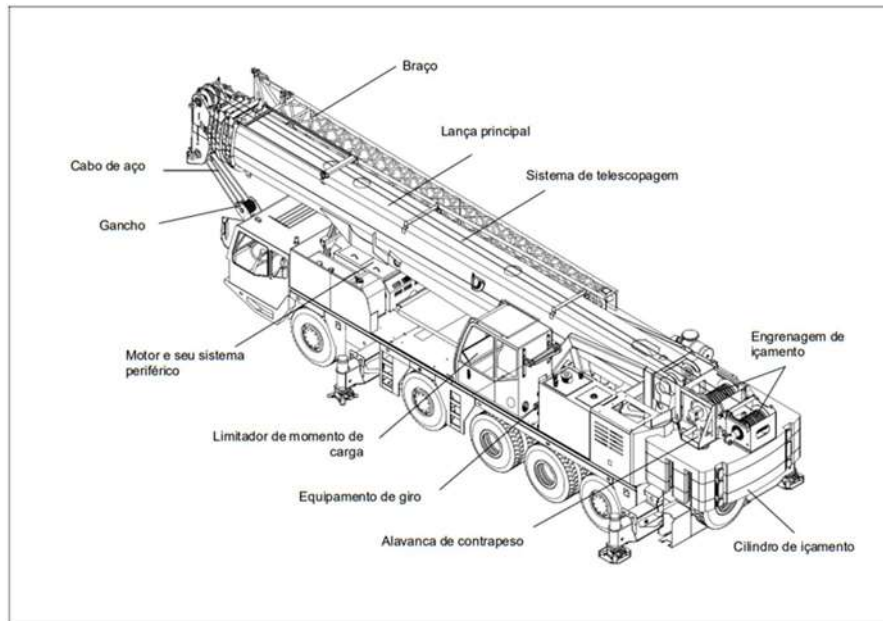
A escolha do guindaste é realizada a partir das tabelas de operação e características do equipamento que apresentam capacidade carga em função do raio de operação, o comprimento e o ângulo que a lança e a altura máxima alcançada pelo gancho de içamento. As tabelas de capacidade de um guindaste são utilizadas para indicar a carga máxima sob cada combinação de raio, lança e ângulo.

A capacidade dos guindastes é determinada pela resistência de seus elementos estruturais e pela sua resistência ao tombamento. Estas resistências são levadas em consideração na elaboração das tabelas de capacidade. Existem diversas situações que podem influir na estabilidade e, consequentemente, na capacidade de um guindaste são elas rigidez do solo, nivelamento do solo, velocidade do vento, carga fora do prumo, impacto, balanço de carga, patolas mal estendidas (FILHO,2005).

De modo geral, em guindastes móveis os componentes são dispostos da mesma maneira para todos os fabricantes, as maiores diferenças são relativas ao conceito do veículo. determinados guindastes são fabricados a partir de um caminhão comercial, outros guindastes possuem a cabine do caminhão com capacidade para apenas uma pessoa. No presente trabalho, os guindastes móveis analisados

possuem cabine do caminhão com capacidade para duas pessoas, cabine do operador, não são adaptações de caminhões comerciais e possuem disposição similar a Figura 2, variam apenas quanto à capacidade, com a menor capacidade de 30 Toneladas e maior capacidade de 300 Toneladas.

Figura 2 - Pontos de inspeção, manutenção em guindastes



Fonte: Adaptado de ZOOMLION (2023).

As principais empresas fabricantes de guindastes móveis presentes no Brasil são Liebherr, Zoomlion, Madal, Groove, Tadano, Terex e XCMG. Diante do pós venda atuante em todo o território nacional e elevada confiabilidade, a Liebherr tem sido a escolha das principais indústrias do Brasil.

A principal fabricante mundial de guindastes móveis para todos os terrenos é a Liebherr. Surgiu em 1969 em Eninghen na Alemanha e possui 40 guindastes de todo terreno de pneus e esteiras. A empresa é reconhecida pelo estado da arte na fabricação de guindastes, fornecendo sistemas de içamento seguros, fabricando componentes com excelente durabilidade e excelente pós venda (LIEBHERR,2023).

No mercado de máquinas pesadas a assistência dos fabricantes é bem presente, os fabricantes fornecem equipamentos de segunda mão, catálogos de peças, fornecem peças e também mão de obra para manutenções. Desta maneira, é possível destacar soluções de reforma de componentes que a Liebherr realiza, alguns exemplos na Figura

3. Tais informações podem subsidiar o estudo de ciclo de vida.

Figura 3 - Principais componentes reformados pela Liebherr

a - Motores a combustão



b - Guinchos



c - Cilindros Hidráulicos



d - Monitores



Fonte: Adaptado de LIEBHERR (2022).

Os acidentes com guindastes podem provocar ferimentos ou morte aos empregados, danos ao equipamento e ao ambiente de trabalho, alto custo de reparo e tempo de inatividade da obra e equipamento. As principais causas de acidentes em guindastes são falhas elétricas, uso indevido e desgaste dos componentes. Falhas elétricas são ocasionadas principalmente por componentes eletrônicos desgastados que provocam consequentemente mal funcionamento de dispositivos mecânicos e hidráulicos. Uso indevido pode ser consequência da amarração incorreta no dispositivo a ser içado, não utilização de plano de rigging, exceder a capacidade de içamento do equipamento, velocidade excessiva no içamento. O desgaste dos componentes é inevitável, mas é possível controlar o desgaste e substituir o componente no momento adequado, os principais componentes que sofreram desgaste são caixas de marcha, freios, engrenagens, rolamentos, cabos de aço. Desta forma, as principais causas de acidentes podem ser evitadas seguindo as recomendações do fabricante (GILLIONS,2020).

Plano de Rigging é o procedimento operacional para o içamento da carga com guindaste móvel, com objetivo de otimizar os recursos e determinar todos os passos da operação, usualmente as empresas estabelecem um limite de carga para a utilização ou não do plano. O plano de rigging é normatizado pela NR12 e NR18, Através do plano de rigging é elaborada e simulada a operação, recomendado acessórios e equipamentos a serem utilizados e avaliando condições ambientais como solo e vento e características do item a ser içado. (RIGGINGBRASIL, 2017).

Especificar um guindaste é uma tarefa complexa, pois diferentes características dos dispositivos podem ser conflitantes. As principais características avaliadas para a compra de um guindaste são capacidade máxima, altura máxima de elevação, potência do motor do caminhão, potência do motor da grua, velocidade máxima de translado, peso total do veículo, tamanho do reservatório de combustível, consumo de combustível, custo de acessórios, custo de manutenção, preferência do mercado de usados, preço de aquisição, classe de emissão, confiança no fabricante e segurança (GÖRÇÜN et al,2023).

4.2 ÍNDICES DE MANUTENÇÃO

Para retratar aspectos importantes de um processo são necessários indicadores, são importantes para medir a evolução de um cenário. A frase de Wiliam Thomson (Lord Kelvin), “Não se pode melhorar aquilo que não se pode medir”, é imprescindível para garantir a evolução dos setores de manutenção. Para melhorar o desempenho de um ativo, é necessário acompanhar seus indicadores de manutenção antes, durante e após as intervenções. Para que através dos indicadores seja possível encontrar melhorias. Com isso, o gerenciamento de indicadores de manutenção e escolher os indicadores adequados são intrínsecos a uma boa gestão de manutenção

Existem 6 indicadores que são classificados como Índices de classe mundial, pois a maioria dos países do ocidente os utiliza. Os indicadores estão no Quadro 1. É importante salientar que de acordo com a necessidade determinados indicadores são utilizados, os indicadores não devem servir apenas para preencher quadros de gestão à vista, mas sim para auxiliar na tomada de decisões.

Quadro 1 - Índices de classe mundial

Tópico	Descrição
1	MTBF - Mean Time Between Failures, TMEF - Tempo Médio Entre Falhas
2	MTTR - Mean Time To Repair, ou TMR - Tempo Médio de Reparo
3	TMPF - Tempo Médio Para Falha
4	Disponibilidade Física da Maquinaria
5	Custo de Manutenção por Faturamento
6	Custo de Manutenção por Valor de Reposição

Fonte: Adaptado de Viana, 2002.

Confiabilidade é a capacidade de um equipamento desempenhar a sua função requerida em um determinado tempo mediante manutenção adequada (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009). Dois conceitos são

importantes para quantificar a confiabilidade, MTTF que é o tempo médio entre falhas (tempo de funcionamento médio) e o MTTR que é o tempo médio entre reparos.

Para se obter o MTTF é necessário dividir a quantidade de horas disponíveis do equipamento pelo número de intervenções corretivas no período. Para se obter o MTTR é necessário dividir a quantidade de horas indisponíveis em virtude de manutenções corretivas pelo número de intervenções corretivas no período (VIANA, 2002).

A disponibilidade é definida como a capacidade de um item estar em condições de desempenhar a função requerida por um tempo determinado (NBR,1994).A Equação

(1) mostra o indicador disponibilidade representa o percentual de dedicação para operação de um equipamento, em relação a quantidade de horas no período (VIANA, 2002).

$$\text{DISPONIBILIDADE} = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} \quad (1)$$

CMPF(Custos de manutenção por faturamento) é um indicador que considera itens como pessoal, materiais, contratação de serviços externos, depreciação e perda de faturamento. Entretanto, custos como perda de faturamento e custos de depreciação não são comumente considerados, apesar de que cerca de 2/3 dos custos totais de manutenção sejam contribuição de custos de pessoal e materiais (VIANA, 2002).

CPMV (Custo de manutenção por valor de reposição) corresponde a relação entre o custo total de manutenção de um equipamento com o seu valor de compra, o conceito é aplicado para equipamentos com elevada criticidade. De modo geral o CPMV deve ser inferior a 6% para ser considerado viável, entretanto diante do panorama da indústria valores superiores podem ser admitidos (VIANA, 2002).

4.3 CUSTO DE CICLO DE VIDA

A redução de custos é o principal objetivo das empresas, na área de equipamentos móveis duas principais estratégias são adotadas: Aumento da vida útil dos ativos ou a terceirização dos equipamentos. Para subsidiar a tomada de decisões surgiu a análise de custo de ciclo de vida (LCC – Life Cycle Cost).

O custo de aquisição de ativo pode ser um falso indicativo de relação custo benefício. Para considerar o real custo de um ativo é importante avaliar o custo de ciclo de vida (WOODWARD, 1997).

Outras ferramentas para gestão de ativos como o Custo total de propriedade (TCO

- Total Cost of Ownership) e Avaliação do ciclo de vida (LCA - Life Cycle Assessment). A TCO contempla itens da LCC, entretanto não considera os custos de operação, é utilizada para avaliar fornecedores. A LCA contempla os custos ambientais (ASSIS, 2009).

O LCC considera todos os custos de manutenção, descarte de ativos, treinamento, custo de atualizações, consumo de energia, custo de instalação, os custos operacionais, os custos de energia, as manutenções, as reposições de peças, o estoque mínimo . Determinar custos futuros de manutenção de forma precisa é difícil, mas é possível utilizar informações de fabricantes, histórico de equipamentos, manutenções e falhas (ZAMPOLLI et al., 2019).

No Quadro 2, é possível verificar as principais categorias de custos para análises de LCC, a categorização dos custos é útil para encontrar os fatores que mais influenciam na vida de um ativo.

Quadro 2 - Custos considerados para o LCC

Tipo de Custo	Exemplos
Custo de aquisição	Investigação, projeto, teste, produção
Custos de distribuição	Transporte, logística, manuseio
Custos de manutenção	Estratégias de manutenção, peças sobresselentes
Custos de operação	Instalações, energia, impostos, seguros
Custos financeiros	Empréstimos, custos de oportunidade
Custos de formação	Formação de operadores
Custos de stock	Peças e materiais armazenados
Custos de desativação	Desmontagem

Fonte: Adaptado de Assis, 2009.

A previsão de custos é essencial para análise, é necessário ter o controle de informações dos ativos, como taxa de falhas, tempo de manutenção, previsão de peças sobressalentes, requisitos de manutenção, previsão de custo anual. Tais informações são coletadas durante a vida de ativos ou podem ser coletadas com fabricantes, empresas com ativos similares. Desta forma, a eficácia do estudo depende das informações coletadas, para isso é necessário que a empresa utilize de sistemas informatizados de gestão de manutenção e devem ser coletadas informações de operação como horas de operação, horas de produção, tempo de manutenção e impacto

financeiro de indisponibilidade, motivos de falha, causas de avarias , tempo de manutenção de custo, peças utilizadas e custos (WOODWARD, 1997).

Para alicerçar o estudo de ciclo de vida é necessário distinguir as informações interessantes das informações úteis, a escolha de dados pode conduzir o estudo a conclusões precipitadas e a perda de tempo. Na coleta de dados são necessárias estimativas e suposições, o que proporciona incertezas. As principais fontes de incerteza são diferenças na performance de equipamentos e sistemas, modificações na utilização e variação de preços (WOODWARD, 1997).

4.4 Tipos de manutenção

A manutenção tem origem no século XVI com o surgimento dos teares manuais. A maior evolução dos conceitos de manutenção surgiu no século XX com o avanço e velocidade das transformações das indústrias. É necessário compreender o primeiro conceito de manutenção que é a manutenção corretiva e acompanhar a evolução dos sistemas de manutenção como por exemplo a RCM (Manutenção Centrada em confiabilidade) e avançando sobre conceitos como manutenção preventiva, preditiva e manutenção produtiva total. Desta forma, a manutenção deixou de ter apenas a missão de manter mas agora busca manter com menor custo e com melhor qualidade.

Manutenção corretiva ocorre após a quebra ou parada do equipamento, ocorre de maneira inesperada. A natureza deste serviço é de solução imediata, entretanto a necessidade de restabelecer o equipamento imediatamente gera pontos de fragilidade como a necessidade de compra de peças com urgência, trabalho sob pressão e atraso na produção. Tais fragilidades podem impactar na eficácia e eficiência do serviço (ALMEIDA, 2015).

Manutenção preventiva, ocorre de maneira planejada e programada em datas predeterminadas para evitar paradas inesperadas do equipamento. Esse tipo de manutenção foi possibilitado a partir dos históricos de falha dos equipamentos. Como tudo é planejado é possível comprar as peças com o melhor custo, utilizar a mão de obra de maneira equilibrada, possibilitando confiabilidade dos ativos (ALMEIDA, 2015).

Manutenção preditiva através de manutenção é possível verificar o estado de funcionamento em tempo real e monitorar os parâmetros do equipamento como ruído, vibração, temperatura dentre

outros. Esse tipo de manutenção possibilita utilizar a vida útil máxima dos componentes do equipamento e planejar as intervenções no equipamento (ALMEIDA, 2015).

Manutenção produtiva total, é um tipo de manutenção que combina características da manutenção preventiva e preditiva de modo que o próprio operador do equipamento acompanhe os parâmetros do equipamento e realize procedimentos de manutenção preventiva. Desta forma, o equipamento é sempre monitorado e a mão de obra do operador é totalmente aproveitada (ALMEIDA, 2015).

A MCC (Manutenção Centrada em confiabilidade) é um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que um ativo continue a desempenhar sua função. A MCC é resultado da análise de confiabilidade a partir da utilização de manutenção preventiva e corretiva, em que descobriu-se que a manutenção preventiva não é eficaz em todos os casos, pois há muitos itens em que não é possível definir o período de manutenção programada (MOUBRAY, 1996).

A partir dos estudos de MCC foram definidas 7 perguntas que servem como premissa para essa metodologia, presentes no Quadro 3.

Quadro 3 - Perguntas balizadoras do MCC

Item	Perguntas balizadora para o MCC
1	Quais são as funções e padrões de desempenho de um ativo no seu contexto presente de operação?
2	De que forma ele falha em cumprir suas funções?
3	O que causa cada falha funcional?
4	O que acontece quando ocorre cada falha?
5	De que forma cada falha importa?
6	O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?
7	O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proativa?

Fonte: Adaptado de Moubray, 1996.

4.5 PERFIL DE PERDAS

Consiste em uma análise de Pareto para classificar as falhas dos equipamentos com o objetivo de filtrar as falhas mais importantes e classificá-las quanto a origem dos desvios, e focar na solução dos problemas mais relevantes. A análise de Pareto consiste na regra de que cerca de 80% das falhas estão relacionadas a 20% dos componentes do equipamento (MADU, 2000)

Na indústria analisada o perfil de perdas é construído a partir da base de dados de falhas, é realizada a classificação do problema quanto a sistema, conjunto e item e causa raiz. É uma ferramenta utilizada nas indústrias para definir itens com prioridade para manutenção e também auxilia para criar ações gerenciais como por exemplo mapear aspectos com necessidade de capacitação dos colaboradores.

