



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



ARTHUR SOUZA SALES CARDOSO

**ANÁLISE DE ÓLEO PARA O SISTEMA DE TREM-DE-FORÇA
DE UMA ESCAVADEIRA: O CASO DE UMA EMPRESA DO SETOR
DE MINERAÇÃO**

OURO PRETO - MG
2026

ARTHUR SOUZA SALES CARDOSO
arthur.cardoso@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE DE ÓLEO PARA O SISTEMA DE TREM-DE-FORÇA
DE UMA ESCAVADEIRA: O CASO DE UMA EMPRESA DO SETOR
DE MINERAÇÃO**

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

Orientador: DSc. Washington Luís
Vieira da Silva

OURO PRETO – MG
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C268a Cardoso, Arthur Souza Sales.

Análise de óleo para o sistema de trem-de-força de uma escavadeira [manuscrito]: o caso de uma empresa do setor de mineração. / Arthur Souza Sales Cardoso. - 2026.
101 f.

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

1. Manutenção - Manutenção preditiva. 2. Máquinas oleodráulicas - Escavadeira hidráulica. 3. Desgaste mecânico. I. Silva, Washington Luís Vieira da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Arthur Souza Sales Cardoso

Análise de óleo para o sistema de trem-de-força de uma escavadeira: o caso de uma empresa do setor de mineração

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

Aprovada em 12 de Fevereiro de 2026

Membros da banca

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

Washington Luís Vieira da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Washington Luis Vieira da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/02/2026, às 19:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1062565** e o código CRC **E6EAC5CF**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
meus pais e irmão, pelo apoio.

A minha namorada, pelo carinho.

Aos meus amigos do curso pelo
companheirismo...

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus, por iluminar meu caminho e me conceder força, saúde e sabedoria para que eu pudesse chegar até a conclusão deste trabalho. Sem Sua presença em minha vida, nada disso seria possível.

Aos meus pais, Solange e Marcelo, meu mais sincero agradecimento por todo o apoio, incentivo e compreensão ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Sou grato por estarem sempre ao meu lado, acreditando em mim, oferecendo suporte emocional e não medindo esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos, especialmente durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha namorada, Livia, agradeço profundamente por todo o apoio incondicional ao longo dessa caminhada. Obrigado pela paciência, incentivo constante, compreensão nos momentos de dificuldade e por estar sempre disposta a ajudar, seja com palavras de motivação ou simplesmente estando presente. Seu apoio foi fundamental para que eu conseguisse seguir firme até a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Washington Luís, agradeço pelo incentivo, pela orientação, pela disponibilidade e pela paciência durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Seus conhecimentos e direcionamentos foram essenciais para a realização deste TCC.

Agradeço também a Rodrigo Reis e Rafael Ferreira pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. O conhecimento compartilhado, as orientações e as contribuições técnicas fornecidas por ambos foram fundamentais para a conclusão deste TCC.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, agradeço pelas importantes contribuições ao longo da graduação, pelos ensinamentos transmitidos e pelo conhecimento compartilhado, que foram fundamentais para minha formação acadêmica e para o aprimoramento deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, agradeço pela convivência, pela troca de conhecimentos, pelo apoio mútuo e pelos momentos compartilhados ao longo dessa jornada acadêmica, que tornaram esse percurso mais leve e enriquecedor.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação acadêmica.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

A análise de óleo aplicada à manutenção de equipamentos de mineração constitui uma ferramenta essencial para a detecção precoce de desgaste, contaminação e degradação do lubrificante, reduzindo a probabilidade de falhas mecânicas inesperadas. Este trabalho caracteriza-se como um estudo de caso desenvolvido a partir do monitoramento de uma escavadeira hidráulica em operação de mineração, abrangendo os sistemas de motor, sistema hidráulico, redutor de giro e comando final. O objetivo foi realizar a análise de óleo para o sistema de trem-de-força de uma escavadeira de uma empresa do setor de mineração. A metodologia baseou-se na análise sistemática das amostras coletadas, na avaliação de tendências ao longo do tempo e na comparação entre critérios de referência. Como resultado, foram definidos novos limites operacionais para os sistemas avaliados, adotando faixas mais conservadoras em relação às originalmente recomendadas pelos fabricantes. No motor, o maior decréscimo ocorre no elemento Pb, com uma redução de 37,50%. No sistema hidráulico, o elemento com o maior decréscimo é o Al, houve uma redução de 42,50%. Já no redutor de giro e comando final, a redução mais expressiva é novamente observada no elemento Pb, que atinge 49,50%, sendo o maior valor de todos os sistemas analisados. Além disso, também foi realizado a proposição da adoção de limites fundamentados em normas ISO, visando maior controle da condição do lubrificante e aumento da vida útil dos componentes. Adicionalmente, foi elaborada uma tabela de interpretação dos principais parâmetros analisados, relacionando aumentos anormais a possíveis causas e estabelecendo planos de ação recomendados para suporte à tomada de decisão na manutenção preditiva. Os resultados sugerem que a estratégia proposta pode apresentar potencial para contribuir com a padronização do monitoramento por análise de óleo, o que poderia permitir uma maior consistência no diagnóstico e poderia auxiliar na identificação de intervenções preventivas antes da evolução para falhas críticas.

Palavras-chave: Análise de óleo. Manutenção preditiva. Escavadeira hidráulica. Limites técnicos. Desgaste mecânico.

ABSTRACT

The oil analysis applied to the maintenance of mining equipment is an essential tool for the early detection of wear, contamination, and lubricant degradation, reducing the probability of unexpected mechanical failures. This work is characterized as a case study developed from the monitoring of a hydraulic excavator operating in mining activities, covering the engine system, hydraulic system, swing reducer, and final drive. The objective was to perform an oil analysis of the powertrain system of an excavator belonging to a mining company. The methodology was based on the systematic analysis of collected samples, trend evaluation over time, and comparison against reference criteria. As a result, new operational limits were defined for the evaluated systems, adopting more conservative ranges compared to those originally recommended by the manufacturers. In the engine, the largest decrease occurs in the element Pb, with a reduction of 37.50%. In the hydraulic system, the element with the greatest decrease is Al, with a reduction of 42.50%. In the swing reducer and final drive, the most expressive reduction is again observed for the element Pb, reaching 49.50%, representing the highest value among all analyzed systems. Additionally, a proposal was made for adopting limits based on ISO standards, aiming to improve control of lubricant condition and increase component service life. A table was also developed to assist in the interpretation of the main parameters analyzed, correlating abnormal increases with possible causes and establishing recommended action plans to support decision-making in predictive maintenance. The results suggest that the proposed strategy has potential to contribute to the standardization of oil analysis monitoring, which could allow for greater consistency in diagnostics and support the identification of preventive interventions before the progression to critical failures.

Keywords: Oil analysis. Predictive maintenance. Hydraulic excavator. Technical limits. Mechanical wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da manutenção.....	5
Figura 2 – Evolução da manutenção.....	7
Figura 3 – Classificação das ações preventivas.....	10
Figura 4 – Curva da banheira.....	16
Figura 5 – Diagrama de Ishikawa.....	17
Figura 6 – Plano de manutenção preventiva.....	20
Figura 7– Fluxograma do procedimento metodológico da pesquisa.....	33
Figura 8 - Fluxograma da cadeia produtiva do minério de ferro.....	40
Figura 9 - Fluxograma da cadeia produtiva do minério de ferro.....	41
Figura 10 - Vista lateral e superior da escavadeira.....	43
Figura 11 – Componentes do motor.....	45
Figura 12 – Componentes do sistema hidráulico da escavadeira.....	47
Figura 13 – Redutor de giro da escavadeira.....	49
Figura 14 – Comando final da escavadeira.....	52
Figura 15 – Tanque hidráulico da escavadeira.....	57
Figura 16 – Comando final da escavadeira.....	58
Figura 17 – Parâmetros da análise de óleo do motor.....	66
Figura 18 – Parâmetros da análise de óleo do sistema hidráulico.....	68
Figura 19 – Parâmetro ISO do sistema hidráulico.....	70
Figura 20 – Relação entre número de partículas de diferentes tamanhos e o tempo de vida do material.....	71
Figura 21 – Parâmetros da análise de óleo do redutor de giro.....	72
Figura 22 – Parâmetros da análise de óleo do comando final lado direito.....	74
Figura 23 – Parâmetros da análise de óleo do comando final lado esquerdo.....	74
Figura 24 – Diagrama de Ishikawa.....	77

Figura 25 – Análise de óleo motor.....	79
Figura 26 – Diagrama de Ishikawa.....	80
Figura 27 – Análise de óleo sistema hidráulico.....	81
Figura 28 – Diagrama de Ishikawa.....	83
Figura 29 – Análise de óleo da transmissão.....	84
Figura 30 – Classificação de cada parâmetro da análise de óleo.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores de manutenção.....	13
Tabela 2 – Passo a passo para criação de um plano de lubrificação.....	25
Tabela 3 – Variáveis e Indicadores.....	36
Tabela 4 – Técnicas de coleta de dados.....	37
Tabela 5 – Peças do equipamento.....	44
Tabela 6 – Elementos principais do redutor de giro.....	50
Tabela 7 – Elementos principais do redutor de giro.....	52
Tabela 8 – Limites técnicos dos fabricantes.....	66
Tabela 9 – Limites técnicos dos fabricantes.....	68
Tabela 10 – Limites técnicos dos fabricantes.....	72
Tabela 11 – Direcionamento por parâmetro.....	87
Tabela 12 – Direcionamento por parâmetro.....	89
Tabela 13 – Direcionamento por parâmetro.....	90
Tabela 14 – Novos limites redutor de giro e comando final.....	92
Tabela 15 – Novos limites sistema hidráulico.....	92
Tabela 16 – Novos limites motor.....	92
Tabela 17 – Porcentagem de redução dos limites técnicos originais.....	95

LISTA DE SIMBOLOS

Ag – Prata

Al – Alumínio

API – American Petroleum Institute

°C – Grau Celsius

CDU – Classificação Decimal Universal

Cr – Cromo

Cu – Cobre

DEAC – Diesel Engine Antifreeze/Coolant

DF – Disponibilidade Física

DSc – Doutor em Ciências

ECC – ERP Central Component

ECM – Electronic Control Module

ELC – Extended Life Coolant

EPIs – Equipamentos de Proteção Individual

Fe – Ferro

GQT – Gestão da Qualidade Total

h – Hora

HH – Homem-hora

HS – Hydraulic System (Sistema hidráulico)

IP – Índice de Preventiva

IR – Índice de Retrabalho

ISO – International Organization for Standardization (Código de limpeza do óleo)

KPIs – Key Performance Indicators

kW – Quilowatt

LOCK – Posição de travamento da alavanca de segurança

mm – Milímetro

Mo – Molibdênio

MSc – Mestre em Ciências

MTBF – Mean Time Between Failures

Na – Sódio

Ni – Níquel

N·m – Newton-metro (Unidade de torque)

OEM – Original Equipment Manufacturer (Fabricante original)

Pb – Chumbo

PCM – Planejamento e Controle da Manutenção

PhD – Doutor em Filosofia

POP – Procedimento Operacional padrão

ppm – Partes por milhão

rpm – Rotações por minuto

SAP – Systems Applications and Products

Si – Silício

Sn – Estanho

SOS – Scheduled Oil Sampling (Programa de análise de óleo)

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

μm – Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Manutenção	5
2.2	Manutenção Preventiva	8
2.3	Planejamento e Controle da Manutenção	10
2.4	Parâmetros de manutenção	14
2.4.1	Procedimento Operacional Padrão (POP)	14
2.4.2	Curva da banheira.....	15
2.4.3	Diagrama de Ishikawa	17
2.5	Plano de Manutenção.....	18
2.6	Lubrificação.....	21
2.7	Plano de Lubrificação	23
2.8	Análise de óleo	26
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Tipo de pesquisa	30
3.2	Materiais e Métodos	33
3.3	Variáveis e Indicadores	35
3.4	Instrumento de coleta de dados	37
3.5	Tabulação dos dados.....	37
3.6	Considerações Finais do capítulo	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	A empresa	39
4.2	Descrição do equipamento.....	42
4.2.1	Função e Aplicação do Equipamento no Processo Produtivo	42
4.2.2	Motor	45

4.2.3	Sistema hidráulico	47
4.2.4	Redutor de giro	49
4.2.5	Comando final	52
4.3	Propostas.....	54
4.3.1	Procedimento de lubrificação	55
4.3.2	Procedimento de coleta de óleo	60
4.3.3	Características do lubrificante utilizado	61
4.3.4	Limites de desgaste e análise de SOS.....	64
4.3.5	Estudos de caso.....	76
4.3.6	Plano de ações para diferentes casos encontrados na análise de óleo	85
4.3.7	Recomendações	91
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	96
5.1	Conclusão	96
5.2	Recomendações	97
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Dentro do ambiente industrial, onde a competitividade cresce cada vez mais, os processos produtivos precisam ser constantemente otimizados, de forma a evitar desperdícios, aumentar a qualidade, elevar a produtividade e garantir maior agilidade na dinâmica empresarial. Nesse contexto, a manutenção torna-se uma atividade imprescindível para que tais requisitos sejam alcançados, mantendo a efetividade e um procedimento adequado de todo o processo produtivo.

Segundo Xenos (2004), a manutenção busca manter um item em condições adequadas para que ele desempenhe sua função requerida. Ainda de acordo com Xenos (2004, p.18), “manter é fazer tudo que for preciso para assegurar que um equipamento continue a desempenhar as funções para as quais foi projetado, num nível de desempenho exigido”. Dessa forma, é de suma importância que se realizem manutenções preventivas nos equipamentos, com o objetivo de preservar sua funcionalidade e evitar falhas inesperadas que comprometam a operação.

Para Viana (2002, p.10), “a manutenção preventiva é todo serviço de manutenção realizados em máquinas que não estejam em falha, que dessa forma proporcionam uma 'tranquilidade' operacional necessária para o bom andamento das atividades produtivas”. Além disso, o autor aborda que no intuito de realizar a manutenção de maneira satisfatória, é necessário traçar uma estratégia bem definida, tornando o plano de manutenção um elemento imprescindível para garantir a eficácia das ações preventivas.

Tal qual Xenos (2004, p.172), “um plano de manutenção consiste em um conjunto de ações preventivas e de datas para sua execução. Em outras palavras, um plano de manutenção é simplesmente um calendário de ações preventivas”. Portanto, pode-se dizer que o plano de manutenção é um planejamento realizado contendo quando cada uma das manutenções em determinado equipamento será realizada.

Por conseguinte, é necessário elaborar um plano de manutenção que contenha toda a estratégia relacionada, especificando com que frequência os componentes de cada equipamento devem ser trocados, reparados ou inspecionados.

De acordo com o material técnico da Petronas Lubrificants Brasil (2021), a função primordial dos lubrificantes é formar uma película entre superfícies em movimento relativo,

reduzindo significativamente o atrito sólido ao substituí-lo pelo atrito fluido. Ainda de acordo com o material, essa ação minimiza o desgaste mecânico, evita perdas de força durante a operação e contribui para o controle térmico do sistema, ao dissipar o calor gerado pelo atrito.

A lubrificação, fundamental para a redução do atrito e do desgaste entre superfícies em movimento relativo, é um dos pilares da manutenção eficiente em sistemas mecânicos, conforme descrito por Gregório (2018). Sob a perspectiva do autor, uma boa lubrificação pode aumentar significativamente a vida útil dos equipamentos. Nesse cenário, torna-se necessária a elaboração de um plano de lubrificação que atenda aos conceitos mencionados para cada tipo de maquinário, assegurando a eficiência operacional nos ambientes industriais.

De acordo com Almeida (2017) plano de lubrificação é um instrumento essencial da manutenção preventiva, responsável por organizar, padronizar e registrar todos os procedimentos de lubrificação aplicáveis aos diferentes equipamentos de uma operação industrial. Ainda na visão do autor, tal documento permite o planejamento e o controle dos lubrificantes usando, já que a depender do equipamento e da funcionalidade dos elementos um lubrificante diferente é necessário.

A análise de óleo é uma ferramenta estratégica no plano de lubrificação e na manutenção preventiva, pois permite avaliar as condições reais de funcionamento dos equipamentos por meio da análise físico-química do lubrificante (Moura, 2016).

Essa técnica possibilita a identificação antecipada de processos de desgaste, contaminações e degradação do óleo, atuando como um recurso relevante para o diagnóstico preditivo de falhas mecânicas (MOURA, 2016). Dessa forma, contribui para a tomada de decisões técnicas mais assertivas, reduzindo paradas não planejadas e aumentando a confiabilidade operacional dos ativos industriais (MOURA, 2016).

Na mineração, ter uma boa estratégia de análise de óleo é imprescindível, pois tais máquinas operam em condições extremas de carga, poeira e variações de temperatura.

Em vista disso, os equipamentos móveis de mina são aqueles que organizam o terreno, escavam o minério e os transportam em direção a usina, onde passam por uma série de processos para que assim sejam transportados e vendidos, dentre esses equipamentos tem-se que a escavadeira, muito usada no ambiente da mineração, tendo uma função crucial dentro do ambiente estudado.

Tal escavadeira tem como função escavar e remover o minério do solo, preparando-o para ser transportado por outros equipamentos até o local desejado. Ela opera em condições

exigentes e realiza tarefas fundamentais no processo de extração, movimentando grandes volumes de material. Tendo em vista seu desempenho e importância operacional, é visível que uma análise de óleo feita de maneira regular e bem estruturada é essencial para manter o bom funcionamento do equipamento.

Conforme o contexto apresentado, tem-se a seguinte problemática:

Como realizar a análise de óleo para o sistema de trem-de-força de uma escavadeira de uma empresa do setor de mineração?

1.2 Justificativa

Para Cruz (2021), a lubrificação é apresentada em estudos de manutenção preventiva como uma prática que pode contribuir para a redução de falhas e custos operacionais. Assim, Rodrigues *et al.* (2021) relatam que a adoção de um plano de lubrificação em máquinas de papel tissue resultou em maior confiabilidade dos componentes e redução das manutenções corretivas. Nesse contexto, esta investigação busca analisar como a lubrificação pode estar associada à melhoria dos processos internos e ao desempenho organizacional, contribuindo diretamente para a melhoria dos processos e o desempenho da empresa em questão.

A análise de óleo a ser proposto no estudo pode ser uma forma eficaz de melhorar os padrões de manutenção em equipamentos de mineração, além de permitir melhor controle dos procedimentos e ajudar a prever possíveis falhas que viriam a ocorrer antes mesmo que ocorram, assim auxiliando na integridade dos ativos, aumento de confiabilidade e a eficiência da operação.

Dessa forma, os resultados apresentados pelo trabalho podem aprimorar o funcionamento do equipamento, aumentar sua disponibilidade, otimizar a sua operação, trazer mais segurança e evitar falhar inesperadas. Essa abordagem também pode ser adaptada a outras máquinas com características similares, oferecendo uma contribuição técnica relevante ao setor.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar a análise de óleo para o sistema de trem-de-força de uma escavadeira de uma empresa do setor de mineração.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver um estudo teórico sobre: manutenção, manutenção preventiva, Planejamento e Controle da Manutenção, plano de manutenção, lubrificação e plano de lubrificação, análise de óleo;
- Elaborar um procedimento metodológico para definir as etapas da análise de óleo para o equipamento estudado;
- Realizar um diagnóstico a partir da análise do desgaste de componentes de uma escavadeira;
- Apresentar as etapas de análise de óleo para o sistema de trem-de-força de uma escavadeira;
- Realizar a análise de óleo a partir dos parâmetros da coleta do mesmo na análise de SOS.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 1, são apresentados o problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos, destacando a necessidade de avaliar a análise de óleo no sistema de trem-de-força de uma escavadeira usada na mineração.

O capítulo 2 reúne a fundamentação teórica sobre manutenção, manutenção preventiva, PCM, planos de manutenção, lubrificação e análise de óleo, abordando ainda as vantagens e limitações de cada conceito e técnica.

O capítulo 3 descreve a metodologia adotada, incluindo a abordagem qualitativa, a pesquisa exploratória, o estudo de caso da escavadeira, os instrumentos de coleta de dados, o procedimento de coleta das amostras de óleo e a definição dos indicadores analisados.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões obtidos a partir das análises SOS dos sistemas da máquina, comparando limites técnicos, identificando tendências de desgaste e descrevendo os principais componentes do equipamento para embasar a interpretação dos dados.

Por fim, o capítulo 5 reúne as conclusões do estudo e as recomendações, indicando melhorias para os limites de análise de óleo, sugestões de ajustes nos procedimentos de manutenção e possibilidades de trabalhos futuros relacionados ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção

Antes de aprofundar os conceitos relacionados à manutenção, é importante compreender um pouco de sua trajetória histórica. Segundo Viana (2002), a manutenção começou a ganhar relevância com o advento da Revolução Industrial, no século XVII. Ainda segundo o autor, à medida que os equipamentos industriais se tornavam mais complexos, crescia também a necessidade de desenvolver práticas específicas para garantir seu funcionamento contínuo e eficiente.

Ainda de acordo com Viana (2002), a partir de 1900, começaram a ser implementadas as primeiras práticas de gestão da manutenção. Para o mesmo autor, durante a Segunda Guerra Mundial, essa necessidade se intensificou, uma vez que a eficiência operacional e a economia de recursos tornaram-se fatores cruciais para o esforço de guerra. Curiosamente, o termo “manutenção” só passou a ser utilizado por volta de 1950, nos Estados Unidos, substituindo gradualmente o termo “conservação”, especialmente na Europa, onde também começou a ganhar espaço nos ambientes produtivos (VIANA, 2002).

A Figura 1 detalha a evolução da Manutenção ao longo do tempo, destacando marcos importantes desde a década de 1950 até os anos 2000.

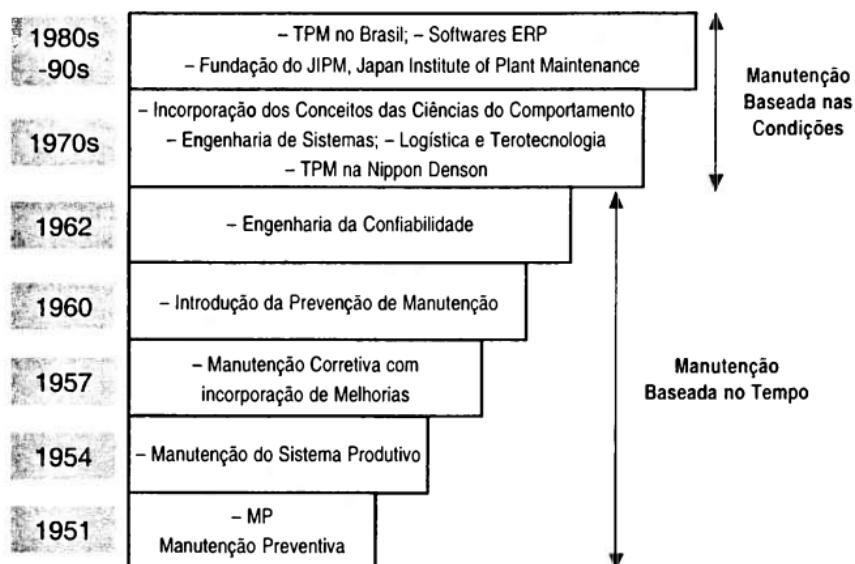


Figura 1 – Evolução da manutenção
Fonte: Viana (2002).

Observa-se na Figura 1 o desenvolvimento da manutenção ao longo de um período de 50 anos, evidenciando a transição de práticas simples e reativas, ainda presentes contemporaneamente, para abordagens mais complexas, integradas e estratégicas. Essa evolução significativa reforçar a crescente importância da manutenção no ambiente industrial.

Além disso, baseado na Figura 1, a adoção de novas técnicas e metodologias passou a ser vista não apenas como uma vantagem competitiva, mas como uma necessidade para garantir a confiabilidade operacional, reduzir custos, aumentar a produtividade e promover a sustentabilidade dos processos produtivos.

Da perspectiva Kardec (2009), no atual cenário empresarial marcado por intensa competitividade, a manutenção dos ativos deve ser realizada de forma ágil e precisa. O autor destaca que o objetivo da manutenção é justamente evitar a necessidade de intervenções corretivas, ou seja, prevenir falhas antes que elas ocorram. Para isso, é essencial que as equipes estejam devidamente capacitadas e preparadas.

Ainda de acordo com Kardec (2009), quando a manutenção é executada de maneira adequada, ela impacta positivamente diversos aspectos da organização, como a disponibilidade dos ativos, o faturamento, a lucratividade, a segurança dos colaboradores, a eficiência no atendimento às demandas, a redução de custos e a preservação ambiental. Esses fatores evidenciam a importância estratégica da manutenção e a necessidade contínua de aprofundamento do conhecimento nessa área (KARDEC, 2009).

Dentre os métodos de gestão da manutenção, pode-se destacar a Gestão da Qualidade Total (GQT). Xenos (2004) conceitua como um sistema de gestão voltado à produção de bens e serviços com alto padrão de qualidade, visando atender às necessidades dos clientes. O mesmo autor aborda que a GQT exige o envolvimento de todos os setores da organização, como planejamento, produção, marketing e assistência técnica, pois todos contribuem para manter os padrões de qualidade. Essa abordagem promove uma cultura organizacional voltada à melhoria contínua e à satisfação do cliente (XENOS, 2004).

Xenos (2004, p. 44) destaca os mandamentos do GQT:

- I. “O cliente em primeiro lugar. Nossas ações devem ser orientadas para a satisfação das necessidades e expectativas dos clientes;
- II. Conheça exatamente a situação atual da sua empresa, departamento ou seção;
- III. Reconheça claramente os pontos fracos do seu local de trabalho;
- IV. Oriente suas decisões por prioridades, atacando primeiro o mais crítico e deixando de lado o menos importante;
- V. Não se concentre somente nos resultados, o processo é mais importante;

- VI. Observe os fatos e levante dados. Saia do escritório e observe os problemas onde eles estão ocorrendo;
- VII. Não observe somente a média, a distribuição dos dados é mais importante;
- VIII. A qualidade se faz durante o processo produtivo. Não adianta correr atrás do problema depois que ele aconteceu. Atue preventivamente;
- IX. Instruções de boca são rapidamente esquecidas. Ao dar instruções sobre uma tarefa crítica, utilize procedimentos escritos;
- X. Ao detectar problemas, tome as contramedidas necessárias imediatamente.
- XI. Estabeleça um sistema para evitar a reincidência dos problemas;
- XII. Respeite seus colegas, empregados e superiores como seres humanos, promovendo um bom relacionamento e um local de trabalho agradável para todos”.

A Figura 2 detalha os princípios da GQT e os principais pontos de cada um desses princípios.

PRINCÍPIOS DA GESTÃO PELA QUALIDADE TOTAL	
Princípio	Pontos Importantes
Enfoque Prioritário no Cliente	• Market in (centralização no mercado) • O processo posterior é o cliente • Investigação da fonte dos problemas (busca exaustiva das causas fundamentais)
Importância da Aplicação de Métodos Estatísticos	• Ênfase nos fatos e dados (gerenciamento baseado em fatos e dados) • Priorização (poucos vitais e muitos triviais) • Gerenciar com os olhos voltados para a dispersão (reduzir a variabilidade)
Importância do Todo	• Disseminar a qualidade por toda a empresa • Busca do envolvimento de todos os setores (girar o Ciclo PDCA com a participação de todos os setores da empresa) • Ênfase no processo (incorporar a qualidade no processo) • Participação de todas as pessoas (criar um local de trabalho alegre através dos Círculos de Controle da Qualidade - CCQ's - e Sistemas de Sugestões)

Figura 2 – Evolução da manutenção
Fonte: Xenos (2004).

Observa-se na Figura 2 reforça de que a GQT é uma abordagem sistêmica, que depende do envolvimento de todos na organização e da aplicação disciplinada de métodos para alcançar a excelência.

Sellitto (2005) enfatiza a confiabilidade como um pilar estratégico na gestão da manutenção industrial, definindo-a como a probabilidade de um equipamento desempenhar sua função esperada, sem falhas, durante um intervalo de tempo determinado e sob condições operacionais específicas. Para o autor, a confiabilidade vai além de seu papel técnico tradicional, assumindo uma função decisiva na formulação de políticas de manutenção voltadas à eficiência e à competitividade organizacional. Quando aplicada corretamente, ela contribui significativamente para a redução de desperdícios de tempo e recursos, permitindo um planejamento mais eficiente das ações de manutenção (SELLITTO, 2025).

Dessa forma, Sellitto (2005) exclama que a confiabilidade torna possível a tomada de decisões mais assertivas quanto à intervenção em equipamentos, evitando falhas inesperadas e prejuízos operacionais. Sellitto (2005) destaca que, ao ser utilizada de forma estratégica, essa ferramenta permite que a empresa maximize o desempenho de seus ativos, otimize o uso de recursos e melhore sua performance geral. Assim, a confiabilidade deixa de ser apenas um dado técnico e passa a ser um elemento essencial para o sucesso da gestão da manutenção industrial (SELLITTO, 2025).

Assim, diante do contexto, a manutenção compreende um amplo conjunto de práticas, técnicas e ferramentas aplicadas, de forma integrada, com o objetivo de assegurar a confiabilidade, a disponibilidade e a segurança dos ativos físicos.

Portanto, com base no que foi abordado no texto, conclui-se que a manutenção preventiva configura-se como uma estratégia eficaz para reduzir falhas, prevenir acidentes e aumentar a produtividade, sendo aplicada conforme as exigências específicas de cada sistema ou equipamento.

