

Análise preditiva do óleo lubrificante usado em sistemas automotivos de equipamentos e maquinário pesado

RESUMO

Leonardo Pereira da Silva Filho
leopereiramsj@gmail.com
Universidade de Uberaba (UNIUBE),
Barra Bonita, São Paulo, Brasil

Os parâmetros relacionados à análise de óleo (contaminação, degradação e desgaste) quando interpretados corretamente com auxílio de técnicas específicas, podem embasar tomadas de decisão de manutenções pontuais, bem como definir a estratégia de manutenção nas organizações com a filosofia de manutenção preditiva, estendendo ao máximo o ganho operacional e detectando sintomas anômalos que precedem grandes falhas. A pesquisa relaciona-se com o entendimento dos princípios de lubrificação, testes de monitoramento das condições do lubrificante e técnicas de desenvolvimento de limites de ação e diagnósticos preditivos. Por meio de referenciais bibliográficos de autores especialistas no tema, buscou-se concatenar os principais fundamentos do assunto e levantamento de dados com teor qualitativo no propósito de aplicação das técnicas abordadas à respeito da classificação e estatística dos resultados de análise de fluidos. Como produto da pesquisa pode-se esclarecer a importância da técnica como pilar da manutenção preditiva e seus benefícios para a manutenção de equipamentos móveis e plantas industriais.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de óleo. Monitoramento. Manutenção preditiva.

INTRODUÇÃO

A análise de óleo é uma técnica amplamente aplicada com o intuito de investigar máquinas e equipamentos quanto a taxas de desgaste, evolução de anomalias e perda de propriedades essenciais dos fluidos lubrificantes. Para a interpretação da técnica com confiabilidade, deve-se utilizar de conhecimentos teóricos e práticos afim da realização das análises especializadas com foco em diagnóstico, prevenção de falhas e resolução de anomalias em estado embrionário.

Deseja-se com a pesquisa investigar princípios norteadores, procedimentos, técnicas e aplicações que se apresentam como fundamentos da análise de fluidos.

Como objetivo geral busca-se estudar, analisar e caracterizar a utilização do monitoramento das condições de fluidos lubrificantes aplicados em sistemas de máquinas bem como ações resultantes do cruzamento de dados oriundos das técnicas de interpretação das informações analisadas. Tratando-se de objetivos específicos, busca-se fundamentar os princípios do tema, estruturar e fornecer técnicas para análise e aplicação das ferramentas que permitam utilizar o conhecimento obtido convertendo-o em ganhos tangíveis resultantes da análise de óleo.

A análise de óleo é um tópico relevante de discussão na atualidade mesmo sendo um método aplicado desde meados da década de 50. Segundo a Abramam (2017) na publicação do documento nacional em que se retrata a situação da manutenção no Brasil, os números referentes aos tipos de manutenção aplicados nas mais diversas áreas industriais são:

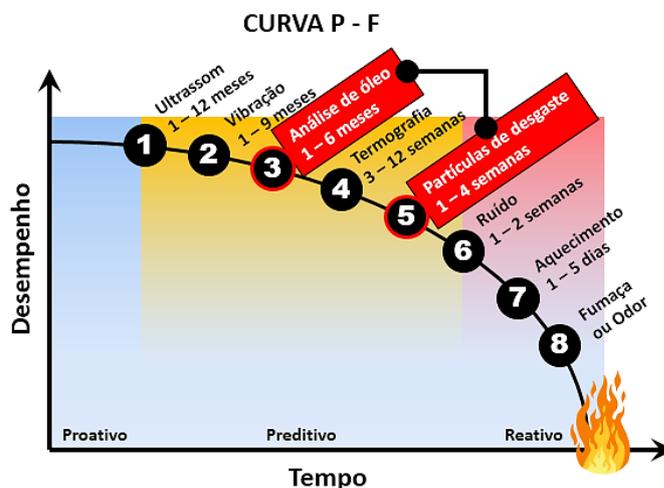
Tabela 1 - Controle da Manutenção - Tipos de manutenção

Setores	Manutenção Corretiva (%)	Manutenção Preventiva (%)	Manutenção Preditiva (%)	Outras Atividades (%)
Açúcar e Álcool, Alimentos e Bebidas	42%	40%	18%	0%
Aeronáutico e Automotivo	42%	48%	4%	5%
Eletroeletrônicos – Energia Elétrica	28%	44%	12%	16%
Químico e Saneamento	25%	50%	20%	5%
Mineração e Siderúrgico	60%	23%	13%	5%
Petróleo e Petroquímico	47%	39%	14%	0%
Papel e Celulose e Plástico	24%	31%	31%	14%
Predial e Prestações de Serviços (EQ e MQ)	45%	44%	5%	6%
Máquinas e Equipamentos - Metalúrgico	25%	48%	7%	20%
Média Geral	38%	41%	14%	8%