Desta forma, para auxiliar na análise de LCC é importante estratificar as principais perdas nos equipamentos. De modo a analisar os itens com maior impacto para cada guindaste e também na visão de frota quais os componentes com maior contribuição para indisponibilidade do ativo.

4.6 ANÁLISE DE FALHAS

O tratamento das falhas é fundamental para realizar ações de modo que as falhas não sejam recorrentes. Diante da grande quantidade de falhas é necessário filtrar quais devem ser analisadas e desenvolver o estudo de modo eficaz e em tempo hábil. É necessário que rodadas de debate sejam realizadas para que as causas e soluções sejam tomadas de modo a contemplar todos os aspectos de manutenção e operação (XENOS, 1998).

As 5 principais ferramentas para análise de falhas são Cinco porquês, Diagrama de Ishikawa, árvore lógica de falhas, Diagrama de Pareto, Diagnóstico de Inteligência artificial (TRACTIAN, 2022). Algumas ferramentas computacionais são plataformas que contemplam os métodos de análise de falha e geram relatórios como o Xfracas e planilhas de Excel essas ferramentas são frequentemente utilizadas nas indústrias.

A coleta de informações é fundamental para análise de falha e diagnóstico da causa raiz. É fundamental coletar registros fotográficos, relatos quanto ao modo de operação e manutenção e também a coleta de informações do histórico de manutenção nos softwares de gerenciamento como por exemplo o SAP. Após a conclusão da análise de falha é fundamental produzir informativos para a manutenção e operação e também relatórios para os gerentes, pois desta forma é possível reduzir ao máximo a chance de reincidência da falha são geradas ações para tratar possíveis falhas semelhantes e planos de ação, como resultado podem ser solicitados capacitação operação, alteração do plano preventivo, capacitação da manutenção, compra de ferramentas e até mesmo alteração de projeto do equipamento.

5. METODOLOGIA

Será realizado estudo de LCC em uma frota de guindastes móveis para todos os terrenos, utilizados em porto privado. A frota é composta de 11 guindastes de diferentes fabricantes, capacidades e ano de fabricação. Para concentrar a análise serão analisados os guindastes da fabricante Liebherr que correspondem a 9 guindastes, os dados técnicos e de operação estão na Tabela 1 e são ilustrados na Figura 4.

Para auxiliar no estudo de LCC será analisado no período de um ano (2022), o banco de dados de falhas (Perfil de perdas), dados de disponibilidade física dos ativos no período e dados do sistema de manutenção e custos de manutenção.

O desenvolvimento do presente trabalho utilizou de conhecimentos da literatura através de estudo teórico das normas, artigos científicos e manuais técnicos. Os resultados obtidos foram desenvolvidos em ferramentas computacionais como PowerBi, Excel e Matlab.

Figura 4 - Guindastes com capacidades similares aos utilizados no trabalho



Fonte: Adaptado de LIEBHERR (2022).

A manutenção dos equipamentos foi realizada por 4 mecânicos disponíveis para atendimentos diurnos e 2 mecânicos para atendimentos noturnos. Os mecânicos são de uma empresa terceirizada e são auxiliados por um inspetor próprio da empresa. A equipe de mecânicos é composta por funcionários com diferentes experiências na manutenção de guindastes. A maioria dos atendimentos são realizados no local de operação do guindaste, o que dificulta o diagnóstico em virtude da dificuldade de acesso e disponibilidade de ferramentas.

A aquisição de dados de disponibilidade e classificação de falhas foi realizada pela equipe de confiabilidade da oficina, realizando o lançamento de dados em uma base de dados da empresa e coletando informações com a equipe de manutenção, inspetor dos equipamentos e operação.

Tabela 1 - Dados Técnicos dos Guindastes Liebherr

Tag	Capacidade (TON)	Fabricação (Ano)	Horímetro Caminhão	Horímetro Grua	Odômetro (Km)
GD-01	70	2011	2.551	1.098	16.883
GD-02	70	2011	1.582	873	14.111
GD-03	90	2011	26.276	13.789	14.681
GD-07	150	2002	79.427	64.864	26.201
GD-08	30	2006	36.847	61.670	22.217
GD-09	300	2009	6.796	14.480	4.931
GD-12	220	2016	16.528	8.943	5.918
GD-14	130	2008	43.227	11.079	20.027
GD-15	220	2011	9.420	12.109	47.792

Fonte: Autor

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão discutidos e apresentados os principais resultados obtidos, comparando com os existentes na literatura.

A análise do perfil de perdas no período possibilita inferir quais os itens mais propensos a falhar nos guindastes e desta forma entender os itens importantes para o custo de ciclo de vida.

6.1 ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DOS ATIVOS

Os valores de disponibilidade alcançados no período podem ser visualizados na Figura 5. A disponibilidade geral dos guindastes no período analisado foi de 65,2%. O menor desempenho da frota foi no mês de Novembro com 57,6% e o maior desempenho foi no mês de julho com 75%. Durante o período de julho a outubro a frota não dispunha de inspetor específico. Desta forma, a performance dos equipamentos no período não foram prejudicadas pela ausência do inspetor, o qual tem a função de agir de modo preventivo e preditivo de forma a detectar as futuras necessidades do maquinário e também tem papel fundamental no diagnóstico de problemas complexos.

Figura 5 - Disponibilidade Física dos Guindastes



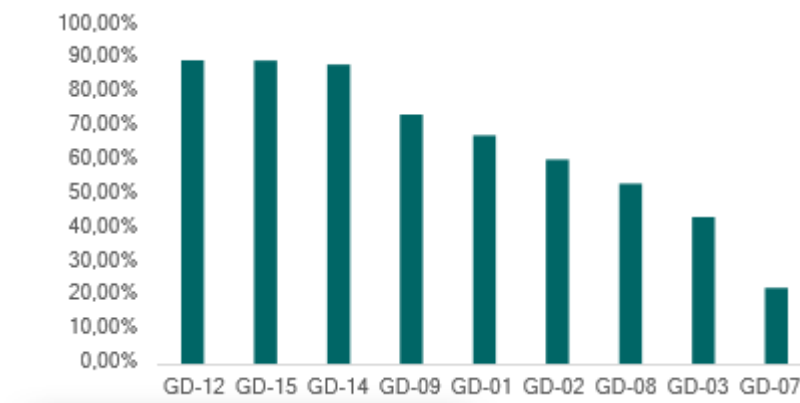
Fonte: Autor

Apesar do valor médio de disponibilidade não ser próximo ao apresentado por RAHMAN (2022) em que a disponibilidade no período de 1,5 anos foi de 99,31%, é necessário entender o contexto do trabalho em que foi analisado apenas um guindaste no período, com capacidade de 80 toneladas do fabricante SANY operando em um porto da Indonésia, mas a idade e horímetro do equipamento não foram mencionados. Um fator que ocasiona a redução no valor de disponibilidade obtido neste trabalho é que os guindastes em reforma externa continuaram a ser considerados no indicador.

Segundo SANY(2023) e RAHMAN (2022) a disponibilidade alvo para guindastes é acima de 90%, o que deve ser compatível para atender demandas de plantas industriais. Na frota analisada esse valor foi atingido até mesmo pelos guindastes menos confiáveis, mas por um período curto de tempo. Como exemplo, o GD-07 teve melhor desempenho no ano com 75% de disponibilidade e o GD-08 obteve melhor desempenho no período com 98,5% de disponibilidade. Desta forma, os guindastes menos confiáveis apresentaram picos de disponibilidade, mas que não foram sustentáveis ao longo do período analisado. A meta de desempenho da frota estipulada pela equipe de confiabilidade foi de 71,5%, o desempenho obtido representa 87% do esperado.

A partir da Figura 6 é possível observar a disponibilidade média por guindaste no período de um ano. Portanto, os guindastes com melhor desempenho foram os guindastes: GD-12, GD-14, GD-15 e obtiveram picos de desempenho em torno de 98% de disponibilidade e média anual de 90%. O equipamento menos confiável foi o GD-07 e o mais confiável foi o GD-12. O resultado geral é consequência das reformas nos guindastes GD-02 e GD-03. O GD-02 sofreu reforma geral por 128 dias em função de folga na mesa de giro. O GD-03 sofreu reforma geral em virtude folga na mesa de giro por 235 dias. O GD-08 sofreu intervenção devido a vazamento em cilindro hidráulico por 128 dias. Já o GD-01 passou 91 dias para reparo do sistema de abertura e fechamento da lança.

Figura 6 - Disponibilidade por guindaste



Fonte: Autor

6.2 MTBF E MTTR

Na Figura 7 é possível avaliar os indicadores MTTR e MTBF, é necessário avaliar ambos indicadores, pois estes produzem o indicador disponibilidade. O maior tempo médio entre falhas ocorreu no mês de dezembro e corresponde a 2,1 vezes o menor valor no período, que ocorreu no mês de setembro. Quanto ao tempo médio entre reparos o maior valor ocorreu no mês de dezembro sendo correspondente a 2,5 vezes o menor valor no período, que ocorreu no mês de julho. Desta forma, é possível verificar a característica da curva na forma de dente de serra no comportamento dos indicadores, os resultados bons não são mantidos, mas podem ser resultado de impactos por diferentes guindastes.

Figura 7 - MTBF e MTTR



Fonte: Autor

O MTBF é um indicador importante para gerar o indicador DF, quanto maior o valor melhor o desempenho do equipamento. O MTTR também é importante para a disponibilidade, quanto menor o valor melhor para o desempenho do equipamento. Além da disponibilidade de um equipamento é importante observar como o indicador é construído, para que possam ser traçadas estratégias para

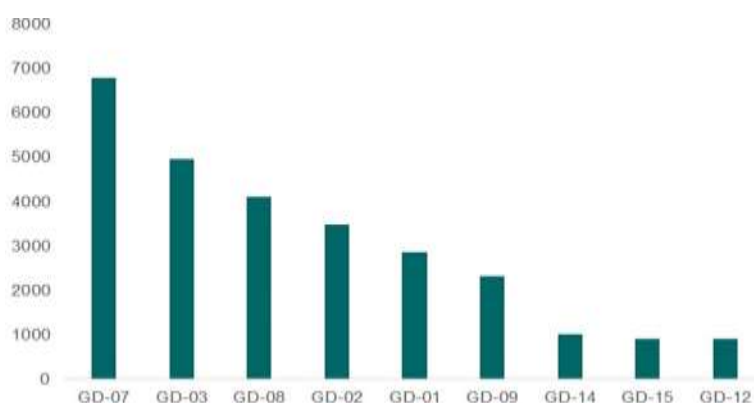
solução de problemas crônicos e críticos, tanto em áreas como capacitação da mão de obra e também estratégia de materiais sobressalentes.

Avaliando os equipamentos com menor disponibilidade no período, é possível verificar que o GD-08 possui o menor MTBF com o valor de 97,3 horas e MTTR de 45,7 horas. O GD-03 possui o maior MTBF com o valor de 312,9 horas e MTTR de 177,4 horas. Apesar do tempo de reparo elevado do GD-03 é necessário considerar que a disponibilidade do equipamento quando operacional no ano foi em média 96%.

Analizando os equipamentos com melhor disponibilidade no período, é possível verificar que o GD-14 possui o menor MTBF, com o valor de 134,8 horas entre falhas e MTTR de 15,8 horas. Enquanto que o guindaste GD-15 possui o melhor MTBF, de 336,9 horas e MTTR de 35,2 horas. Desta forma, demonstra que o guindaste com problemas mais frequentes é o GD-14, mas apesar das falhas possui excelente disponibilidade. Os valores de MTBF e MTTR.

A partir da Figura 8 é possível evidenciar quais os equipamentos foram enviados para manutenção em fornecedor externo e também é possível destacar os equipamentos com problemas críticos. Os guindastes GD-07, GD-03, GD-08, GD-02, GD-01 foram enviados para manutenção externa. O GD-01 enfrentou uma falha crítica em campo, em que foi necessário grande quantidade de tempo para mobilizar o equipamento para a oficina.

Figura 8 - Horas em manutenção



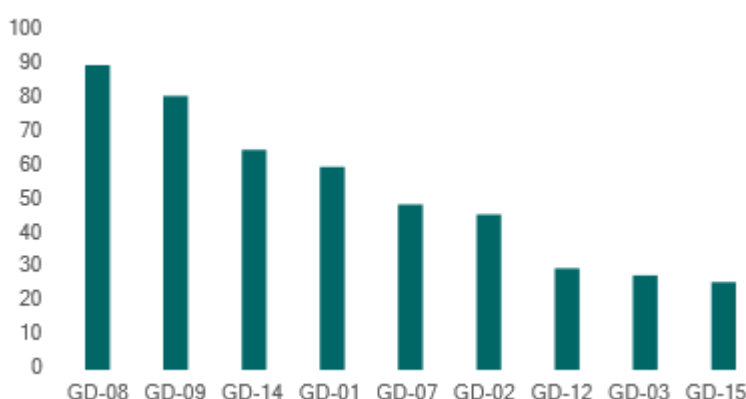
Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 9 é possível visualizar a quantidade de falhas por guindaste, o guindaste com maior quantidade de falhas é o GD-08 e com a menor quantidade de falhas é o GD-

15. É possível observar que a quantidade de falhas não é diretamente proporcional à disponibilidade física de um equipamento, pois podem ocorrer falhas que não interrompem significativamente o

funcionamento do equipamento, e podem ocorrer poucas falhas mas que requeiram grande quantidade de tempo para solução do problema. Desta forma, avaliar a quantidade de falhas pode não ser um bom indicador, principalmente para equipamentos com grande quantidade de falhas. Além disso, um equipamento pode possuir pendências identificáveis em inspeções que não inviabilizam a operação do equipamento a curto prazo, mas que podem impactar significativamente a longo prazo quando não tratadas.

Figura 9 - Quantidade de falhas por guindaste



Fonte: Autor, 2023.

6.3 PERFIL DE PERDAS

É importante estratificar quais os sistemas provocaram falhas em um equipamento, para assim priorizar nos sistemas mais críticos, ou seja, sistemas com maior quantidade de falhas e maior tempo de reparo. Uma ferramenta utilizada nas indústrias é a utilização do diagrama de Pareto, estratificação de perdas ou perfil de perdas. Desta forma, essa ferramenta possibilita trabalhar nos itens mais críticos e fornecer insumos para tomadas de decisões estratégicas a longo prazo.

A partir da classificação de falhas estruturada pelo setor, foram determinados 22 sistemas para todas as frotas, entretanto na frota de guindastes apenas 15 sistemas tiveram mais ocorrências, e foram representados na Figura 10a. O sistema com maior quantidade de falhas é o sistema elétrico, enquanto que o sistema mecânico possui a menor quantidade de falhas. O sistema mecânico obteve apenas 6 falhas no ano, com eventos relacionados a redutores, estrutura e sustentação.

O sistema não identificado tem grande quantidade de eventos, essa classificação é resultado de atendimento concluído mas sem retorno de ordem de manutenção, atendimento concluído com retorno de manutenção inconclusivo ou atendimento em que o equipamento não apresentou

problema. Para diminuir esse tipo de classificação é necessário que as equipes de manutenção sigam atentamente a rotina de retorno de manutenção e foco na padronização dos retornos de manutenção. Desta forma, a classificação não encontrada deve ser tratada, para que reflita apenas atendimentos em que o equipamento não apresenta problema, e assim as reais informações possam contribuir para melhores tomadas de decisões.

Figura 10 - Estratificação de falhas por sistema



Fonte: Autor

Na Figura 10b é possível visualizar os sistemas com maior impacto na disponibilidade em virtude do tempo de manutenção. O maior impacto foi ocasionado pelo sistema mecânico e o menor impacto foi o material rodante. O sistema mecânico obteve esse resultado acumulado em função da manutenção da coroa de giro do GD-02 e GD-03, durante o tempo de 232 dias na manutenção do GD-03 foi realizada uma reforma geral no equipamento em motor a combustão, sistemas hidráulicos e estrutura assim como no GD-02.