2.2 Manutenção Preventiva

Segundo a norma NBR 5462 (1994), a manutenção preventiva é definida como a manutenção realizada em intervalos predeterminados ou conforme critérios técnicos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falhas ou a degradação do desempenho de um item. Ainda segundo a norma, essa abordagem permite antecipar problemas, prolongar a vida útil dos componentes e otimizar os recursos operacionais, contribuindo diretamente para a eficiência produtiva e a segurança no ambiente de trabalho.

A manutenção preventiva, segundo Xenos (2004), é uma prática planejada que visa preservar o funcionamento ideal dos equipamentos antes que qualquer falha ocorra, garantindo maior confiabilidade ao processo produtivo. De acordo com Xenos (2004), ela é realizada com base em critérios técnicos e intervalos definidos, o que permite reduzir drasticamente a necessidade de intervenções emergenciais. Xenos (2004) também destaca que essa abordagem melhora o controle de materiais no almoxarifado, pois possibilita prever com precisão quais itens serão utilizados e em que momento.

Xenos (2004) ressalta que o Planejamento e Controle da Produção depende diretamente da manutenção preventiva para organizar o calendário de paradas e otimizar os recursos disponíveis. Para Xenos (2004), ao evitar panes inesperadas, essa prática reduz custos

operacionais e evita impactos negativos na produtividade e no moral da equipe. Além disso, Xenos (2004) afirma que a repetição das atividades preventivas permite o aperfeiçoamento contínuo dos métodos de trabalho, tornando a atuação da equipe cada vez mais eficiente e segura.

Kardec (2013, p.43) cita os momentos onde a manutenção preventiva deve ser utilizada, mostrando os fatores que devem ser levados em consideração:

- “Quando não é possível a manutenção preditiva;
- Aspectos relacionados com a segurança pessoal ou da instalação que tornam mandatária a intervenção, normalmente para substituição de componentes;
- Por oportunidade em equipamentos críticos de difícil liberação operacional;
- Riscos de agressão do meio ambiente;
- Em sistemas complexos e/ou de operação contínua”.

Ainda segundo Kardec (2013), a manutenção preventiva pode introduzir defeitos que não existiam no equipamentos anteriormente. Dentre os possíveis motivos para tal, tem-se falha humana, falha de sobressalentes, contaminações introduzidas no sistema de óleo, danos durante partidas e paradas, falhar de procedimentos de manutenção.

De acordo com Xenos (2004), a manutenção preventiva pode ser definida como um conjunto de ações preventivas realizadas em determinado intervalo de tempo, tais ações são divididas em ações baseadas no tempo, que são aquelas realizadas em intervalos fixos de tempo, e em ações baseadas na condição, que são manutenções realizadas a partir de uma inconsistência encontrada durante a inspeção periódica.

A figura 3 mostra a divisão das ações preventivas e algumas de suas possíveis aplicações.

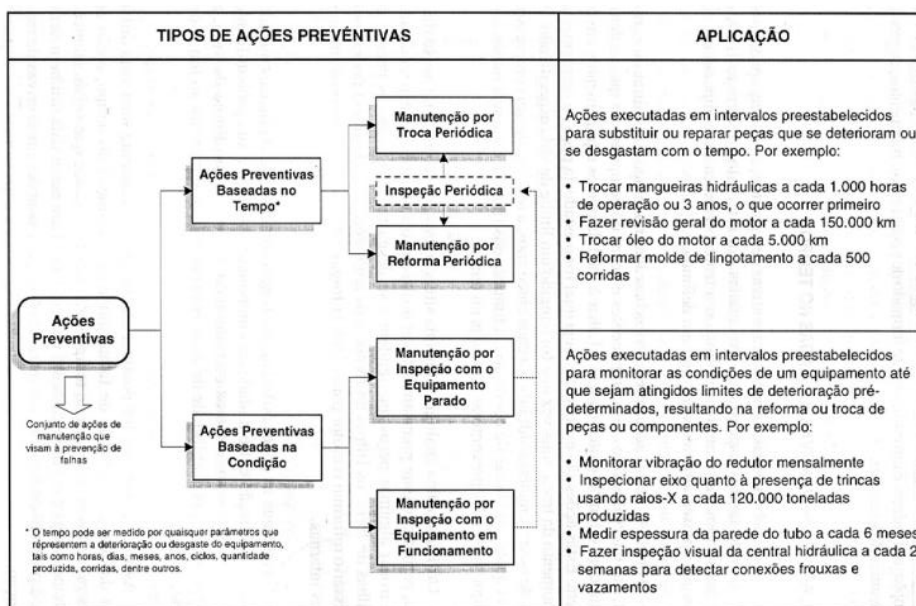


Figura 3 – Classificação das ações preventivas
Fonte: Xenos (2004).

A figura 3 apresenta exemplos de ações preventivas baseadas no tempo e na condição, como troca de óleo e monitoramento de vibração, além de listar tipos de manutenção preventiva como inspeção periódica e reforma programada. Ela destaca a importância de realizar manutenções em intervalos definidos ou conforme sinais de desgaste.

Diante do exposto, fica evidente que a manutenção preventiva desempenha um papel estratégico na gestão de ativos industriais, promovendo a redução de falhas, custos e o aumento da segurança operacional. Ao considerar diferentes abordagens — como ações baseadas no tempo e na condição — e compreender seus benefícios e limitações, as organizações podem estruturar planos de manutenção mais eficazes e sustentáveis. Assim, a adoção consciente e planejada da manutenção preventiva se consolida como um diferencial competitivo essencial para a longevidade dos equipamentos e a excelência dos processos produtivos.

2.3 Planejamento e Controle da Manutenção

De acordo com Viana (2002), o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) configura-se como um órgão de apoio (staff) à área de manutenção, estando diretamente subordinado à gerência do departamento. Sua principal função é oferecer suporte técnico e administrativo, contribuindo para a eficiência e eficácia das atividades de manutenção. Conforme descrito por Viana (2002), o PCM ocupa uma posição estratégica no organograma organizacional, interagindo com diversas gerências, como operação, manutenção, suprimentos e engenharia.

Segundo Cabral e Rodrigues (2017), o PCM atua em quatro frentes fundamentais: planejamento, provisionamento, programação e controle. Essas funções são essenciais para garantir que os serviços de manutenção sejam executados de forma estruturada, com os recursos adequados e dentro dos prazos estabelecidos, promovendo o aumento da produtividade e a redução de custos operacionais.

De acordo com Cabral e Rodrigues (2017), a função de planejamento compreende a definição dos métodos de execução das atividades, a estimativa de tempo, a alocação de mão de obra e a identificação dos materiais necessários. Ainda de acordo com os autores, o provisionamento, por sua vez, refere-se à reserva ou aquisição dos materiais previamente planejados, assegurando sua disponibilidade no momento da execução. Essa função exige integração com os setores de compras e almoxarifado, além de um controle eficaz de estoques (CABRAL; RODRIGUES, 2017).

UNICESUMAR (2025) destaca que a programação no setor de PCM é responsável por definir o que, quanto e quando produzir. Segundo a UNICESUMAR (2025), o acompanhamento dessas ordens é essencial para garantir o cumprimento dos prazos e a eficiência do processo. A UNICESUMAR (2025) também aborda que a programação deve estar alinhada ao planejamento estratégico para assegurar qualidade, produtividade e controle de custos. Por fim, a UNICESUMAR (2025) alerta que muitas empresas negligenciam essa etapa, focando apenas na produção, o que compromete os resultados.

Para a UNICESUMAR (2025), o controle da produção no PCM busca garantir que as ordens sejam cumpridas corretamente e no prazo, com apoio de um sistema de informações eficiente. Esse sistema, conforme a UNICESUMAR (2025), deve registrar dados atualizados sobre materiais, equipamentos e andamento das ordens. A UNICESUMAR (2025) explica que o PCP transforma essas informações em decisões práticas, permitindo ajustes rápidos. Assim, o controle se torna essencial para manter a eficiência e a confiabilidade da produção, como reforça a UNICESUMAR (2025).

Ferreira e Fernandes (2020) abordam que além das funções clássicas de planejamento, programação, provisionamento e controle, o PCM também desempenha um papel fundamental na gestão de indicadores de desempenho da manutenção. Ainda de acordo com os autores, a coleta e análise de dados operacionais são essenciais para o monitoramento da eficiência dos processos, permitindo a avaliação de métricas como MTBF (tempo médio entre falhas), MTTR (tempo médio para reparo), disponibilidade e aderência à programação.

De acordo com a ABRAMAN (2023), o PCM atua como elo entre os setores, recebendo demandas operacionais e organizando as intervenções de manutenção com base em critérios técnicos e estratégicos, como criticidade dos ativos, paradas programadas e metas de produtividade. Essa atuação integrada garante que as ações de manutenção estejam alinhadas com os objetivos globais da empresa, contribuindo para a excelência operacional.

Ferreira e Fernandes (2020) destacam que o PCM deve ser estruturado com base em sistemas de informação integrados, como ERPs, e possuir profissionais capacitados em confiabilidade e engenharia de manutenção. Essa abordagem permite que o PCM atue de forma proativa, antecipando falhas, otimizando recursos e promovendo a sustentabilidade dos processos produtivos (FERREIRA; FERNANDES; 2020).

A tabela 1 mostra os indicadores mais importantes na perspectiva de Viana (2002).

Tabela 1 – Indicadores de manutenção.

Indicador	Descrição
<i>Backlog:</i>	Representa o volume de serviços de manutenção pendentes de execução. É medido em horas-homem (HH) e indica a carga de trabalho acumulada. Um backlog equilibrado permite planejamento eficiente e evita sobrecarga ou ociosidade da equipe.
DF (Disponibilidade Física):	É o percentual de tempo em que um equipamento está disponível para operar em relação ao tempo total. Reflete a confiabilidade dos ativos e a eficácia da manutenção.
IR (Índice de Retrabalho)	Mede a quantidade de ordens de manutenção que precisaram ser refeitas. Um alto índice indica falhas na execução, baixa qualidade ou diagnóstico incorreto.
IP (Índice de Preventiva):	Mostra a proporção de manutenções realizadas de forma planejada, antes da falha. Um bom índice de preventiva está associado à maior confiabilidade e menor custo de manutenção.
HH	É a unidade de medida do esforço de trabalho. Representa uma hora de trabalho de um colaborador. É usada para dimensionar equipes, planejar atividades e calcular indicadores como backlog e produtividade.

Fonte : Viana (2002)

A Tabela 1 apresenta a descrição de alguns dos principais indicadores utilizados no setor de PCM, oferecendo uma visão clara e objetiva sobre seu papel no controle da produção. Essa sistematização contribui para a análise e o acompanhamento eficiente dos processos produtivos.

A análise dos dados, aliada aos conceitos de PCM, revela uma estrutura de manutenção organizada e com potencial de evolução. A categorização das ordens, o uso de prioridades e a possibilidade de aplicar indicadores como *backlog*, DF e índices de manutenção demonstram uma base sólida para decisões mais estratégicas. Esses elementos, alinhados às práticas recomendadas por Viana (2002), indicam um caminho claro para o fortalecimento da gestão da manutenção.

2.4 Parâmetros de manutenção

2.4.1 Procedimento Operacional Padrão (POP)

Segundo Campos (1999), um Procedimento Operacional Padrão (POP) é um documento formal que descreve, de maneira objetiva, a forma correta e padronizada de executar uma atividade, garantindo que o processo seja realizado sempre da mesma maneira, independentemente de quem o execute. Para o autor, a padronização estabelecida pelo POP é fundamental para assegurar que todas as etapas do processo sejam cumpridas de forma clara, lógica e coerente, reduzindo significativamente a variabilidade operacional. Campos (1999) enfatiza que a existência de um roteiro documentado evita improvisações, falhas decorrentes de interpretações individuais e desvios que possam comprometer a qualidade do resultado final, garantindo assim maior estabilidade aos processos organizacionais.

Ainda conforme Campos (1999), o POP é uma das bases da gestão da qualidade, pois somente processos padronizados podem ser devidamente medidos, avaliados e posteriormente aprimorados. O autor destaca que a padronização proporciona um ambiente propício para a melhoria contínua, uma vez que a uniformidade na execução permite identificar com precisão as causas de problemas, testar soluções e verificar resultados de forma estruturada. Dessa forma, os POPs não apenas orientam a execução das tarefas, mas também servem como instrumentos estratégicos de gestão, contribuindo para a consistência operacional, para o aumento da confiabilidade dos processos e para o fortalecimento da cultura de excelência dentro das organizações (Campos, 1999).

Segundo a Nomus (2026), um POP deve conter:

- Identificação do documento, incluindo nome da tarefa, responsável, número do POP, data de criação, data da revisão e número da versão, garantindo controle e rastreabilidade do procedimento (NOMUS, 2026);

- Lista completa dos materiais necessários, assegurando que o executor disponha de todos os recursos antes de iniciar a atividade (NOMUS, 2026);
- Descrição dos passos críticos, organizados em sequência lógica e coerente, representando o fluxo real da rotina e orientando o trabalhador de forma clara e padronizada (NOMUS, 2026);
- Orientações de manuseio do material após a execução, incluindo organização do ambiente, descarte adequado e registro das informações geradas (NOMUS, 2026);
- Definição dos resultados esperados, contendo critérios de verificação que permitam avaliar se o procedimento foi realizado conforme o padrão estabelecido (NOMUS, 2026);
- Ações corretivas, indicando como proceder diante de falhas, desvios, falta de materiais ou situações imprevistas durante a execução (NOMUS, 2026);
- Aprovação formal do documento, registrada pelas assinaturas dos executores, do supervisor e da gerência, validando o POP antes de sua aplicação operacional (NOMUS, 2026).

A Nomus também afirma que um POP deve incluir orientações sobre o manuseio adequado dos materiais e documentos após o término da tarefa, indicando como organizar o posto de trabalho, descartar resíduos e registrar corretamente as informações produzidas na execução (NOMUS, 2026). Ademais, o POP precisa definir os resultados esperados, estabelecendo parâmetros que permitam verificar se o procedimento foi executado de forma correta e conforme o padrão estabelecido pela empresa (NOMUS, 2026).

Além disso, o documento deve prever ações corretivas, descrevendo o que o executor deve fazer caso ocorram falhas, falta de materiais, problemas com máquinas ou qualquer situação fora do padrão (NOMUS, 2026). Por fim, o POP deve ser aprovado formalmente por duas assinaturas de executores, pelo supervisor e pela gerência, concluindo o processo de validação e assegurando que o procedimento esteja autorizado para uso operacional (NOMUS, 2026).

2.4.2 Curva da banheira

Segundo Xenos (2004), a *Curva da Banheira* representa o comportamento típico da frequência de falhas ao longo da vida útil de um equipamento. O autor explica que essa curva recebe esse nome devido ao seu formato característico, que se assemelha ao contorno lateral de uma banheira: alto no início, baixo no meio e novamente crescente no final. Essas curvas são

divididas em três períodos distintos, cada um com características e causas de falhas específicas (XENOS, 2004).

O primeiro trecho da curva corresponde ao período de falhas prematuras, em que a frequência de falhas é inicialmente elevada devido a defeitos de fabricação, erros de montagem, ajustes incorretos ou problemas iniciais de operação (XENOS, 2004). Em seguida, ocorre o trecho central, chamado de período de falhas aleatórias, no qual a taxa de falhas se mantém praticamente constante, sendo causada por fatores imprevisíveis e que não estão relacionados diretamente ao desgaste do equipamento (XENOS, 2004). Por fim, o último trecho da curva corresponde ao período de falhas por desgaste, no qual a frequência de falhas volta a aumentar progressivamente devido ao envelhecimento natural dos componentes, deterioração de materiais, fadiga e efeitos acumulados do uso prolongado (XENOS, 2004).

A Figura 4 mostra como é a curva da banheira.

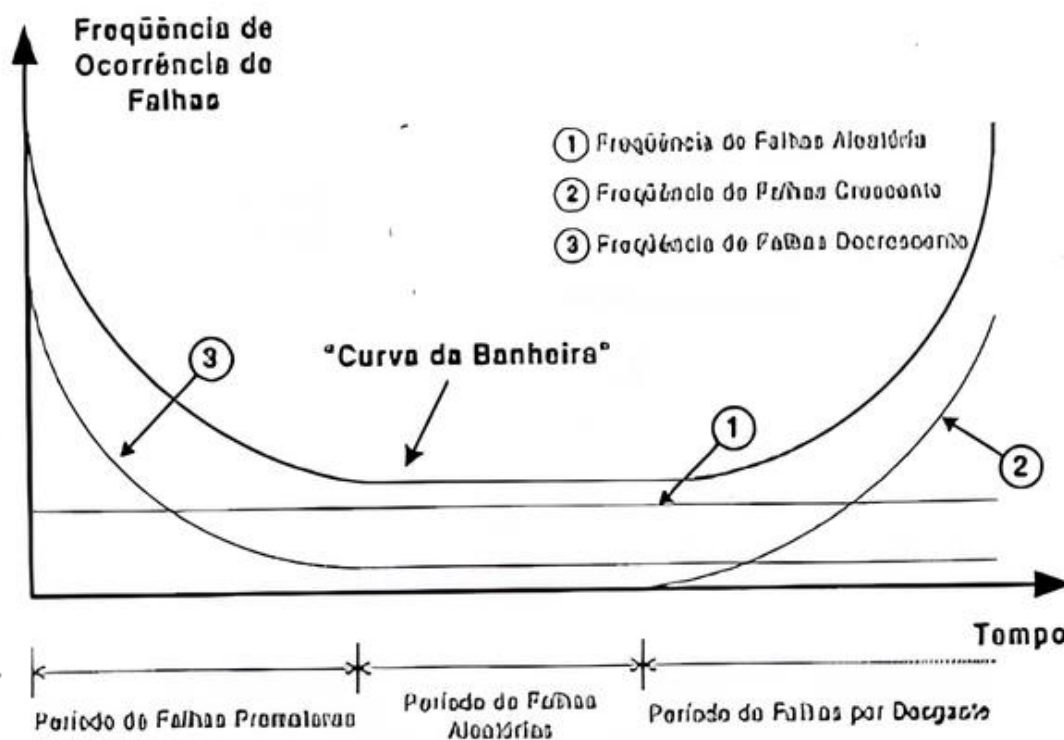


Figura 4 – Curva da banheira.
Fonte: Xenos (2004).

A Figura 4 mostra a Curva da Banheira, evidenciando os três períodos distintos do comportamento de falhas. A imagem apresenta, de forma visual, a queda brusca das falhas após a fase inicial (falhas prematuras), seguida por um longo intervalo de estabilidade onde as falhas são aleatórias e, finalmente, por um crescimento gradual da taxa de falhas devido ao desgaste do equipamento. Essa representação gráfica auxilia na compreensão das estratégias de

manutenção mais adequadas para cada etapa da vida útil do equipamento, conforme discutido por Xenos (2004).

2.4.3 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, também chamado de Diagrama de Causa e Efeito ou Diagrama Espinha de Peixe, é definido como uma ferramenta visual que auxilia na identificação e organização das possíveis causas de um problema ou resultado indesejado (LeverPro, 2025). Segundo o blog da LeverPro, ele permite representar de forma lógica todos os fatores que podem influenciar um efeito, facilitando a compreensão das origens de um problema e promovendo uma análise estruturada das causas (LeverPro, 2025).

Ainda de acordo com a LeverPro (2025), o Diagrama de Ishikawa segue uma sequência de passos para sua construção, iniciando com a definição clara do problema, que deve ser colocado na “cabeça do peixe”, e a partir disso desenha-se a espinha central para depois identificar as categorias principais de causas (LeverPro, 2025).

As categorias clássicas, conhecidas como 6Ms — Máquina, Método, Medida, Mão de Obra, Material e Meio Ambiente — são utilizadas para organizar as causas potenciais que podem influenciar o problema analisado (LeverPro, 2025). Por fim, o texto da LeverPro (2025) destaca que o uso colaborativo dessa ferramenta, por meio do levantamento das possíveis causas e posterior priorização, auxilia equipes a entender melhor as origens dos desafios e definir ações mais eficazes para corrigi-los e melhorar processos críticos (LeverPro, 2025).

A Figura 5 mostra um exemplo de um diagrama de Ishikawa na prática.

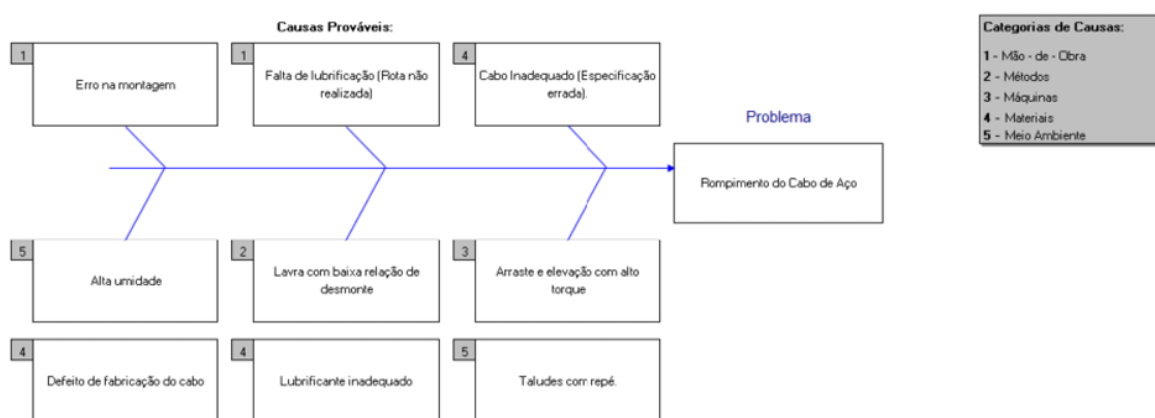


Figura 5 – Diagrama de Ishikawa.
Fonte: Viana (2021).

A Figura 5 mostra a aplicação do Diagrama de Ishikawa para análise do modo de falha “Rompimento do Cabo de Aço”. Observa-se que as causas prováveis foram organizadas

conforme as cinco categorias utilizadas no exemplo — (1) Mão de Obra, (2) Métodos, (3) Máquinas, (4) Materiais e (5) Meio Ambiente — cada uma representada nas ramificações principais da “espinha de peixe”. No diagrama, identificam-se causas relacionadas à mão de obra, como erro na montagem, causas ligadas aos métodos, como lavoura com baixa relação de desmonte e arraste e elevação com alto torque, além de causas referentes às máquinas, como falta de lubrificação e lubrificante inadequado.

Também estão representadas causas associadas aos materiais, entre elas defeito de fabricação do cabo e cabo inadequado, e causas ligadas ao meio ambiente, como alta umidade e taludes com repetição. A partir dessa estrutura, nota-se que o diagrama permite visualizar de maneira clara como diferentes fatores podem contribuir para o rompimento do cabo de aço, facilitando a investigação das causas-raiz e a definição de ações corretivas.

Em síntese, a integração entre o Procedimento Operacional Padrão, a Curva da Banheira e o Diagrama de Ishikawa demonstra que a excelência operacional depende tanto da padronização das atividades quanto da compreensão técnica do comportamento das falhas e da identificação estruturada de suas causas.

Conforme evidenciado por Campos (1999), o POP assegura uniformidade na execução dos processos, enquanto Xenos (2004) destaca que a Curva da Banheira orienta intervenções de manutenção alinhadas ao ciclo de vida dos equipamentos; já o Diagrama de Ishikawa, segundo LeverPro (2025), amplia a capacidade de análise ao revelar graficamente os fatores que contribuem para problemas críticos. Assim, ao utilizar essas ferramentas de forma articulada, as organizações fortalecem a confiabilidade de seus sistemas, aprimoram o desempenho operacional e consolidam práticas eficazes de melhoria contínua, garantindo resultados mais consistentes e sustentáveis.

2.5 Plano de Manutenção

Conforme Conterato (2017), o planejamento da manutenção mecânica é definido como a organização e padronização das atividades referentes à manutenção de equipamentos. O autor afirma que o plano de manutenção deve ser uma forma eficiente e rápida de gerenciar as necessidades de manutenção dos equipamentos após sua utilização. Conterato (2017) descreve que esse planejamento é realizado por meio da identificação das principais características dos equipamentos, o que permite a elaboração de um cronograma de manutenções e verificações.

Ainda segundo Conterato (2017), essas manutenções e verificações são atribuídas aos responsáveis por meio de ordens de manutenção. Campos *apud* Conterato (2017), que define a ordem de manutenção como um pedido feito pelo gestor da manutenção ou por alguém ligado à área de produção.

De acordo com Xenos (2004), um plano de manutenção é composto por um conjunto de ações preventivas e pelas datas em que essas ações devem ser executadas. O autor afirma que a elaboração do plano depende da realização de inspeções preventivas nos equipamentos, e que quanto maior o conhecimento sobre as necessidades de manutenção preventiva, melhor será o conteúdo do plano. O plano, segundo Xenos (2004), representa um calendário de intervenções destinadas a evitar falhas e garantir o bom funcionamento dos equipamentos.

Xenos (2004) também explica que a elaboração dos planos torna-se mais simples quando já se conhecem as operações de inspeção, reforma ou troca exigidas pelos equipamentos, bem como seus respectivos intervalos. Ainda conforme Xenos (2004), essas informações devem estar contidas nos padrões de manutenção, os quais incluem critérios formais, instruções detalhadas e frequência das tarefas. O autor acrescenta que, mesmo na ausência desses padrões, é possível elaborar planos com base na experiência acumulada pelos técnicos da área.

A Figura 6 ilustra um exemplo de plano de manutenção de um sistema de climatização por ar-condicionado.

Descrição da Atividade	Periodicidade	Data da execução	Executado por	Aprovado por
a) Condicionador de Ar (do tipo "expansão direta" e "água gelada")				
Verificar e eliminar sujeira, danos e corrosão no gabinete, na moldura da serpentina e na bandeja;	Mensal			
Limpar as serpentinas e bandejas;	Mensal			
Verificar a operação dos controles de vazão;	Mensal			
Verificar a operação de drenagem de água da bandeja;	Quinzenal			
Verificar o estado de conservação do isolamento termoacústico;	Bimestral			
Verificar a vedação dos painéis de fechamento do gabinete;	Mensal			
Verificar a tensão das correias para evitar o escorregamento;	Mensal			
Lavar as bandejas e serpentinas com remoção do biofilme (lobo), sem o uso de produtos desengraxantes e	Bimestral			

Figura 6 – Plano de manutenção preventiva
Fonte: Silva (2014)

A Figura 6 mostra um plano de manutenção preventiva para sistemas de ar-condicionado do tipo expansão direta e água gelada. O plano inclui atividades como limpeza de serpentinas e bandejas, verificação de vazamentos, controles de vazão, drenagem, isolamento termoacústico e tensão das correias. As tarefas são realizadas com periodicidades mensais, quinzenais ou bimestrais, e cada uma deve ser registrada com data, responsável pela execução e aprovação.

De acordo com Lima (2023), a pesquisa realizada evidenciou a importância de um plano de manutenção preventiva para o laboratório de usinagem. O autor destaca que a implementação desse plano é essencial para obter um controle mais eficaz sobre a manutenção dos equipamentos, com o objetivo de reduzir falhas inesperadas e otimizar os resultados. Ainda segundo Lima (2023), os benefícios associados à manutenção preventiva incluem o aumento da confiabilidade, melhor desempenho dos equipamentos, redução de custos e prolongamento da vida útil de componentes e máquinas.

Lima (2023) também observa que, embora os resultados positivos não sejam imediatamente perceptíveis na fase inicial de implementação, eles se tornam evidentes após um período de adaptação. O autor aponta que, apesar de exigir maior esforço da equipe de manutenção, o plano preventivo é mais eficaz e econômico a longo prazo do que a manutenção corretiva,

A partir do conteúdo analisado é possível notar que o plano de manutenção preventiva é uma ferramenta essencial para garantir o bom desempenho e a durabilidade dos equipamentos. Sua elaboração, baseada em inspeções regulares e no conhecimento técnico, permite organizar as tarefas de forma eficiente, reduzir falhas inesperadas e otimizar os recursos disponíveis. A aplicação prática, como exemplificado na Figura 4, reforça a importância da padronização e do controle das atividades de manutenção.

2.6 Lubrificação

Viana (2002) afirma que a lubrificação é importante para conservar elementos mecânicos, reduzindo o atrito entre superfícies que estariam em contato direto, minimizando o desgaste dos componentes mecânicos dos equipamentos. Ainda segundo o autor, os elementos passíveis de lubrificação possuem funções diferentes, por isso a lubrificação desses componentes devem ser realizadas de maneira distinta.

O atrito entre superfícies em contato é uma das principais causas de desgaste em componentes mecânicos, afetando diretamente o desempenho e a produtividade dos maquinários industriais como explicam Rodrigues, Miranda e Kurowsky (2021).

Rodrigues, Miranda e Kurowsky (2021) abordam que para evitar falhas, paradas inesperadas ou quebras de peças, é fundamental o uso de filmes lubrificantes, como graxas e óleos, que reduzem o atrito e aumentam a confiabilidade dos equipamentos. Em empresas do setor papeleiro, essas situações são frequentes, e a adoção de planos de lubrificação como forma de manutenção preventiva tem se mostrado eficaz na redução de manutenções corretivas e dos custos associados a esse tipo de intervenção, conforme apontado por Rodrigues, Miranda e Kurowsky (2021).

Viana (2002) explica que, embora existam lubrificantes gasosos e sólidos, como o ar, a grafita e a mica, os mais utilizados na indústria são os líquidos (óleos) e semi-sólidos (graxas). Segundo Viana (2002), os óleos lubrificantes, geralmente de origem mineral, são obtidos a partir do petróleo e classificados conforme sua base: parafínica, intermediária ou naftênica.