Fonte: Adaptado de Abramam (2017)

Analisando os dados apresentados, apenas 14% dos recursos da manutenção são aplicados em técnicas preditivas. O gráfico abaixo (Curva PF) demonstra o comparativo das técnicas de manutenção em relação à capacidade de detecção prematura de falhas pelo domínio preditivo:

Figura 1 - Curva PF e análise de períodos até deflagração da falha



Fonte: Adaptado de UE Systems (2014)

No domínio preditivo, em específico com a técnica de análise de óleo, as falhas são detectadas de forma previsível e programável com até 6 meses de antecedência. Dessa forma, torna-se possível planejar recursos (materiais e humanos) para aplicação da manutenção antes da falha ou substituição de peças no fim de sua vida útil através de técnicas que permitam elevar ao máximo a disponibilidade das máquinas e equipamentos com desempenho adequado ao menor custo operacional possível.

O grande desafio da atualidade para a aplicação da técnica de análise de óleo e maximização do seu desempenho tem ligação direta com a estruturação da técnica e conhecimento de aplicação de suas ferramentas. A temática desenvolvida em relação a técnica preditiva de análise de óleo visa também gerar novos caminhos de atuação para os engenheiros, técnicos e acadêmicos no que se direciona a atuação em monitoramento das condições aplicados nos mais diversos setores industriais, que carecem de mão de obra com capacitação acadêmica, perfil analítico e técnico para direcionar conceitos e práticas de análise de óleo no maquinário.

Falhas evitadas não só tem potencial de elevada redução no custo operacional da indústria, mas também ganhos ambientais (redução de geração de resíduos e sucatas) bem como de saúde e segurança (redução de exposições dos trabalhadores ao risco de acidentes manuseando peças e componentes falhados).

PRINCÍPIOS DA LUBRIFICAÇÃO

PROPÓSITO DO LUBRIFICANTE

Lubrificantes fluidos, graxos ou em formato sólidos (dependendo da especificidade de aplicação) usualmente possuem seis funções básicas que são: Controle de atrito; Controle de desgaste; Controle de corrosão; Controle de

temperatura; Controle de contaminação e Transmissão de potência. Em concordância, a ASM (American Society for Materials) expõe sobre as funções dos lubrificantes como:

“A FUNÇÃO PRIMÁRIA dos lubrificantes líquidos é controlar o atrito, o desgaste e os danos superficiais durante a vida útil pretendida. Um sistema que contém elementos de máquina, como engrenagens e rolamentos. Desgaste e danos na superfície ocorrem sob limite ou condições de lubrificação limite parcial, mas não em condições hidrodinâmicas completas. Funções secundárias são para evitar corrosão e para eliminar calor, sujeira e resíduos de desgaste. Os lubrificantes também podem transferir força ou energia, como ocorre sistemas hidráulicos.” (ASM, 1995, p.125)

Conforme ASM (1995) os lubrificantes podem ser amplamente classificados como lubrificantes para motores ou para não-motores. Considerando a afirmação, pode-se segregar os lubrificantes do modo à seguir:

Quadro 1 - Classificação dos tipos de lubrificantes

Lubrificantes de motores	Lubrificantes de não-motores
Óleo para motores à gasolina	Fluidos de transmissão (automático, manual e de potência)
Óleos para motores diesel (automotivo, estacionário, ferroviário e marítimo)	Fluidos de direção hidráulica
Óleos para motores a gás natural	Fluidos amortecedores
Óleos para motores de aviação	Óleos de engrenagem (automotivo e industrial)
Óleos para motores de ciclo a dois tempos	Fluidos hidráulicos (trator e industrial)
Óleos para motores alternativos	Fluidos para trabalho em metal Óleos industriais diversos Graxas