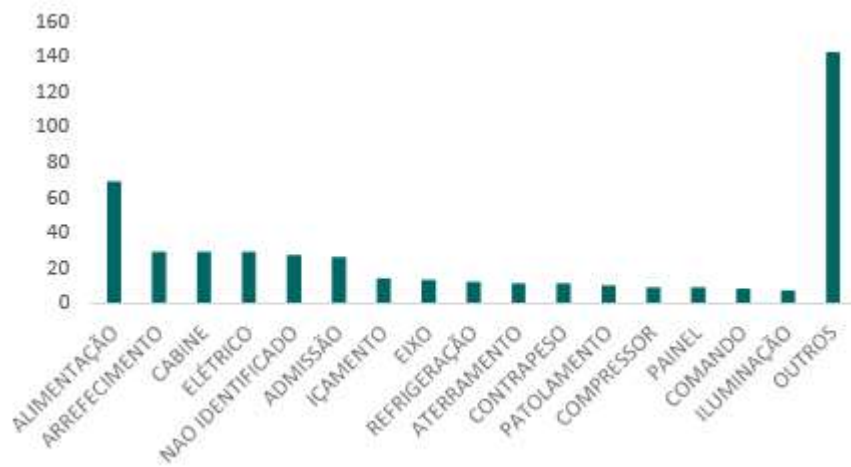
O sistema elétrico tem a maior quantidade de falhas e exige o segundo maior tempo de manutenção. É importante ressaltar que diversos problemas como sistema elétricos necessitam da troca completa da cordoalha, entretanto diversas vezes constatou-se a necessidade de reparo rápido para que o equipamento retorne ao trabalho. Os problemas elétricos são em parte gerados por adaptações nas instalações elétricas para instalação de ar condicionado, sistemas de monitoramento de pressão das patolas e outros, para adequar os equipamentos mais antigos às regras atuais da empresa. O desgaste da cordoalha também foi relatado, com grande influência do tempo de operação e da exposição a material agressivo como o minério de ferro. As adaptações geralmente não são bem dimensionadas o que causa grande quantidade curtos e necessidade troca de fusíveis.

Na Figura 11a é possível verificar que o conjunto com maior quantidade de falhas é o de alimentação que é correlacionado ao sistema elétrico. O segundo conjunto com maior quantidade de falhas é o de arrefecimento que é ocasionado por chamados relacionados a completar do fluido, resultado da redução natural do fluido pela não estanqueidade do sistema e também por vazamentos. A coluna de outros conjuntos tem grande quantidade de falhas, o que demonstra a diluição de problemas em diversos conjuntos, o que torna necessário avaliação mais detalhada para que sejam propostas soluções definitivas para as falhas.

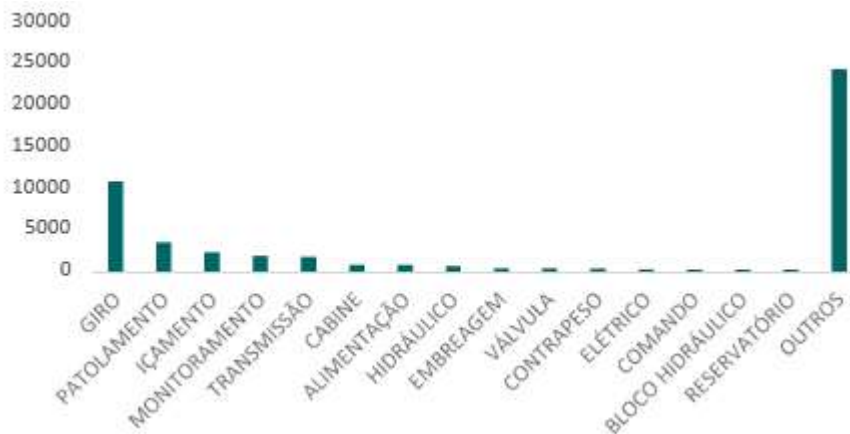
Na Figura 11b é possível verificar novamente o impacto das falhas no sistema mecânico resultado do conjunto giro para a reforma do GD-02 e GD-03. Os conjuntos de monitoramento e alimentação são relacionados a problemas elétricos. O conjunto de içamento foi ocasionada pela falha do GD-01 que necessitou cerca de 3 meses para solução do problema, em virtude da dificuldade de diagnóstico da falha e a correção do problema exigiu acesso ao interior da lança do guindaste, que é uma tarefa em espaço confinado com isso o equipamento foi enviado para oficina externa para realização do reparo no carrinho da lança. O conjunto de patolamento é resultado do tempo de manutenção de cilindros hidráulicos.

Figura 11 - Estratificação de falhas por conjunto

a) QUANTIDADE DE FALHAS POR CONJUNTO



b) QUANTIDADE DE HORAS EM MANUTENÇÃO POR CONJUNTO

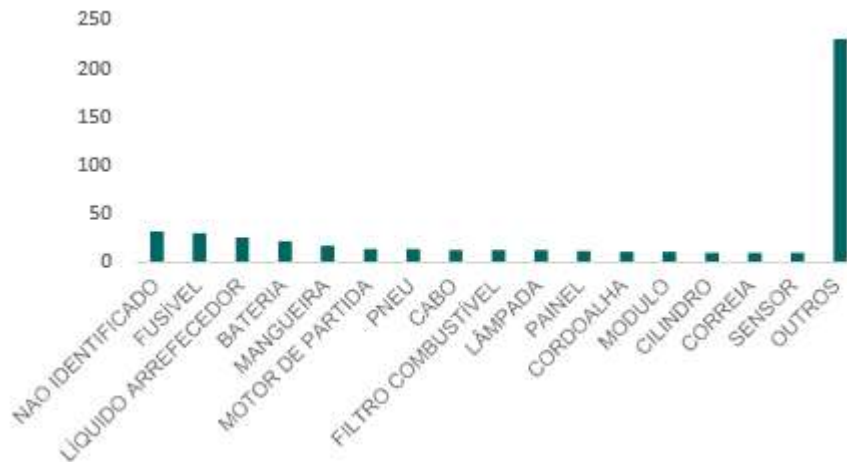


Fonte: Autor

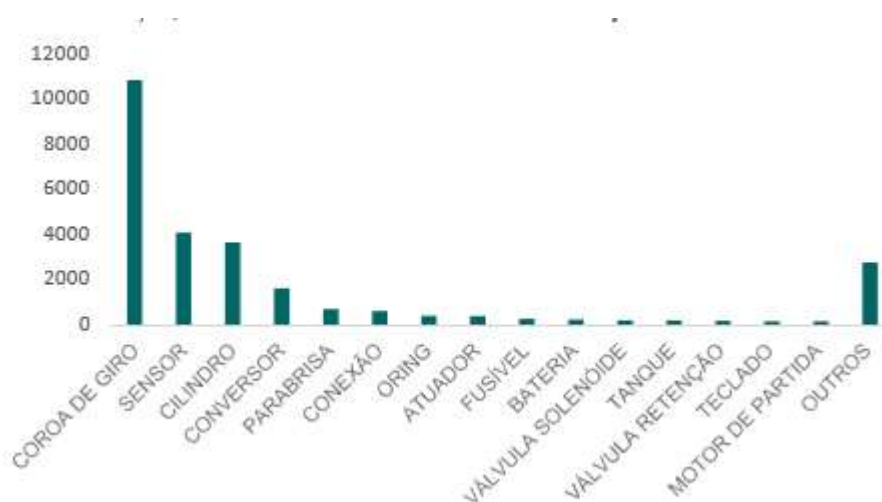
Na Figura 12a é possível verificar a grande quantidade de falhas não identificadas, que podem ser resultado de não preenchimento do retorno ou não haver falha no equipamento, para solucionar esse desvio é necessário maior disciplina dos mantenedores ao preencher as ordens de serviço. O elevado número de outros itens como compressor de ar condicionado, ventilador, vazamentos e outros.

Figura 12 - Estratificação de falhas por item

a) QUANTIDADE DE FALHAS POR ITEM



b) QUANTIDADE DE HORAS EM MANUTENÇÃO POR ITEM



Fonte: Autor

Na Figura 12b é possível verificar o impacto de indisponibilidade ocasionado pela manutenção da coroa de giro nos guindastes GD-02 e GD-03. O tem sensor é relacionado a falha elétrica no GD-07, e o cilindro resultado da intervenção no GD-08, a falha no conversor ocorreu no GD-09 que passou por uma reforma geral. Desta forma, a estratificação por item e tempo de manutenção permite visualizar o impacto das principais falhas no ano.

6.4 ANÁLISES DE FALHAS

As principais falhas estão evidenciadas na Tabela 2. Os eventos são uma base para compreender quando o equipamento necessita de reforma ou intervenção demorada.

Tabela 2 - Falhas com maior impacto em 2022

Ativo	Falha	Tempo (Dias)
GD-03	DESGASTE NA COROA DE GIRO	234
GD-02	DESGASTE NA COROA DE GIRO	129
GD-08	VAZAMENTO NA PATOLA	129
GD-01	NORMALIZAR COMANDOS DA LANÇA	91
GD-07	FALHAS ELÉTRICAS	77
GD-09	VAZAMENTO NA TRANSMISSÃO	67
GD-12	PARABRISA FRONTAL COM AVARIA	28
GD-07	VAZAMENTO HIDRÁULICO	24

Fonte: Autor

6.4.1 COROA DE GIRO

A coroa de giro permite a grua do guindaste movimentar 360° enquanto sustenta o peso da grua, do objeto içado e dos contrapesos. Caso a folga da coroa de giro esteja maior que o recomendado pelo fabricante há o risco de colapso do guindaste. Esse item exige inspeção constante e lubrificação periódica (POTESTA, 2016).

Figura 13 - Coroa de giro



Fonte: Adaptado de Allslewingbearing, 2023.

Na Figura 13, é possível visualizar o componente que ocasionou a reforma geral dos guindastes GD-02 e GD-03 e contribuiu para o grande período de indisponibilidade dos equipamentos. A coroa de giro deve ser inspecionada frequentemente e deve ter sua folga medida em no mínimo quatro pontos, a folga deve ser comparada ao limite recomendado pelo fabricante do equipamento, a folga e largura dos dentes da coroa e pinhão devem ser medidas e comparadas aos parâmetros máximos tolerados. Os parafusos da coroa de giro devem ser medidos, verificados, torqueados e substituídos quando necessário (WORKSAFE AUSTRALIA, 2006)

6.4.2 CILINDROS

Os guindaste possuem diversos cilindros hidráulicos, possibilitando a movimentação e sustentação do equipamento. Estão presentes nas patolas, contrapeso, lança, direção e etc. A perda de pressão ou movimento involuntário do cilindro pode provocar tombamento do guindaste, a presença de vazamentos pode ocasionar danos ao meio ambiente. Desta forma, a inspeção rotineira do equipamento deve avaliar os cilindros. Além disso, a inspeção detalhada deve avaliar aspectos como vazamento, folga da haste e deslocamento involuntário da haste. Na Figura 14, é possível verificar a visão explodida de um cilindro hidráulico.

Figura 14 - Visão explodida de um cilindro hidráulico



Fonte: Adaptado de Hydroline, 2023.

No período analisado a maior parte dos cilindros falhou devido ao fim da vida útil das vedações. Em alguns casos pontuais identificou-se a presença de sujeira dentro do cilindro. O tempo de reparo dos cilindros pode ser grande em virtude da necessidade de reparo em fornecedor externo. Na empresa estudada é realizada a manutenção de cilindros de pequeno e médio porte, o que diminui consideravelmente o tempo de indisponibilidade do equipamento. Além disso, é recomendável manter reparos sobressalentes para os cilindros e assim garantir agilidade na entrega do produto.

6.4.3 TRANSMISSÃO

A Figura 15 apresenta uma transmissão de guindaste Liebherr, geralmente são fornecidas pela ZF. A transmissão pode falhar por falta de troca do fluido no período determinado pelo fabricante, uso inadequado e desgaste por tempo. No caso estudado haviam vários desvios relacionados a manutenção preventiva, como falta de material, não seguimento dos planos de manutenção, e os planos de manutenção foram implantados há apenas 2 anos. O que pode ser um fator contribuinte para a falha do guindaste GD-09.

Figura 15 - Transmissão de um guindaste Liebherr



Fonte: Adaptado de Machinery Line Australia, 2023.

6.4.4 VIDROS

Os vidros estão presentes nos guindastes, no caminhão são utilizados no para- brisa e vidros das portas, na grua é utilizado no teto e nas laterais. Com exemplificado na Figura 16. A avaria no vidro pode ser resultado de colisão provocada por falha na operação ou pode ser aleatória. Durante o período de análise ocorreram 10 eventos de quebra de vidros, o que pode inviabilizar a utilização do equipamento em função da localização e tipo do dano ao vidro.

A avaria pode comprometer a visibilidade ou estilhaçar sobre o operador, é importante salientar que os vidros dos guindastes podem ser temperados ou laminado de acordo com a aplicação. Se a avaria não atrapalhar a operação do equipamento e a equipe de segurança validar a operacionalidade do equipamento, esse não necessita ficar indisponível, caso contrário o equipamento deve aguardar o provisionamento do novo vidro, que em alguns casos pode demorar mais de um mês. Para solucionar o tempo de espera pode ser adotada a estratégia de material sobressalente.

Figura 16 - Vidros em um guindaste móvel sobre rodas



Fonte: Adaptado de LIEBHERR (2023).

6.5 DEFEITOS APRESENTADOS PELOS EQUIPAMENTOS

Segundo a NBR 5462 defeito é qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos, defeito pode ou não afetar a capacidade de um item em desempenhar uma função requerida. Enquanto que a falha é o término da capacidade de um item em desempenhar a função requerida.

6.5.1 CORROSÃO

O fenômeno da corrosão pode impossibilitar a utilização do equipamento, está muito presente nos equipamentos mais antigos, tanto nos guindaste da frota como em pás carregadeiras e carretas, como exemplo na Figura 17. A corrosão pode avançar de modo a requerer reforma estrutural do equipamento, o que exige grande quantidade de tempo, inviabilizando a utilização do equipamento.

A corrosão nos guindastes usualmente está presente na cabine da grua e do caminhão, carenagem e também nos chassis do equipamento. Nas cabines a corrosão é facilmente perceptível em virtude do fácil acesso, em geral tem origem na área de vedação dos vidros. Dentre as soluções para minimizar a corrosão pode ser realizada a mudança no tipo de vedação dos vidros e também a lavagem mais frequente dos equipamentos, pois de modo geral os veículos não possuem rotina de lavagem, apenas é exigida lavagem para as manutenções preventivas.

Figura 17 - Corrosão metálica



Fonte: IPCM (2021).

6.5.2 MODOS DE DIREÇÃO

A falha nos modos de direção impacta a qualidade da operação dos guindastes, pois dificulta a realização de manobras em espaços reduzidos. Em casos de falha nesse sistema, o guindaste continua operacional, mas fica restrito a locais amplos e de fácil manobra. No período analisado 5 guindastes apresentaram esse defeito. Na Figura 18, é possível visualizar o funcionamento dos modos de direção.

Figura 18 - Funcionamento dos modos de direção

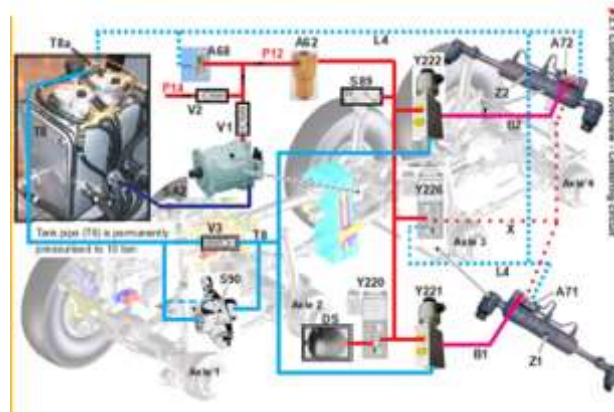


Fonte: Adaptado de LIEBHERR (2016).

O sistema permite facilitar a manobra dos equipamentos através do esterçamento de uma quantidade variável de eixos, o sistema é popularmente conhecido como modo caranguejo e é composto por bombas hidráulicas, válvulas, sensores e bloco de controle. O sistema é controlado eletronicamente e utiliza uma rede complexa de sensores e acionamentos esterçar os eixos, o sistema esquematizado está na Figura 19. A tecnologia está presente em 7 dos 9 guindastes avaliados, exceto nos mais antigos (GD- 07 e GD-08) em que o esterçamento é realizado manualmente pelo operador do equipamento através de comandos na cabine do caminhão.