Viana (2002) também destaca que esses óleos podem receber aditivos com funções específicas, como detergentes, antioxidantes e anticorrosivos, e que, apesar da existência de óleos vegetais, animais e sintéticos, os minerais predominam nas aplicações industriais.

Ainda conforme Viana (2002), as graxas são compostas por um espessante disperso em um lubrificante líquido, com consistência entre sólida e semifluida, podendo conter aditivos. Viana (2002) aponta que elas são aplicadas em locais com risco de contaminação, exposição ao ambiente ou difícil acesso, devido à sua função vedante. O autor também menciona diferentes tipos de graxas, como as de base de cálcio, lítio e alumínio. Viana (2002) afirma que, após identificar os pontos de lubrificação, é necessário escolher o tipo adequado de lubrificante, sua frequência de aplicação e o método utilizado, organizando essas informações em roteiros de lubrificação por localização, tipo de lubrificante e método de aplicação.

Segundo Altan *apud* Maciel (2016), além de reduzir o atrito e o desgaste, o lubrificante deve atuar como um meio de proteção contra aderência de material, corrosão e excesso de calor, sendo este último dissipado pelo próprio veículo do lubrificante. Keeeler *apud* Maciel (2016) complementa que essa proteção ocorre por meio de uma barreira lubrificante que isola completamente a superfície da ferramenta da peça metálica, sendo sua eficácia dependente de parâmetros como viscosidade, molhabilidade e aditivos.

Já Martinez *apud* Maciel (2016) reforça que o objetivo do lubrificante é substituir o atrito sólido por um atrito fluido, o que exige estabilidade térmica, inércia química e capacidade de manter as superfícies limpas. Esses autores evidenciam que a lubrificação vai além da simples redução de atrito, sendo um elemento técnico essencial para o controle da deformação, proteção da ferramenta e qualidade do produto final.

Segundo Nadkarni (2007), a composição química dos lubrificantes é essencial para seu desempenho, sendo formulados com bases e aditivos específicos para resistir à oxidação, corrosão e pressão. O autor destaca que fatores como temperatura, carga e velocidade influenciam diretamente na escolha dos aditivos. Nadkarni (2007) também afirma que testes laboratoriais padronizados são fundamentais para garantir que o lubrificante atenda aos requisitos técnicos da aplicação.

Ainda conforme Nadkarni (2007), a presença de certos compostos pode afetar a compatibilidade com materiais metálicos e não metálicos. O autor explica que propriedades como viscosidade, acidez e teor de água devem ser analisadas para prever o comportamento do

lubrificante. Nadkarni (2007) conclui que a química do lubrificante influencia diretamente na confiabilidade dos sistemas e na prevenção de falhas.

A adição de compostos à base de molibdênio aos lubrificantes promove a formação *in situ* de filmes protetores, principalmente de dissulfeto de molibdênio (MoS_2), que possui estrutura lamelar com baixa resistência ao cisalhamento (JONES *et al*, 2020). Essa estrutura permite o deslizamento entre camadas, reduzindo o atrito em regimes de lubrificação de limite (JONES *et al*, 2020). O MoS_2 atua como barreira física, prevenindo o contato metálico direto e diminuindo o desgaste por deslizamento (JONES *et al*, 2020). A estabilidade térmica dos filmes formados é favorecida pela presença do molibdênio, mesmo sob variações extremas de temperatura (JONES *et al*, 2020).

A decomposição de compostos organomolibdênio durante a operação gera MoS_2 , que protege os componentes sob altas pressões (JONES *et al*, 2020). A combinação com elementos como o boro potencializa o desempenho térmico e a estabilidade da formulação, especialmente em veículos elétricos (JONES *et al*, 2020). Assim, os aditivos de molibdênio se destacam como elementos-chave na engenharia de lubrificantes modernos e na pesquisa tribológica (JONES *et al*, 2020).

Como já abordado ao longo deste texto, a lubrificação desempenha um papel essencial na preservação de componentes mecânicos, na redução do atrito e na prevenção de falhas operacionais. A escolha adequada do lubrificante, juntamente com o uso de aditivos específicos, foi destacada como um fator determinante para melhorar o desempenho térmico e garantir maior proteção contra o desgaste. Além disso, destaca-se que a aplicação correta do lubrificante contribui significativamente para a eficiência dos processos, prolonga a vida útil dos equipamentos e reduz os custos com manutenções corretivas.

2.7 Plano de Lubrificação

Para Miyamoto (2022), o ponto crucial da gestão da lubrificação industrial é o planejamento de lubrificação, pois é nesse registro que estão contidos os procedimentos e ações a serem tomadas, como os intervalos de lubrificação, o modo de aplicação e as instruções de segurança. Conforme Almeida *apud* Miyamoto (2022), o plano de lubrificação reúne informações dos maquinários da empresa e dados importantes, como a frequência e a especificação do lubrificante a ser utilizado, considerando a variedade de produtos disponíveis no mercado e suas funções na manutenção das peças.

Ainda segundo Miyamoto (2022), a elaboração do plano, é necessário conhecimento dos pontos principais da máquina, especialmente onde existe maior esforço, bem como dos componentes que a compõem. Através de um adequado planejamento de manutenção, é possível alcançar níveis mais elevados de disponibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, do processo produtivo, sendo a disponibilidade operacional um indicador chave de excelência em manutenção e garantia de produtividade para Filho *apud* Miyamoto (2022).

Segundo Mobley *apud* Rodrigues (2021), a lubrificação industrial, mesmo sendo uma forma primitiva de manutenção preventiva, é uma ferramenta eficaz para a redução de custos e o aumento da produção, desde que aplicada corretamente. Para que um programa de lubrificação seja implementado em toda a fábrica, Mobley *apud* Rodrigues (2021), destaca que a gerência deve realizar uma pesquisa detalhada em cada peça de equipamento, considerando as recomendações dos fabricantes, as condições operacionais, como contaminantes e temperaturas, e o histórico da máquina.

De acordo com Alverson *apud* Rodrigues (2021), essas informações podem ser informatizadas para criar cronogramas de lubrificação, definir intervalos de troca de óleo e organizar rotas para execução das tarefas. Já Duane *apud* Rodrigues (2021), ressalta que os responsáveis pela lubrificação devem ser treinados para executar as tarefas conforme o plano ou cronograma, sendo também habilitados para o manuseio, aplicação e armazenamento correto dos lubrificantes.

A Tabela 2 mostra da perspectiva de (PLANO de lubrificação, 2023), o passo a passo da criação de um plano de lubrificação.

Tabela 2 – Passo a passo para criação de um plano de lubrificação.

Etapas	Descrição
Levantamento de Equipamentos	Liste todos os equipamentos que necessitam de lubrificação, incluindo tipo, modelo e fabricante. Mapeie os pontos de lubrificação em cada máquina.
Seleção de Lubrificantes	Certifique-se da compatibilidade dos lubrificantes com os materiais das máquinas. Considere temperatura, ambiente e carga de trabalho.
Definição de Frequência e Quantidade	Estabeleça a frequência e a quantidade correta de lubrificante para cada ponto, com base em horas de operação ou tempo.
Procedimentos de Aplicação	Defina o método de aplicação adequado (manual, automático, spray etc.) e as ferramentas corretas para garantir precisão.
Treinamento da Equipe	Capacite a equipe para aplicar lubrificantes corretamente, identificar problemas e seguir normas de segurança com EPIs.
Implementação de Controles	Controle quais máquinas foram lubrificadas, quando e por quem. Monitore o consumo de lubrificantes e mantenha histórico.
Monitoramento e Ajustes	Avalie a eficácia do plano com KPIs como MTBF e custos. Ajuste o plano com base em dados e mudanças operacionais.
Revisão e Melhoria Contínua	Realize auditorias periódicas e use tecnologias como sensores IoT para garantir a melhoria contínua do plano.

Fonte: Abecom (2025)

A tabela 2 apresenta uma estrutura organizada para a criação de um plano de lubrificação, segmentada em etapas sequenciais, e orienta desde o levantamento inicial dos equipamentos até a revisão contínua do processo, abordando aspectos técnicos, operacionais e de gestão. Também destaca a importância do controle, da capacitação da equipe e da análise de desempenho para garantir a eficácia do plano ao longo do tempo.

Segundo Fernandes (2014), a elaboração de um plano de lubrificação é fundamental para garantir a sistematização e organização das técnicas e teorias aplicadas ao processo de manutenção industrial. Fernandes (2014) destaca que, ao estruturar o projeto em planos de lubrificação contendo todas as informações necessárias, é possível cercar possíveis erros operacionais e assegurar a eficiência das tarefas.

Com base na análise do conteúdo estudado, constata-se que o plano de lubrificação representa um instrumento indispensável para a gestão eficiente da manutenção industrial. Quando devidamente estruturado e executado, esse plano contribui significativamente para a preservação dos equipamentos, promovendo a redução de falhas operacionais, a diminuição de custos com reparos corretivos e o aumento da vida útil dos ativos.

Além disso, sua aplicação adequada favorece a melhoria das condições de segurança no ambiente de trabalho, a padronização dos procedimentos e a otimização dos recursos técnicos e humanos envolvidos nos processos produtivos.

O conteúdo apresentado, reforçou a importância da manutenção preventiva como estratégia essencial para garantir a eficiência e a confiabilidade dos equipamentos industriais. Dentre os diversos aspectos abordados, destacou-se a lubrificação como elemento central na redução do atrito, prevenção do desgaste e prolongamento da vida útil dos componentes mecânicos, especialmente em ambientes severos como o da mineração.

Também foi evidenciado que a escolha adequada dos lubrificantes, aliada ao uso de aditivos específicos e à aplicação correta, é fundamental para o desempenho dos equipamentos. A elaboração de um plano de lubrificação bem estruturado, adaptado às necessidades de cada máquina, como a escavadeira, é indispensável para assegurar a continuidade operacional e reduzir custos com falhas inesperadas.

2.8 Análise de óleo

De acordo com Soluções Industriais (2025), a análise de óleo é uma prática essencial para garantir a confiabilidade e a eficiência dos equipamentos industriais. Um dos principais benefícios é a produtividade, pois o acompanhamento rigoroso dos sistemas e as inspeções periódicas asseguram que os equipamentos permaneçam disponíveis e operando em sua melhor capacidade, aumentando o rendimento do processo (Soluções Industriais, 2025)..

Ainda de acordo com Soluções Industriais (2025), outro benefício destacado é a redução de custos, já que as análises permitem identificar anomalias, como desgaste excessivo ou presença de contaminantes, possibilitando ações corretivas antes que ocorram falhas graves e prejuízos maiores.

Por fim, a manutenção preditiva proporcionada pela análise de óleo permite que intervenções sejam realizadas no momento certo, evitando desgaste prematuro e falhas não identificadas, assegurando maior segurança operacional e prolongando a vida útil dos ativos (Soluções Industriais, 2025).

Para Trico Corporation (2023), compreender o valor da análise de óleo é o primeiro passo para sua implementação eficaz, pois essa prática vai além de testar lubrificantes, oferecendo uma visão detalhada sobre a condição dos equipamentos. Ainda de acordo com a página monitorar partículas de desgaste, contaminantes e sinais de degradação do óleo, é

possível obter alertas antecipados sobre falhas potenciais, integrando-se a outras técnicas como análise de vibração e termografia para uma abordagem completa da saúde dos ativos.

Para a Trico Corporation (2023), o passo a passo para uma implementação eficaz da análise de óleo deve ser feito seguido os seguintes passos:

1. Compreender o valor da análise de óleo

A análise de óleo é uma ferramenta estratégica que permite antecipar falhas e reduzir custos, complementando outras práticas de manutenção preditiva.

2. Identificar os equipamentos críticos

Nem todas as máquinas exigem o mesmo nível de monitoramento. Devem ser priorizados os ativos que impulsionam a produção, operam continuamente ou possuem alto custo de substituição, garantindo maior retorno sobre o investimento.

3. Definir objetivos claros para o programa

Estabelecer metas específicas é essencial para direcionar o programa. Entre as mais comuns estão: prolongar a vida útil do lubrificante, reduzir paradas não programadas, melhorar o planejamento da manutenção e detectar contaminações ou desgaste precocemente.

4. Escolher o parceiro certo para análise de óleo

Recomenda-se optar por laboratórios ou soluções internas que ofereçam testes completos, relatórios rápidos e recomendações práticas. Caso a empresa opte por realizar análises internamente, deve garantir equipamentos adequados e equipe treinada.

5. Estabelecer um programa de amostragem

A precisão da análise depende da coleta correta, que deve seguir intervalos consistentes, técnicas adequadas para evitar contaminação e garantir amostras representativas das condições reais de operação. Para máquinas críticas, recomenda-se maior frequência de coleta ou uso de sensores em tempo real.

6. Integrar os resultados às ações de manutenção

Os dados obtidos devem ser utilizados para programar intervenções com base em alertas antecipados, otimizar cronogramas de lubrificação e troca de óleo, investigar fontes de contaminação e coordenar com outras técnicas de monitoramento para confirmar diagnósticos.

7. Treinar a equipe

O treinamento é indispensável para garantir a eficácia do programa. Ressalta-se que os profissionais devem ser capacitados para realizar a coleta corretamente, interpretar relatórios e aplicar as conclusões nas decisões de manutenção.

8. Monitorar e aprimorar continuamente

Por fim enfatiza-se a importância da melhoria contínua. É necessário revisar periodicamente o desempenho do programa, analisando tendências de confiabilidade, economia obtida e precisão das decisões baseadas na análise. Ajustes nos intervalos de coleta, parâmetros e procedimentos devem ser feitos conforme necessário para manter o alinhamento com os objetivos estratégicos.

Mobil (2025) aborda os seguintes tópicos relacionados aos testes de análise de óleo:

- Viscosidade (ASTM D445): Indica alterações na resistência à vazão do óleo, podendo sinalizar mudanças físicas ou contaminação por outros fluidos;
- Oxidação por FTIR: Identifica subprodutos prejudiciais da degradação térmica do lubrificante, representando uma alteração física;
- Nitração por FTIR: Detecta subprodutos da combustão, sendo também uma alteração física do lubrificante;
- Glicol por FTIR / ASTM D2982: Indica a presença de fluido de arrefecimento no óleo de motor;
- Fuligem por FTIR: Identifica subprodutos de combustíveis não queimados, caracterizando contaminação;
- Água (FTIR / placa quente / Karl Fischer ASTM D1744): Detecta a presença de água, um contaminante crítico que acelera a degradação do óleo e das superfícies metálicas;
- Número de Ácido Total (TAN – ASTM D664): Mede subprodutos ácidos da oxidação e contaminação, indicando alteração física do lubrificante;
- Diluição por combustível (Cromatografia gasosa): Identifica a presença de combustível no óleo, outro tipo de contaminação;
- Análise de elementos por ICP (Espectroscopia de Plasma Acoplado Indutivamente): Detecta aditivos e partículas metálicas de desgaste;
- Número de Base Total (TBN – ASTM D4739): Avalia a capacidade do óleo de neutralizar ácidos, indicando alteração física;

- Contagem de partículas (ISO): Determina tamanho e quantidade de contaminantes sólidos presentes no óleo.

Com base no conteúdo abordado, é possível entender que a análise de óleo representa uma estratégia indispensável para garantir a eficiência e a confiabilidade dos processos industriais. Além de permitir o monitoramento contínuo das condições do lubrificante e dos componentes internos, essa prática contribui para reduzir custos, aumentar a produtividade e prolongar a vida útil dos equipamentos. Quando bem estruturada, possibilita intervenções planejadas, evita falhas inesperadas e assegura maior segurança operacional, tornando-se um recurso essencial para manter a competitividade e a sustentabilidade das operações.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

De acordo com Minayo (2001), a abordagem qualitativa é voltada para a compreensão dos significados, valores e percepções atribuídos pelos sujeitos aos fenômenos sociais, onde a autora se fundamenta na análise de contextos e experiências, buscando interpretar a realidade a partir da perspectiva dos envolvidos. Essa abordagem não se limita à mensuração de variáveis, mas sim à interpretação profunda das relações e processos, sendo especialmente adequada para estudos que envolvem dinâmicas humanas, organizacionais e culturais. resultados e discussões (MINAYO,2001).

No contexto do estudo proposto, que visa à elaboração de estratégias relacionadas aos parâmetros encontrados nas análises de óleo para uma escavadeira utilizada em operações de mineração, a abordagem qualitativa se mostra pertinente por permitir a análise das práticas de manutenção a partir da vivência dos profissionais envolvidos.

Através da observação e da coleta de informações junto a operadores e técnicos, é possível compreender como os procedimentos são executados na prática, quais são os desafios enfrentados e quais critérios orientam a escolha dos lubrificantes e a frequência das intervenções. Essa compreensão contextualizada contribui para a formulação de um plano mais eficaz, alinhado às condições reais de operação e às necessidades específicas do equipamento e do ambiente de trabalho.

Segundo Marconi e Lakatos (2017), a pesquisa exploratória tem como principal objetivo proporcionar maior familiaridade com um problema ainda pouco conhecido, permitindo ao pesquisador desenvolver hipóteses ou aprimorar ideias. Essa abordagem é caracterizada pela flexibilidade metodológica, sendo especialmente útil em estudos iniciais, nos quais o pesquisador busca compreender melhor o fenômeno investigado. A pesquisa exploratória pode envolver levantamento bibliográfico, entrevistas com especialistas ou análise de exemplos que ajudem a esclarecer os aspectos fundamentais do objeto de estudo

A pesquisa exploratória contribui significativamente para o desenvolvimento deste trabalho ao permitir o levantamento inicial de informações sobre as práticas de lubrificação aplicadas à escavadeira em ambiente de mineração. Por meio dessa abordagem, foi possível identificar os principais componentes sujeitos a desgaste, os tipos de lubrificantes utilizados e os critérios adotados para sua aplicação. Essa etapa investigativa serviu como base para a

formulação da estratégia mais adequada à realidade operacional da empresa, considerando tanto os aspectos técnicos quanto as condições específicas de uso do equipamento.

Segundo Fachin (2017), a pesquisa documental consiste na coleta, classificação, seleção difusa e utilização de toda a espécie de informações, abrangendo também as técnicas e métodos que facilitam sua busca e identificação. Ainda de acordo com o autor, essa abordagem se destaca por utilizar documentos como fontes primárias, sejam eles escritos, visuais ou orais, que não foram previamente analisados com fins científicos. A pesquisa documental é especialmente útil quando se busca compreender fenômenos a partir de registros originais, como relatórios institucionais, cartas, fotografias, certidões, entre outros, permitindo ao pesquisador acessar dados autênticos e contextualizados diretamente da fonte (FACHIN,2017).

A pesquisa documental, conforme utilizada neste trabalho, está diretamente relacionada às atividades de levantamento de informações técnicas sobre a escavadeira, como manuais de operação, catálogos de fabricantes, fichas de manutenção e normas técnicas. Esses documentos serão fundamentais para identificar os componentes que exigem lubrificação, selecionar os tipos adequados de lubrificantes, definir a frequência de aplicação e organizar os procedimentos operacionais.

Assim, todas as etapas da construção das estratégias atreladas às análises de óleo serão embasadas em registros originais, caracterizando o uso da pesquisa documental como método central na elaboração da proposta técnica.

Para Boccato (2006) a pesquisa bibliográfica é feita a partir de um levantamento e análise crítica dos documentos publicados sobre o tema a ser pesquisado para atualizar, desenvolver o conhecimento e assim contribuindo para que seja feita a pesquisa acadêmica foco do estudo.

Dessa forma, esse tipo de pesquisa é elaborado a partir de material já publicado, como livros, artigos científicos, periódicos, teses, dissertações e outros documentos disponíveis, com o objetivo de colocar o pesquisador em contato direto com o conhecimento acumulado sobre o assunto (PRODANOV; FREITAS,2013)

A pesquisa bibliográfica é essencial para reunir conhecimentos técnicos sobre manutenção preventiva e lubrificação, permitindo embasar teoricamente a elaboração das estratégias relacionadas a análise de óleo da escavadeira. Por meio da análise de materiais já publicados, é possível compreender práticas consolidadas e aplicá-las ao contexto da mineração.

De acordo com Goode e Hatt (1973), o estudo de caso é uma estratégia metodológica que permite a investigação profunda e detalhada de um objeto específico, possibilitando compreender suas particularidades e complexidades. Ainda segundo os autores, essa abordagem é eficaz para obter conhecimento amplo sobre um fenômeno, especialmente quando outras metodologias não seriam capazes de captar suas nuances.

Já Sátyro e D’Albuquerque (2020) destacam que o estudo de caso contribui para a construção de teorias e para a análise de causalidades complexas, sendo útil tanto em abordagens qualitativas quanto quantitativas.

No contexto desta monografia, o estudo de caso será aplicado à análise de uma escavadeira utilizada em operações de mineração, com ênfase na interpretação dos resultados das análises de óleo de seus principais sistemas. A metodologia adotada baseia-se na avaliação do aumento dos parâmetros metálicos e contaminantes, de modo que cada elemento identificado fora dos padrões de normalidade seja associado aos possíveis componentes de origem do desgaste ou da falha.

A partir desse direcionamento técnico, torna-se possível localizar potenciais pontos de falha, estabelecer novos limites operacionais mais adequados às condições reais de serviço e propor melhorias nos procedimentos de manutenção e lubrificação, promovendo maior confiabilidade operacional e redução de falhas não planejadas.

3.2 Materiais e Métodos

A Figura 7 mostra os passo a passo proposto para realização do projeto proposto

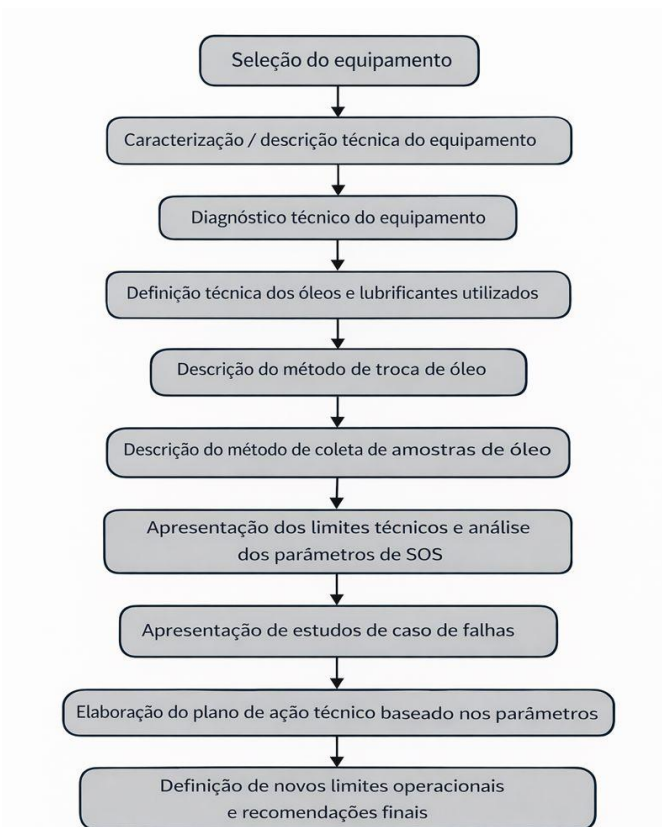


Figura 7: Fluxograma do procedimento metodológico da pesquisa.
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Conforme a Figura 7, o processo metodológico inicia-se com a seleção do equipamento, adotando-se como critério principal o valor do horímetro. A escolha da escavadeira com maior número de horas de operação justifica-se pela maior disponibilidade de dados históricos de manutenção e de análises de óleo, o que possibilita uma avaliação mais representativa dos efeitos do uso prolongado sobre os sistemas mecânicos, hidráulicos e de transmissão. Essa decisão visa garantir maior robustez técnica às análises subsequentes.

Na sequência, realiza-se a caracterização técnica do equipamento, etapa que compreende a coleta e organização de informações detalhadas, tais como marca, modelo, ano de fabricação, arquitetura dos sistemas, capacidades de reservatórios, especificações construtivas e condições típicas de operação. Essas informações são obtidas por meio de manuais técnicos, documentação do fabricante e da plataforma Visiolink, responsável pelo fornecimento de dados operacionais históricos. Essa etapa é fundamental para contextualizar o comportamento do equipamento e subsidiar corretamente as análises posteriores.

Com base nessa caracterização, procede-se ao diagnóstico técnico do equipamento, cujo objetivo é identificar os sistemas críticos, os pontos de lubrificação relevantes e os principais modos de falha associados, tais como desgaste abrasivo, fadiga superficial, contaminação por partículas sólidas, presença de água e degradação térmica do lubrificante. Os dados operacionais extraídos do Visiolink auxiliam na identificação de desvios de funcionamento e no histórico de intervenções, permitindo estabelecer correlações entre condições de operação e potenciais mecanismos de falha.

Posteriormente, realiza-se a definição técnica dos óleos e lubrificantes utilizados em cada sistema (motor, sistema hidráulico, transmissão e redutores), considerando as recomendações do fabricante, normas técnicas aplicáveis, condições ambientais e severidade de operação. São avaliados parâmetros como viscosidade, classificação API/ISO, estabilidade térmica, resistência à oxidação e compatibilidade com materiais.

Em complemento, são descritos os procedimentos adotados para a troca de óleo, contemplando práticas operacionais, controle de contaminação, limpeza dos sistemas, substituição de filtros, volumes aplicados e condições de operação durante a troca. Da mesma forma, estabelece-se o método padronizado de coleta de amostras de óleo feitas pela empresa, de modo a garantir a confiabilidade dos resultados laboratoriais.

Na etapa seguinte, realiza-se a apresentação dos limites técnicos adotados para os parâmetros de análise de óleo, considerando tanto os valores recomendados pelo fabricante original quanto referências de fabricantes alternativos. Em paralelo, são analisados os resultados históricos das análises de óleo (SOS), com ênfase na evolução temporal dos elementos de desgaste, bem como na interpretação das tendências segundo o conceito da curva da banheira.

Adicionalmente, são apresentados estudos de caso extraídos de análises de falha da própria empresa analisada, evidenciando situações em que equipamentos sofreram falhas mesmo apresentando parâmetros inferiores aos limites originalmente estabelecidos pelos fabricantes. Essa análise reforça a necessidade de uma abordagem mais conservadora e ajustada às condições reais de operação, especialmente em ambientes severos como a mineração.

A partir desse conjunto de informações, é elaborado um plano de ação técnico, no qual cada elemento químico monitorado é associado aos possíveis componentes de origem do desgaste, contaminação ou deterioração permitindo o direcionamento preciso das inspeções e

intervenções. Esse plano estabelece ações corretivas, preventivas e preditivas, priorização de sistemas críticos e ajustes nos procedimentos de manutenção.

Por fim, são definidos novos limites operacionais recomendados para os parâmetros de análise de óleo, bem como propostas de melhorias nos procedimentos de manutenção, lubrificação e monitoramento. Essas recomendações visam aumentar a confiabilidade operacional, reduzir falhas inesperadas e prolongar a vida útil dos sistemas da escavadeira, consolidando a análise de óleo como uma ferramenta central no processo decisório da manutenção preditiva aplicada à mineração.

3.3 Variáveis e Indicadores

Para o site VIA CARREIRA (2025), as variáveis em uma pesquisa científica representam os elementos ou características que podem ser observados, medidos ou modificados ao longo do estudo, onde elas são fundamentais para a estruturação dos objetivos e para a análise dos resultados. Ainda segundo o portal, variáveis são tudo aquilo que pode assumir diferentes valores e que o pesquisador deseja investigar, como tempo, temperatura, desempenho ou desgaste de componentes.

No contexto deste trabalho, a variável central é a análise de óleo, pois é a partir da análise dos dados técnicos da escavadeira — como frequência de uso, desgaste dos componentes e tipos de lubrificante — que se busca desenvolver e aplicar essa solução de manutenção preventiva.

Indicadores são instrumentos de mensuração que permitem avaliar o desempenho, a evolução ou o estado de determinado fenômeno. De acordo com Prado e Castanha (2020), os indicadores são recursos aplicados com o objetivo de estabelecer processos de avaliação e mensuração, sendo amplamente utilizados em contextos científicos e tecnológicos para compreender tendências e tomar decisões estratégicas.

No contexto deste trabalho, os indicadores definidos — como a quantidade de pontos de lubrificação identificados, recomendações do fabricante, a frequência recomendada de aplicação, o tipo de lubrificante especificado, o método de aplicação, a clareza das instruções, a facilidade de implementação e a adequação às condições de operação — serão fundamentais para avaliar a eficácia e a aplicabilidade da nova estratégia proposta para a escavadeira.

A tabela 3 mostra as variáveis e indicadores envolvidos nesse trabalho.

Tabela 3 -Variáveis e Indicadores

Variável	Indicadores
Análise de óleo	• Quantidade de pontos de lubrificação identificados; • Periodicidade recomendada de aplicação; • Recomendações do fabricante; • Tipo de lubrificante especificado para cada ponto; • Método de aplicação definido (manual, automático etc.); • Padronização; • SAP ECC; • Facilidade de implementação do plano; • Adequação as condições de operação (poeira, temperatura, carga); • Parâmetros de desgaste, deterioração, contaminação e formulação; • Indicadores de degradação do lubrificante; • Curva da banheira; • Diagnostico; • Limites técnicos; • Normas técnicas.

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A tabela 3 tem como objetivo organizar os critérios de avaliação da análise de óleo e propor estratégias atreladas a mesma. Nela, a variável central é a própria análise de óleo, e os indicadores definidos permitem mensurar sua qualidade e aplicabilidade.

Entre os aspectos avaliados estão a identificação dos pontos de lubrificação e a periodicidade recomendada de aplicação, as recomendações dos fabricantes, o tipo de lubrificante especificado e o método de aplicação adotado, bem como o nível de padronização e a integração com sistemas de gestão, como o SAP ECC. Adicionalmente, são considerados os parâmetros de desgaste, deterioração, contaminação e formulação do lubrificante, os indicadores de degradação, a análise de tendências por meio da curva da banheira, o diagnóstico técnico dos sistemas, os limites operacionais adotados e a conformidade com normas técnicas aplicáveis.

Essa estrutura possibilita uma avaliação sistemática e aprofundada das condições reais de operação da escavadeira, assegurando que as diretrizes propostas estejam alinhadas às exigências práticas do ambiente de mineração e à maximização da confiabilidade e da vida útil do equipamento.

3.4 Instrumento de coleta de dados

A tabela 4 mostra as técnicas de coleta de dados utilizadas no trabalho.

Tabela 4 – Técnicas de coleta de dados

Técnica de Coleta	Descrição
Visiolink	O Visiolink será utilizado para coletar dados operacionais da escavadeira, como horas de uso e condições de funcionamento.
Manual do fabricante	O manual do fabricante será consultado para obter as recomendações técnicas sobre os tipos de lubrificantes, intervalos de troca e especificações dos componentes. Isso garante que o plano siga as orientações do fabricante, promovendo maior durabilidade e eficiência do equipamento.
Planilha no Excel	A planilha será usada como ferramenta de organização e acompanhamento do estudo. Ela servirá para registrar os dados coletados, estruturar o passo a passo da análise.

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A Tabela 4 apresenta as técnicas de coleta utilizadas no desenvolvimento das novas estratégias atreladas a análise de óleo. O software Visiolink foi empregado para obter dados operacionais da escavadeira, como tempo de uso, essenciais para definir a periodicidade das trocas. O manual do fabricante forneceu as recomendações técnicas sobre lubrificantes e intervalos ideais. Já a planilha no Excel serviu como ferramenta de organização e acompanhamento das etapas do estudo.

3.5 Tabulação dos dados

Para a tabulação e organização dos dados coletados neste estudo, serão utilizados os softwares Microsoft Word, Microsoft Excel e Visiolink. O Word será empregado na sistematização textual das informações e registros técnicos; o Excel será utilizado para estruturar tabelas, gráficos e planilhas de controle dos pontos de lubrificação e suas respectivas frequências; e o Visiolink será aplicado na visualização e análise gráfica dos componentes da

escavadeira, permitindo identificar com precisão os pontos de lubrificação e apoiar a construção do plano proposto.

3.6 Considerações Finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os tipos de pesquisa utilizados para a condução do estudo, incluindo a pesquisa documental, bibliográfica e o estudo de caso, todos devidamente contextualizados com o objetivo da monografia.

Além disso foi proposto um procedimento metodológico para orientar a elaboração de novas estratégias a partir da análise de óleo para a escavadeira, a partir da análise dos dados técnicos obtidos por meio do software Visiolink. No capítulo seguinte, são exploradas essas informações, permitindo a identificação dos pontos críticos de lubrificação e a definição das estratégias adequadas para elaboração do plano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 A empresa

A empresa atua no setor de mineração, com foco principal na extração e beneficiamento de minério de ferro. No Brasil, esse setor possui grande relevância econômica e estratégica, pois está diretamente associado ao desempenho das exportações nacionais e à geração de empregos diretos e indiretos. Além disso, o país apresenta ampla diversidade mineral e reservas significativas, o que contribui para sua posição de destaque no cenário internacional, especialmente na produção de recursos como minério de ferro, bauxita, ouro e nióbio.

No contexto global, o Brasil ocupa posição de destaque na produção de minério de ferro. Segundo dados publicados pelo United States Geological Survey (USGS, 2024), o país é reconhecido como o segundo maior produtor mundial de minério de ferro, ficando atrás apenas da Austrália. Essa colocação evidencia a importância estratégica do Brasil no mercado internacional, reforçando sua relevância no fornecimento desse insumo essencial para cadeias industriais globais.

O processo produtivo do minério de ferro inicia-se na etapa de extração mineral, realizada predominantemente por lavra a céu aberto, utilizando equipamentos de grande porte, como escavadeiras, caminhões fora-de-estrada, tratores, pás carregadeiras e motoniveladores, além do emprego de explosivos para desmonte de rochas em áreas de alta resistência. Após a lavra, ocorre o transporte inicial do minério bruto até a usina de beneficiamento, por meio de caminhões ou correias transportadoras, que também desempenham papel essencial na movimentação interna entre viradores, empilhadeiras e recuperadoras.

Na usina, desenvolvem-se as operações de beneficiamento, cujo objetivo é elevar o teor de ferro e remover impurezas, isso se necessário, garantindo que o produto atenda às especificações técnicas exigidas pelo mercado. Entre as principais etapas destacam-se a britagem e peneiramento, responsáveis pela redução granulométrica; a moagem e flotação, que promovem a concentração do ferro; e a separação magnética, que assegura a purificação do material. Concluído o beneficiamento, a polpa segue para a pelotização, processo no qual é aglomerado e transformado em pelotas esféricas, endurecidas em fornos para garantir resistência mecânica e estabilidade durante o transporte e utilização em altos-fornos siderúrgicos.

Posteriormente, as pelotas ou a polpa são direcionados para estocagem em pátios, onde permanecem organizados em pilhas, assegurando fluxo contínuo para as etapas subsequentes. A movimentação interna é realizada por empilhadeiras e recuperadoras acopladas às correias transportadoras, compondo um sistema indispensável para a eficiência operacional.

Em seguida, ocorre o transporte ferroviário, que conecta as unidades produtivas aos portos, permitindo o deslocamento do material até os terminais marítimos. Finalmente, no porto, o minério ou as pelotas são submetidos a operações de descarregamento, classificação e carregamento em navios de grande porte, destinados à exportação ou ao abastecimento das siderúrgicas nacionais. Essa etapa envolve sistemas automatizados de viradores, correias e carregadores de navio.

A Figura 8 mostra a cadeia produtiva do minério de ferro já citada.

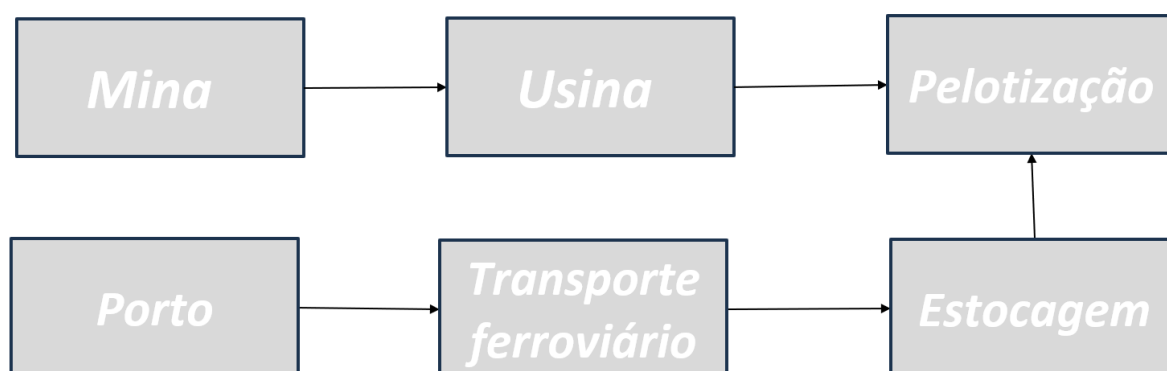


Figura 8: Fluxograma da cadeia produtiva do minério de ferro.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 8 evidencia a complexidade da cadeia produtiva do minério de ferro, que combina processos mecânicos, químicos e logísticos para transformar a matéria-prima extraída em um produto adequado às exigências do mercado global, garantindo eficiência operacional e sustentabilidade econômica.

A empresa apresenta uma estrutura organizacional, como pode-se verificar na figura 9.

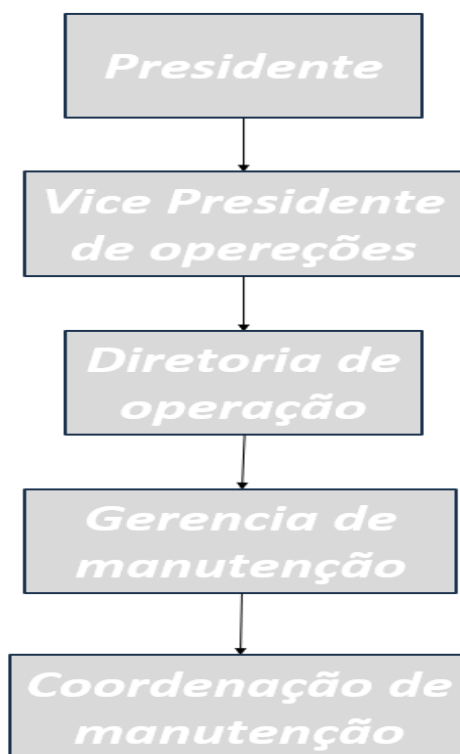


Figura 9: Fluxograma da cadeia produtiva do minério de ferro.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 9 mostra a estrutura hierárquica do setor operacional e de manutenção, organizada em níveis de gestão que asseguram a tomada de decisão e a execução das atividades estratégicas e operacionais. No topo da estrutura encontra-se o Presidente, responsável pela definição das diretrizes corporativas e pela supervisão global das operações da organização. Logo abaixo na hierarquia, está o Vice-Presidente de Operações, cuja função é coordenar as áreas produtivas e garantir que as metas estabelecidas pela presidência sejam implementadas de forma eficiente.

Em seguida, a Diretoria de Operação atua como elo entre a alta administração e as gerências, sendo responsável por traduzir as estratégias corporativas em planos operacionais, assegurando a integração entre diferentes setores. Sob a diretoria, encontra-se a Gerência de Manutenção, que tem como atribuição planejar, controlar e executar as atividades de manutenção preventiva e corretiva, garantindo a disponibilidade e confiabilidade dos ativos industriais. Por fim, a Coordenação de Manutenção desempenha papel essencial na execução direta das tarefas, supervisionando equipes técnicas e assegurando que os procedimentos sejam realizados conforme os padrões estabelecidos.

Essa estrutura evidencia a relação vertical entre os níveis decisórios e operacionais, permitindo que as ações estratégicas sejam desdobradas em atividades práticas, assegurando alinhamento entre os objetivos corporativos e a gestão da manutenção.

4.2 Descrição do equipamento

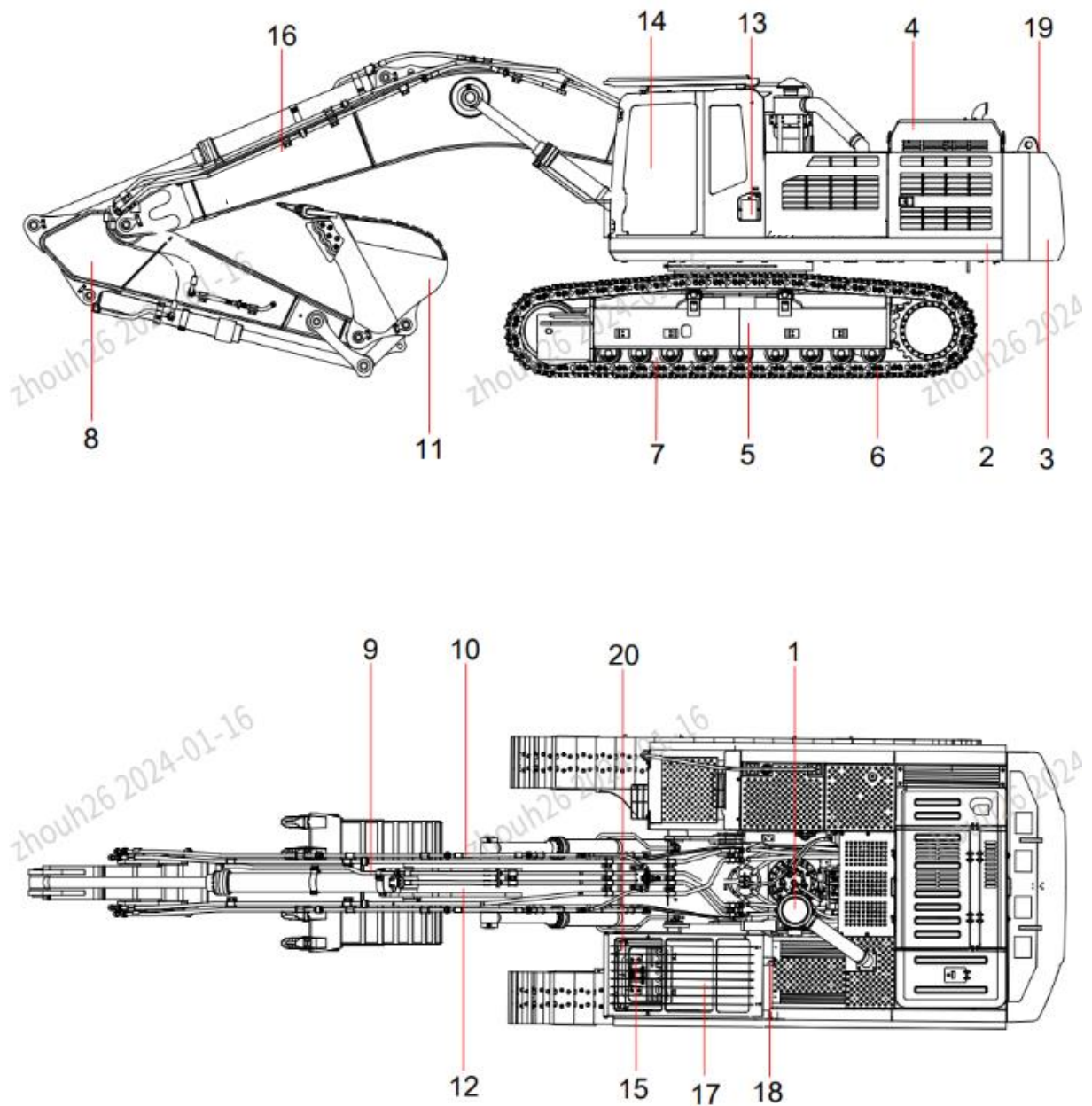
O que é o equipamento, pra que serve, em qual parte do processo ele é usado usada de uma forma geral, falar dos sistemas principais, e detalhar o trem-de-força.

4.2.1 Função e Aplicação do Equipamento no Processo Produtivo

De acordo com 3XMais (2023), a escavadeira hidráulica é um equipamento de grande porte amplamente utilizado em operações que exigem elevada força de escavação e precisão nos movimentos. Sua aplicação se estende por diversos setores industriais, incluindo construção civil, agronegócio, obras de infraestrutura, saneamento, terraplenagem e, com destaque, o setor de mineração.

A partir da análise do manual do fabricante, é possível analisar que a máquina é composta por uma superestrutura giratória montada sobre um chassi com esteiras ou pneus, além de um conjunto operacional formado por lança, braço e caçamba. Esses componentes são acionados por um sistema hidráulico de alta pressão, que permite a execução de movimentos coordenados e potentes, essenciais para atividades de escavação, carregamento e movimentação de materiais de grande massa e densidade, como solo, minério e rochas fragmentadas.

Na Figura 10, observa-se a escavadeira estudada.



Z

Figura 10: Vista lateral e superior da escavadeira.
Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

A tabela 4 mostra as peças ou sistemas apontados na Figura 10.

Tabela 5 – Peças do equipamento

NÚMERO	DESCRIÇÃO
1	Sistema de Potência
2	Montagem da Superestrutura
3	Montagem do Contrapeso
4	Montagem do Truck
5	Montagem dos Roletes
6	Conjunto da Corrente de Esteira
7	Instalação da Placa de Proteção da Esteira
8	Dispositivo de Trabalho
9	Tubo do Dispositivo de Trabalho
10	Montagem do cilindro (3.1)
11	Concha
12	Sistema Elétrico
13	Montagem da Cabine
14	Monitor
15	Revestimento
16	Lança
17	Acessórios Acoplados
18	Luz de Advertência
19	Montagem da Câmera
20	Montagem do Terminal GPS-EMEA

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A Figura 10 e a Tabela 5 retratam a escavadeira analisada, destacando seus principais componentes estruturais e funcionais. A Figura 10 apresenta vistas lateral e superior do equipamento, permitindo a identificação visual dos elementos numerados que compõem o sistema mecânico e operacional da máquina. Esses elementos estão descritos na Tabela 5, que organiza as partes em ordem numérica, acompanhadas de suas respectivas denominações técnicas.

Entre os componentes evidenciados, destaca-se o Sistema de Potência (1), responsável por fornecer energia ao conjunto, seguido pela Montagem da Superestrutura (2) e pelo Contrapeso (3), que assegura a estabilidade durante as operações de escavação. A estrutura também inclui a Montagem de Truck (4) e os roletes (5), essenciais para a sustentação e mobilidade da escavadeira. O Conjunto da Corrente de Esteira (6) e a Instalação da Placa de Proteção da Esteira (7) garantem a tração e proteção do sistema de deslocamento.

Na parte operacional, encontram-se o Dispositivo de Trabalho (8) e o Tubo do Dispositivo de Trabalho (9), que integram o mecanismo de escavação, além da Montagem do cilindro (10), elemento fundamental para a movimentação de materiais. Complementam a estrutura o Chicote da Lança (11), o Sistema Elétrico (12) e a Montagem da Cabine (13), que abriga os controles do operador. Recursos adicionais incluem o Monitor (14), os Revestimentos (15 e 16), os Acessórios Acoplados (17), a Luz de Advertência (18), a Montagem da Câmera (19) e o Terminal GPS-EMEA (20), que contribuem para a segurança, monitoramento e precisão operacional.

No contexto da mineração, a escavadeira hidráulica desempenha papel estratégico na cadeia produtiva, sendo empregada em operações de lavra, escavação de bancadas, carregamento de caminhões fora de estrada, alimentação de britadores primários, dragagem de áreas alagadas e demolição de estruturas geotécnicas. Conforme Diniz et al. (2024), sua versatilidade operacional é ampliada pela possibilidade de acoplamento de implementos específicos, como rompedores hidráulicos, garras e placas compactadoras, o que permite sua adaptação a diferentes fases do processo mineral. Diagnostico do setor de manutenção.

4.2.2 Motor

A Figura 11 mostra o motor da escavadeira e seus periféricos.

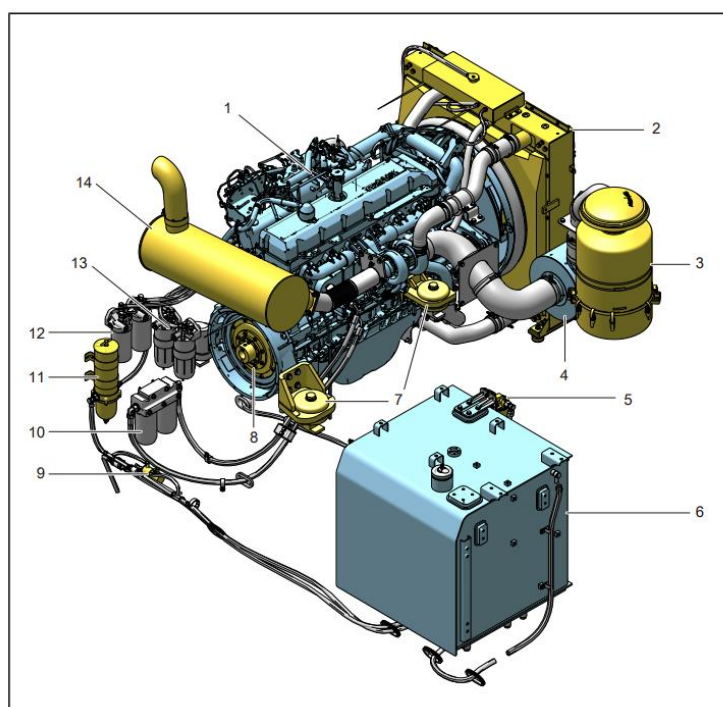


Figura 11: Componentes do motor.
Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

Figura 11 corresponde ao conjunto motriz e seus componentes periféricos de uma escavadeira hidráulica. Este conjunto é responsável por garantir a conversão eficiente da energia química do combustível em energia mecânica e hidráulica, além de assegurar a filtragem, lubrificação, refrigeração e redução de ruído, fundamentais para a operação segura e durável da máquina.

O motor (1) é o elemento central do sistema, responsável por transformar a energia química do diesel em energia mecânica por meio da combustão interna. Para manter a temperatura adequada de funcionamento, o radiador (2) atua na dissipação do calor gerado, evitando sobreaquecimento e garantindo eficiência térmica. O ar admitido pelo motor passa pelo pré-filtro de ar (3) e pelo filtro de ar (4), que removem partículas sólidas e impurezas, prevenindo desgaste prematuro dos componentes internos.

O sistema de alimentação de combustível é composto pelo filtro de diesel (5), pelo tanque de combustível (6) e pelo conjunto da bomba de combustível (9), que pressuriza e envia o diesel para os injetores. A filtragem é complementada pelo filtro de combustível grosso (13) e pelo filtro de combustível fino (12), que asseguram a remoção de contaminantes em diferentes granulometrias, garantindo a qualidade do combustível antes da combustão. Para reduzir vibrações e assegurar a transmissão suave de potência, o conjunto inclui o amortecedor (7) e o acoplamento (8).

A lubrificação do motor é garantida pelo filtro de óleo (10), que retém partículas e resíduos presentes no óleo lubrificante, e pelo separador óleo-água (11), que evita contaminação por água, preservando as propriedades lubrificantes. Por fim, o silenciador (14) atua na redução do ruído proveniente da exaustão dos gases de combustão, atendendo às normas ambientais e proporcionando maior conforto operacional. A capacidade de óleo do motor é de aproximadamente 52 litros, evidenciando a robustez do sistema para suportar condições severas de trabalho.

4.2.3 Sistema hidráulico

A Figura 12 mostra os componentes presentes no sistema hidráulico da escavadeira

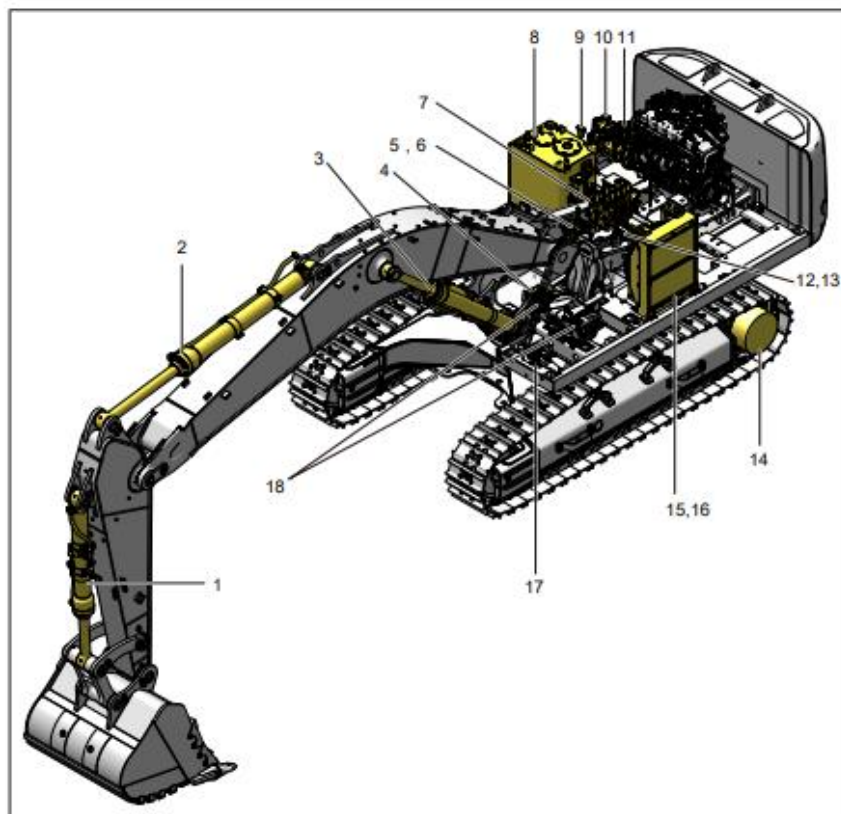


Fig 5-1

Figura 12: Componentes do sistema hidráulico da escavadeira
Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

A Figura 12 retrata o sistema hidráulico da escavadeira, cujo é responsável por transmitir força e movimento para os conjuntos de cilindros e motores hidráulicos. Tudo começa no tanque de óleo hidráulico, onde o fluido é armazenado e filtrado. Esse óleo é aspirado pelas bombas através do porto de sucção principal.

O coração do sistema é o conjunto de bombas hidráulicas, composto por duas bombas de pistões axiais com placa oscilante de deslocamento variável, dois reguladores, uma bomba de engrenagem piloto e uma bomba de resfriamento variável. As bombas principais são acionadas pelo motor da escavadeira por meio de um eixo de transmissão. Quando o motor gira, ele movimenta as bombas, que pressurizam o óleo para alimentar todo o circuito.

As bombas de pistão axial ajustam automaticamente a vazão conforme a demanda, graças aos reguladores que controlam o ângulo da placa oscilante. Esse ajuste é comandado

pelo ECM do sistema hidráulico, que monitora sensores de pressão e posição para otimizar desempenho e reduzir consumo. A pressão gerada pelas bombas principais pode chegar a centenas de bar, garantindo força suficiente para levantar cargas pesadas.

A bomba piloto fornece óleo de baixa pressão para o sistema de controle, acionando as válvulas dos joysticks e pedais. Esse óleo não movimenta os cilindros diretamente, mas permite que as válvulas principais sejam acionadas com precisão. Já a bomba de resfriamento envia fluxo para o radiador hidráulico, onde o fan motor movimenta a hélice para dissipar calor, mantendo a temperatura ideal do óleo.

Depois que o óleo é pressurizado, ele segue para o bloco de comando de válvulas, que direciona o fluxo para os atuadores conforme os comandos do operador. Os atuadores são os conjuntos de cilindros (lança, braço e caçamba), que transformam a pressão do óleo em movimento linear, e os motores hidráulicos, como o motor de giro (slewing motor) e os motores de translação, que convertem pressão em movimento rotativo para girar a torre e movimentar as esteiras.

Para permitir que o óleo circule entre a parte superior e inferior da escavadeira sem risco de torção das mangueiras ou vazamentos, existe o conjunto giratório (junta de conexão). Essa peça funciona como um conector rotativo que mantém a passagem do fluido mesmo quando a torre gira, evitando que as mangueiras se enrolem.

A junta é composta por duas partes: a inferior, que permanece fixa junto ao chassi e está conectada às mangueiras que vêm do tanque, e a superior, que gira junto com a cabine e a estrutura móvel. O óleo pressurizado passa da parte fixa para a parte móvel através de canais internos na junta, garantindo alimentação constante dos motores de translação e outros componentes localizados na parte inferior sem interromper o funcionamento, mesmo durante a rotação da torre.

Além disso, o sistema conta com redutores compostos por um conjunto de engrenagens planetárias, que ajustam a velocidade e aumentam o torque nos movimentos de giro e deslocamento. Esse tipo de redutor é essencial porque o atrito em equipamentos que utilizam esteiras é muito alto, exigindo um torque elevado para iniciar e manter o movimento. As engrenagens planetárias permitem transmitir grande força com dimensões compactas, garantindo precisão e potência para deslocar a máquina e realizar giros suaves mesmo sob carga pesada.

4.2.4 Redutor de giro

A Figura 13 é referente ao redutor de giro da escavadeira

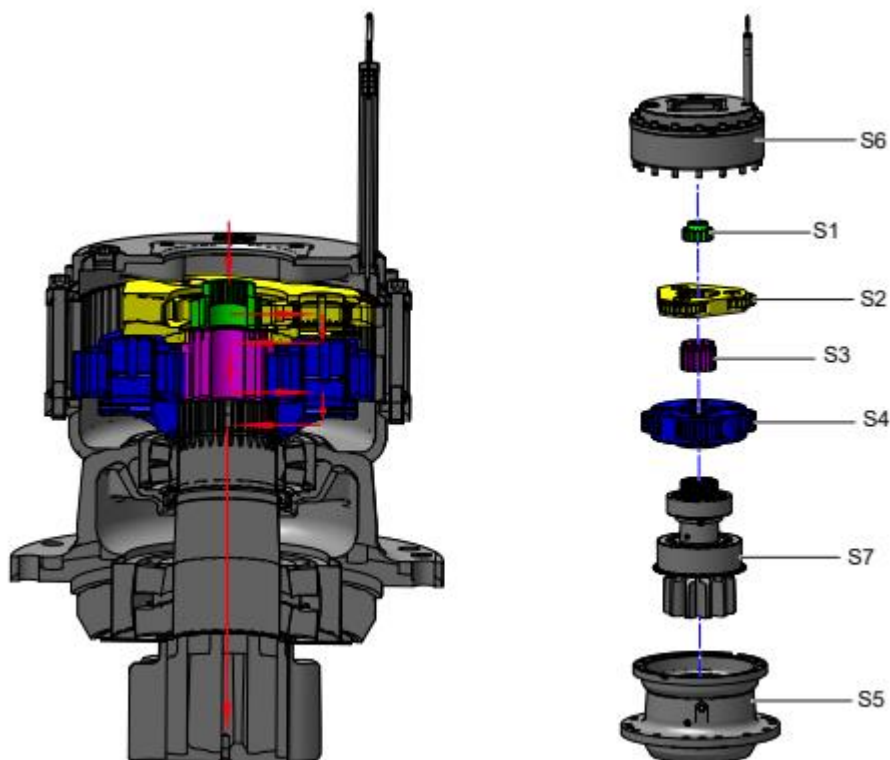


Figura 13: Redutor de giro da escavadeira
Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

Tabela 6 – Elementos principais do redutor de giro

Legenda	Elemento
S1	Engrenagem solar do primeiro estágio
S2	Porta-satélites do primeiro estágio
S3	Engrenagem solar do segundo estágio
S4	Porta-satélites do segundo estágio
S5	Engrenagem interna
S6	Extremidade de entrada
S7	Extremidade de saída

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Figura 12 e Tabela 6 correspondem ao conjunto redutor de giro, responsável pela rotação da estrutura superior da escavadeira em relação ao chassi inferior. Esse componente é acoplado ao motor de giro e transmite torque para a engrenagem de saída, que se conecta à coroa dentada (cremalheira) localizada na parte inferior da máquina. Esse mecanismo permite que a escavadeira gire 360° de forma controlada e com alta capacidade de carga.