É importante observar que o defeito ocorreu em 5 equipamentos da frota, até mesmo no guindaste reformado no ano de 2021, o GD-09. A falha nos equipamentos não ocorreu no sistema completo, em alguns foram trocados componentes do sistema enquanto que em outros equipamentos o sistema foi substituído por completo. A vida útil do sistema não é estipulada pelo fabricante e não há intervalo de manutenção programada para os componentes. Desta forma, podem ser traçadas estratégias de substituição programada de componentes como sensores, componentes como bloco hidráulico tinham a vida do equipamento com cerca 12 anos de operação, mas o sistema completo tem custo elevado.

Figura 19 - Diagrama do sistema de modos de direção



Fonte: Adaptado de LIEBHERR (2016).

6.5.3 PNEUS

Durante o período analisado os pneus foram trocados por dano ou por tempo de uso. Em casos de dano, foram ocasionados por colisões com objetos agressivos como pedras e estruturas metálicas. Quando os pneus possuem muito tempo de uso, a troca pode ser requisitada por decisões de segurança ou por apresentarem danos facilmente visíveis a olho nu como trincas e rachaduras, como exemplificado na Figura 20. No período analisado foram detectados pneus com mais de 10 anos.

Desta forma, no caso analisado o desgaste dos componentes não é significativo, pois os equipamentos atuam apenas na planta industrial, necessitando apenas de pequenos deslocamentos o que pode ser atestado pela hodômetro dos equipamentos, o equipamento mais antigo possui apenas 47 mil km apesar dos 20 anos de operação. Pois os equipamento são transportados em carretas no caso de manutenção em oficina externa fora da cidade.

Figura 20 - Avaria em pneu



Fonte: Adaptado de LC TYRES (2023).

6.5.4 OUTROS DEFEITOS

Em diversos defeitos e falhas a causa raiz pode ser detectada rapidamente, porém em virtude da indisponibilidade de peças os equipamentos podem necessitar o tempo de aprovisionamento dos componentes, o que pode demorar além do tempo estipulado em virtude de demora no transporte, falhas em documentações e necessidade de importação. Para operacionalizar o equipamento de maneira mais rápida são utilizados componentes alternativos presentes no mercado local, utilizando de adaptações para disponibilizar o equipamento mais rapidamente, o que pode ser viável entretanto a solução definitiva deve ser planejada.

Os componentes como baterias, motores de partida e alternadores caso não estejam operacionais podem inviabilizar a operação de um equipamento. Os compressores de ar condicionado podem ocasionar um defeito pois prejudica funcionalidades do equipamento e consequente conforto do operador, mas em caso de necessidade o equipamento pode içar objetos sem o funcionamento do ar condicionado. Quando ocorre a falha do alternador e baterias o equipamento pode funcionar utilizando baterias novas, mas será recorrente a necessidade de baterias carregadas. A opção de apenas substituir bateria em caso de falha no alternador resolveu paliativamente o funcionamento de um equipamento e foi opção recorrente no período analisado para que os guindastes pudessem concluir suas atividades planejadas. Os componentes como alternadores, motores de partida, baterias e compressores de ar condicionado foram gargalos no ano de 2021, são exemplificados na Figura 21.

Durante o período do trabalho foi observado que não há política de adoção de materiais sobressalentes como motores de partida, alternadores e compressores. O que pode aumentar o tempo de inatividade de um ativo caso falhem. Entretanto existe a prática de um estoque mínimo de baterias, mas que não tem sua vida útil catalogada.

Figura 21 - Componentes críticos



Fonte: Adaptado de Advanceautoparts (2023).

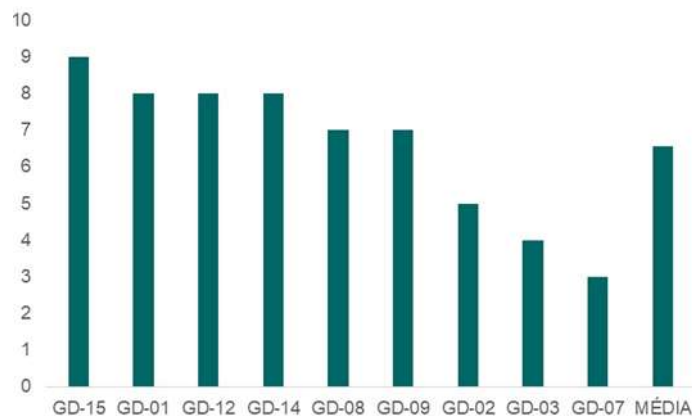
Os sistemas de ar condicionado, são importantes para a operação dos equipamentos com conforto e ergonomia, as intercorrências foram provenientes de falha na instalação elétrica que foi adaptada nos guindastes mais antigos. Outra falha na manutenção dos ar condicionados é relacionada ao cumprimento dos procedimentos de manutenção orientados pelos fabricantes de compressores como DENSO, SANDEN, DELPHI que orientam a substituição do sistema completo com a troca de condensador, compressor e evaporador. Além disso passos como vácuo e limpeza do sistema podem não serem realizados no tempo estipulado pelo fabricante, o que pode reduzir a vida útil do sistema de ar condicionado.

6.6 MANUTENÇÕES PREVENTIVAS

A partir da Figura 22 é possível verificar que a quantidade média de manutenções no período foi de 6,5 preventivas, enquanto que o programado seriam 12 manutenções.

Considerando a indisponibilidade dos equipamentos que passaram por reforma, o valor médio de 7,1 manutenções por equipamento no período analisado. A quantidade de preventivas pode não refletir na disponibilidade do equipamento a curto prazo, entretanto o agravamento de problemas pode ocasionar resultados catastróficos a longo prazo.

Figura 22 - Quantidade de manutenções preventivas



Fonte: Autor, 2023

A aderência ao tempo planejado das preventivas executadas foi de 65% no período, por fatores como tempo reduzido de liberação para preventiva, pequena de mão de obra disponível, erro de planejamento, pessoas não seguem o plano. Para o GD-12 e GD-08 a aderência ao tempo planejado de preventiva foi de 58%, GD-15 com 90%.

Para a realização de manutenções preventivas os equipamentos não foram liberados pelo período necessário e frequência programada. As manutenções dos equipamentos são em função da estimativa de operação dos equipamentos que é de cerca de 24 horas por dia, as preventivas geradas pelo sistema de manutenção tem média de 30 dias e contemplam os itens contemplados por revisões programadas múltiplas de 500 horas, com os itens orientados pelo fabricante. O período pode ser considerado conservador, entretanto é necessário considerar que os equipamentos operam em regime quase ininterrupto e o ambiente é agressivo, o que pode ser constatado nos planos de manutenção executados através da presença de filtros de ar obstruídos e da presença de muitos contaminantes no diesel.

Outro aspecto importante é a quantidade de horas que os planos de manutenção foram realizados. Durante o período analisado foram identificadas falhas nos procedimentos de manutenção preventiva, como não realização das tarefas conforme plano de manutenção programado. A falha na lubrificação dos itens de manutenção é um item crítico, pois nos guindastes analisados são indicados três tipos de graxa: para cabos, lança e mancais rolamentos e coroa de giro. Em determinadas manutenções as aplicações foram trocadas, o que a longo prazo pode provocar profundos danos aos componentes do equipamento e pode ser uma das causas do desgaste excessivo da coroa de giro no GD-02 e GD-03.

6.7 REFORMA DE EQUIPAMENTOS

A empresa não determina a vida útil dos ativos mas a orientação é que operem por 10 anos, mas como os guindastes são ativos com alto valor de aquisição, a vida útil tende a ser estendida. A idade média da frota é de 12,6 anos, 8 dos 9 equipamentos passaram por no mínimo um processo de reforma, o único ativo que não passou por reforma foi o GD-12 que é o ativo mais novo da frota.

Quadro 4 - Tempo de vida de guindastes móveis

Capacidade do guindaste	Limite de anos de fabricação
Abaixo de 50 Toneladas	20 anos
Entre 50 e 100 Toneladas	25 anos
Acima de 100 Toneladas	30 anos

Fonte: Adaptado de Singapore ministry of manpower, 2007.

A partir da literatura é possível considerar o tempo de utilização adequado. O Brasil não possui regulamentação de tempo de utilização de guindastes, poucos países possuem tal critério, por exemplo em Singapura a restrição de utilização de guindastes é de 20 a 30 anos conforme o Quadro

4. O período de vida pode ser prolongado por meio da validação de agentes credenciados que munidos de relatórios técnicos contendo dados de manutenção, operação, acidentes e inspeções detalhadas e ensaios mecânicos de componentes.

Na Austrália a vida estimada dos guindastes pode ser categorizada em mecânica e estrutural. Para os mecânicos a vida planejada é de 10 anos, e para a estrutura 25 anos. As inspeções devem seguir as recomendações dos fabricantes, mas quando a informação não estiver disponível alguns itens críticos devem ser avaliados como exemplo coroa de giro, fixação da coroa de giro, guinchos, componentes hidráulicos, sistema de freio, sistemas de acionamento, polias, Moitão, motores hidráulicos, caixas de marcha, eixo cardã (WORKSAFE AUSTRALIA,2006).

Quadro 5 - Dados complementares dos guindastes

Guindaste	Anos de operação	Comentários
GD-01	11	
GD-02	11	Reforma parcial na Liebherr. Ano de 2021
GD-03	11	Reforma externa. Ano de 2022
GD-07	20	Reformado Liebherr (Chassis). Ano de 2018
GD-08	16	Reformado Liebherr (Elétrica e Giro). Ano de 2019
GD-09	13	Reformado Liebherr. Ano de 2021
GD-12	6	
GD-14	15	Reformado Liebherr. Ano de 2017
GD-15	11	Reformado Liebherr. Ano de 2020

Fonte: Autor, 2023

A partir da Quadro 5 é possível visualizar a quais os guindaste já realizaram reforma. Apenas o GD-01 e GD-12 não passaram por reformas. Desta forma, são os equipamentos mapeados para serem reformados, assim como os mais antigos GD-07 e GD-08. A partir das reformas gerais ocorridas foi possível quantificar que o custo de reforma é equivalente a um terço do valor de um equipamento novo. Como guindastes são equipamentos com custo de aquisição na casa de milhões de reais, mas permite que o equipamento opere por mais longos anos com confiabilidade.

Para estabelecer o custo de ciclo de vida mais abrangente é necessário ter controle detalhado e completo dos custos de manutenção. Entretanto, não foi possível ter essa perspectiva em virtude da descentralização das ferramentas de compra na empresa, em que muitas compras não tem rastreabilidade de custos e são misturados com custos de outras áreas da empresa. Foi possível acompanhar detalhadamente apenas os custos de reforma geral. Desta forma, para obter o custo de ciclo de vida mais preciso é necessário controlar todo o custo de manutenção do equipamento durante

a vida útil e acompanhar o perfil de perdas. Observou-se que os custos de manutenção preventiva são similares para equipamentos novos e usados.

7. CONCLUSÃO

A confiabilidade da frota analisada é inferior aos estudos analisados. A idade média da frota é de 12,6 anos, que é superior a vida útil dos sistemas mecânicos estipulados por órgãos internacionais. As condições de operação dos veículos analisados são bem diferentes dos trabalhos científicos encontrados. Os veículos operam 24 horas por dia, enquanto que os equipamentos da literatura operam 8 horas por dia. Além disso, as condições do ambiente são bem agressivas pela presença do minério de ferro, o que pode acelerar o desgaste de componentes elétricos e a corrosão da estrutura.

Durante o período analisado a frequência de manutenções preventivas foi de 60% do planejado. E a aderência ao tempo de manutenção planejado das preventivas executadas foi de 65%. Desta forma, é possível constatar que os equipamentos não seguem os planos preventivos, a manutenção predominante é corretiva. Durante o período analisado não foi possível estabelecer relação significativa entre a disponibilidade do ativo e o seguimento de planos de manutenção. O que pode refletir que a manutenção preventiva traz impactos a longo prazo.

Foi possível perceber que os ativos que já passaram por reforma tem confiabilidade próxima a equipamentos mais novos e que não passaram por reforma. Entretanto, os equipamentos reformados há mais tempo apresentaram confiabilidade ruim no período analisado. No período analisado foi possível verificar que um guindaste com boa confiabilidade pode apresentar componentes no fim da vida útil.

A avaliação de custos realizada foi simplificada em virtude da não disponibilidade do banco de dados adequado. Os custos da empresa são descentralizados, os componentes são geralmente comprados em blocos em que podem abranger diversos guindastes. Além disso, os registros de custos anteriores a 2019 não são precisos. Desta forma, os custos mais facilmente rastreáveis foram os custos para reforma, e equivale a um terço do valor de aquisição de um equipamento novo similar. Enquanto os custos de aluguel podem facilmente ultrapassar o valor do ativo após 5 anos.

No período analisado foram identificados pontos vulneráveis nos fluxos e processos de manutenção, como a Implementação de monitoramento de horímetro e consumo de combustível dos guindastes para controlar a utilização do equipamento e medir a eficiência energética. Desta forma, realizar a manutenção de acordo com o tempo de operação e assim reduzir custos e utilizar recursos com

eficiência. Outra estratégia para controlar custos e pode aumentar a confiabilidade é o acompanhamento da vida útil de componentes como baterias, motores de partida, alternadores e compressores.

Os planos de manutenção podem ser aperfeiçoados, de modo a contemplar as características de uso dos equipamentos. Os planos de manutenção devem ser dinâmicos e sofrerem constantes evoluções, o que não foi verificado no período em virtude do complexo fluxo de alteração de planos de manutenção (necessário desembaraçar o processo de dados mestres com a engenharia).

Os custos de manutenção foram um grande desafio no desenvolvimento do trabalho, os custos são concentrados em plataformas de gerenciamento, mas não podem ser estratificados conforme os itens adquiridos. Além disso, foi verificada a compra de itens com identificação do sistema não condizente com o item recebido. O que é reflexo da necessidade de compras em fornecedores locais com descrições genéricas que contemplem itens presentes nos contratos.

Desta forma, durante o período foi possível verificar pontos de melhoria nas manutenções e relatar causas que comprometem os processos de manutenção e são causadas pela operação. Com isso, o presente trabalho consiste em uma introdução aos conceitos de manutenção industrial e princípios de funcionamento de guindastes.

9. REFERÊNCIAS

ABC,America Associated Builders and Contractors. Implementing OSHA's New Cranes and Derricks Rule | ABC. Disponível em: <<https://abcksmo.org/news/implementing-oshas-new-crane-derricks-final-rule/>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

ABNT, NBR. 5462. Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, p. 6, 1994.

Advance Auto Parts | Car & Truck Replacement Parts, Aftermarket Auto Parts, Performance Parts & Accessories. Disponível em: Acesso em: 9 jul. 2023.<<https://shop.advanceautoparts.com/>>.

ALLSLEWINGBEARING. Mobile crane slewing bearing, 2010. Disponível em: <<https://www.allslewingbearing.com/project/lm-1050/>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

ALMEIDA, PAULO SAMUEL; ROCCA, JAIRO ESTEVÃO. Manutenção mecânica industrial princípios técnicos e operações. Saraiva Educação SA, 2015.

ASSIS, Rui; JULIÃO, Jorge. Gestão da manutenção ou gestão de activos?(Custos ao longo do ciclo de vida). In: 10º Congresso de Manutenção, Figueira da Foz. 2009.

FOGLIATO, Flávio; RIBEIRO, José Luís Duarte. Confiabilidade e manutenção industrial. Elsevier Brasil, 2009.

GILLIONS, S. Common Causes of Crane Failure. Disponível em:

<<https://www.lloydsbritish.com/blog/common-causes-of-crane-failure>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

GÖRÇÜN, Ömer Faruk; DOĞAN, Gürkan. Mobile crane selection in project logistics operations using Best and Worst Method (BWM) and fuzzy Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS). Automation in Construction, v. 147, p. 104729, 2023.

HYDROLINE. How to assemble a hydraulic cylinder? Experts of hydraulics. Disponível em: <<https://hydroline.fi/blog/hydraulic-cylinder-assembly/>>. Acesso em: 01 jul. 2023.

IPCM. Corrosion: what it is, how it develops, what are the most corrosive environments, and how metals can be protected - IPCM. Disponível em:

<<https://www.ipcm.it/en/article/corrosion-process-corrosive-environments-metal-protection.aspx>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

LC TYRES . Earthmover Tyre Damage Information Booklet. Disponível em:

<https://www.hsa.ie/eng/Your_Industry/Quarrying/Maintenance_Operations/Tyre_Changing_and_Repair/Earthmoving_Tyre_Safety_-LC_Tyres.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2023.