O redutor é do tipo planetário, composto por múltiplos estágios para reduzir a velocidade do motor hidráulico e aumentar o torque disponível. Na Tabela 6, os elementos principais são:

S1 – Engrenagem solar do primeiro estágio: recebe o movimento diretamente do motor hidráulico.

S2 – Porta-satélites do primeiro estágio: suporta os planetários que giram em torno da engrenagem solar.

S3 – Engrenagem solar do segundo estágio: transmite movimento para o segundo conjunto planetário.

S4 – Porta-satélites do segundo estágio: aumenta a redução e distribui torque para a saída.

S5 – Engrenagem interna: fixa ao corpo do redutor, permitindo que os planetários engrenem e realizem a redução.

S6 – Extremidade de entrada: ponto onde o motor hidráulico se conecta ao redutor.

S7 – Extremidade de saída: transmite torque para a engrenagem que aciona a coroa dentada da máquina.

O funcionamento ocorre da seguinte forma: o motor hidráulico de giro envia movimento rotativo para a entrada do redutor (S6). Esse movimento é transmitido à engrenagem solar do primeiro estágio (S1), que faz os planetários girarem dentro da engrenagem interna (S5). O porta-satélites (S2) transmite o movimento para o segundo estágio, onde o mesmo processo se repete com S3 e S4, resultando em uma redução significativa da velocidade e aumento do torque na saída (S7). Esse torque é aplicado à engrenagem inferior, que engrena com a cremalheira fixa no chassi, permitindo a rotação da estrutura superior.

Quanto à lubrificação, o redutor utiliza óleo lubrificante interno, geralmente óleo mineral ou sintético de alta viscosidade, armazenado dentro da carcaça do redutor. Esse óleo não vem do sistema hidráulico da máquina; ele é independente e serve exclusivamente para reduzir atrito e dissipar calor entre as engrenagens. O nível e a qualidade do óleo devem ser monitorados periodicamente, pois a lubrificação é essencial para evitar desgaste prematuro dos dentes e rolamentos. Normalmente, há tampas de inspeção e dreno para troca do óleo conforme as horas de operação especificadas pelo fabricante.

4.2.5 Comando final

A Figura 14 ilustra o comando final da escavadeira.

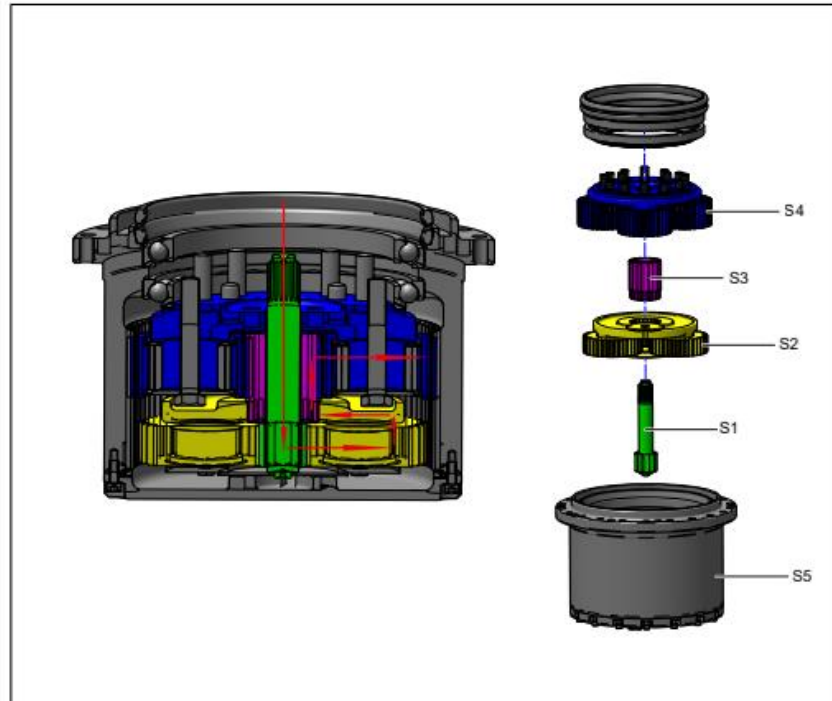


Figura 14: Comando final da escavadeira,
Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

Tabela 7 – Elementos principais do redutor de giro

Legenda	Elemento
A	Eixo de saída do motor
B	Eixo de entrada do redutor
S1	Engrenagem solar do primeiro estágio
S2	Porta-satélites do primeiro estágio
S3	Engrenagem solar do segundo estágio
S4	Porta-satélites do segundo estágio
S5	Engrenagem interna

Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

Figura 14 e Tabela 7 correspondem ao conjunto do comando final, ele é responsável por transmitir a força do motor hidráulico para as esteiras da escavadeira, garantindo deslocamento com alta capacidade de tração e controle preciso. Esse componente é acoplado ao motor de

deslocamento e converte a alta rotação do motor em torque elevado, necessário para movimentar a máquina em terrenos irregulares.

O conjunto é do tipo redutor planetário, composto por múltiplos estágios que reduzem a velocidade do motor e aumentam o torque disponível na saída. Na Tabela 7, os principais elementos são:

A – Eixo de saída do motor: transmite a rotação inicial do motor hidráulico para o redutor.

B – Eixo de entrada do redutor: ponto de acoplamento entre o motor e o redutor.

S1 – Engrenagem solar do primeiro estágio: recebe diretamente o movimento do eixo de entrada.

S2 – Porta-satélites do primeiro estágio: suporta os planetários que giram em torno da engrenagem solar.

S3 – Engrenagem solar do segundo estágio: transmite movimento para o segundo conjunto planetário.

S4 – Porta-satélites do segundo estágio: aumenta a redução e distribui torque para a saída.

S5 – Engrenagem interna: fixa ao corpo do redutor, permitindo que os planetários engrenem e realizem a redução.

O motor hidráulico envia movimento rotativo para o eixo de saída (A), que se conecta ao eixo de entrada do redutor (B). Esse movimento é transmitido à engrenagem solar do primeiro estágio (S1), fazendo os planetários girarem dentro da engrenagem interna (S5). O porta-satélites (S2) transmite o movimento para o segundo estágio, onde o mesmo processo se repete com S3 e S4. Essa configuração proporciona uma redução significativa da velocidade e um aumento expressivo do torque na saída, que é aplicado à roda motriz da esteira, garantindo deslocamento seguro e eficiente.

O comando final utiliza óleo lubrificante interno, geralmente mineral ou sintético de alta viscosidade, armazenado dentro da carcaça do redutor. Esse óleo é independente do sistema hidráulico e serve para reduzir atrito e dissipar calor entre engrenagens e rolamentos. É essencial monitorar o nível e a qualidade do óleo periodicamente, pois a lubrificação adequada evita desgaste prematuro. Normalmente, há tampas de inspeção e dreno para troca do óleo conforme as horas de operação especificadas pelo fabricante.

4.3 Propostas

O presente estudo foi desenvolvido a partir da seleção do equipamento que apresenta o maior valor de horímetro dentre os ativos da frota, condição que indica elevado regime de utilização e, conseqüentemente, maior suscetibilidade ao desgaste progressivo de seus componentes internos. Adicionalmente, verifica-se que o histórico de manutenção dessa escavadeira é limitado quando comparado a equipamentos equivalentes de outras unidades da empresa, o que restringe a existência de parâmetros consolidados de referência para avaliação do seu comportamento operacional.

Diante desse cenário, tornou-se necessária a realização de um estudo específico fundamentado em análises de óleo, com o objetivo de estabelecer padrões técnicos próprios e limites operacionais condizentes com as condições reais de serviço do equipamento.

Os sistemas avaliados compreendem o motor, o sistema hidráulico, o redutor de giro e o comando final. O motor, responsável pela geração de potência, opera sob elevadas solicitações térmicas e mecânicas, sendo fortemente influenciado pela condição do lubrificante. O sistema hidráulico, essencial para o acionamento dos implementos, apresenta elevada sensibilidade à contaminação particulada e à degradação físico-química do fluido.

O redutor de giro, constituído por engrenagens e rolamentos de precisão, depende diretamente da integridade do óleo para evitar desgaste acelerado, enquanto o comando final, responsável pela transmissão de torque às esteiras, opera sob cargas extremas, tornando o controle dos elementos de desgaste no lubrificante um fator crítico para sua confiabilidade.

O objetivo central deste estudo consiste na análise sistemática dos parâmetros obtidos nas amostras de óleo desses sistemas, com ênfase nos elementos metálicos de desgaste, contaminantes e indicadores de degradação do lubrificante. A interpretação conjunta desses parâmetros permite correlacionar os resultados laboratoriais com o estado real dos componentes internos, identificar tendências de falha ainda em estágio incipiente e avaliar a adequação dos limites técnicos tradicionalmente adotados pelos fabricantes.

A partir dessa abordagem, busca-se propor novos limites operacionais e diretrizes de manutenção mais conservadores e compatíveis com a severidade das condições de operação em mineração, fornecendo subsídios técnicos para o direcionamento de inspeções, intervenções e estratégias de manutenção preditiva, com vistas ao aumento da confiabilidade operacional e à extensão da vida útil dos sistemas avaliados.

4.3.1 Procedimento de lubrificação

Antes da execução de qualquer procedimento de troca de óleo nos sistemas da escavadeira, deve-se garantir que o equipamento esteja devidamente estacionado em local plano, com o freio de estacionamento acionado e a alavanca de segurança na posição “LOCK”, de modo a impedir qualquer movimentação involuntária dos componentes hidráulicos.

Para as etapas que envolvem acesso aos drenos, filtros e componentes do sistema de lubrificação, o motor deve estar desligado e a chave removida do contato, assegurando condições seguras de trabalho para a equipe de manutenção.

O aquecimento prévio do óleo, quando recomendado pelo fabricante, deve ser realizado nos seguintes sistemas:

- Motor – para facilitar a drenagem completa e a remoção de impurezas em suspensão;
- Sistema hidráulico – para reduzir a viscosidade do fluido e permitir melhor escoamento;
- Redutor de giro – quando aplicável, para favorecer a drenagem do óleo retido nas engrenagens;
- Comando final – devido à elevada viscosidade do óleo e à presença de contaminantes metálicos.

Após o aquecimento desses sistemas, o motor deve ser desligado e deve-se aguardar um tempo mínimo de aproximadamente 20 a 30 minutos para o resfriamento parcial do óleo, minimizando o risco de queimaduras e permitindo a execução segura do procedimento.

Nos casos em que não há necessidade de aquecimento prévio, ou quando o fabricante não o recomenda, a troca de óleo deve ser realizada diretamente com o equipamento desligado e bloqueado, mantendo-se as condições de segurança operacional.

4.3.1.1 Motor

A troca do óleo do motor é uma atividade de manutenção preventiva que deve ser realizada por duas pessoas para garantir segurança e eficiência. Este procedimento assegura a lubrificação adequada dos componentes internos, reduz desgaste e prolonga a vida útil do motor. A execução deverá ser realizada num período de 1 hora.

Ferramentas e Materiais Necessários

- Chave para elemento filtrante;
- Pano limpo;

- LUBRAX TOP TURBO 15W40: 10,5 L
- Novo elemento filtrante;
- Recipiente para coleta de óleo.

Descrição do Procedimento

1. Remova a placa da tampa inferior da máquina e posicione um recipiente sob a válvula de drenagem, utilizando um pano limpo para evitar contaminação;
2. Drenagem do Óleo: Abra a válvula de drenagem localizada na parte inferior do cárter de óleo do motor, através da torneira de drenagem na caixa de acessórios, permitindo que todo o óleo escoe para o recipiente. Após a drenagem completa, retire a torneira e guarde-a;
3. Remoção do Filtro :Abra a porta de acesso do lado direito da máquina e utilize a chave para girar o elemento filtrante para a esquerda, removendo-o;
4. Instalação do Novo Filtro: Limpe a base do elemento filtrante. Preencha o novo filtro com óleo limpo pelo orifício do anel externo, aplique óleo (ou uma fina camada de graxa) na superfície de vedação e na rosca, e instale o novo elemento na base;
5. Nota: Certifique-se de que não há vedação antiga na base do filtro para evitar vazamentos;
6. Aperte o filtro até encostar na superfície de vedação e gire de $\frac{3}{4}$ a 1 volta;
7. Reabastecimento: Abra o capô do motor e adicione óleo pelo bocal de enchimento até atingir o nível entre as marcas na vareta;
8. Verificação: Ligue o motor em marcha lenta por um curto período ,desligue e verifique novamente o nível do óleo, garantindo que esteja entre o máximo e o mínimo;
9. Finalização: Reinstale a tampa inferior da máquina.

4.3.1.2 Sistema hidráulico

A troca do óleo hidráulico é uma atividade de manutenção preventiva que deve ser realizada por duas pessoas para garantir segurança e eficiência. Este procedimento assegura o funcionamento adequado do sistema hidráulico, evitando desgaste prematuro e falhas operacionais. A execução deve ocorrer em um período estimado de 1 hora.

Ferramentas e Materiais Necessários

- Chave de caixa 36 mm com pega;
- Recipiente para coleta de óleo;
- Pano limpo;

- HYDRA XP 46 TAMBOR : 200L.

A Figura 15 é um desenho do tanque hidráulico da escavadeira

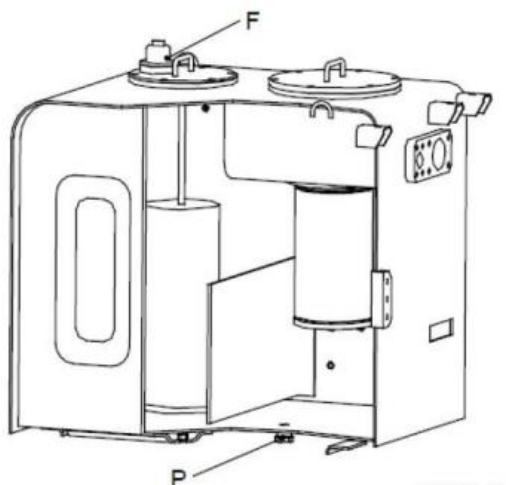


Figura 15: Tanque hidráulico da escavadeira.
Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

A Figura 15 apresenta o tanque hidráulico da escavadeira, destacando os componentes [F] porta de sucção e [P] bocal de drenagem. Esta ilustração será utilizada para facilitar o entendimento do procedimento de troca do óleo hidráulico, permitindo a correta identificação dos pontos de acesso para drenagem e reabastecimento durante a manutenção preventiva.

Descrição do Procedimento

1. Remoção da Proteção Inferior: Remova os parafusos da placa da tampa inferior e retire a placa;
2. Posicionamento do Mecanismo Superior: Gire o mecanismo superior até que o bocal de drenagem do tanque hidráulico esteja centralizado entre os trilhos;
3. Posicionamento do Braço: Retraia o braço e o cilindro da caçamba, abaixe o braço oscilante até que os dentes da caçamba toquem o solo;
4. Segurança: Coloque a alavanca de controle da trava de segurança na posição “travada” e desligue o motor;
5. Acesso ao Tanque: Remova a tampa da porta de sucção [F] na parte superior do tanque hidráulico;
6. Drenagem do Óleo: Posicione um recipiente sob o bocal de drenagem e utilize a chave para remover o bocal [P]. Verifique o anel O-ring e substitua se estiver danificado. Após a drenagem completa, reinstale e aperte o bocal [P];

Nota: Evite respingos de óleo durante a remoção do bocal.

7. Reabastecimento: Adicione a quantidade especificada de óleo hidráulico pelo orifício de sucção [F]. Verifique se o nível está entre as marcas H e L da vareta medidora.

4.3.1.3 Comando final

A troca do óleo do comando final é uma atividade de manutenção preventiva que deve ser realizada por duas pessoas para garantir segurança e eficiência. Este procedimento assegura a lubrificação adequada das engrenagens internas, evitando desgaste prematuro e falhas operacionais. A execução deve ocorrer em um período estimado de 1 hora.

A Figura 16 é um desenho do comando final da escavadeira.

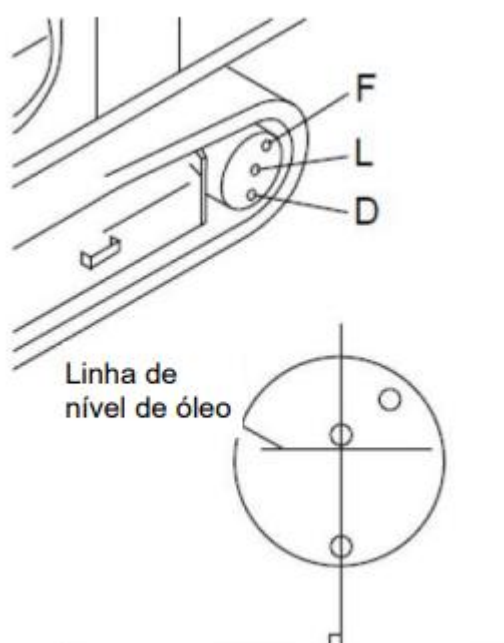


Figura 16: Comando final da escavadeira.
Fonte: Catálogo do fabricante (2025).

A Figura 16 apresenta o comando final da escavadeira, destacando os componentes [F] bujão de enchimento, [L] bujão de nível e [D] bujão de drenagem, além da linha de nível de óleo. Esta ilustração será utilizada para facilitar o entendimento do procedimento de troca do óleo do comando final, permitindo a correta identificação dos pontos de acesso para drenagem, verificação do nível e reabastecimento durante a manutenção preventiva..

Ferramentas e Materiais Necessários

- Chave de fenda adequada;
- Recipiente para coleta de óleo;
- Pano limpo;
- LUBRAX GL 85W140: 10 L.

Descrição do Procedimento

1. Preparação: Coloque a máquina em terreno plano com o bujão de drenagem [D] voltado para baixo. Desligue o motor e coloque a alavanca da trava de segurança na posição LOCK;
2. Limpeza Inicial: Retire a poeira do plugue de cabeça cilíndrica sextavada com uma chave de fenda adequada para evitar danos;
3. Drenagem do Óleo: Posicione um recipiente sob o bujão de drenagem [D]. Solte lentamente o bujão de nível [L] e o bujão de drenagem [D] para permitir a saída do óleo. Após a drenagem completa, limpe o bujão [D] com diesel e reinstale-o;
4. Reabastecimento: Desaperte o bujão de enchimento [F] e adicione a quantidade especificada de óleo de engrenagem até que o óleo comece a sair pelo orifício do bujão [L]. Antes de reinstalar, limpe o plugue com diesel.

4.3.1.4 Redutor de Giro

A troca do óleo do mecanismo de giro é uma atividade de manutenção preventiva que deve ser realizada por duas pessoas para garantir segurança e eficiência. Este procedimento assegura a lubrificação adequada das engrenagens internas, evitando desgaste prematuro e falhas operacionais. A execução deve ocorrer em um período estimado de 1 hora.

Ferramentas e Materiais Necessários

- Recipiente adequado para coleta de óleo;
- Chave para válvula de drenagem;
- Pano limpo;
- LUBRAX GL 85W140 (quantidade: 10,5 L).

Descrição do Procedimento

1. Preparação: Coloque a máquina em terreno plano com o bujão de drenagem voltado para baixo. Desligue o motor e coloque a alavanca da trava de segurança na posição LOCK;
2. Limpeza Inicial: Retire a poeira do plugue de cabeça cilíndrica sextavada com uma chave de fenda adequada para evitar danos;
3. Drenagem do Óleo: Posicione um recipiente sob a válvula de drenagem. Afrouxe a válvula para descarregar completamente o óleo da engrenagem. Em seguida, aperte novamente a válvula;

Nota: Se o óleo fluir em rosca fina, interrompa a descarga.

Antes de descarregar em baixa temperatura, gire o equipamento de trabalho para aquecer ligeiramente o óleo. Não gire durante a descarga para evitar danos;

4. Reabastecimento: Remova a tampa do bocal de enchimento e adicione 10,5 L de óleo de engrenagem através do bocal até que o óleo saia pelo orifício do bujão;
5. Verificação e Finalização: Antes de instalar, limpe o plugue com diesel. Aplique selante na rosca da válvula de respiro e instale a tampa. Torque de aperto: 2,7 N·m.

Após a conclusão de qualquer procedimento de manutenção, é obrigatório realizar a limpeza completa e a organização do local da atividade. Todas as ferramentas utilizadas devem ser devidamente higienizadas e armazenadas em seus locais apropriados. Além disso, deve-se preparar o descarte correto dos resíduos gerados, como óleos usados e materiais contaminados, seguindo as normas ambientais e de segurança aplicáveis. Este procedimento é comum e deve ser executado ao final de todas as atividades de troca de óleo, independentemente do sistema

4.3.2 Procedimento de coleta de óleo

A coleta de óleo lubrificante é realizada seguindo um conjunto padronizado de etapas estipuladas pela própria empresa, que garantem a obtenção de amostras representativas para posterior análise físico-química. Inicialmente, é feita a preparação do ambiente e do equipamento. A área destinada à manutenção é inspecionada para assegurar que se encontra em condições adequadas, limpa e sem presença de elementos que possam interferir na operação. Em seguida, são selecionadas e inspecionadas todas as ferramentas e materiais necessários, assegurando que estejam em perfeitas condições de uso.

Após a verificação da área e dos equipamentos de apoio, o equipamento móvel que terá o óleo coletado deve ser posicionado corretamente no box ou pátio de manutenção. O posicionamento é feito com o auxílio de sinaleiro e recursos de comunicação, garantindo alinhamento adequado e permitindo o bloqueio do equipamento. Concluído o posicionamento, executa-se obrigatoriamente o bloqueio do equipamento, seguido do teste de energia zero, girando a chave de ignição até o segundo estágio para confirmar que não há energia residual.

Com o equipamento bloqueado, inicia-se a preparação do material de coleta. Os frascos destinados às amostras são identificados com data, horímetro, TAG do equipamento, tipo de lubrificante, ponto de coleta e indicação sobre a ocorrência ou não de troca do óleo. Todos os itens de coleta — bomba manual, mangueiras, recipientes e materiais de limpeza — devem estar organizados e conferidos antes de iniciar o processo.

O ponto de coleta no equipamento deve ser limpo cuidadosamente, e está localizado no mesmo ponto onde o óleo é retirado no procedimento de troca, iniciando pela parte interna e seguindo para a área externa. O pano utilizado não pode ser reutilizado em diferentes pontos, evitando contaminação cruzada. Também é removido todo o excesso de sujeira presente no bocal, bujão ou tampa antes de sua abertura. Em seguida, o frasco é preparado: sua tampa é armazenada dentro da embalagem de transporte e o frasco é acoplado à parte inferior da bomba manual de sucção, garantindo encaixe firme e sem passagem de ar.

Após a preparação do frasco, realiza-se a montagem da mangueira de sucção, inserindo-a na parte superior da bomba até ultrapassar aproximadamente 25 mm para dentro do frasco. A porca de travamento é ajustada, assegurando vedação completa. A extremidade livre da mangueira é então posicionada no interior do compartimento do equipamento, mantendo-a submersa no óleo, porém sem tocar o fundo, a fim de evitar a coleta de detritos que comprometeriam a análise.

Com a montagem completa, procede-se à sucção da amostra. A haste da bomba é acionada até que o frasco atinja o nível indicado, sem ultrapassá-lo. Caso seja necessária maior quantidade de fluido, novos frascos são acoplados e o processo é repetido. Ao finalizar a coleta, o frasco é imediatamente tampado para evitar contaminação, e o compartimento do equipamento é fechado. A bomba manual deve ser higienizada antes de ser armazenada ou utilizada em outra coleta.

Concluída a etapa de coleta, realiza-se o preenchimento do formulário de identificação da amostra, contendo no mínimo: nome do executante, TAG do equipamento, horímetro do equipamento ou do compartimento, tipo de óleo coletado, data e indicação de troca do fluido. Por fim, todas as amostras devidamente identificadas e acondicionadas são encaminhadas à ferramentaria, depositadas na caixa de coleta específica, seguindo as janelas de entrega previamente estabelecidas.

4.3.3 Características do lubrificante utilizado

4.3.3.1 Motor

O óleo utilizado no motor da escavadeira em estudo é o Lubrax Top Turbo 15W40, um lubrificante mineral desenvolvido para motores Diesel de alto desempenho. Esse óleo atende a rigorosos padrões internacionais de qualidade e apresenta propriedades físico-químicas que garantem proteção adequada ao motor em condições severas de operação.

Entre seus principais parâmetros, destacam-se:

- Densidade (20/4 °C): 0,8830 g/mL;
- Viscosidade a 40 °C: 107,2 cSt;
- Viscosidade a 100 °C: 14,8 cSt;
- Índice de viscosidade: 142;
- Ponto de inflamação: 230 °C;
- Ponto de fluidez: -27 °C;
- Cinzas sulfatadas: 1,17%;
- TBN (Número de Basicidade Total): 11,0 mg KOH/g.

Além disso, o Lubrax Top Turbo 15W40 atende às classificações API CI-4/SL e ACEA E7, e cumpre especificações de fabricantes como Mercedes-Benz 228.3, Volvo VDS-3, Caterpillar ECF-1 e Cummins CES 20078, assegurando compatibilidade com motores Diesel submetidos a cargas elevadas e longos períodos de operação.

Essas características demonstram que o lubrificante possui desempenho adequado para motores de máquinas pesadas, garantindo estabilidade térmica, proteção contra desgaste, controle de depósitos e maior durabilidade dos componentes internos.

4.3.3.2 Sistema hidráulico

O fluido hidráulico utilizado no sistema da escavadeira em estudo é o Lubrax Hydra XP 46, um lubrificante mineral de alto desempenho desenvolvido especificamente para sistemas hidráulicos que operam sob condições severas de pressão e temperatura. Esse fluido atende a padrões internacionais de qualidade e apresenta propriedades físico-químicas que garantem proteção confiável aos componentes hidráulicos, mesmo em ambientes de operação pesada e contínua.

Para o grau de viscosidade ISO 46, escolhido para a aplicação da escavadeira, destacam-se os seguintes parâmetros típicos:

- Densidade (20/4 °C): 0,869 g/mL;
- Viscosidade a 40 °C: 44,3 cSt;
- Viscosidade a 100 °C: 6,83 cSt;
- Índice de viscosidade: 110;
- Ponto de fulgor: 244 °C;

- Ponto de fluidez: $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Índice de acidez: 0,41 mg KOH/g;
- Teste FZG (A/8.3/90): estágio 11 (alta resistência ao desgaste).

Além dessas características, o Lubrax Hydra XP 46 atende à norma DIN 51524 – Parte 2 (HLP) e ao teste Vickers 35VQ25, assegurando compatibilidade com sistemas hidráulicos que exigem elevada proteção contra desgaste, boa demulsibilidade, resistência à oxidação, estabilidade térmica e baixa formação de espuma.

Essas propriedades demonstram que o fluido oferece desempenho adequado para sistemas hidráulicos de máquinas pesadas, garantindo eficiência operacional, proteção contra desgaste prematuro, menor risco de falhas e maior durabilidade dos componentes do sistema hidráulico da escavadeira analisada.

4.3.3.3 Redutor de giro e comando final

O lubrificante utilizado no sistema estudado para redutor de giro e comandos finais é o Lubrax GL 85W140, um óleo mineral desenvolvido para transmissões que exigem nível de desempenho API GL-5. Esse lubrificante foi projetado para suportar condições severas de carga, pressão e temperatura, garantindo desempenho adequado em eixos diferenciais, caixas de transferência, redutores e engrenagens de equipamentos off-road, como máquinas pesadas e veículos que operam em ambientes exigentes.

Para o grau de viscosidade SAE 85W-140, selecionado para a aplicação da máquina analisada, destacam-se os seguintes parâmetros físico-químicos:

- Densidade (20/4 $^{\circ}\text{C}$): 0,904 g/mL;
- Ponto de fulgor: $234\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Ponto de fluidez: $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Viscosidade a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$: 401,9 cSt;
- Viscosidade a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$: 28,09 cSt;
- Índice de viscosidade: 96.

Além disso, o Lubrax GL 85W140 atende aos níveis de desempenho API GL-5 e MIL-L-2105D, garantindo resistência a altas pressões, elevada proteção antidesgaste, prevenção contra corrosão e controle eficaz da formação de espuma — fatores essenciais para assegurar o funcionamento confiável de engrenagens submetidas a esforços intensos.

Essas características demonstram que o Lubrax GL 85W140 oferece desempenho ideal para transmissões e eixos diferenciais de máquinas pesadas, garantindo durabilidade, redução de falhas e proteção contínua dos componentes mecânicos envolvidos no estudo.

4.3.4 Limites de desgaste e análise de SOS

A seguir, serão apresentados os gráficos referentes às análises de óleo do tipo SOS realizadas nos principais sistemas do equipamento estudado, sendo eles: motor, sistema hidráulico, comando final e redutor de giro. Ressalta-se que cada sistema possui uma periodicidade específica de coleta, definida conforme diretrizes de manutenção e recomendações técnicas, sendo admitida uma tolerância aproximada de 20% em relação ao intervalo previsto. Dessa forma, apesar de existir uma frequência padrão, as coletas podem ocorrer de forma levemente antecipada ou postergada, em função de fatores operacionais, disponibilidade do equipamento e programação de manutenção.

Em algumas situações, as coletas podem ser realizadas antecipadamente devido a ocorrências específicas, como suspeita de falha, necessidade de verificação de tendência anormal, repetição de amostragem em razão de erro no procedimento, ou ainda devido a condições observadas durante a operação. Da mesma forma, em determinados períodos, pode haver ausência de valores ou dados incompletos nos gráficos, decorrente de falhas no processo de coleta, contaminação da amostra, extravio durante transporte ou inconsistências no processamento laboratorial. No eixo X dos gráficos, serão apresentadas tanto as datas das coletas quanto o horímetro do equipamento no momento em que cada amostra foi retirada, buscando correlacionar os parâmetros analisados com o tempo de operação do ativo.

Destaca-se ainda que o equipamento analisado foi adquirido novo, não havendo histórico de operação anterior, e as análises apresentadas abrangem desde o início de sua operação até o período de conclusão deste estudo. Esse aspecto é relevante, pois possibilita acompanhar o comportamento dos parâmetros desde as primeiras horas de funcionamento, incluindo o período de amaciamento dos componentes internos, até o estágio atual do equipamento. Dessa forma, torna-se possível observar tendências relacionadas ao desgaste, contaminação e degradação do lubrificante ao longo do tempo, reduzindo incertezas relacionadas a condições operacionais anteriores desconhecidas.

Os parâmetros avaliados nas análises de óleo correspondem, principalmente, a elementos químicos e propriedades do lubrificante presentes na amostra coletada. Parte desses elementos está relacionada ao próprio óleo utilizado no sistema, enquanto outra parte

corresponde a partículas e contaminantes que passam a estar presentes no fluido devido ao desgaste natural dos componentes, ou ainda devido a falhas mecânicas e contaminações externas. Elementos como ferro (Fe), alumínio (Al), cobre (Cu), chumbo (Pb) e cromo (Cr), por exemplo, são classificados como metais de desgaste, pois podem surgir no óleo devido ao atrito e desgaste progressivo de peças internas, como mancais, camisas, anéis, buchas, engrenagens, bombas e componentes de vedação. Em condições normais, espera-se que esses elementos apresentem níveis baixos e relativamente estáveis, compatíveis com o desgaste natural do equipamento. Entretanto, aumentos bruscos ou tendências ascendentes podem indicar desgaste acelerado, falhas em componentes específicos ou condições anormais de operação.

Além disso, determinados parâmetros avaliados nas análises SOS também podem estar relacionados à contaminação do fluido, como a presença de sílica (Si), geralmente associada à entrada de poeira e partículas abrasivas no sistema, e a contagem de partículas, expressa pelo código ISO, utilizada especialmente no sistema hidráulico como indicador do nível de limpeza do óleo. Esses parâmetros são relevantes, pois a contaminação por partículas pode contribuir para o desgaste prematuro de componentes hidráulicos, como bombas, válvulas e atuadores. Dessa forma, o monitoramento sistemático desses resultados pode auxiliar na avaliação do desgaste interno e também na análise da eficiência das práticas de filtragem, vedação e controle de contaminação durante intervenções de manutenção.

Portanto, a análise histórica dos parâmetros ao longo do tempo pode contribuir para a identificação de tendências, avaliação da condição dos sistemas e apoio à tomada de decisão relacionada à manutenção preventiva e preditiva. Assim, a análise de óleo pode atuar não apenas como um indicador pontual, mas como ferramenta de monitoramento contínuo, auxiliando na antecipação de falhas, no aumento da confiabilidade operacional e no controle da vida útil dos componentes avaliados.

4.3.4.1 Motor

A Figura 17 e a Tabela 8 mostram teores dos elementos da coleta de óleo do motor e os limites impostos pelo fabricante original e por um fornecedor de equipamento de performance equivalente.

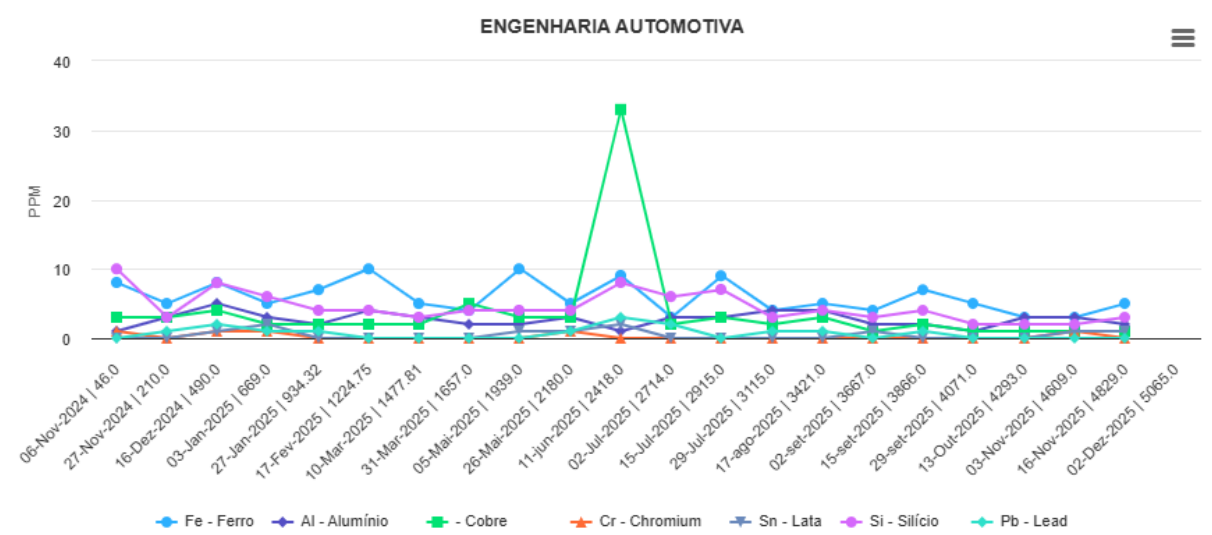


Figura 17: Parâmetros da análise de óleo do motor.
Fonte: VisionLink (2025).

Tabela 8 – Limites técnicos dos fabricantes

Elemento	Fornecedor original	Fornecedor 2
Al	10	4
Cr	10	3
Cu	15	10
Fe	100	45
Pb	20	5
Si	20	11
Sn	10	4

Fonte: Manuais do fabricante (2025).

A Figura 17 e a Tabela 8 apresentam as concentrações, em ppm, dos elementos químicos identificados nas amostras de óleo do motor ao longo do período analisado, bem como os limites máximos recomendados pelo fabricante original do equipamento e por um segundo fabricante de referência. Ressalta-se que esses limites representam os valores máximos admissíveis para cada parâmetro dentro da amostra de óleo coletada, funcionando como referência para avaliar se a condição do motor permanece dentro de um padrão considerado aceitável. Na Tabela 8, são apresentados os limites estabelecidos pelo fabricante original e também por um segundo fabricante de uma máquina de características semelhantes, ambas classificadas na mesma faixa operacional, com capacidade de caçamba em torno de 4 toneladas.

A Figura 17 mostra a evolução temporal desses elementos a partir das coletas realizadas durante a operação do motor, sendo que a periodicidade de análise do óleo ocorre a cada 250 horas de funcionamento da máquina, enquanto a troca do óleo é realizada a cada 500 horas, conforme o plano de manutenção adotado. A partir da avaliação desses dados, é possível inferir que o motor se encontra dentro de seu período de vida útil quando analisado sob a ótica da curva da banheira.

Observa-se que, nas primeiras horas de operação, há concentrações relativamente mais elevadas de alguns elementos, associadas ao período de amaciamento dos componentes internos. Após aproximadamente 1500 horas de operação, o equipamento ultrapassa a fase de mortalidade infantil, passando a apresentar níveis mais estáveis de desgaste, compatíveis com a fase de vida útil normal do componente.

Entretanto, entre as coletas realizadas aproximadamente entre 2200 e 3000 horas, verifica-se uma tendência de aumento dos parâmetros de desgaste, indicando possível condição de desgaste excessivo do sistema. Dentre os elementos analisados, destaca-se o cobre (Cu), que atingiu valores superiores a 30 ppm, aproximadamente o dobro dos limites recomendados pelos fabricantes avaliados. Esse comportamento demandou maior atenção da equipe técnica, uma vez que pode estar associado tanto a uma coleta inadequada da amostra quanto ao desgaste de componentes específicos, como o núcleo do trocador de calor, comumente fabricado a partir desse material.

Diante desse cenário, a equipe de manutenção é direcionada a realizar inspeções detalhadas nos componentes associados, verificando se estes se encontram em condições adequadas de operação. Como procedimento corretivo, recomenda-se a substituição do óleo lubrificante, a realização do flush do sistema e, posteriormente, uma nova troca de óleo. Caso alguma anormalidade mecânica seja identificada durante as inspeções, esta deve ser prontamente corrigida para evitar danos mais severos ao equipamento.

Ao analisar os limites apresentados na Tabela 8, observa-se uma discrepância significativa entre os valores recomendados pelos fabricantes, sendo os limites estabelecidos pelo fabricante original consideravelmente menos conservadores quando comparados ao segundo fornecedor. Tal condição gera preocupação para a equipe de manutenção, uma vez que, com base na experiência prática, níveis próximos aos limites do fabricante original já são considerados críticos e potencialmente capazes de causar danos ao equipamento.

Ressalta-se, contudo, que, excetuando-se o pico anormal de cobre observado, os demais parâmetros permanecem muito abaixo dos valores considerados críticos, inclusive quando comparados aos limites mais conservadores. Dessa forma, apesar do episódio pontual relacionado ao cobre, o comportamento geral do óleo indica uma condição operacional controlada, sendo necessária apenas a manutenção do monitoramento contínuo para garantir a confiabilidade e a integridade do motor ao longo de sua vida útil.

4.3.4.2 Sistema hidráulico

A Figura 18 e a Tabela 9 mostram teores dos elementos da coleta de óleo do sistema hidráulico e os limites impostos pelo fabricante original e por um fornecedor de equipamento de performance equivalente.

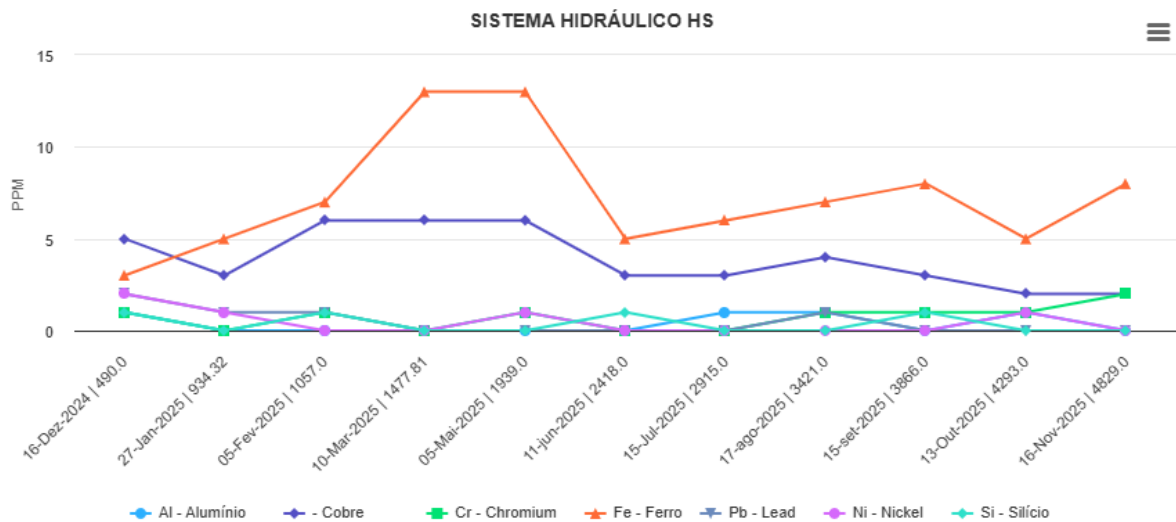


Figura 18: Parâmetros da análise de óleo do sistema hidráulico.
Fonte: VisionLink (2025).

Tabela 9 – Limites técnicos dos fabricantes.

Elemento	Fornecedor original (ppm)	Fornecedor 2 (ppm)
Al	20	3
Cr	10	1
Cu	150	46
Fe	25	33
Pb	20	4
Si	50	9

Fonte: Manuais dos fabricantes (2025).

Figura 18 e a Tabela 9 apresentam as concentrações, em ppm, dos elementos químicos identificados nas amostras de óleo do sistema hidráulico ao longo do período analisado, bem

como os limites máximos recomendados pelo fabricante original do equipamento e por um segundo fabricante de referência. Ressalta-se que esses limites representam os valores máximos admissíveis para cada parâmetro dentro da amostra de óleo coletada, funcionando como referência para avaliar se a condição do motor permanece dentro de um padrão considerado aceitável.

Na Tabela 9, são apresentados os limites estabelecidos pelo fabricante original e também por um segundo fabricante de uma máquina de características semelhantes, ambas classificadas na mesma faixa operacional, com capacidade de caçamba em torno de 4 toneladas.

A Figura 18 ilustra a evolução temporal desses elementos a partir das coletas realizadas durante a operação do motor, sendo que a periodicidade de análise do óleo ocorre a cada 500 horas de funcionamento da máquina, enquanto a troca do óleo é realizada a cada 1000 horas, conforme o plano de manutenção adotado.

A partir da análise da Figura 18, observa-se que, até aproximadamente 2000 horas de operação, os elementos analisados apresentam variações mais acentuadas, comportamento característico das fases iniciais de funcionamento do sistema. A partir desse ponto, nota-se uma tendência de diminuição e estabilização dos parâmetros, indicando a entrada do sistema em sua fase de vida útil, conforme o comportamento esperado segundo a curva da banheira.

Entretanto, identifica-se um aumento elevado e pontual nas concentrações de alguns elementos, com destaque para o ferro (Fe), antes do período de estabilização. Esse comportamento está muito provavelmente associado a um procedimento de flush do sistema realizado de forma inadequada ou, possivelmente, não realizado após intervenções no circuito hidráulico. A ausência ou falha nesse procedimento pode resultar na permanência de partículas metálicas e contaminantes no sistema, refletindo diretamente nos resultados das análises de óleo.

Após a adoção das ações corretivas necessárias, observa-se uma redução progressiva das concentrações dos elementos, seguida de um comportamento mais estável nas coletas subsequentes. A partir desse momento, os valores passam a se manter dentro de uma faixa considerada normal para a operação do sistema hidráulico, não indicando desgaste excessivo ou condição anormal de funcionamento.

De forma semelhante ao observado para o motor, a análise dos limites apresentados na Tabela 9 evidencia que os valores recomendados pelo fabricante original são mais conservadores quando comparados aos do segundo fabricante analisado. Essa discrepância gera

atenção por parte da equipe de manutenção, uma vez que, com base na experiência operacional, concentrações próximas aos limites do fabricante original já são consideradas potencialmente críticas, mesmo quando ainda se encontram abaixo dos limites do outro fornecedor.

Apesar dessa diferença entre os critérios adotados pelos fabricantes, observa-se que, após a estabilização do sistema, os níveis dos elementos permanecem abaixo dos limites críticos, reforçando que o sistema hidráulico HS encontra-se em condição operacional adequada. Recomenda-se, portanto, a manutenção do monitoramento contínuo por meio da análise de óleo, visando garantir a confiabilidade do sistema e a identificação precoce de possíveis anomalias.

A Figura 19 mostra o parâmetro ISO obtido a partir das análises de óleo do sistema hidráulico do equipamento.

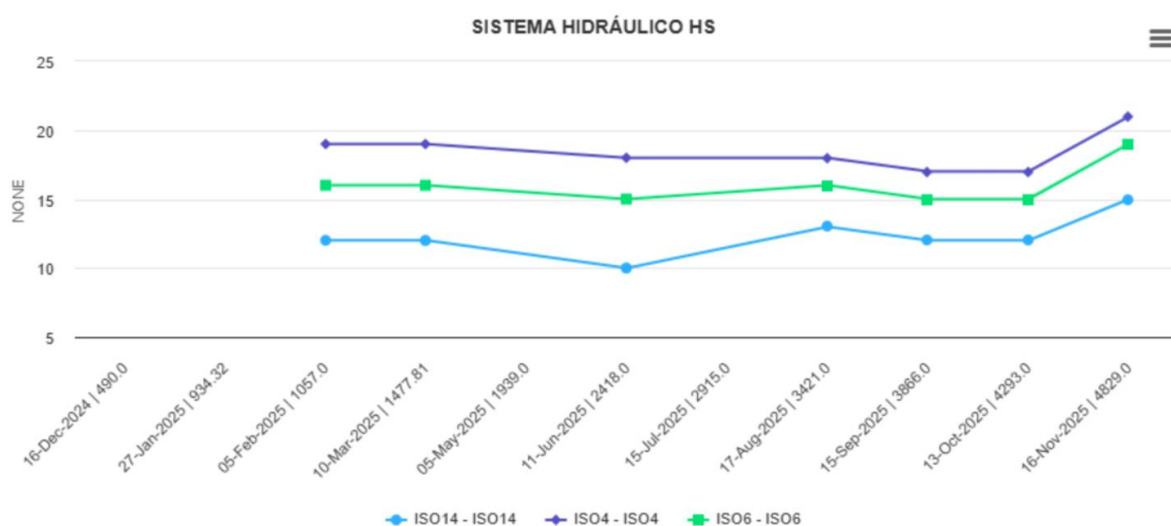


Figura 19: Parâmetro ISO do sistema hidráulico.

Fonte: VisionLink (2025).

A Figura 19 apresenta o código ISO do sistema hidráulico, o qual representa a quantidade de partículas sólidas presentes no fluido nas faixas de 4 μm , 6 μm e 14 μm . A partir da análise dos resultados, observa-se inicialmente uma tendência de redução dos níveis de contaminação, indicando melhora temporária na condição do óleo. Entretanto, na última medição verifica-se um aumento expressivo do parâmetro ISO, caracterizando uma elevação abrupta na concentração de partículas. Esse comportamento pode estar associado ao desgaste de componentes internos do sistema, à entrada de contaminantes externos, à degradação do óleo, à eficiência reduzida do sistema de filtragem ou ainda à realização recente de troca de óleo ou intervenções no circuito hidráulico.

A Figura 19 mostra a relação entre o parâmetro ISO e o tempo de vida útil dos componentes do sistema hidráulico.

Impacto das Partículas nos Sistemas

Tradução de ISO / NAS				
ISO 22/20/17 NAS 11	19/17/14 8	17/15/12 6	16/14/11 5	14/12/9 3
Contaminação excessiva Não apropriado para nenhum sistema	Óleo novo, típica contaminação Sistemas de baixa e média pressão	Contaminação leve Hidráulico & Lubrificação	Óleo limpo Servo & proporcional	Óleo muito limpo Todos os sistemas

Hidráulico e lubrificação- pesquisa de tempo de vida do componente				
ISO 22/20/17 NAS 11	19/17/14 8	17/15/12 6	16/14/11 5	14/12/9 3
0,5 x Vida	0,75 x Vida	Vida nominal	1,5 x	2 x Lifetime

Figura 20: Relação entre número de partículas de diferentes tamanhos e o tempo de vida do material.
Fonte: VisionLink (2025).

A Figura 20 apresenta uma tabela que relaciona o percentual estimado da vida útil real dos componentes ao nível de limpeza do óleo, determinado pelo código ISO obtido nas análises do tipo SOS. Conforme observado na Figura 18, os resultados indicam que o parâmetro ISO permanece em patamares elevados ao longo do período analisado, evidenciando um nível significativo de contaminação no fluido hidráulico. Considerando o valor atual do código ISO, estima-se que os componentes do sistema hidráulico atingiriam aproximadamente apenas 50% de sua vida útil total prevista, o que reforça a necessidade de adoção de medidas corretivas e preventivas voltadas à redução da contaminação. Dessa forma, torna-se possível aumentar a confiabilidade do sistema, reduzir a taxa de desgaste dos componentes e prolongar a durabilidade operacional do equipamento.

4.3.4.3 Redutor de giro

A Figura 21 e a Tabela 10 mostram teores dos elementos da coleta de óleo do redutor de giro e os limites impostos pelo fabricante original e por um fornecedor de equipamento de performance equivalente.

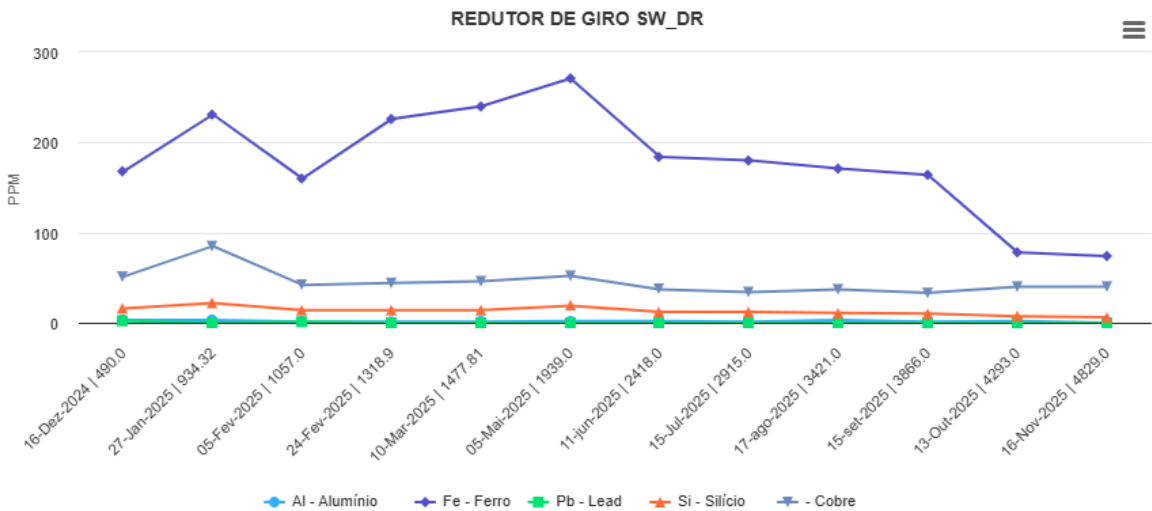


Figura 21: Parâmetros da análise de óleo do redutor de giro.
Fonte: VisionLink (2025).

Tabela 10 – Limites técnicos dos fabricantes.

Elemento	Fornecedor original (ppm)	Fornecedor 2 (ppm)
Al	100	3
Cr	*	2
Cu	50	9
Fe	1200	149
Pb	50	1
Si	100	17

(**) Não há valores no manual do fabricante.
Fonte: Manuais dos fabricantes (2025).

A Figura 21 e a Tabela 10 apresentam as concentrações, em ppm, dos elementos metálicos e contaminantes identificados nas amostras de óleo do redutor de giro SW_DR bem como os limites máximos recomendados pelo fabricante original do equipamento e por um segundo fabricante de referência. Ressalta-se que esses limites representam os valores máximos admissíveis para cada parâmetro dentro da amostra de óleo coletada, funcionando como referência para avaliar se a condição do motor permanece dentro de um padrão considerado aceitável.

Na Tabela 10, são apresentados os limites estabelecidos pelo fabricante original e também por um segundo fabricante de uma máquina de características semelhantes, ambas classificadas na mesma faixa operacional, com capacidade de caçamba em torno de 4 toneladas.

A Figura 21 mostra a evolução temporal desses elementos a partir das coletas realizadas durante a operação do motor, sendo que a periodicidade de análise do óleo ocorre a cada 500 horas de funcionamento da máquina, enquanto a troca do óleo é realizada a cada 2000 horas, conforme o plano de manutenção adotado.

A partir da análise da Figura 21, observa-se que, em torno de 1000 horas de operação, ocorre um aumento pontual nas concentrações de alguns elementos, com destaque para o ferro (Fe) e o cobre (Cu). Esse comportamento é compatível com um procedimento de flush do sistema não realizado ou executado de forma inadequada, permitindo a permanência de partículas residuais no sistema após intervenções de manutenção.

Sob a ótica da curva da banheira, verifica-se que, a partir de aproximadamente 2000 horas de operação, há uma tendência de redução dos teores dos elementos analisados, indicando a transição do redutor para sua fase de vida útil. Observa-se, entretanto, que a estabilização mais consistente dos parâmetros ocorre apenas a partir de cerca de 4000 horas de operação, quando os valores passam a apresentar menor variação entre as coletas.

Esse comportamento evidencia a necessidade de atenção aos procedimentos de descontaminação do sistema, especialmente quanto à correta execução do flush, uma vez que falhas nesse processo podem prolongar o período de instabilidade inicial dos parâmetros de desgaste. Ainda assim, é importante ressaltar que, mesmo nos períodos de maior concentração observados, os valores permanecem significativamente abaixo dos limites estabelecidos pelos fabricantes, conforme apresentado na Tabela 10.

A análise dos limites evidencia também uma diferença expressiva entre os critérios adotados pelos fornecedores, sendo o fabricante original consideravelmente menos conservador, especialmente para elementos como ferro (Fe) e alumínio (Al), cujos limites são bastante elevados.

Já o segundo fornecedor adota limites mais restritivos, porém, mesmo quando considerados esses valores mais conservadores, os teores observados não indicam condição crítica de desgaste. Tal condição gera preocupação para a equipe de manutenção, uma vez que, com base na experiência prática, níveis próximos aos limites do fabricante original já são considerados críticos e potencialmente capazes de causar danos ao equipamento.

Dessa forma, o comportamento dos elementos analisados não caracteriza risco imediato à integridade do redutor de giro SW_DR. Contudo, recomenda-se a padronização e rigor na execução dos procedimentos de flush, bem como a continuidade do monitoramento por análise de óleo, a fim de assegurar a estabilidade dos parâmetros ao longo da vida útil do equipamento e prevenir eventuais anomalias futuras.

4.3.4.4 Comandos finais direito e esquerdo

A Figura 22 e 23 e a Tabela 10 mostram teores dos elementos da coleta de óleo dos comandos finais do lado direito e esquerdo e os limites impostos pelo fabricante original e por um fornecedor de equipamento de performance equivalente.

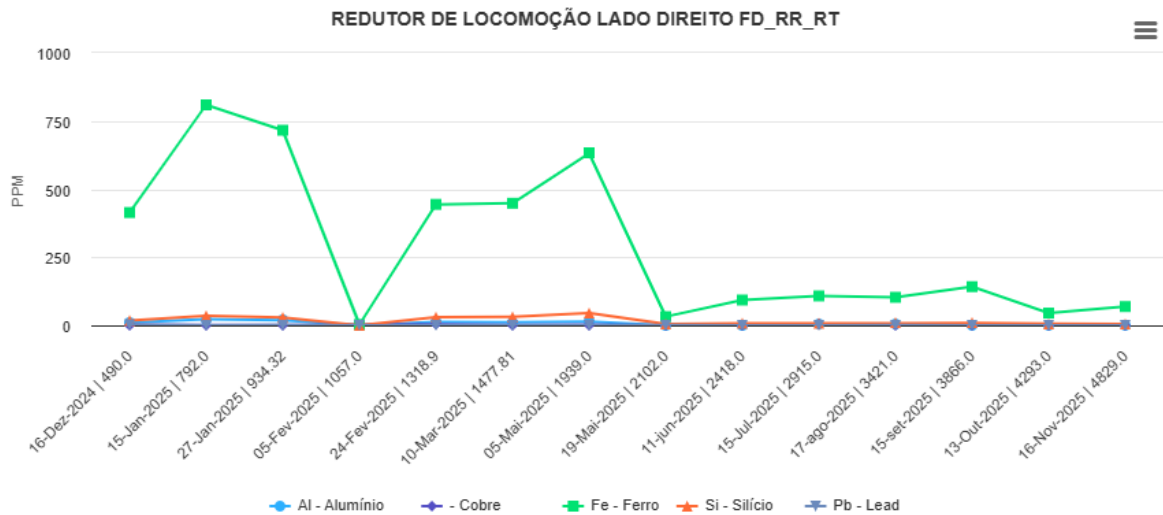


Figura 22: Parâmetros da análise de óleo do comando final lado direito.
Fonte: VisionLink (2025).

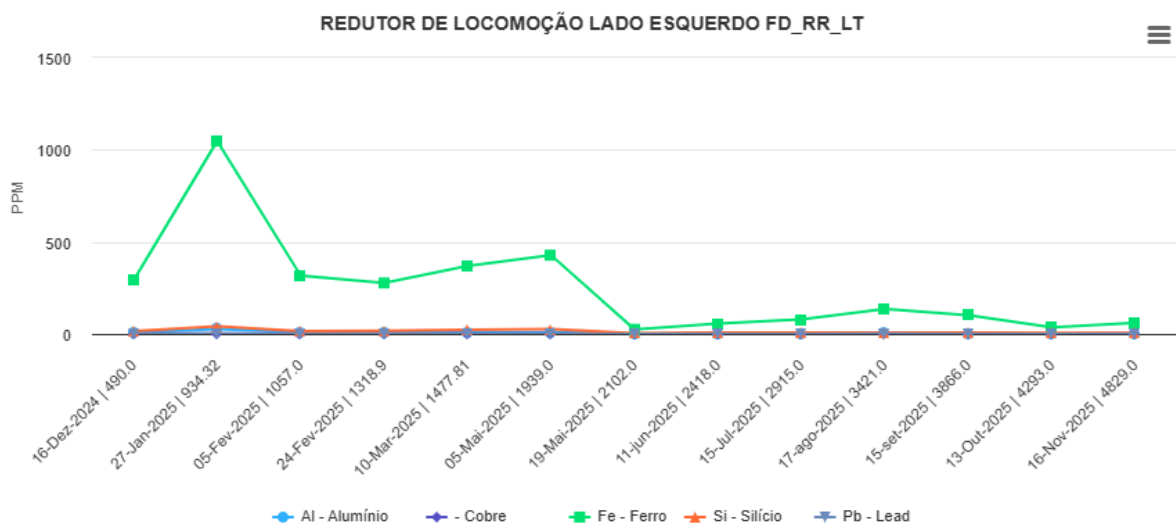


Figura 23: Parâmetros da análise de óleo do comando final lado esquerdo.
Fonte: VisionLink (2025).