LIEBHERR. Guindaste móvel telescópico. Disponível em:

<<https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/guindastes-moveis-sobre-esteiras-e-pneus/guindastes-moveis/liebherr-guindastes-moveis/lm-informacoes.html>>. Acesso em: 13 maio. 2023.

LIEBHERR. Guindaste móvel telescópico. Disponível em:

<<https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/guindastes-moveis-sobre-esteiras-e-pneus/guindastes-moveis/liebherr-guindastes-moveis/itm-informacoes.html>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

LIEBHERR. This is how to Build Cranes Mobile Crane Technology at a Glance. [s.l: s.n.]. Disponível

em:<<https://www.liebherr.com/shared/media/mobile-and-crawler-cranes/brochures/mobile-crane-technology/liebherr-mobile-crane-technology-p415-00-e04-2016.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2023.

LIEBHERR. Reman & repair programme for mobile and crawler cranes. Disponível em:

<<https://www.liebherr.com/en/gbr/products/mobile-and-crawler-cranes/service/reman-and-repair-programme.html>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

MADU, Christian N. Competing through maintenance strategies. International Journal of Quality & Reliability Management, 2000.

MOUBRAY, John. Introdução à manutenção centrada na confiabilidade. São Paulo: Aladon, p. 129, 1996.

PEDRO, Isabel; FILIPE, José António; RODRIGUES, Bruno. Implementation of a program for the analysis of the costs of equipments' maintenance until the end of their useful life. International Journal of Latest Trends in Finance and Economic Sciences, n. 4, p. 196-200, 2011.

PINHO, Mauro Ottoboni. Transporte e montagem. 2005.

POTESTA, R. Slew Ring Bearing Condition Monitoring to Ensure Safe Crane Operation. Disponível em: <<https://www.slewpro.com/blog/slew-ring-bearing-condition-monitoring-to-ensure-safe-crane-operation#:~:text=A%20failure%20of%20the%20slew>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

RAHMAN, Faisal et al. Availability Optimization of the Mobile Crane Using Approach Reliability Engineering at Oil and Gas Company. Mathematical Modelling of Engineering Problems, v. 9, n. 1, 2022.

RAHMAN, Faisal et al. Optimization maintenance performance level through collaboration of overall equipment effectiveness and machine reliability. Journal of Applied Engineering Science, v. 20, n. 3, p. 917-936, 2022.

RIGGINGBRASIL. Plano de Rigging qual a principal finalidade na movimentação de carga? Disponível em:<<https://riggingbrasil.com.br/plano-de-rigging/#:~:text=O%20Plano%20de%20Rigging%20%C3%A9>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

SANY. Manutenção de guindastes: o que é e em qual frequência fazer? Disponível em:

<<https://sany.centrooestemg.com.br/blog/manutencao-de-guindastes/>>. Acesso em: 1 jul. 2023.

SINGAPORE MINISTRY OF MANPOWER. Mobile cranes extension criteria for the service life of mobile cranes. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.mom.gov.sg/>>-

/media/mom/documents/safety-health/circulars/2007/circular-20070327-limit-on-the- years-of-service-of-mobile-cranes-extension-criteria-for-the-service-life-of-mobile- cranes.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2023.

TRACTIAN.5 ferramentas fundamentais para a análise de falhas. Disponível em: <https://traction.com/blog/5-ferramenta-fundamentais-para-a-analise-de-falhas>. Acesso em: 5 jun. 2023.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. PCM-Planejamento e Controle da manutenção. Qualitymark Editora Ltda, 2002.

WOODWARD, David G. Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. International journal of project management, v. 15, n. 6, p. 335-344, 1997. WORKSAFE AUSTRALIA. Mobile crane Code of Practice 2006. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<https://www.worksafe.qld.gov.au/ data/assets/pdf_file/0019/17128/mobile-crane-cop- 2006.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2023.

XENOS, Harilaus G. Gerenciando a manutenção produtiva. Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial, v. 171, 1998.

ZAMPOLLI, M. et al. Gestão de ativos: guia para a aplicação da norma ABNT NBR ISO 55001 considerando as diretrizes da ISO 55002: 2018. International Copper Association Brazil, v. 2, 2019.

ZOOMLION. Manual de manutenção guindaste de caminhão. Disponível em:

<<https://www.zoomlion.com.br/wp-content/uploads/2022/12/ZTCT25-80-Manual-de-Manutencao.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

Capítulo 3



10.37423/241009403

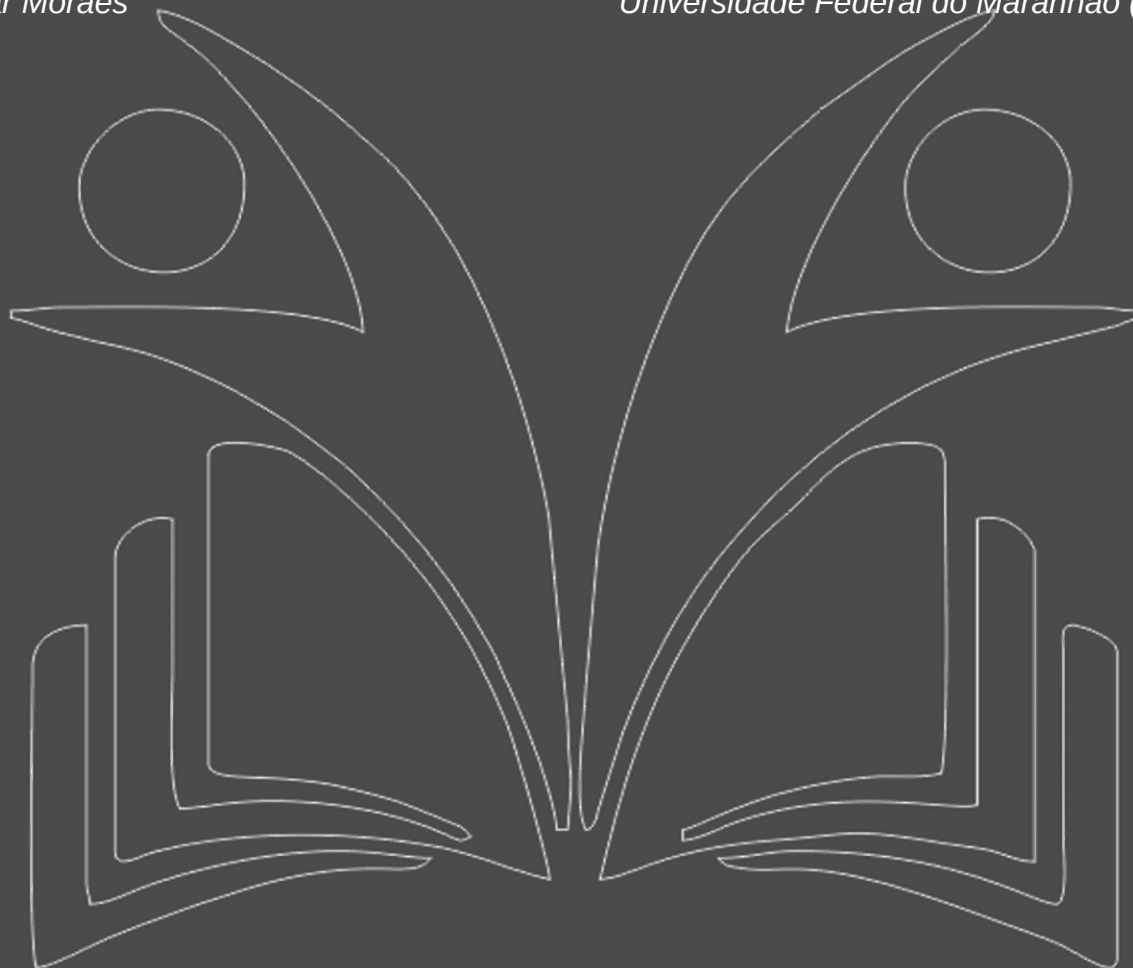
AVALIAÇÃO DE PLANO PREVENTIVO EM CAMINHÕES DE UMA EMPRESA DE TRANSPORTE DE REFRESCOS

David Luis Coelho da Silva

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Elson Cesar Moraes

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)



Resumo: Ao realizar um estudo sobre a manutenção em frotas de peso elevado percebeu-se que tem poucos dados sobre o assunto, principalmente sobre a manutenção dos pneus e as técnicas utilizadas para se evitar maiores danos aos veículos. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar um sistema de transporte de uma empresa de refresco com base em indicadores de manutenção preventiva, levando em consideração os impactos da rota percorrida, peso livre transportado e qualidade das inspeções. A metodologia escolhida é estruturada em um estudo de caso exploratório, descritivo e analítico do objeto estudado. Os dados utilizados para análise foram retirados da plataforma SAP, e com o uso de indicadores, tais como, o peso do caminhão, a velocidade média, telemetria, etc, utilizando como ferramenta o FMEA. Com os resultados da análise, ações de melhorias foram realizadas tais como: aumentar a viscosidade do óleo 15W40, para evitar o desgaste dos motores; estabelecer uma manutenção preventiva padronizada e melhorar o planejamento de distribuição de peso dos veículos para se obter um menor custo e aumento da qualidade de vida dos equipamentos.

Palavras-chave: manutenção preventiva, peso, distribuição de peso, planejamento.

1 INTRODUÇÃO

A análise de falhas é uma prática rotineira dentro da manutenção de equipamentos mecânicos, sendo está um item importante para prevenir problemas de quebras ou baixo desempenho dos maquinários , contudo nem sempre foi assim. Segundo DUTRA (2019), até o começo de 1945, o ato de realizar a manutenção era apenas concertar quando ocorria a falha, ou seja, aplicar a manutenção corretiva. Posterior a Segunda Guerra Mundial, a economia global evoluía e a competitividade crescia a passos longos. O cenário levou a perspectiva que não era vantajoso permitir um equipamento operar até a quebra, surgindo ali a manutenção preventiva. Segundo VIANA (2002), o surgimento do termo "manutenção", é indicado a finalidade de manter em bom estado de funcionamento todo e quais quer equipamento, ferramenta ou dispositivo, ocorrendo na década de 1950 nos EUA, nesse período na Europa tal termo ocupava os espaços de produtividade, em necessidade de "conservação "dos equipamentos.

Como a chegada da Terceira Revolução Industrial em meados de 1969, a tecnologia da informação adentrou a indústria. O que culminou na introdução de braços robóticos nas linhas de produção, Comandos Lógicos Programáveis, Automação eletropneumática, etc. Ao mesmo tempo, os processos de manutenção se beneficiaram da tecnologia, surgindo assim a manutenção Preditiva. Contemplando as técnicas de Inspeção instrumental tais como: Análise de Vibração, Análise de Óleo, Termografia e Ultrassom, desempenhando um papel importante nos processos de inspeção e possíveis princípios de falhas (DUTRA, 2019).

Baseado na norma NRB-5462 (1994), DUTRA (2019) a Manutenção Preventiva é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios Pré-definido, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de itens os mais críticos relacionado a frota da veiculo como motor, transmissão e suspensão.

A NRB-5462 (1994) salienta três tipos de manutenção: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva. O que definirá qual o tipo será usar e quando é a estratégia de manutenção adotada para manter a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos. A manutenção preventiva traz resultado apenas nos equipamentos onde as falhas que estão relacionadas diretamente com a idade do equipamento. Ou seja, ela é ineficiente em 89% dos equipamentos, onde as taxas de falhas não estão relacionadas a idade do equipamento, mas sim, com as condições de operação (DUTRA, 2019). Baseado-se nesse aspecto a manutenção preventiva se encaixa no tema abordado.

Segundo TELES (2019), cerca de 69% das empresas brasileiras aplicam apenas a manutenção corretiva em seus ativos. Para grande parte das empresas fadadas ao fracasso, a manutenção é enxergada como um setor que gera gastos, sem a cultura de incentivo e a visão de que o setor apresenta retornos quanto à confiabilidade e disponibilidade de seus equipamentos. Frente ao exposto, este trabalho desenvolve um estudo de caso em caminhões de frota de uma empresa, utilizando como indicadores de manutenção preventiva correlacionando com o custo e qualidade dessas revisões.

2 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema mostra-se relevante devido a importância de se analisar o plano de manutenção dos caminhões estudados e identificar quais indicadores contribuem para o não cumprimento do plano. Nas empresas, a manutenção vem recebendo uma maior atenção por ser um importante pilar na gestão da produção, sendo indispensável para atingir os seguintes objetivos, aumento de produção alinhado a redução de custos, qualidade e segurança. (FABRO, 2021).

Com a evolução e inserção de novas tecnologias é necessário um controle maior e mais eficiente das atividades logísticas da distribuição física de produtos. As empresas brasileiras presumiam o aumento da sua frota em 32% até 2019, com isso, é essencial realizar a gestão de frotas e suas atividades (EXAME, 2023).

A necessidade de redução de custos em uma empresa se torna cada vez mais vital para a sua competitividade. Para isso, se faz necessário buscar ferramentas e metodologias que auxiliam na melhoria constante dos processos industriais FABRO (2021) .

Segundo,TIMOTEO (2018), a utilização do sistema de tratamento de falhas, quando aplicado corretamente, é uma ferramenta que ajuda a minimizar o impacto sobre o funcionamento dos equipamentos, através da detecção e eliminação de reincidências de falhas promovendo um aumento da confiabilidade. Essas ferramentas minimizam o número e o custo das paradas não programadas e melhoram o desempenho global de uma indústria.

3 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Analisar o sistema de transporte de uma empresa de refresco com base em indicadores de manutenção preventiva, levando em consideração os impactos da rota percorrida, peso livre transportado e qualidade das inspeções.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar através do plano de manutenção os tipos de falhas presentes nos veículos;
2. Conhecer o funcionamento dos sistemas mais críticos da frota analisada;
3. Aplicar AMFE, para propor um conjunto de estratégias de manutenção a fim de auxiliar na tomada de decisões do setor de Manutenção de frota.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

MANUTENÇÃO

A norma NBR 5462 define manutenção preventiva como uma forma de manutenção realizada em intervalos fixos planejados, ou de acordo com outros critérios devidamente prescritos e programadas (NBR-5462, 1994).

Para COSTA (2013) a manutenção age como uma função estratégica das organizações, onde esta é responsável direta pela disponibilidade dos ativos e tem importância direta nos resultados da empresa.

A manutenção utiliza uma vasta gama de estratégias e ferramentas, as mesmas podem ser resumidas em políticas de manutenção (tabela 4.1.1). As políticas de manutenção são formadas por um conjunto de regras, conceitos e técnicas os quais são abordados para efetuar a operacionalização da manutenção de modo a atender os mais essenciais interesses industriais (DUTRA, 2019; DARIO et al., 2023).

Tabela 4.1.1 – Políticas de manutenção

Política de Manutenção		
Grupos	Base da Política de Manutenção	Ação da Manutenção
Manutenção Corretiva	Manutenção baseada na Falha	Reparar
Manutenção Preventiva	Manutenção Baseado no Uso	Inspecionar
	Manutenção Baseada no Tempo	Reparar
	Manutenção Baseada no Projeto	Substituir
Manutenção Preditiva	Manutenção Baseada na Detecção	Inspecionar
	Manutenção Baseada na Condição	Inspecionar

Fonte: (WAEYERBERGH, 2005).

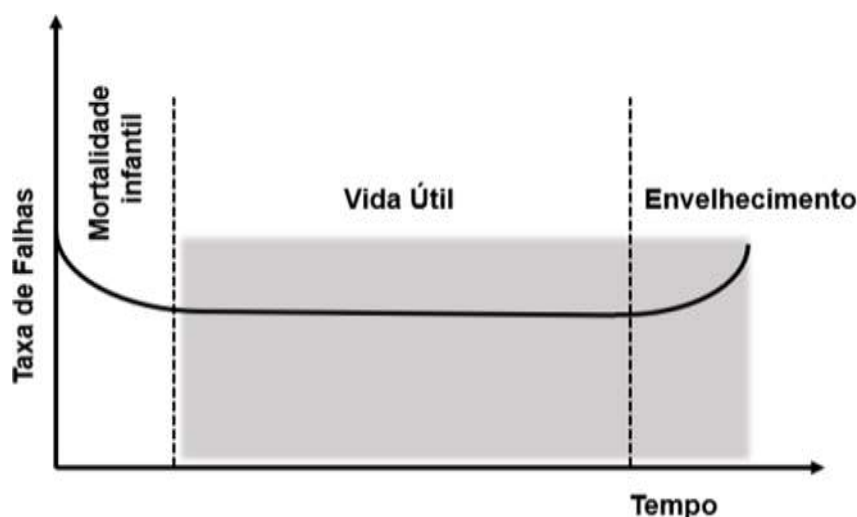
Segundo Kardec e Nascif (2009), a realização da manutenção preventiva deve ser considerada nos seguintes contextos: quando a manutenção preditiva não puder ser realizada; em ocasiões em que aspectos de segurança pessoal ou da instalação tornam obrigatória a intervenção para substituição de componentes; em equipamentos críticos que apresentem uma difícil liberação para operação para

manutenção, quando observada uma oportunidade; quando existirem riscos de danos ao meio ambiente; e em sistemas de alta complexidade e/ou de operação contínua.