As Figuras 22 e 23 e a Tabela 10 apresentam as concentrações, em ppm, dos elementos metálicos e contaminantes identificados nas amostras de óleo dos redutores de locomoção lado direito (Figura 23) e lado esquerdo (Figura 22), bem como os limites máximos recomendados pelo fabricante original do equipamento e por um segundo fabricante de referência. Ressalta-se que esses limites representam os valores máximos admissíveis para cada parâmetro dentro da amostra de óleo coletada, funcionando como referência para avaliar se a condição do motor permanece dentro de um padrão considerado aceitável.

Na Tabela 10, são apresentados os limites estabelecidos pelo fabricante original e também por um segundo fabricante de uma máquina de características semelhantes, ambas classificadas na mesma faixa operacional, com capacidade de caçamba em torno de 4 toneladas.

As Figuras ilustram a evolução temporal desses elementos a partir das coletas realizadas durante a operação do motor, sendo que a periodicidade de análise do óleo ocorre a cada 500 horas de funcionamento da máquina, enquanto a troca do óleo é realizada a cada 2000 horas, conforme o plano de manutenção adotado.

A partir da análise das Figuras 22 e 23, observa-se que, até aproximadamente 1000 horas de operação, ocorre um aumento significativo nas concentrações de alguns elementos, com destaque para o ferro (Fe). Esse comportamento é fortemente indicativo de que o procedimento de flush do sistema não foi realizado ou foi executado de maneira inadequada nesse período inicial, possibilitando a permanência de partículas metálicas residuais no sistema após intervenções de manutenção.

Sob a ótica da curva da banheira, verifica-se que, a partir de aproximadamente 2000 horas de operação, ambos os redutores passam a apresentar uma tendência de redução dos teores dos elementos analisados, indicando a transição para a fase de vida útil. Observa-se ainda que a estabilização mais consistente dos parâmetros ocorre de forma gradual, sendo mais evidente nas coletas posteriores, quando os valores passam a apresentar menor variação.

A análise conjunta dos dados evidencia que, mesmo nos períodos de maior concentração observados nas fases iniciais, os valores permanecem bem abaixo dos limites estabelecidos pelos fabricantes, conforme apresentado na Tabela 10. Essa condição indica que, do ponto de vista dos critérios de condenação por análise de óleo, não há indícios de falha iminente nos redutores de locomoção analisados.

Adicionalmente, a Tabela 10 evidencia uma diferença significativa entre os limites adotados pelos fabricantes, sendo o fabricante original consideravelmente menos conservador, especialmente para elementos como ferro (Fe) e alumínio (Al).

Ainda assim, mesmo quando considerados os limites mais restritivos do segundo fabricante, os teores observados permanecem dentro de faixas aceitáveis, não caracterizando condição crítica de desgaste. Tal condição gera preocupação para a equipe de manutenção, uma vez que, com base na experiência prática, níveis próximos aos limites do fabricante original já são considerados críticos e potencialmente capazes de causar danos ao equipamento.

Apesar de os resultados indicarem uma condição operacional adequada após a fase inicial, o comportamento observado nas primeiras 1000 horas de operação reforça a necessidade de maior rigor nos procedimentos de manutenção, em especial na execução correta do flush do sistema. A padronização desse procedimento é fundamental para reduzir picos iniciais de contaminação e acelerar a estabilização dos parâmetros de desgaste.

Dessa forma, recomenda-se a continuidade do monitoramento periódico por análise de óleo para ambos os redutores, de modo a acompanhar a estabilidade dos parâmetros ao longo do tempo e garantir a confiabilidade operacional dos redutores de locomoção, tanto do lado direito quanto do lado esquerdo.

4.3.5 Estudos de caso

Com o objetivo de evidenciar a inadequação dos limites atualmente recomendados pelo fabricante original, serão apresentados estudos de caso de falhas ocorridas em equipamentos similares. Observou-se que, em diversas ocorrências reais, os teores dos parâmetros monitorados por análise de óleo não atingiram sequer valores próximos aos limites classificados como críticos pelo fabricante, mesmo quando o sistema já apresentava degradação avançada e falha funcional iminente.

Esse comportamento demonstra que os limites estabelecidos pelo fabricante são excessivamente elevados e pouco sensíveis às condições reais de operação, dificultando a detecção precoce de tendências anormais. Dessa forma, reforça-se a necessidade de redefinição desses parâmetros, adotando limites mais conservadores e alinhados ao histórico operacional observado, permitindo maior confiabilidade no monitoramento e melhor direcionamento das ações de manutenção preventiva.

4.3.5.1 Motor

No dia 28/09/2023, por volta das 18h, o ativo MBR_24402 apresentou falha grave durante operação, com relato do operador de que o equipamento “apagou o motor”. Durante o diagnóstico inicial, foi identificado o travamento do motor diesel, acompanhado de danos no motor de partida e descarregamento das baterias, caracterizando uma falha catastrófica do conjunto. A análise preliminar, baseada no histórico de monitoramento por análise de óleo SOS, indicou que o motor já apresentava evolução crítica dos níveis de desgaste, especialmente do elemento ferro (Fe), além de sinais de contaminação por poeira e aumento de fuligem (Soot). Dessa forma, conclui-se que o travamento não ocorreu de forma súbita, mas como consequência de um processo progressivo de degradação que não foi interrompido a tempo.

O modo de falha envolveu aumento da pressão do cárter, vazamento de óleo lubrificante e falhas nas vedações, condições que agravaram o desgaste interno e aceleraram a deterioração do motor. Entre os dias 23 e 28/09 foram registrados sinais de degradação, porém não houve ação corretiva antes da parada definitiva. As inspeções realizadas após a ocorrência confirmaram falhas nas vedações das unidades injetoras, além de vazamento de diesel e indícios de presença de líquido de arrefecimento, evidenciando comprometimento das vedações e possível contaminação cruzada entre sistemas. Também foi identificado que o motor operou aproximadamente 980 horas após a última intervenção, sem redução significativa nos indicadores de contaminação, reforçando a insuficiência da estratégia de manutenção aplicada para conter a evolução do desgaste.

A Figura 24 mostra o diagrama de Ishikawa da análise da falha.



Figura 24: Diagrama de Ishikawa.

Fonte: Empresa estudada (2023).

A Figura 24 apresenta o diagrama de Ishikawa elaborado para análise da falha. O diagrama, também conhecido como diagrama de causa e efeito, tem como objetivo organizar e

estruturar as causas potenciais de um evento, agrupando-as em categorias que representam as principais origens de falhas em sistemas industriais. No presente caso, foram considerados fatores relacionados a método, medida, máquina, material e mão de obra. No eixo método, destacam-se falhas no processo de tomada de decisão a partir da análise SOS, uma vez que a tendência de desgaste já era observável, mas não gerou intervenção preventiva.

No eixo medida, observa-se a limitação dos critérios de alarme adotados, já que os limites utilizados não foram suficientemente sensíveis para antecipar a falha. No eixo máquina, foram identificados desgaste acelerado de componentes internos e falhas de vedação, condições diretamente relacionadas ao aumento da pressão do cárter e aos vazamentos observados. No eixo material, destacam-se a contaminação por poeira (sílica) e o aumento de fuligem, que aceleram o desgaste abrasivo e reduzem a eficiência do lubrificante. Por fim, no eixo mão de obra, evidencia-se a ausência de intervenção corretiva no período crítico, mesmo com sinais técnicos disponíveis, o que contribuiu para a evolução da condição até o travamento completo do motor.

A análise histórica dos dados revela que os níveis de ferro atingiram valores próximos de 80 ppm antes da falha, caracterizando condição severa de desgaste. Esse parâmetro é diretamente associado ao desgaste de componentes internos ferrosos, como camisas, anéis e mancais. Embora o aumento fosse consistente e progressivo, os limites estabelecidos pelo fabricante não foram suficientes para gerar alerta preventivo eficaz, o que evidencia que, para a realidade operacional do equipamento analisado, os parâmetros adotados não garantiram sensibilidade adequada para interromper a evolução do desgaste.

A Figura 25 representa o gráfico da análise de SOS do motor

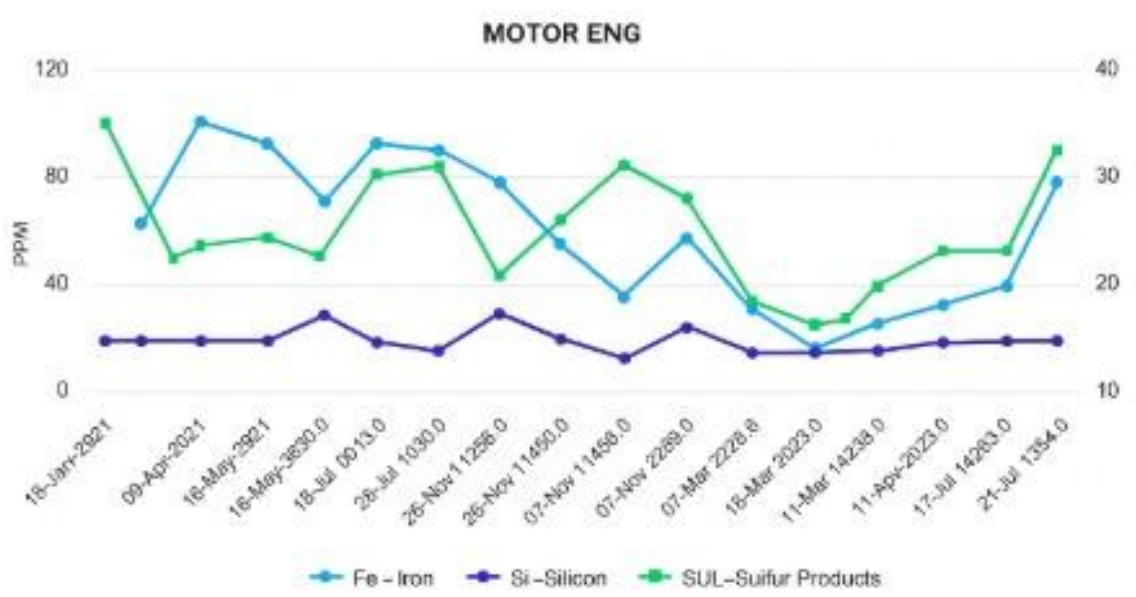


Figura 25: Análise de óleo motor.

Fonte: VisionLink (2023)

A Figura 25 apresenta a evolução dos parâmetros monitorados no motor, incluindo ferro (Fe), fuligem (Soot) e produtos de enxofre (Sulfur Products), ao longo do período de acompanhamento. Observa-se que os níveis de ferro apresentaram tendência de crescimento e atingiram valores elevados antes da falha, reforçando que havia sinais claros de degradação mecânica. No início do gráfico, identifica-se o ponto em que foi realizada a substituição do componente, seguindo recomendações do fabricante quanto à montagem e ajustes. Entretanto, mesmo após a intervenção, os dados históricos indicaram manutenção da tendência de desgaste, demonstrando que a falha final foi resultado de deterioração progressiva, associada a contaminação e falhas de vedação, sem a adoção de ações preventivas suficientes para evitar a quebra.

Conclusão da causa da falha (motor): a falha foi causada principalmente pelo desgaste interno severo do motor, evidenciado pelo aumento progressivo do ferro, associado à contaminação por poeira e fuligem e agravado por falhas de vedação (unidades injetoras e sistema de lubrificação). Como fatores contribuintes, destacam-se a insuficiência dos critérios de monitoramento adotados e a ausência de intervenção preventiva no período crítico, permitindo que a condição evoluísse até o travamento completo do motor.

4.3.5.2 Sistema hidráulico

No dia 04/10/2023, durante inspeção operacional, foi identificado vazamento excessivo de óleo hidráulico pelo retentor da haste do cilindro de escavação do lado esquerdo (LE). Essa

condição caracterizou falha de vedação com perda de estanqueidade, podendo comprometer diretamente a eficiência do sistema hidráulico, reduzir a força disponível para operação e elevar o risco de falhas secundárias, como superaquecimento, cavitação e contaminação interna do fluido. Devido à gravidade do vazamento, foi necessária intervenção imediata para evitar degradação acelerada do conjunto e impactos na disponibilidade do equipamento.

Durante o diagnóstico, a equipe de manutenção confirmou desgaste acentuado das vedações e presença de folga excessiva nos anéis internos do cilindro. Esses fatores indicam que a falha não ocorreu apenas por degradação natural do retentor, mas por evolução mecânica interna do cilindro, que comprometeu o alinhamento e o contato adequado entre os elementos de vedação e a haste. Como consequência, houve perda da capacidade de retenção do fluido e aumento progressivo do vazamento, caracterizando condição crítica de operação.

Como procedimento adotado, foi realizada a remoção do cilindro danificado e a instalação de um novo cilindro, seguindo as recomendações do fabricante para desmontagem, montagem e fixação. Além disso, foram realizadas inspeções complementares no sistema hidráulico, visando identificar possíveis danos internos, avaliar o estado do fluido e garantir que não houvesse falhas adicionais associadas ao vazamento. A intervenção foi registrada no sistema SAP para fins de rastreabilidade e controle histórico, sendo aplicada garantia de seis meses para o componente substituído.

A Figura 26 mostra o diagrama de Ishikawa dessa análise de falha.

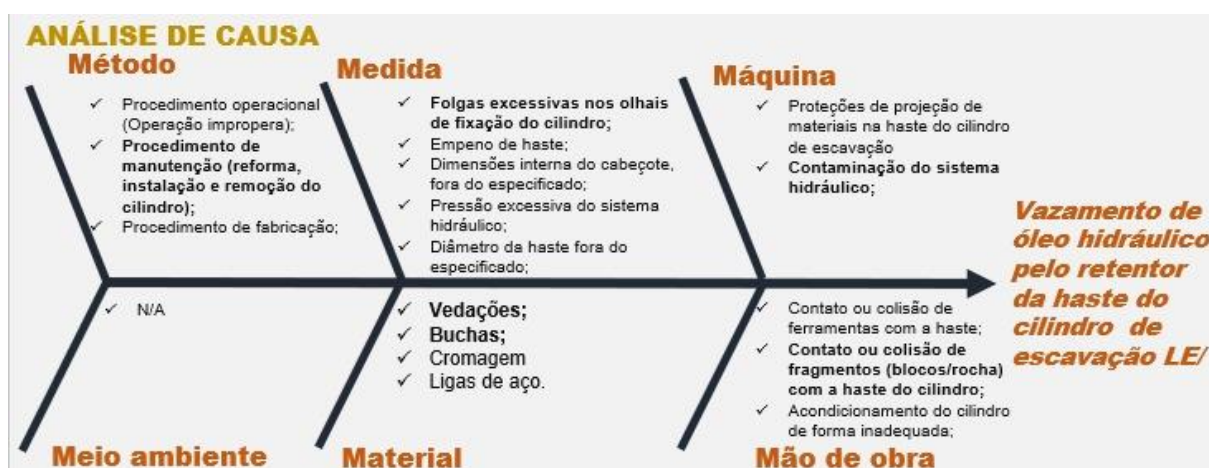


Figura 26: Diagrama de Ishikawa.
Fonte: Empresa estudada (2023).

A Figura 26 apresenta o diagrama de Ishikawa elaborado para análise da falha. O diagrama organizou as causas potenciais em categorias relacionadas a método, medida, máquina, material e meio ambiente, permitindo identificar os fatores que contribuíram para a

perda de estanqueidade do cilindro. No eixo método, destaca-se a insuficiência das inspeções preventivas previstas na estratégia de manutenção, uma vez que a evolução da folga interna e o desgaste das vedações não foram detectados antecipadamente. No eixo medida, observa-se ausência de evidências preventivas geradas via análise SOS antes da falha, indicando que os limites de monitoramento adotados podem não ter sido sensíveis o suficiente para sinalizar contaminação ou tendência de degradação do sistema.

No eixo máquina, foram identificados como fatores principais o desgaste prematuro das vedações e a folga excessiva nos anéis internos do cilindro, condição que acelera a degradação do retentor e aumenta a possibilidade de vazamentos. No eixo material, considera-se o efeito abrasivo de partículas contaminantes no fluido, que contribuem diretamente para desgaste de vedações e componentes internos. Por fim, no eixo meio ambiente, destaca-se a exposição do conjunto a poeira e partículas sólidas típicas das condições reais de operação, as quais podem ingressar no sistema e intensificar o desgaste.

A Figura 27 representa a análise de SOS mostrando os parâmetros do óleo após a quebra do cilindro.

Nº CONTROLE LABORATÓRIO	DATA COLETA	DATA PROCESSO	HR/KM EQUIP	HR/KM ÓLEO	ÓLEO TROCADOR	FLUIDO ADICIONADO	UNIDADES DO FLUIDO ADICIONADO	TIPO DE FLUIDO
U060-53289-0119	10-Oct-2023	16-Oct-2023	13845.0 HR	13845.0 HR	Não		L	LUBRAX GRANS TAC-4
Monitorar	O resultado da contagem de partículas acima de 20/18/15 é considerado alto para sistemas hidráulicos. Níveis elevados de contaminação por partículas podem gerar desgaste abrasivo, danificar componentes e causar obstrução prematura de filtros. Verificar na inspeção diária danos nas vedações e ruídos anormais. Na próxima revisão aplicar filtro de alta eficiência (UHE), se disponível e rodar por 250 horas ou efetuar diálise no óleo. Coletar nova amostra regularmente.							
U060-53264-0295	20-Sep-2023	21-Sep-2023	13635.0 HR	13635.0 HR	Não		L	LUBRAX GRANS TAC-4
Monitorar	O resultado da contagem de partículas acima de 20/18/15 é considerado alto para sistemas hidráulicos. Níveis elevados de contaminação por partículas podem gerar desgaste abrasivo, danificar componentes e causar obstrução prematura de filtros. Verificar na inspeção diária danos nas vedações e ruídos anormais. Na próxima revisão aplicar filtro de alta eficiência (UHE), se disponível e rodar por 250 horas ou efetuar diálise no óleo. Trocar o óleo e coletar nova amostra regularmente.							
U060-53236-0158	23-Aug-2023	24-Aug-2023	13336.0 HR	13336.0 HR	Não		L	LUBRAX GRANS TAC-4
Monitorar	Foi possível observar traços de limas ferosas e impurezas na análise visual. Grandes partículas de desgaste podem gerar desgaste abrasivo, danificar componentes e causar obstrução prematura de filtros. Código ISO recomendado <18/15. Na próxima revisão verificar limas no filtro, procedimento de coleta, temperatura de componentes e trocar o filtro de óleo para um filtro de alta eficiência, se aplicável e rodar por 250 horas ou efetuar diálise no óleo. Coletar nova amostra regularmente.							
U060-53223-0631	10-Aug-2023	11-Aug-2023	13122.0 HR	13122.0 HR	Não		L	LUBRAX GRANS TAC-4
Normal	Nível normal de desgaste. Óleo em condição de uso. Monitorar nos intervalos regulares.							

Elementos de desgaste (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	B	Mo	Ni	Ag	Ti	V	Mn	Ca	Mg	Zn	P	Ba
U060-53289-0119	2	10	1	2	1	0	11	6	1	107	49	0	2	0	0	1	3366	12	1028	925	1
U060-53264-0295	0	4	0	2	1	0	6	7	0	98	61	2	2	0	0	0	3476	10	1163	970	2
U060-53236-0158	0	5	1	8	1	0	7	5	1	68	43	1	1	1	0	1	3356	8	1147	975	1
U060-53223-0631	0	7	1	1	2	1	4	3	1	72	39	1	2	1	0	2	3038	8	979	868	1

Figura 27: Análise de óleo sistema hidráulico.

Fonte: VisionLink (2023).

A Figura 27 apresenta os resultados da análise SOS do óleo hidráulico após a ocorrência da falha no cilindro. Observou-se teor de sílica de 11 ppm, valor que indica presença relevante de contaminantes abrasivos no fluido. Esse resultado é significativo, pois a sílica está diretamente associada à entrada de poeira e partículas externas, atuando como agente abrasivo e acelerando o desgaste de vedações, anéis e superfícies internas. Dessa forma, o dado reforça que o sistema estava operando sob condição de contaminação, contribuindo para a redução da vida útil do conjunto de vedação do cilindro.

Além disso, vazamentos em componentes hidráulicos representam condição crítica não apenas pela perda de fluido, mas também pelo aumento do risco de contaminação. Quando há perda de estanqueidade, ocorre maior exposição do sistema ao ambiente externo, facilitando a entrada de partículas e intensificando a circulação de óleo contaminado. Assim, a falha no cilindro pode ter sido tanto consequência quanto fator agravante da contaminação interna, criando um ciclo de degradação progressiva.

Conclusão da causa da falha (cilindro hidráulico – LE): a falha foi causada principalmente pelo desgaste prematuro das vedações do cilindro, associado à folga excessiva nos anéis internos, resultando em vazamento severo de óleo hidráulico. Como fator contribuinte, a presença de sílica em nível significativo (11 ppm) confirmou condição de contaminação abrasiva no sistema, favorecendo desgaste acelerado das vedações. O evento evidenciou a necessidade de revisão dos limites de monitoramento e adoção de critérios mais restritivos para contaminação, visando maior sensibilidade na detecção precoce e maior confiabilidade operacional em condições reais de trabalho.

4.3.5.3 Transmissão

No dia 04/10/2025, às 22h41, o equipamento apresentou falha ao engatar marcha, entrando em manutenção corretiva devido à perda de potência e incapacidade de tração. Durante o diagnóstico, constatou-se contaminação do filtro de óleo da transmissão por material não ferroso, além de falha na calibração do sistema de transmissão. Esses indícios apontaram que o conjunto estava operando sob condição de lubrificação inadequada, possivelmente associada a baixo nível de óleo, condição que não foi reportada previamente pelo operador nem identificada pelo CMA, contribuindo diretamente para a falha funcional observada.

Como procedimento adotado, foi realizada inspeção detalhada do sistema, avaliando a integridade da bomba e dos componentes internos da transmissão. Em seguida, foi efetuada a substituição da bomba, a remoção do óleo contaminado, além da validação do nível de fluido conforme os parâmetros operacionais recomendados pelo fabricante. Adicionalmente, foram executadas ações corretivas complementares, incluindo a revisão do checklist inicial de operação, a divulgação da análise de falha para a equipe operacional e a atualização dos planos de monitoramento no sistema SAP, visando maior rastreabilidade, controle e confiabilidade do processo.

A Figura 28 mostra o diagrama de causa e efeito feito durante a análise da falha.



Figura 28: Diagrama de Ishikawa.
Fonte: Empresa estudada (2023).

O diagrama evidencia a correlação entre fatores relacionados a método, máquina, medida, material e mão de obra, demonstrando que a falha não foi causada por um único fator isolado, mas sim por uma combinação de condições operacionais e deficiências de controle. No grupo método, destacam-se falhas no cumprimento do plano de monitoramento e ausência de padronização na verificação do nível de óleo. No grupo medida, evidencia-se a inexistência de acompanhamento por análise de óleo, o que comprometeu a identificação antecipada de desgaste ou contaminação. No grupo máquina, foram identificadas consequências associadas ao sistema de lubrificação e à bomba de óleo. Já em mão de obra, destacam-se falhas na comunicação operacional e ausência de reporte do nível crítico de óleo.

Durante a investigação, constatou-se que não havia coleta de óleo para análise desde agosto, fator considerado crítico, pois impediu o acompanhamento de tendência do sistema. A ausência de monitoramento periódico por análise de óleo comprometeu a detecção antecipada de anomalias, permitindo que a transmissão operasse em condição degradada até a ocorrência da falha. Dessa forma, a inexistência de dados analíticos inviabilizou a identificação de sinais precoces de desgaste, limitando a avaliação da evolução do sistema ao longo do tempo.

A Figura 29 mostra os parâmetros da análise de óleo da transmissão.

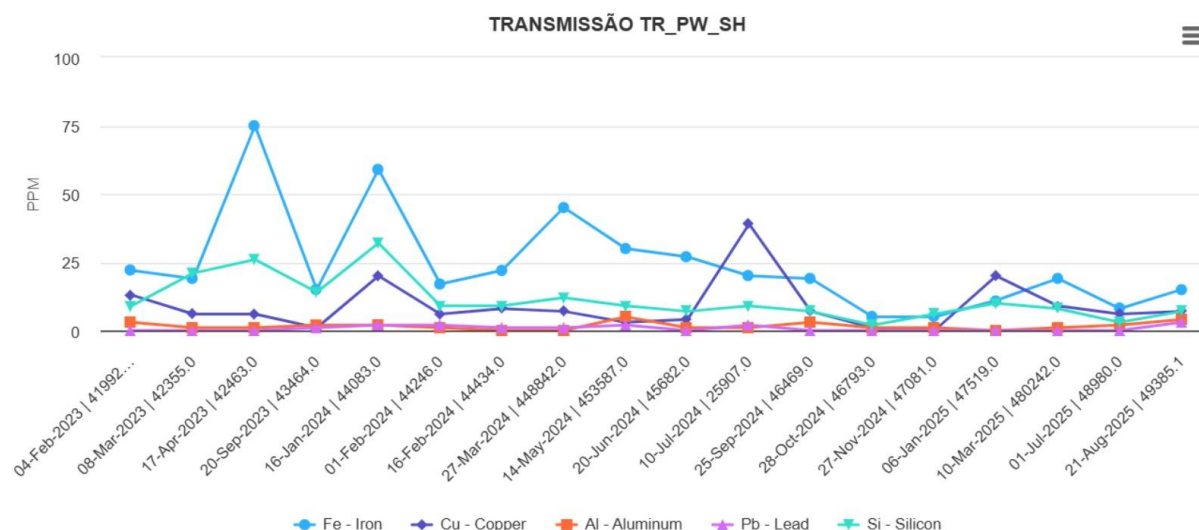


Figura 29: Análise de óleo da transmissão.

Fonte: VisionLink (2025).

Observa-se que, mesmo nas proximidades da falha, os valores dos elementos da Figura 29 monitorados permaneceram abaixo dos limites recomendados pelo fabricante, conforme indicado no histórico de tendência apresentado. Esse comportamento evidencia que os parâmetros e limites atualmente definidos são excessivamente permissivos, não sendo eficazes para indicar risco real de falha ou desgaste interno progressivo. A ocorrência de falha funcional mesmo com valores inferiores aos limites reforça que tais critérios não representam adequadamente as condições reais de operação do equipamento.

Além disso, a operação com baixo nível de óleo resulta em elevação da temperatura de trabalho, aceleração da degradação do fluido e aumento do atrito entre componentes internos, favorecendo a geração de partículas metálicas e não ferrosas. Dessa forma, a falha observada reforça que o controle rigoroso do nível e da qualidade do lubrificante é determinante para evitar desgaste prematuro e perda de confiabilidade operacional.

Conclusão da causa da falha: a falha na transmissão esteve associada à lubrificação inadequada, agravada pela ausência de monitoramento periódico por análise de óleo desde agosto e pela ineficiência dos limites atuais definidos pelo fabricante em indicar risco iminente. A contaminação por material não ferroso, somada à falha de calibração e ao baixo nível de lubrificante, evidencia que a estratégia atual de monitoramento e controle é insuficiente, sendo necessária a revisão dos parâmetros e a implementação de limites mais conservadores, alinhados às condições reais de operação, para prevenção de falhas futuras.

4.3.6 Plano de ações para diferentes casos encontrados na análise de óleo

A Figura 30 classifica os parâmetros informados na análise de óleo pelas suas características.

Parâmetro	1 Taxa de Desgaste	2 Deterioração	3 Contaminação	4 Formulação
Alumínio (Al)	X		X	
Bário (Ba)				X
Boro (B)			X	X
Cálcio (Ca)				X
Cromo (Cr)	X			
Cobre (Cu)	X			
Ferro (Fe)	X			
Chumbo (Pb)	X			
Magnésio (Mg)				X
Molibdênio (Mo)	X			
Níquel (Ni)	X			
Fósforo (P)				X
Potássio (K)			X	
Silício (Si)	X		X	
Sódio (Na)			X	
Estanho (Sn)	X			
Zinco (Zn)				X
Nitração		X		
Oxidação		X		
Fuligem		X		
Sulfatação		X		
Contagem de Partículas	X		X	
Combustível			X	
Glicol			X	
Água			X	
Viscosidade		X	X	

Figura 30: Classificação de cada parâmetro da análise de óleo

Fonte: Empresa estudada (2023).

Figura 30 mostra a relação entre os testes realizados pelo programa S·O·S e as quatro principais questões sobre desgaste em sistemas lubrificados: taxa de desgaste, deterioração do óleo, contaminação e formulação. Cada linha representa um elemento químico ou parâmetro físico monitorado nas análises de óleo, enquanto as colunas indicam a contribuição desse parâmetro para responder a cada uma das quatro questões.