VIANA (2002), os planos de manutenção são o conjunto de informações necessárias, para a orientação perfeita da atividade de manutenção preventiva. Os mesmos representam, na prática, o detalhamento da estratégia de manutenção assumida por uma empresa. A sua disposição no tempo e no espaço, e a qualidade das suas instruções, determinam o tratamento dado pelo organismo mantenedor para com sua ação preventiva.

Quando se fala de manutenção de sistemas mecânicos, fala-se de modos de prevenir que os desgastes naturais da peça tornem-se fraturas ou modificações de suas propriedades de modo que os requisitos de funcionamento dessa peça sejam atendidos. Para entender melhor as fases de um desgaste, usa-se o conceito da curva da banheira, mostrada na figura 4.1.1 (KARDEC; NASCIF, 2001).

Figura 4.1.1 – O conceito da curva da banheira



Fonte: (KARDEC; NASCIF, 2001)

Segundo Kardec e Nascif (2001):

1. "MORTALIDADE INFANTIL - Há grande incidência de falhas por componentes com efeitos de fabricação ou deficiências de projeto. Essas falhas também podem ser oriundas de problemas de instalação.;
2. VIDA ÚTIL – A taxa de falhas é sensivelmente menor e relativamente constante ao longo do tempo. A ocorrência de falhas decorre de fatores menos controláveis, como fadiga ou corrosão acelerada, fruto de interações dos materiais com o meio. Assim, sua previsão é mais difícil;
3. ENVELHECIMENTO OU DEGRADAÇÃO – Há um aumento na taxa de falhas decorrente do desgaste natural, que será tanto maior quanto mais passar o tempo."

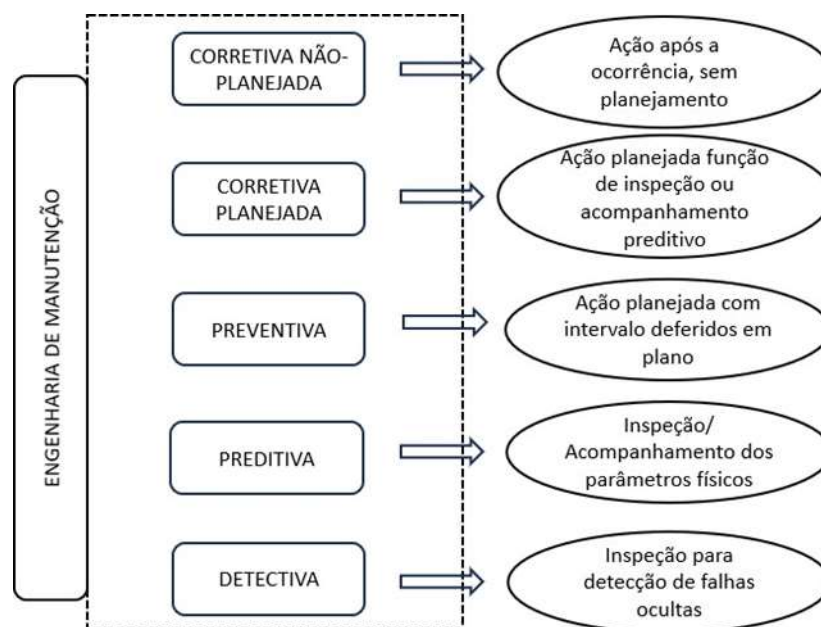
É necessário ter cuidado na programação das manutenções preventivas para que elas não sejam apenas momentos para corrigir problemas, caso a manutenção preventiva não seja feita de maneira correta, ela pode acabar ocasionando mais falhas (LIEBL et al., 2021).

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) visa melhorar as ações de manutenção com o planejamento aliado a ferramentas de análise de falhas para ter a maior disponibilidade com redução de custos e mais segurança (KARDEC; NASCIF, 2009).

TIPOS DE MANUTENÇÃO

De acordo com a norma ABNT 5462 a manutenção é dividida em três tipos, conforme a figura 4.1.2

Figura 4.1.2 – Tipos de manutenção



Fonte: Adaptado de (KARDEC; NASCIF, 2009)

- **Manutenção Corretiva:**

A manutenção corretiva é a forma mais primitiva de manutenção, como foi mostrado anteriormente na Evolução da Manutenção. Ela se baseia simplesmente na correção de uma falha ou do desempenho menor que o esperado. Este tipo de manutenção, considerada simples, exige altos custos referentes a “spare parts – partes de reposição”, horas extras dos operários, ociosidade do equipamento e a baixa disponibilidade de produção (ALMEIDA, 2000). Caso o reparo ou uma quebra não possam ser postergados, devem ser considerados como uma manutenção emergencial ou corretiva não planejada, ou seja, ao aparecer a falha é necessário o reparo imediato da mesma (COSTA, 2013). A manutenção corretiva planejada é uma correção de uma falha ou de um desempenho menor que o

esperado, porém se baseia na modificação dos parâmetros de condição observados pela manutenção preditiva (KARDEC; NASCIF, 2009).

- Manutenção Preventiva:

De acordo com Viana (2020) apresenta uma pequena distinção quanto a essa definição, afirmando que o surgimento da “falha” é o divisor de águas entre a manutenção corretiva e preventiva. Todas as ações de manutenção após o surgimento da falha são corretivas. A manutenção preventiva utiliza muitas vezes meios técnicos para estimar o momento em que ocorrerá a falha no equipamento, sendo esses meios muitas vezes instrumentos de medições para falhas específicas, ou parecer técnico de um especialista que contenha conhecimento amplo nesta área (GARG; DESHMUKH, 2006; ALMEIDA, 2000). Kardec e Nascif (2009) esclarecem também que nem sempre os fabricantes fornecem dados precisos para a adoção nos planos de manutenção preventiva, além disso, condições ambientais e operacionais influem significativamente na degradação dos equipamentos, logo, a definição de periodicidade e substituição deve ser estipulada para cada instalação.

- Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva se baseia na leitura de variáveis críticas cujos limites são previamente definidos, quando as leituras ou a projeção por modelos se aproximam destes limites, uma intervenção de manutenção deve ser planejada, de modo a controlar a falha iminente (GARG; DESHMUKH, 2006; TOAZZA; SELLITO, 2015).

Um dos principais quesitos que diferencia a manutenção preditiva de outros tipos de manutenção é a definição da periodicidade em que deve ser executada. Essa pode se dar em função do tempo, como no caso de uma lubrificação realizada em períodos fixos recomendados pelo fabricante, em função das horas de funcionamento de um determinado conjunto, peça ou componente, ou em função da produtividade, em que a orientação se dá pela quantidade de peças produzidas. A recomendação de periodicidade também pode ser mista, em que se utiliza, por exemplo, a lubrificação periódica e a quantidade de horas de utilização um item ao mesmo tempo, sendo a manutenção realizada conforme o que ocorrer primeiro (TELES, 2019).

É a manutenção que realiza acompanhamento de variáveis e parâmetros de desempenho de máquinas e equipamentos, com o objetivo de definir o melhor instante para a intervenção, com o máximo aproveitamento do ativo (FREITAS, 2016; COSTA, 2013).

OBJETIVOS DA MANUTENÇÃO

ZANETTI (2019) define como objetivos da manutenção:

- a) Manter os equipamentos em estado de funcionamento seguro e eficiente;
- b) Manter os equipamentos com uma disponibilidade adequada;
- c) Manter os equipamentos com uma fiabilidade adequada;
- d) Reduzir ao mínimo os custos totais, em coerência com os objetivos anteriores;
- e) Aumentar a vida útil dos equipamentos e infraestruturas, mantendo a qualidade do serviço dentro dos padrões de qualidade e eficiência definidos;
- f) Diminuir o número de paragens de forma a minimizar os prejuízos para a entidade gestora e para os próprios funcionários.

INDICADORES DE MANUTENÇÃO

Tempo Médio Entre Falhas (TMEF)

Os indicadores de manutenção servem como tradução do comportamento dos equipamentos e sistemas de produção frente ações de manutenção (MEGIOLARO, 2015).

O Tempo Médio Entre Falhas (TMEF), do inglês - Mean Time Between to Failure (MTBF) é considerado um dos mais importantes indicadores da manutenção (GOMES, BARBOSA, 2022). De acordo com TELES (2019), o MTBF é utilizado para medir o tempo médio existente entre uma falha e outra, conforme a Equação (4.3.1).

$$MTBF = \frac{\sum \text{Horas trabalhadas}}{N_{\text{falhas funcionais}}} \quad (4.3.1)$$

O aumento do MTBF ao longo do tempo indica que o número de intervenções corretivas realizadas sofreu um decréscimo. Este pode ser considerado como um sinal positivo, uma vez que o total de horas disponíveis para a operação aumentou (VIANA, 2002).

TEMPO MÉDIO DE REPARO (TMR)

O tempo médio de reparo é dado como sendo a divisão entre a soma das horas de indisponibilidade para a operação devido à manutenção (HIM) pelo número de intervenções corretivas no período (NC) (VIANA, 2002).

Para TELES (2019), este indicador mostra o tempo médio que o mantenedor gastou para colocar o equipamento novamente em funcionamento. Quanto menor este tempo, melhores os resultados para a manutenção. O MTTR pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$MTTR = \frac{\sum \text{Tempo}_{\text{reparo de falhas funcionais}}}{N_{\text{Intervencoes}}} \quad (4.3.2)$$

TEMPO MÉDIO PARA FALHA (TMPF)

O tempo médio para falha tem como enfoque este tipo de componente, consistindo na relação entre o total de horas disponíveis do equipamento para a operação (HD) dividido pelo número de falhas detectadas em componentes não reparáveis Equação (4.3.3).

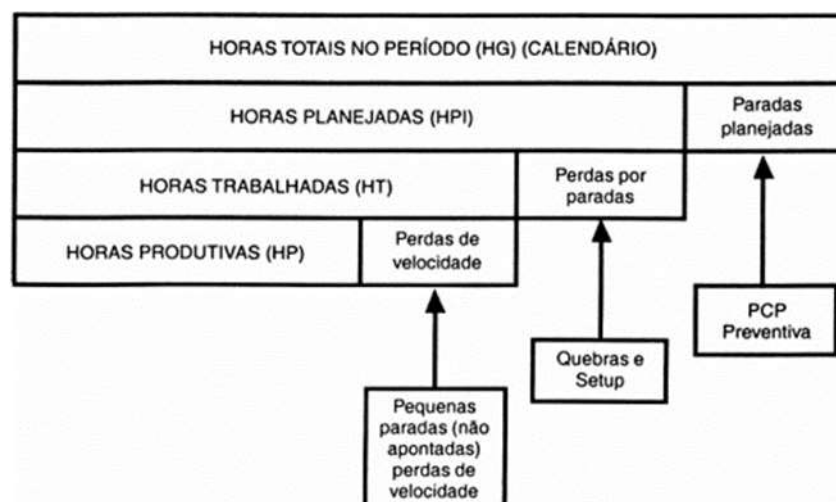
$$TPMF = \frac{HD}{N_{\text{falhas}}} \quad (4.3.3)$$

DISPONIBILIDADE FÍSICA (DF)

De acordo com ALMEIDA (2000), FREITAS (2016), a disponibilidade física (DF) representa o percentual de dedicação para operação de um equipamento, ou de uma planta, em relação às horas totais do período. A fórmula da disponibilidade física (DF) varia de empresa para empresa

Este índice se reveste de fundamental importância para manutenção, pois o nosso principal produto é DF, ou seja, disponibilizar o maior número de horas possível do equipamento para a operação, conforme Figura 4.3.1 (FREITAS, 2016).

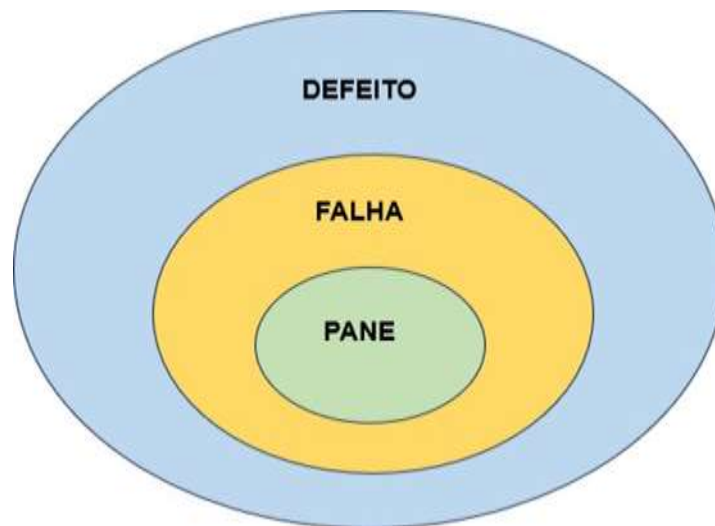
Figura 4.3.1 – Controle de tempo de manutenção



Fonte: (TIMOTEO, 2018)

A falha é definida por uma perda da função requerida de um item, podendo ser parcial ou completa. A falha completa é resultado do desvio de características além dos limites especificados causando perda total da função requerida do equipamento (KARDEC; NASCIF, 2009). De acordo com Kardec e Nascif (2009) existem três eventos, que podem ser relacionados conforme indicado na Figura 4.3.2.

Figura 4.3.2 – Caracterização das panes, falhas e defeitos



Fonte: (ZANETTI, 2019)

A análise de falhas pode ser aplicada quando o processo já está em operação, depois de ocorrer uma falha, identificando suas causas e realizando o bloqueio, ou antes que uma falha ocorra, detectando as possíveis causas e realizando o bloqueio (TAKAYAMA, 2008).

Existem algumas ferramentas que podemos utilizar para nos auxiliar na identificação dessas falhas, como:

- Análise dos modos e efeitos das falhas – AMEF;
- Análise da árvore de falhas – AAF;
- Diagrama de causa e efeito;
- Diagrama da sequência de eventos

A AMFE é uma das ferramentas mais utilizadas, inclusive para a elaboração deste trabalho foi aplicado o uso dessa ferramenta, para chegar aos resultados da análise, que será colocado posteriormente. A AMFE pode ser aplicada tanto em projetos de produtos ou processos que ainda estão em fase de elaboração como em revisão de produtos em produção ou processos em operação (TAKAYAMA, 2008). A AMFE é feita através de três parâmetros: severidade, definida pela gravidade do modo de falha a

de acordo com seus impactos relacionados a meio ambiente, segurança, produção e custo; ocorrência, frequência com que o modo de falha acontece (ZANETTI, 2019).

Segundo WAEYERBERGH (2005), define em sua obra os principais benefícios que o AMFE traz para o processo ao qual é aplicado. Selecionando alguns e trazendo para o contexto deste trabalho, são eles:

- Identificação das características críticas ou significativas;
- Ajuda a identificar e eliminar os problemas potenciais de segurança;
- Estabelece uma prioridade de ações corretivas;
- Redução significativa dos custos;
- Melhoria da qualidade;
- Ajuda a alcançar e superar as expectativas dos clientes;
- Ajuda a identificar antecipadamente as falhas.

GESTÃO DE FROTAS E MANUTENÇÃO

Segundo TAKAYAMA (2008) a segurança deve ser prioridade na definição da estratégia de manutenção para a quebra do equipamento não colocar em risco a vida do trabalhador. Assim com os aspectos ambientais devem ser levados em consideração. A avaliação da criticidade do equipamento pode ser feita através da classificação apresentada no fluxograma apresentado na Figura 4.4.1.

Figura 4.4.1 – Planejamento de tempo para realizar a manutenção

Afeta SSMA de forma significativa	5	• Causa fatalidade ou acidente Sérios incapacitantes
		• Condição de saúde irreversível
		• Pode causar acidente com danos a médio e longo prazo e/ou espalhados ao ambiente
		• Equipamento controlado por Legislação ou em caso de falha pode causar descumprimento de requisitos legais ou impedem monitoramento requerido pelos órgãos ambientais
	3	• Lesões leves
		• pequeno impacto financeiro sobre o negócio
		• Efeito nocivos a saúde de uma ou mais pessoas
		• Pode causar perturbação ecológica de baixa duração e/ou impactos restrito na área ambiental
	1	• Pequena perda financeira (primeiros socorros)
		• Efeito leves a saúde
		• Não afeta o meio ambiente
Afeta qualidade do produto	5	• Afeta qualidade do produto final (fora de especificação para o cliente externo)
	3	• Afeta qualidade para cliente interno (não afeta cliente externo, é passível de recuperação)
	1	• Não afeta a qualidade ou especificação do produto
Afeta a produção	5	• Afeta meta anual de produção da planta (irrecuperável)
	3	• Afeta a produção da planta (não afeta a meta anual, recuperável)
	1	• Não afeta a produção
Afeta a produção	5	• Gera um custo de manutenção igual ou superior à 5% do custo mensal de manutenção (pelo orçamento matricial)
	3	• Gera um custo de manutenção entre 2% e 5% do custo mensal de manutenção (pelo orçamento matricial)
	1	• Não afeta significativamente o custo de manutenção

Fonte: (FERREIRA, 2009)

Melhores práticas da manutenção, segundo (KARDEC; NASCIF, 2009), são aquelas que se têm mostrado superiores em resultados, selecionados por um processo sistemático e julgadas como exemplares bons ou de sucesso demonstrado.

MEDIDAS DE DESEMPENHO APLICADAS AOS CUSTOS DOS PNEUS

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos –(ANIP, 2014) a vida útil dos pneus depende de uma manutenção cuidadosa por parte do motorista, nesta área, ela orienta sobre o limite de segurança, pressão, o rodízio de pneus e dicas importantes para evitar o desgaste do pneu.

A vida útil dos pneus depende de vários fatores externos e internos da empresa segundo FABET (Acesso em: 03 jul. 2023.), como a conservação dos veículos, da forma Revista Produção Online, como os motoristas conduzem os veículos, do trânsito, do clima, do relevo, das estradas, do peso das cargas transportadas, dos tipos de veículos utilizados e da manutenção.

As funções que o pneu deve apresentar como um recipiente de pressão, e o único ponto de apoio do veículo a superfície da estrada, são: (a) capacidade de suportar e transportar cargas, (b) capacidade amortecedora, (c) capacidade de transmissão de torque, (d) capacidade de resposta direcional e (d) capacidade de aderência ao solo (ANIP, 2014; GOODYEAR, 2010; FABET, Acesso em: 03 jul. 2023.).

Segundo, (GOODYEAR, 2010), outro fator de redução de custo é o emparelhamento incorreto ou inadequado dos pneus, os pneus desemparelhados resultam na distribuição desigual da carga, devido à variação de diâmetro dos pneus, pois roda com a mesma velocidade.

Em síntese, considerando as operações dos processos internos associados a manutenção, a pesquisa, na literatura mencionada nesta seção, revelou que seus indicadores de resultados estejam associados aos custo total da manutenção, como: calibrações dos pneus, alinhamentos dos veículos, balanceamento, ordens de serviço, socorros nas estradas, índice de sucateamento de pneu, horas de treinamento, indicadores de segurança e saúde do trabalho, consumo de combustível, reclamação de clientes, acidentes, custo aplicado aos pneus, gasto com pneus na estrada e custo do pneu por km rodado(FREITAS, 2016).

O pneu é um elemento de suma importância para o funcionamento de um veículo, além de suportar o peso da estrutura e ter contato direto com o solo. Por isso, é muito importante conhecer como um pneu é fabricado, as características de cada modelo e tipo, aplicações e principalmente os cuidados e manutenção (VIPAL, 2018).

5. METODOLOGIA

OBJETO DE ESTUDO

Para a elaboração deste estudo, foi adotada uma metodologia exploratória, descritiva, analítico e principalmente comparativa, com a criação de dois cenários: manutenção da manutenção preventiva 2021 e 2022. A escolha foi caracterizada, através de dados, observando o progresso do setor de manutenção em uma empresa voltada à transporte de cargas, avaliando os resultados quanto à produtividade dos veículos e a eficiência da manutenção.

A primeira etapa do trabalho foi a realização de um estudo de caso para avaliação das condições do setor de frota, analisando se o plano preventivo está sendo cumprido, com objetivo de caracterizar o cenário inicial e levantar dados para a comparação conforme o avanço do projeto. Na sequência, para funcionamento do plano de manutenção preventiva revisado, foram realizadas quatro etapas: Se o plano preventivo está sendo cumprido; qual o impacto do fator cubagem na manutenção; se a roteirização está atendendo a capacidade do caminhão e se o registro de intervenções está sendo atendido.

Desta forma, para início das atividades foram realizados levantamentos sobre a manutenção preventiva em equipamentos. Além disso, se optou por estudos específicos com relação à manutenção de veículos destinados ao transporte de cargas, buscando garantir ações mantenedoras mais eficientes aos ativos, prolongando sua vida útil e aumentando a produtividade.

Assim, este trabalho analisa o comportamento da manutenção preventiva associado a cubagem, rota e preventiva dos veículos do modelo 17.190 Worker, isto é, suspensão por coluna cujo pórtico se encontra exposto nas Figuras 5.1.1 e 5.1.1 .

Figura 5.1.1 – Veículo de estudo:

a) Modelo caminhão de 8 Baías e b) Modelo de caminhões no pátio



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

ESTUDO DE CASO

IDENTIFICAÇÃO DA EMPRESA

A empresa em questão pediu sigilo na divulgação da marca, tendo em vista isso, a mesma será tratada aqui como empresa de entrega de produtos do ramo alimentícios do Mara- nhão. Como destacada

essa empresa utiliza caminhões baiados de 6, 8, 10 e 12 baías. Para este trabalho foi utilizado apenas caminhões de 8 baías com idades de fabricação semelhantes.

FROTA VEICULAR

A frota veicular que é objeto deste estudo é voltada ao transporte dos produtos do ramo alimentícios na unidade operacional até o destino final. Para tanto, a análise focará em 10 caminhões de duas unidades, distribuídos conforme as necessidades das operações de trabalho (tabela 5.2.1).

Tabela 5.2.1 – Coleta de dados de itens trocados em preventiva 2021

Horários de operação dos Caminhões		
Dias da semana	Jornada de trabalho	Horas trabalhadas
Segunda à Sexta	07h às 12h e 14h às 17h	8
Sábado e domingo	07h às 12h e 14h às 17h	8

Fonte: Autoria própria.

A análise preliminar realizada neste estudo, identificou várias divergências no quesito de boas práticas no controle de preventivas. Já que existe ferramentas na empresa, porém a gestão delas não é aplicada corretamente e para sanar esse problema algumas medidas foram tomadas, sendo elas:

1. Levantamento de manutenção preventiva correta evitando uma manutenção mal feita.
2. Atualização do banco de dados com detalhamento e peças que devem ser feitas no plano preventivo do fabricante.
3. Verificação do Impacto das cargas transportadas em relação as rotas transportadas.

O plano preventivo do Fabricante para o modelo VolksWagen 17.190 Worker se baseia no seguinte quadro de manutenção. Baseando-se nessa análise temos os seguintes modelos de preventiva do fabricante, figura 5.2.1.

Figura 5.2.1 – Plano Preventivo do Caminhão 17.190 Worker Dias

Ciclo de vida (em Dias)																
Revisão		Ocorrência														
Nome	Dias	365	730	1.095	1.460	1.825	2.190	2.555	2.920	3.285	3.650	4.015	4.380	4.745	5.110	5.475
20.000 KM OU 12 MESES	365	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
40.000 KM OU 24 MESES	730		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	
60.000 KM OU 36 MESES	1.095			✓			✓			✓			✓			✓
80.000 KM OU 48 MESES	1.460				✓				✓				✓			

Fonte: (SUDESTE, 2023)

Outro fator importante é a cubagem dos veículo, pois no ramo logístico a carga é calculada pela seguinte equação.

$$Cub_{Total} = C \cdot L \cdot A \cdot Q \quad (5.2.1)$$

Onde,

- C = Comprimento (m)
- L = Largura (m)
- A = Altura (m)
- Q = Quantidade de cubas
- CubTotal = cubagem total (m³)

Dados fornecidos pelos fabricante para esse modelo de caminhão temos que, a cubagem é 760 e o peso total para o carregamento é 7840 kg o volume de cubagem é 0,04m³, apresentado via SAP na Figura 5.2.2

Figura 5.2.2 – Dados Extraídos do SAP

Dados relevantes p/transporte	
Peso	8.160,000
Peso tot.perm.	16.000,000
Carga máx.	7.840,000
Volume carga	760,000
Alt.esp.carga	0
LargPltCarga	0
ComprPltCa	0
Nº compartims.	8

Unidade de peso: KG
 Unid.de volume: CUB
 UnidComprimento: MM

Fonte: Autoria Própria

Para a análise temos que a cubagem varia de 70%, 75%, 80%, 85% e 97%. Para cada dia da semana de todos os caminhões, os picos de carga será: terça, quarta e quinta sendo o ultimo com os maiores valores. Dados que serão importantes para verificar o impacto nas preventivas e o desgaste das peças é o peso por cubagem. Outro fator que será importante é a rota do veículo, onde as condições das vias são relevantes e impactam diretamente nos desgastes de molas e pneus.

Uma ferramenta que usaremos é a Telemetria do veículo, que obtém dados como velocidade média, Trajeto e Velocidade máxima, essas informações são retiradas de rotas percorridas referentes a uma semana. As rotas são padronizadas, logo são rotinas semanais.

A idade dos veículos é um fator determinante na adoção de medidas para uma melhor preservação, já que quanto maior a idade maior o numero de manutenções baseando-se no diagrama de banheira visto na seção 4.

Tabela 5.2.2 – Coleta de dados de itens trocados em preventiva 2021

Caminhões de 8 baías com perfis semelhantes		
Nº de Frota	Idade em anos	Base de Op.
1	9	SLZ
2	10	IMP
3	10	SLZ
4	10	SLZ
5	10	SLZ
6	10	SLZ
7	10	SLZ
8	10	SLZ
9	10	SLZ
10	9	IMP

Fonte: Autores.

6 RESULTADOS

ANÁLISE PREVENTIVA

Os resultados apresentados contou com dados extraídos de histórico de preventiva re- gistradas no SAP. A telemetria foi obtida pelos sistema Tixlog rastreo de veículos, já a cubagem média adotada fornecida pela roteirização da empresa.

Tabela 6.1.1 – Coleta de dados de itens trocados em preventiva 2021

Preventivas 2021		
Nº de Frota	Nº de Itens	Base de Op.
1	16	SLZ
2	28	IMP
3	15	SLZ
4	15	SLZ
5	9	SLZ
6	8	SLZ
7	0	SLZ
8	0	SLZ
9	9	SLZ
10	16	IMP

Fonte: Autoria Própria.

A presente coletas de dados para as preventivas foi obtida pelo histórico de manutenção em dois períodos, anos de 2021 e 2022 como apresentado nas tabelas 6.1.1 e 6.1.2 , conforme o plano preventivo do fabricante percebeu-se que os veículos das frotas 7, 8, 3 e 5 não estavam seguindo o plano estabelecido. e por consequência houve mais paradas para manutenção corretiva não planejada.

Segundo (RIDDELL, 2022), não acompanhar o plano preventivo pode causar uma sequência de falhas sendo elas acompanhada de desgastes de peça e de negligencia da manutenção preventiva, afetando diretamente a linha de produção industrial, a manutenção preventiva evita maiores falhas de operação sendo elas a perda do motor o componente mais caro do equipamento.

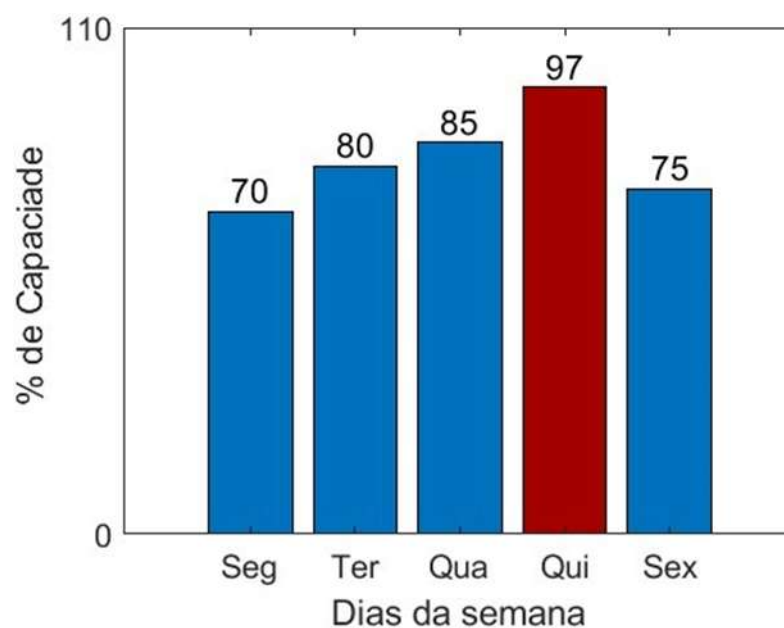
Tabela 6.1.2 – Coleta de dados de itens trocados em preventiva 2022

Preventivas 2022		
Nº de Frota	Nº de Itens	Base de Op.
1	16	SLZ
2	13	IMP
3	0	SLZ
4	25	SLZ
5	0	SLZ
6	16	SLZ
7	16	SLZ
8	9	SLZ
9	16	SLZ
10	10	IMP

Fonte: Autoria Própria.

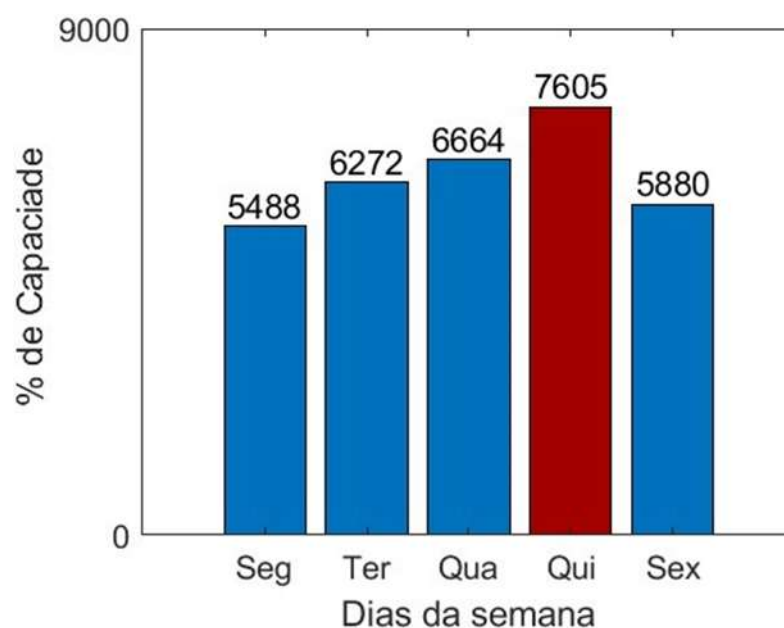
ANÁLISE DE PESO DOS CAMINHÕES

Os dados obtidos pela capacidade de carga são importantes para sabermos se atende as especificações do fabricante , visto que a empresa retira os lucros pelo volume de entrega. Assim, se utiliza a equação vista na seção 5 . Ou seja, essa equação nos fornece o valor da cubagem.

Figura 6.2.1 – Analise média de capacidade de carga dos caminhões

Fonte: Autoria própria.

Como todos os veículo atendem a um certo comportamento de carga, foi calculado uma media baseada na analise experimental. Assim, percebeu-se que nos dias de: terça, quarta e quinta o volume era maior em relação a segunda e sexta, a quinta como o período de maior estresse de carga visto nas Figuras 6.2.1 e 6.2.2 sendo o limite máximo livre de 7840 Kg extraído da empresa.

Figura 6.2.2 – Analise média da capacidade de carga em Kg por caminhão

Fonte: Autoria própria.