A primeira coluna, Taxa de Desgaste, identifica elementos metálicos como alumínio, cromo, cobre, ferro, chumbo, molibdênio, níquel, estanho e silício, que são diretamente associados ao desgaste de componentes internos, como mancais, engrenagens e superfícies de atrito. A presença desses metais em concentrações elevadas indica aumento da taxa de desgaste.

A segunda coluna, Deterioração, agrupa parâmetros relacionados à degradação do óleo, como nitração, oxidação, sulfatação e fuligem. Esses indicadores refletem processos químicos

que ocorrem devido à alta temperatura, presença de contaminantes e envelhecimento do lubrificante, comprometendo sua capacidade de proteção.

A terceira coluna, Contaminação, inclui elementos e substâncias externas ao sistema, como silício (poeira), sódio e potássio (indicadores de contaminação por refrigerante), além de combustível, glicol, água e contagem de partículas. A presença desses contaminantes reduz a eficiência do lubrificante e acelera o desgaste.

Por fim, a quarta coluna, Formulação, contempla aditivos presentes no óleo, como cálcio, magnésio, boro, fósforo e zinco, que são essenciais para manter as propriedades do lubrificante. A análise desses elementos permite verificar se a formulação está adequada ou se houve perda de aditivos por diluição ou degradação.

Essa matriz é fundamental para interpretar os resultados das análises de óleo, pois permite correlacionar cada parâmetro com a condição do equipamento e do lubrificante, auxiliando na tomada de decisão para manutenção preditiva.

A Tabela 11 apresenta a origem provável de falhas associadas a parâmetros isolados ou combinados da análise de óleo do motor. A ocorrência de valores acima dos limites ou de aumentos repentinos direciona a análise para os componentes relacionados. Essa correlação auxilia na identificação da causa raiz e no direcionamento da manutenção.

Tabela 11 – Direcionamento por parâmetro

Parâmetros de Teste	Possível Fonte
Fe, Cr	Camisa do cilindro, anéis do pistão
Fe, Cr, Al	Camisa do cilindro, anéis do pistão, saia do pistão de alumínio
Pb	Revestimento dos mancais da biela e dos mancais principais
Pb, Al, Fe	Revestimento dos mancais da biela e dos mancais principais, virabrequim
K e/ou Na, Cu	Contaminação por fluido de arrefecimento ELC
Na, Si, Cu	Contaminação por fluido de arrefecimento convencional ou DEAC
Si > Al, Fe, Cr	Sujeira, camisa do cilindro, anéis do pistão
Si > Al, Fe, Pb, Cr	Sujeira, camisa do cilindro, revestimento dos mancais, anéis do pistão
Cu > Pb ou Cu > Sn	Bucha de bronze ou arruela de encosto
Cu > Pb, Sn	Bucha de bronze ou arruela de encosto
Fuligem, Fe, Cr	Desgaste por fuligem na camisa do cilindro, anéis do pistão
Fuligem, Fe, Mo, Cr	Desgaste por fuligem em motores antigos com anéis superiores revestidos com molibdênio e nas camisas do cilindro
Cu	Lixiviação do núcleo do resfriador de óleo
Oxidação, Fe, Pb	Óleo superaquecido, troca de óleo atrasada, alto blow-by
Sulfatação, Fe	Combustível com alto teor de enxofre, troca de óleo atrasada
Aumento da viscosidade, Oxidação, Fe, Pb	Óleo superaquecido, desgaste na camisa do cilindro, revestimento dos mancais e anéis do pistão
Aumento da viscosidade, Fuligem, Fe, Pb	Fuligem muito alta, desgaste na camisa do cilindro, revestimento dos mancais e anéis do pistão
Redução da viscosidade	Cisalhamento permanente da viscosidade do óleo multiviscoso
Redução da viscosidade, diluição por combustível, metais de desgaste	Normal
Redução da viscosidade, diluição severa por combustível	Falha do motor
Mo, B, Ba, Cu	Possíveis elementos de aditivos

Água	Entrada de fluido de arrefecimento, condensação, lavagem sob pressão
------	--

Fonte: Manuais dos fabricantes (2025).

Tabela 11 apresenta a relação entre os parâmetros de teste da análise de óleo e suas possíveis fontes de origem, permitindo a identificação dos principais mecanismos de desgaste, contaminação e degradação do lubrificante. A partir da combinação e predominância de determinados elementos químicos e propriedades físico-químicas, é possível inferir a origem das falhas, como desgaste de componentes internos (camisas de cilindro, anéis de pistão, mancais, buchas e virabrequim), contaminação por fluido de arrefecimento, entrada de sujeira externa, degradação térmica do óleo, além de falhas associadas à diluição por combustível. Essa abordagem é fundamental para o diagnóstico preventivo, pois permite associar variações anormais nos parâmetros monitorados às condições reais de operação do equipamento, servindo como base para a tomada de decisão em manutenção preditiva e para a definição de limites de controle mais adequados à realidade operacional do sistema.

A Tabela 12 apresenta a origem provável de falhas associadas a parâmetros isolados ou combinados da análise de óleo do sistema hidráulico. A ocorrência de valores acima dos limites ou de aumentos repentinos direciona a análise para os componentes relacionados. Essa correlação auxilia na identificação da causa raiz e no direcionamento da manutenção.

Tabela 12 – Direcionamento por parâmetro

Parâmetros de Teste	Fonte
Cu	Lixiviação do núcleo do resfriador de óleo
Fe, Cr	Cilindros
Si > Al, Fe, Cr, Cu, código ISSO	Sujeira, desgaste da bomba, cilindro e haste
Fe, Cr, Cu, código ISO	Desgaste da bomba ou do motor
Fe, Cr, Cu, Pb, Sn, código ISSO	Desgaste da bomba ou do motor
Fe, Al, Cu, código ISO	Desgaste da bomba ou do motor
Ag	Lixiviação de gaiolas ou pistas de rolamentos antifricção
Fe, Cr, Ag, código ISO	Rolamentos antifricção
Si, Fe, código ISO	Material de fricção de freio úmido e placas separadoras
Zn < 900 PPM	Óleo hidráulico industrial
K e/ou Na, Cu	Contaminação por fluido de arrefecimento ELC
Na, Si, Cu	Contaminação por fluido de arrefecimento convencional ou DEAC
Oxidação, aumento da viscosidade	Óleo superaquecido, troca de óleo atrasada
Água	Entrada de fluido de arrefecimento, condensação, lavagem sob pressão

Fonte: Manual do fabricante (2025).

A Tabela 12 apresenta a correlação entre os parâmetros de teste da análise de óleo hidráulico e suas possíveis fontes de origem, permitindo a identificação dos principais mecanismos de desgaste, contaminação e degradação do fluido.

A partir da combinação e predominância de elementos químicos, código ISO e propriedades físico-químicas, é possível inferir a origem das falhas, como desgaste da bomba ou do motor hidráulico, falhas em rolamentos antifricção, contaminação por fluido de arrefecimento, entrada de sujeira externa e degradação térmica do óleo. Essa abordagem é fundamental para o diagnóstico preventivo, pois permite associar variações anormais dos parâmetros monitorados às condições reais de operação do sistema hidráulico, subsidiando a tomada de decisão em manutenção preditiva e a definição de limites de controle mais adequados à realidade operacional do equipamento.

A Tabela 13 apresenta a origem provável de falhas associadas a parâmetros isolados ou combinados da análise de óleo de redutores. A ocorrência de valores acima dos limites ou de

aumentos repentinos direciona a análise para os componentes relacionados. Essa correlação auxilia na identificação da causa raiz e no direcionamento da manutenção

Tabela 13 – Direcionamento por parâmetro

Parâmetros de Teste	Fonte
Água positiva, Si > Al, Fe, Na	Entrada de água, desgaste de engrenagens, sujeira
Si > Al, Fe, Cr, Ni, código ISSO	Entrada de sujeira, desgaste de engrenagens, desgaste de rolamentos
Ag	Lixiviação de gaiolas ou pistas de rolamentos antifricção
Fe, Cr, Ag, código ISO	Desgaste de engrenagens e rolamentos (possível problema de pré-carga)
Fe, código ISO	Engrenagens
Cu > Pb ou Cu > Sn	Bucha de bronze ou arruela de encosto
Cu > Pb, Sn	Bucha de bronze ou arruela de encosto
Si, Fe, código ISO	Materiais de fricção de freio e placas separadoras
Cu, Pb, Fe, código ISO	Materiais de freio de bronze e placas separadoras
Oxidação, aumento da viscosidade	Óleo superaquecido, troca de óleo atrasada
Redução da viscosidade	Óleo de reposição com viscosidade mais baixa
Água	Vedação desgastada ou danificada, lavagem sob pressão

Fonte: Manual do fabricante (2025).

A Tabela 13 apresenta a correlação entre os parâmetros de teste da análise de óleo de transmissões e suas possíveis fontes de origem, permitindo a identificação dos principais mecanismos de desgaste, contaminação e degradação do lubrificante.

A partir da combinação e predominância de elementos químicos, presença de água, código ISO e variações de viscosidade, é possível inferir a origem das falhas, como desgaste de engrenagens, rolamentos e buchas, problemas associados à pré-carga de componentes, contaminação por sujeira externa ou entrada de água, além de degradação térmica do óleo. Essa abordagem é fundamental para o diagnóstico preventivo, pois permite correlacionar variações anormais dos parâmetros monitorados às condições reais de operação da transmissão, subsidiando a tomada de decisão em manutenção preditiva e a definição de limites de controle mais adequados à realidade operacional do equipamento.

4.3.7 Recomendações

1. Direcionamentos de Manutenção a partir da Análise de Óleo (SOS)

A partir da consolidação dos dados obtidos nas análises de óleo do tipo SOS, associadas aos estudos de caso observados ao longo do período operacional e ao histórico de intervenções de manutenção, foi possível estabelecer direcionamentos técnicos claros quanto à interpretação dos parâmetros analisados e às ações recomendadas para cada sistema avaliado.

Com base na correlação entre parâmetros de desgaste, contaminação e degradação do lubrificante, e suas respectivas possíveis fontes, torna-se possível identificar quais componentes do sistema devem ser priorizados para inspeção ou intervenção sempre que for observado um aumento brusco ou a ultrapassagem de limites críticos em determinados elementos da análise de óleo. Dessa forma, a análise deixa de ser apenas uma ferramenta de diagnóstico e passa a atuar de forma preditiva, direcionando a manutenção para componentes específicos, como mancais, camisas, anéis, trocadores de calor, buchas de bronze e sistemas de vedação.

2. Critérios de Criticidade dos Parâmetros

Considerando que os limites fornecidos pelo fabricante original e por um segundo fabricante de referência apresentam diferenças significativas, optou-se por adotar uma abordagem intermediária de criticidade, mais alinhada à realidade operacional observada em campo. Para isso, foi definida uma mediana técnica entre os limites dos dois fabricantes, utilizada como valor crítico de referência.

Assim, nos casos em que o limite do fabricante original é superior ao do segundo fabricante, adotou-se a seguinte classificação:

- Valores até o limite mais conservador: condição normal;
- Valores entre o limite conservador e a mediana: condição de monitoramento;
- Valores acima da mediana: condição crítica, demandando ação de manutenção.

Essa metodologia foi definida a partir da análise estatística dos dados históricos, do comportamento real dos equipamentos e da experiência da equipe de manutenção, garantindo critérios mais realistas e aplicáveis à operação

As tabelas 14, 15 e 16 mostram os novos limites propostos.

Tabela 14 – Novos limites redutor de giro e comando final

Elemento	Normal (ppm)	Monitoramento (ppm)	Crítico (ppm)
Al	< 3	3 – 51,5	≥ 51,5
Cr	< 2	(**)	≥ 2
Cu	< 9	9 – 29,5	≥ 29,5
Fe	< 149	149 – 674,5	≥ 674,5
Pb	< 1	1 – 25,5	≥ 25,5
Si	< 17	17 – 58,5	≥ 58,5

(**) Não há tal parâmetro no fabricante original, utiliza-se os do fabricante alternativo
Fonte: Manuais dos fabricantes (2025).

Tabela 15 – Novos limites sistema hidráulico

Elemento	Normal (ppm)	Monitoramento (ppm)	Crítico (ppm)
Al	< 3	3 – 11,5	≥ 11,5
Cr	< 1	1 – 5,5	≥ 5,5
Cu	< 46	46 – 98	≥ 98
Fe	< 25	(**)	≥ 25
Pb	< 4	4 – 12	≥ 12
Si	< 9	9 – 29,5	≥ 29,5

(**) Limite original inferior ao do segundo fabricante, por isso mantém-se o original.
Fonte: Manuais dos fabricantes (2025).

Tabela 16 – Novos limites motor

Elemento	Normal (ppm)	Monitoramento (ppm)	Crítico (ppm)
Al	< 4	4 – 7	≥ 7
Cr	< 3	3 – 6,5	≥ 6,5
Cu	< 10	10 – 12,5	≥ 12,5
Fe	< 45	45 – 72,5	≥ 72,5
Pb	< 5	5 – 12,5	≥ 12,5
Si	< 11	11 – 15,5	≥ 15,5
Sn	< 4	4 – 7	≥ 7

Fonte: Manuais dos fabricantes (2025).

3. Capacitação da Equipe e Importância do Flush do Sistema

A análise dos resultados evidenciou a necessidade de reciclagem e capacitação contínua da equipe responsável pela lubrificação e manutenção, especialmente no que diz respeito à execução correta do procedimento de flush. Diversos picos anormais observados nos teores de elementos metálicos estão associados a flushes realizados de forma inadequada ou não realizados, resultando na permanência de contaminantes no sistema após intervenções.

Um flush executado de maneira incorreta pode elevar artificialmente os níveis de desgaste observados nas análises de óleo, mascarando a real condição dos componentes e

antecipando falsos alarmes. Dessa forma, a padronização dos procedimentos, aliada ao treinamento prático da equipe, é fundamental para garantir a eficácia da descontaminação do sistema e a confiabilidade dos resultados das análises subsequentes.

4. Controle de Contaminação no Sistema Hidráulico

No que se refere ao óleo hidráulico, os dados indicam que, para maximizar a vida útil dos componentes, é fundamental manter o nível de limpeza do fluido na faixa ISO 17/15/12. Essa condição reduz significativamente o desgaste abrasivo em válvulas, bombas e atuadores hidráulicos, contribuindo para o aumento do tempo médio entre falhas.

Como alternativas para atingir e manter esse nível de limpeza, destacam-se:

- Melhoria do sistema de filtragem, com filtros de maior eficiência;
- Pré-filtragem do óleo novo antes do abastecimento;
- Utilização de unidades de filtragem externa (kidney loop);
- Controle rigoroso de contaminação durante manutenções e trocas de componentes;
- Monitoramento frequente da contagem de partículas por meio da análise de óleo.

5. Análise Estatística e Revisão de Limites ao Fim de Vida dos Componentes

Ao final da vida útil dos componentes, torna-se necessária a realização de uma análise estatística aprofundada, utilizando todo o banco de dados gerado pelas análises de óleo SOS ao longo do tempo. Essa abordagem permite identificar padrões reais de desgaste e contaminação, possibilitando a revisão e refinamento dos limites atualmente adotados.

Com isso, é possível estabelecer novos limites personalizados, mais condizentes com o perfil operacional do equipamento, o ambiente de trabalho e o histórico de manutenção, elevando o nível de maturidade do programa de manutenção preditiva

Essa percepção foi reforçada pela avaliação de estudos de caso de falhas reais ocorridas em equipamentos, envolvendo sistemas como motor, sistema hidráulico e transmissão, nos quais foram registradas falhas relevantes mesmo com valores de desgaste e contaminação abaixo dos limites críticos tradicionalmente adotados. Dessa forma, observa-se que a utilização direta dos limites originais pode reduzir a sensibilidade do monitoramento, dificultando a identificação precoce de tendências anormais e atrasando a tomada de decisão de manutenção.

Diante disso, este trabalho propôs uma metodologia prática para redefinição de limites operacionais temporários, com o objetivo de tornar o monitoramento mais conservador e

compatível com a realidade observada em campo. Para isso, foram estabelecidos critérios de normalidade, monitoramento e criticidade a partir da comparação entre os dois fabricantes. Nos casos em que o limite do fabricante original se mostrou superior ao do segundo fabricante, foi adotada uma abordagem intermediária, definindo-se uma mediana técnica como referência crítica. Assim, valores até o limite mais conservador foram classificados como condição normal, valores entre o limite conservador e a mediana foram considerados como condição de monitoramento, e valores acima da mediana foram classificados como condição crítica, demandando ação de manutenção. Nos casos em que o limite do fabricante original foi igual ou inferior ao do segundo fabricante, o valor mais conservador foi mantido como referência, sendo definida uma faixa de monitoramento aproximadamente 33% abaixo do limite crítico, buscando maior sensibilidade para detecção de tendências.

Como principal contribuição prática, foram definidos novos limites para os sistemas de motor, sistema hidráulico, redutor de giro e comando final, permitindo que o acompanhamento das análises SOS se torne mais sensível e preventivo. Além disso, foi estruturado um direcionamento técnico de manutenção, relacionando os principais elementos químicos e parâmetros avaliados às suas prováveis fontes e aos componentes críticos de cada sistema. Dessa forma, a análise de óleo deixa de atuar apenas como ferramenta de diagnóstico e passa a auxiliar de forma mais objetiva na tomada de decisão, direcionando inspeções e intervenções para componentes específicos sempre que forem observados aumentos bruscos ou tendências anormais em determinados elementos.

Adicionalmente, os resultados evidenciaram a importância da padronização e capacitação da equipe responsável por lubrificação e manutenção, especialmente em procedimentos como flush. A execução inadequada desse processo pode contribuir para a permanência de contaminantes no sistema após intervenções, além de gerar picos artificiais de metais nas análises subsequentes, reduzindo a confiabilidade do diagnóstico.

No caso específico do sistema hidráulico, também foi reforçada a necessidade de controle de contaminação por partículas, uma vez que a presença de partículas abrasivas está diretamente associada ao desgaste prematuro de componentes como bombas, válvulas e atuadores. Dessa forma, práticas como melhoria de filtragem, pré-filtragem do óleo novo, utilização de filtragem externa (kidney loop), controle de contaminação durante manutenções e monitoramento frequente por contagem de partículas podem contribuir para manter melhores níveis de limpeza do fluido (códigos ISO mais baixos), aumentando a confiabilidade e preservando a vida útil do sistema.

Por fim, ressalta-se que, ao longo do ciclo de vida dos componentes, a tendência é que o banco de dados das análises SOS se torne mais robusto. Assim, recomenda-se que, ao final de vida útil dos principais componentes, seja realizada uma análise estatística utilizando todo o histórico coletado, permitindo revisar e refinar os limites temporários propostos. Dessa forma, será possível estabelecer limites ainda mais ajustados ao perfil operacional, às condições ambientais e ao histórico de manutenção do equipamento analisado, aumentando a maturidade do programa de manutenção preditiva.

A Tabela 17 apresenta, em termos percentuais, a redução entre o limite crítico originalmente recomendado pelo fabricante e o novo limite crítico proposto para cada elemento avaliado.

Tabela 17 – Porcentagem de redução dos limites técnicos originais.

Elemento	Motor			Sistema hidráulico			Redutor de giro e comando final		
	Limite original(ppm)	Novo limite(ppm)	Diferença(%)	Limite original(ppm)	Novo limite(ppm)	Diferença(%)	Limite original(ppm)	Novo limite(ppm)	Diferença(%)
Al	10	7	30,00%	20	11,5	42,50%	100	51,5	48,50%
Cr	10	6,5	35,00%	10	5,5	45,00%	(**)	(**)	(**)
Cu	15	12,5	16,67%	150	98	34,70%	50	29,5	41,00%
Fe	100	72,5	27,50%	25	25	0,00%	1200	674,5	43,80%
Pb	20	12,5	37,50%	20	12	40,00%	50	25,5	49,00%
Si	20	15,5	22,50%	50	29,5	41,00%	100	58,5	41,50%
Sn	10	7	30,00%	(**)	(**)	(**)	(**)	(**)	(**)

(**) Não há valores no manual do fabricante.

Fonte: Manuais dos fabricantes (2025).

A Tabela 17 apresenta a comparação entre os limites originais do equipamento e os novos valores adotados, evidenciando também o percentual de redução aplicado a cada elemento analisado. No motor, o maior decréscimo ocorre no elemento Pb, com uma redução de 37,50%. No sistema hidráulico, o elemento com o maior decréscimo é o Al, houve uma redução de 42,50%. Já no redutor de giro e comando final, a redução mais expressiva é novamente observada no elemento Pb, que atinge 49,50%, sendo o maior valor de todos os sistemas analisados.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O presente trabalho demonstrou que os limites tradicionalmente utilizados para interpretação das análises de óleo do tipo SOS nem sempre representam de forma fiel a realidade operacional dos equipamentos em campo. A partir da análise histórica das amostras e da comparação entre referências de diferentes fabricantes, observou-se que podem ocorrer indícios de desgaste e contaminação mesmo quando os parâmetros permanecem abaixo dos limites críticos recomendados, evidenciando a necessidade de critérios mais sensíveis e alinhados à condição real do ativo.

Diante disso, foi proposta uma metodologia para redefinição de limites operacionais temporários, com o objetivo de aumentar a segurança e melhorar a detecção precoce de tendências anormais, enquanto se consolida uma base de dados mais robusta. Como principal contribuição prática, foram estabelecidos novos limites de normalidade, monitoramento e criticidade para os sistemas de motor, sistema hidráulico, redutor de giro e comando final, adotando faixas mais conservadoras do que as originalmente indicadas pelos fabricantes.

No motor, o maior decréscimo ocorre no elemento Pb, com uma redução de 37,50%. No sistema hidráulico, o elemento com o maior decréscimo é o Al, houve uma redução de 42,50%. Já no redutor de giro e comando final, a redução mais expressiva é novamente observada no elemento Pb, que atinge 49,50%, sendo o maior valor de todos os sistemas analisados. Essa redefinição permite criar níveis intermediários de alerta, favorecendo decisões de manutenção antes que o desgaste evolua para falhas graves.

Além disso, foi elaborado um plano de ação técnico, relacionando os principais elementos químicos e parâmetros avaliados às suas prováveis fontes e aos componentes críticos de cada sistema. Dessa forma, sempre que forem observados aumentos bruscos ou tendências anormais, torna-se possível direcionar inspeções e intervenções de manutenção de maneira objetiva, contribuindo para diagnósticos mais rápidos e assertivos.

No sistema hidráulico, os resultados também evidenciaram a importância do controle de contaminação por partículas. A análise do código ISO indicou níveis superiores aos recomendados para maximização da vida útil dos componentes, reforçando que a redução do número de partículas no fluido é determinante para preservar a durabilidade dos equipamentos. Assim, além da redefinição de limites, destaca-se a necessidade de práticas complementares,

como melhoria do sistema de filtragem, pré-filtragem do óleo novo, controle rigoroso durante manutenções e monitoramento contínuo da limpeza do fluido.

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta pode contribuir para o aumento da confiabilidade do programa de manutenção preditiva, reduzindo o risco de falhas não detectadas por limites excessivamente permissivos e fornecendo critérios mais aplicáveis ao contexto real da operação. Como continuidade, recomenda-se a aplicação do método em uma frota maior e a realização de análises estatísticas ao longo do ciclo de vida dos componentes, permitindo futuramente consolidar limites definitivos, personalizados e mais aderentes à realidade operacional. limites definitivos, personalizados e cada vez mais aderentes à realidade operacional.

5.2 Recomendações

A partir do estudo realizado, são recomendados os seguintes trabalhos futuros:

1. Definição de Limites Técnicos Baseados em Análise Estatística de Dados de SOS

Estudo para consolidar dados históricos de análises de óleo ao longo do ciclo de vida dos componentes, aplicando métodos estatísticos para estabelecer limites ideais de monitoramento e criticidade ajustados à realidade operacional.

2. Impacto da Padronização da ISO de Limpeza em Sistemas Hidráulicos na Confiabilidade dos Equipamentos

Avaliação da influência da padronização da ISO de limpeza sobre a redução de falhas e aumento da vida útil dos componentes hidráulicos em operações de mineração.

3. Aplicação de Técnicas Avançadas de Diagnóstico Preditivo Integradas às Análises SOS

Desenvolvimento de um modelo que combine análise de óleo com outras ferramentas preditivas (como vibração e termografia) para antecipar falhas em sistemas críticos, aumentando a confiabilidade e reduzindo custos operacionais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SELLITTO, Miguel Afonso. **Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos**. Produção, v. 15, n. 1, p. 109–120, abr. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/SVhm5tHjcGKbmD4Ng5fMjmC/>. Acesso em: 25 jun. 2025.

PEREIRA, Gabriel Guido de Oliveira; OLIVEIRA, Ana. **Manutenção preventiva: os benefícios da manutenção preventiva**. Taubaté: Faculdade Anhanguera de Taubaté, 2023. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/57600/1/GABRIEL_GUIDO_OLIVEIRA_PEREIRA.pdf. Acesso em: 01 jul. 2025.

RODRIGUES, Jonathan; MIRANDA, Diego Alves de; KUROWSKY, Edilson José. **Aplicação de um plano de lubrificação em máquinas de conversão de papel tissue**. Anais do II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia – CoBICET, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/354385089>. Acesso em: 4 jul. 2025.

MACIEL, D. C.; CORRADI, D. R.; SILVA, G. C.; MARTINS, N.; GOMES, D. J. C.; DUTRA, J. M. S. **Influência da lubrificação no processo de trefilação do aço SAE 1020**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 2016, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: ABCM, 2016. p. 21–25. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/316735279>. Acesso em: 4 jul. 2025.

CONTERATO, Gregori Picolotto. **Manutenção industrial mecânica: estudo de caso sobre a gestão da manutenção**. 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15190>. Acesso em: 04 jul. 2025.

NADKARNI, R. A. **Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants**. 2. ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007. ISBN 978-0-8031-4274-9. Disponível em: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=57834cfd93553b0b27545e81&assetKey=AS%3A382567959285761%401468222717560>. Acesso em: 4 jul. 2025.

JONES, A.; SMITH, B.; THOMPSON, C.; JOHNSON, D.; et al. **Using conventional molybdenum and boron lubricant additives in electric vehicles**. Lube-Tech, Issue 151, 2020. Disponível em: <https://www.lube-media.com/wp-content/uploads/Lube-Tech-151-Using-conventional-molybdenum-and-boron-lubricant-additives-in-electric-vehicles.pdf>.

Acesso em: 04 jul. 2025.

CABRAL, Daiana Araújo; RODRIGUES, Leonardo Mangia. **A implantação do PCM como estratégia para aumento de produtividade e redução de custos: pesquisa-ação em uma oficina portuária**. In: Seminário de Gestão e Tecnologia – SEGeT, 2017. Disponível em: <https://www.seget.org.br>. Acesso em: 03 jul. 2025.

UNICESUMAR. **Gestão da Qualidade**. Maringá: Centro Universitário Unicesumar, 2025. Disponível em: <https://www.unicesumar.edu.br/wp-content/uploads/degustacao/ebook/ebook-material-didatico-gestao-da-qualidade.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2025.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 18. ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

FACHIN, Odília. **Fundamentos de metodologia**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

PETRONAS LUBRIFICANTS BRASIL S.A. **Princípios básicos de lubrificantes e lubrificação**. [S.l.]: Petronas, [s.d.]. 40 p. Material institucional.

3XMAIS. **Apostila Teórica Escavadeira – Kit Didático de Simulação Operacional de Escavadeira**. 2. ed. [S.l.]: 3XMais Treinamentos, 2023. Disponível em: <https://3xmaistreinamentos.com.br/wp-content/uploads/2021/01/Apostila-Teórica-Escavadeira-3XMais.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2025. [3xmaistre...tos.com.br]

DINIZ, B. P.; PEREIRA, D. A. M.; NETO, J. C.; ARAÚJO, G. N.; ARAÚJO, J. M. B.; SILVA, R. E. S. **Seleção de escavadeiras para mineração através da aplicação dos métodos CRITIC e MOORA**. In: XII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2024, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: UFCG-CDSA, 2024. [bing.com]

MENDES, E. P. **Guia de seleção de escavadeiras para projetos de construção e mineração**. In: Blog Tracbel. [S.l.]: Tracbel, 2023. Disponível em:

<https://www.tracbel.com.br/blog/melhores-escavadeiras/>. Acesso em: 03 nov. 2025. [tracbel.com.br]

MOURA, R. **Análise de óleo aplicada à manutenção preditiva**. 2. ed. São Paulo: Editora Técnica, 2016.

FABRICANTE NÃO IDENTIFICADO. *Manual técnico de operação e manutenção de equipamentos*. [S.l.]: [s.n.], [s.d.].

XENOS, Harilaos G. **Gerenciamento da qualidade total**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2004.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

PRADO, Lucas; CASTANHA, Jéssica. **Indicadores: definição, tipos e aplicações**. 2020. Disponível em: <https://viacarreira.com/indicadores/>. Acesso em: 03 jul. 2025.

VIA CARREIRA. **Variáveis em uma pesquisa científica: o que são e como identificar**. 2025. Disponível em: <https://viacarreira.com/>. Acesso em: 03 jul. 2025.

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

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries 2024**. Reston: U.S. Geological Survey, 2024. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2026.

NOMUS. **Procedimento Operacional Padrão (POP): o que é, como montar e modelo grátis**. Disponível em: <https://www.nomus.com.br/blog-industrial/>. Acesso em: 18 fev. 2026.

CAMPOS, Vicente Falconi. **Gestão da Qualidade Total: Padronização dos Processos**. Rio de Janeiro: Falconi Editora, 1999.

VIANA, H. R. G. **Manual da Gestão de Manutenção – Volume 2**. São Paulo: Editora Qualitymark, 2010.