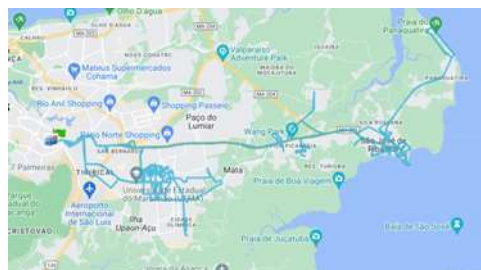
ANÁLISE DE TELEMETRIA E ROTA

O caminhão de Frota 01 realizou uma rota singular tendo em vista os diferentes trechos, a região mais próxima da capital São Luís passando pelos Municípios de Paço do Lumiar e São José de Ribamar. Esse trajeto apresenta obstáculo bem danosos ao veículo em especial em uma rota mais interna ao municípios que apresentam uma grande quantidade de buracos, desgastando de forma maior o veículo e o percurso de 393,9 Km a velocidade máxima reflete o tipo de percurso mais urbano.

Tabela 6.3.1 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 01

Coleta de dados Caminhão 01 (03/01 à 07/01 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
393,9	6	58

Figura 6.3.1 – Rota semanal caminhão 01



Fonte: Autoria própria.

O caminhão de Frota 02 realizou uma rota de longa distância, compreendendo a região urbana de Imperatriz, Açailândia até nova Brasília. Alguns trajetos dessas cidades são difíceis devido a qualidade das vias, contudo mesmo com um percurso longo esse veículo mantém um plano preventivo evitando paradas não desejadas.

Tabela 6.3.2 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 02

Coleta de dados Caminhão 02 (03/10 à 07/10 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
314,3	6	82

Figura 6.3.2 – Rota semanal caminhão 02



Fonte: Autoria própria

O caminhão de Frota 03 Realizou um percurso cheio de trajetos difíceis indo para região rural de São Luís com vias de difícil acesso e repletas de buracos, causando desgaste de suspensão e pneus. Caso os pneus não estejam bem calibrados e sua banda de rodagem não estiver adequada consome mais combustível e desgasta da suspensão.

Tabela 6.3.3 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 03

Coleta de dados Caminhão 03 (05/12 à 9/12 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
255,4	8	57

Figura 6.3.3 – Rota semanal caminhão 03



Fonte: Autoria própria.

O caminhão de Frota 04 Realiza um trajeto puramente urbano como ruas fechadas e muitas paradas e frenagem. Portanto, uma rota que utiliza a troca de marcha com maior frequência em especial marchas de força isso é refletido na velocidade média que é uma das menores.

Tabela 6.3.4 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 04

Coleta de dados Caminhão 04 (12/12 à 16/12 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
249.4	5	51

Figura 6.3.4 – Rota semanal caminhão 04

Fonte: Autoria própria.

O caminhão de Frota 05 Realiza um trajeto puramente urbano como ruas fechadas e muitas paradas e frenagem sendo uma rota que utiliza a troca de marcha com maior frequência em especial marchas de força isso é refletido na velocidade media que é uma das menores além disso a existência de muitas subidas com cargas forçando o motor e o sistema de transmissão.

Tabela 6.3.5 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 05

Coleta de dados Caminhão 05 (05/12 à 09/12 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
164,6	5	73

Figura 6.3.5 – Rota semanal caminhão 05

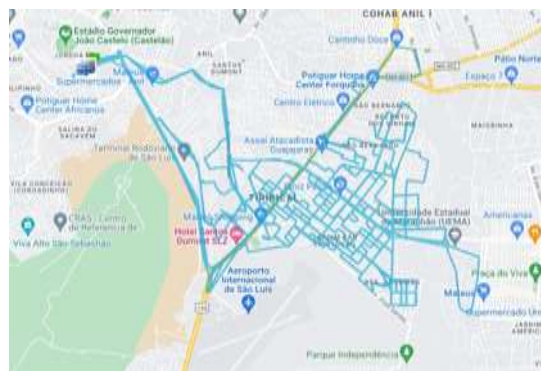
Fonte: Autoria própria.

O caminhão de Frota 06 Realiza um trajeto puramente urbano como ruas fechadas e muitas paradas e frenagem sendo uma rota que utiliza a troca de marcha com maior frequência em especial marchas de força isso é refletido na velocidade média que é uma das menores.

Tabela 6.3.6 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 06

Coleta de dados Caminhão 03 (03/10 à 08/10 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
193.9	5	62

Figura 6.3.6 – Rota semanal caminhão 06



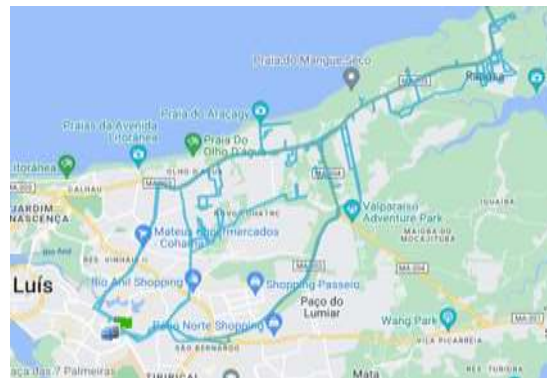
Fonte: Autoria própria.

O caminhão de Frota 07 Realiza um percurso no perímetro urbano de São Luís e nos Municípios de Paço do Lumiar e Raposa tendo uma mescla de situações a região compreendendo nos bairros de Paço do Lumiar são os com os trajetos de maior descaso de via prejudicando a suspensão e pneus com maior severidade.

Tabela 6.3.7 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 07

Coleta de dados Caminhão 07 (03/01 à 07/01 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
457,4	7	68

Figura 6.3.7 – Rota semanal caminhão 07



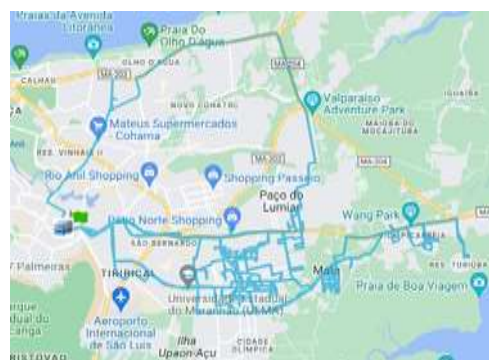
Fonte: Autoria própria.

O caminhão de Frota 08 realizou uma tendo em vista os diferentes trechos a região mais próxima da capital São Luís passando pelos Municípios de Paço do Lumiar e São José de Ribamar. Esse trajeto apresenta obstáculo bem danosos ao veículo em especial em uma rota mais interna aos Municípios que apresentam uma grande quantidade de buracos, desgastando de forma maior o veículo e o percurso de 362,6 Km, onde a velocidade máxima reflete o tipo de percurso mais urbano.

Tabela 6.3.8 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 08

Coleta de dados Caminhão 08 (07/03 à 11/03 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
362,6	6	55

Figura 6.3.8 – Rota semanal caminhão 08



Fonte: Autoria própria.

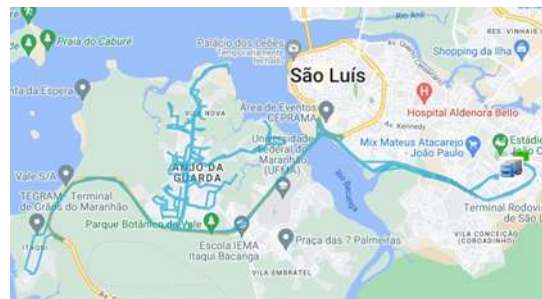
O caminhão de Frota 9 Realiza um trajeto puramente urbano como ruas fechadas e muitas paradas e frenagem sendo uma rota que utiliza a troca de marcha com maior frequência em especial marchas de

força isso é refletido na velocidade media que é uma das menores além disso a existência de muitas subidas com cargas forçando o motor e o sistema de transmissão.

Tabela 6.3.9 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 09

Coleta de dados Caminhão 09 (07/11 à 11/11 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
264.1	9	69

Figura 6.3.9 – Rota semanal caminhão 09

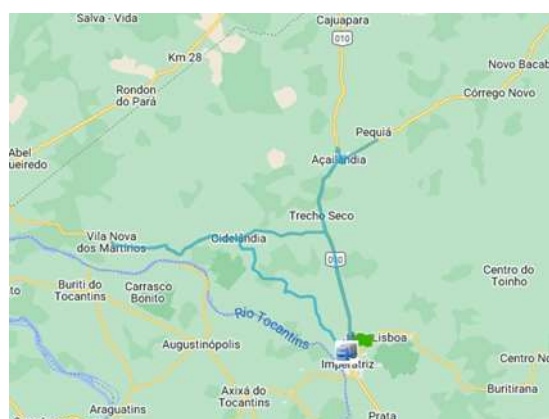


Fonte: Autoria própria.

O caminhão de Frota 10 realizou Uma rota de longa distancia essas compreendendo a região urbana de Imperatriz, Açailândia até Vila Nova dos Martírios algumas com trajeto difícil devido a qualidade da via, contudo mesmo com um percusso longo esse veiculo mantêm um plano preventivo evitando paradas não desejadas.

Tabela 6.3.10 – Coleta de dados de telemetria do caminhão 10

Coleta de dados Caminhão 10 (03/10 à 07/10 de 2022)		
Km Percorrido	Vel. médio Km/h	Vel. máxima Km/h
747.5	10	80

Figura 6.3.10 – Rota semanal caminhão 10

Fonte: Autoria própria.

OBSERVAÇÕES E COMENTÁRIOS

Como observado são inúmeros fatores que afetam a manutenção sendo eles o uso do óleo mais adequados para esses caminhões que já estão chegando ao final da sua vida útil, e já estão no geral apresentando um desgaste natural das peças, pensando nisso temos que. Os óleos são feitos para representarem a viscosidade em altas e baixas temperaturas. Portanto, o óleo 20w50 é mais espesso quando está em altas temperaturas, quando comparado ao 15w40 utilizado pela empresa. Os óleos possuem características físico-químicas, ou seja, são a viscosidade cinemática que significa (mecânica dos movimentos), ponto de fulgor, ponto de fluidez e densidade, índice de viscosidade e corrosão ao cobre (DMLLUBRIFICANTES, 2023).

O uso desses óleos no motor é de suma importância, e saber qual usar e o tipo do motor é muito importante. Já que isso é fundamental para evitar desgastes drásticos nas engrenagens. Outro fator observado que deve ser ponderado é a melhor distribuição de carga ao longo da semana para evitar o desgaste prolongado mantendo uma margem de segurança de 80 por cento de capacidade afim de evitar um desgaste maior das peças. A via é um fator importante a ser colocado tendo em vista as estradas do Maranhão que possuem um histórico ruim de existência de buracos na via.

7 CONCLUSÃO

Conforme o objetivo proposto foi possível verificar, que dentre os dados analisados, quatro veículos da empresa, que se encontram em estudo não cumpriram com o plano preventivo do fabricante no tempo certo, A incidência de manutenção corretiva não planejada foi o início desse projeto tendo em vista os malefícios que não cumpri o plano preventivo pode trazer. Durante o estudo foi possível

definir, se não estava sendo realizado um bom plano de manutenção para evitar o estresse nos equipamentos, para que não houvesse o desgaste das peças de forma prematura. O desgaste das peças está relacionado a não gestão de distribuição de carga, que é planejada para o veículo durante a semana. O trajeto do veículo também impactou diretamente no gasto dos veículos, e concluímos que os percursos mais movimentados (urbanos), são os mais danosos aos veículos devido às condições, que as vias se encontram.

Outro fator determinante, a escolha do tipo de óleo lubrificante, que influenciou na vida útil do equipamento. A partir das discussões apresentadas no transcorrer da pesquisa, verifica-se a aplicação da ferramenta AMFE nos caminhões propostos, obteve-se uma melhora na tomada de decisão ao identificar pontos críticos, que estão foram aplicados em 2023 fez com que melhorasse a o planejamento e a disponibilidade da frota, outro ponto importante foi a disponibilidade, que de 20 veículos danificados recuperamos 16 que estava como a manutenção deficitária assim otimizando a frota.

Em suma, este estudo proporcionou pontos positivos para a empresa em análise, no que diz respeito à qualidade, planejamento na gestão da manutenção, e o objetivo do trabalho foi cumprido, pois o estudo contribui para evolução dos planos de manutenção da empresa e diminuição dos custos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. T. Manutenção preditiva: Confiabilidade e qualidade. 2000.

ANIP. Vendas de pneus para caminhões e ônibus no brasil. ANIP, São Paulo, 2014.

COSTA, M. d. A. Gestão estratégica da manutenção: Uma oportunidade para melhorar o resultados operacional. Engenharia de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora, p. 104, 2013.

DARIO, M.; SILVA, L.; NETO, S. Indicadores de desempenho, práticas e custos da manutenção na gestão de pneus de uma empresa de transportes. Revistaão Produ Online, FLORIANOPOLIS - SC, 2023. Disponível em: <<https://pesquisa-eaesp.fgv.br/sites/gvpesquisa.fgv.br/files/arquivos/silva indicadores_de_desempenho_praticas_e_custos_da.pdf>.

DMLLUBRIFICANTES. Qual óleo mais viscoso para veiculos mais anti- gos 20w50 ou 15w40. 2023. Disponível em: <<https://dmllubrificantes.com.br/>

qual-oleo-mais-grosso-20w50-ou-15w40/#:~:text=Os%20dois%20%C3%B3leos%20s%C3%A3o%20feitos,temperaturas%2C%20quando%20comparado%20ao%2015w40>.

DUTRA, J. T. Planejamento e controle de manutenção: Uma metodologia passo a passo para implantação do pcm. ENGETELES, 2019.

EXAME. Locadoras de frota de veículos resistem à econômica brasileira. 2023. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/dino/locadoras-de-frota-deveiculos-resistem-a-crise-economica-brasileira/amp/>>.

FABET. O desafio está de volta. revista melhor motorista de caminhão do brasil. Acesso em: 03 jul. 2023. Disponível em: <<http://www.melhormotorista.com.br>>.

FABRO, N. P. Estudo do sistema de tratamento de falhas para auxiliar na análise e detecção de falhas em caminhão fora de estrada: o caso de uma empresa de mineração. Universidade Federal de Ouro Preto - ENGENHARIA MECÂNICA, 2021.

FERREIRA, L. Implementação da central de ativos para o melhor desempenho do setor de manutenção : Um estudo de caso vitorantim metais. UFJF - UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, JUIZ DE FORA - MG, 2009.

FREITAS, L. 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. UFJF, JUIZ DE FORA, 2016.

GARG, A.; DESHMUKH, S. G. Maintenance management: literature review and directions. Journal of quality in maintenance engineering, 2006.

GOODYEAR. Boletim de orientação técnica goodyear. Revista O Carreteiro, 2010.

KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção: Função estratégica. Qualitymark, Rio de Janeiro, 2001.

- KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção: Função estratégica. Qualitymark, Rio de Janeiro, 2009.
- LIEBL, G.; PEREIRA, D.; FAGUNDES, A. Análise da confiabilidade em uma frota de caminhões de transporte de resíduo. INOVA, São Bento do Sul, 2021.
- MEGIOLARO, M. Indicadores de manutenção industrial relacionados á eficiência global de equipamentos. UFPA, Belem - PA, 2015.
- NRB-5462. Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- RIDDELL, R. Practical root cause failure analysis: Key elements, case studies, and common equipment failures. CRC Press, New York, 2022.
- SUDESTE. volkswagen worker. 2023. Disponível em: <<http://www.sudestecaminhoes.com.br/novo/worker-17-190>>.
- TAKAYAMA, M. A. S. Análise de falha aplicada ao planejamento estratégico da manutenção. UFJF, JUIZ DE FORA, 2008.
- TELES, J. Planejamento e controle da manutenção descomplicado: uma metodologia passo a passo para implantação do pcm. Engeteles editora, Brasília, 2019.
- TIMOTEO, J. N. Importância da utilização de análise de falha para performance da manutenção industrial. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade Ietec, Belo Horizonte, 2018.
- TOAZZA, G. F.; SELLITO, M. A. Estratégia de manutenção preditiva no departamento gráfico de uma empresa do ramo fumageiro. Revista Produção Online, 2015.
- VIANA, H. R. G. Pcm: planejamento e controle da manutenção. Qualitymark, Rio de Janeiro, 2002.
- VIPAL. Guia de danos e desgastes: Carga. Vipal, Porto Alegre, 2018.
- WAEYERBERGH, G. Uma estrutura para o desenvolvimento do conceito de manutenção industrial. Katholieke Universiteit Leuven, Belgica, 2005.
- ZANETTI, M. B. Aplicação da metodologia fmea para revisão das estratégias de manutenção em equipamentos de perfuração de uma mineradora. UFOP, João Monlevade - MG, 2019.



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XII