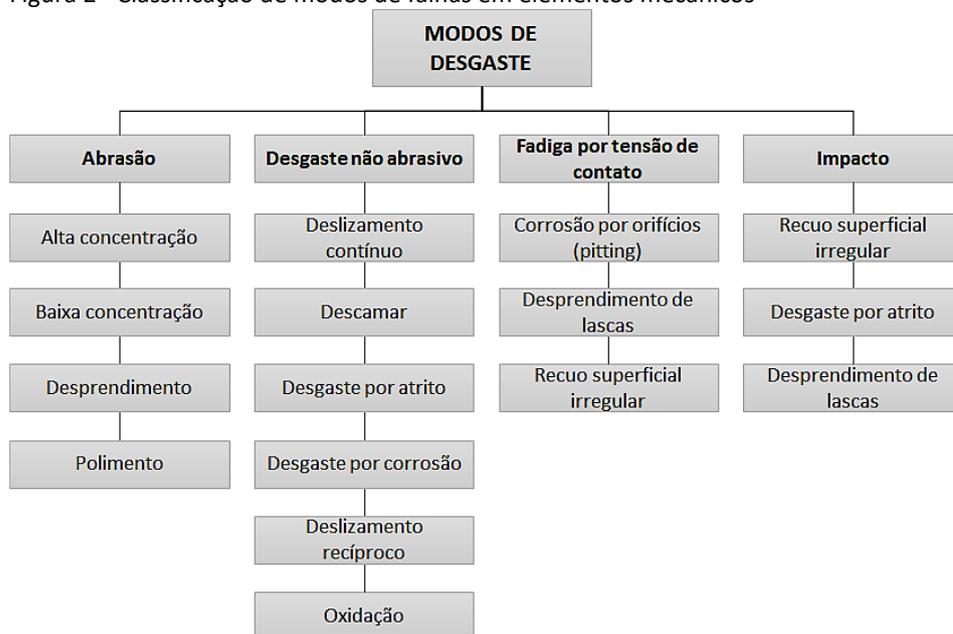
Fonte: Adaptado de ASM (1995)

Haja vista que a seleção adequada dos lubrificantes acabados podem influir diretamente na qualidade da aplicação e desempenho funcional dos sistemas humedecidos à óleo, deve ser levado em consideração que “a diferença entre um material de lubrificação e outro é frequentemente a diferença entre operação bem sucedida de uma máquina e a falha.” (BLOCH, 2000, p.4).

A propagação de falhas em elementos de máquinas e equipamentos possui de certa forma, mecanismos de evolução até a deflagração da quebra ou fratura mecânica das peças e componentes.

Os modos de desgaste são conhecidos em suma, como formas de manifestação que antecedem as falhas (eventos que provocam parada imediata do sistema produtivo ou operação anômala). A seguir é mostrado um modelo segundo Budinski (2014) de classificação básica de modos de desgaste em elementos mecânicos:

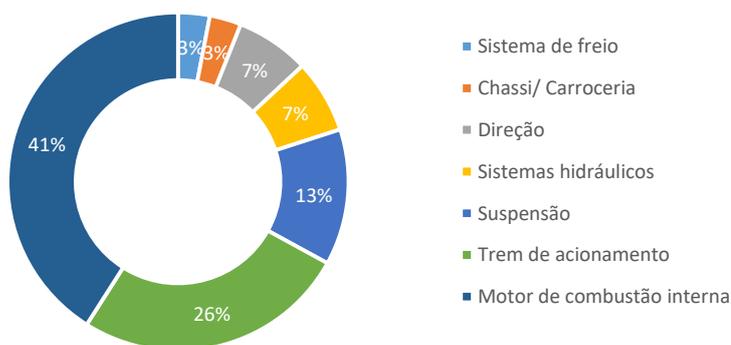
Figura 2 - Classificação de modos de falhas em elementos mecânicos



Fonte: Adaptado de Budinski (2014)

Vejamos que os grandes grupos ou classes de modos de desgaste resumem-se em abrasão, desgaste não abrasivo, fadiga por tensão de contato e impacto. Abrasão relaciona-se com desgaste provocado devido contato direto entre dois ou mais corpos (superfícies) em movimento, já o desgaste não abrasivo podemos classificar como um evento causado por degradação da superfície devido algum tipo de reação química ou física. Fadiga por tensão de contato dirige-se a fragilização sub superficial devido a exposição das faces em contato e desprendimento de “lascas” de material. Impacto, claramente relaciona-se com alguma ruptura devido à colisão brusca entre superfícies de contato. Como relacionado anteriormente, os modos de desgaste antecedem as falhas que estatisticamente são distribuídas em seu maior volume aos de ocorrências para casos relatados em equipamentos móveis do setor automotivo segundo a divisão realizada por Hasan (2017) e demonstrada graficamente à seguir:

Figura 3 - Distribuição de falhas em componentes



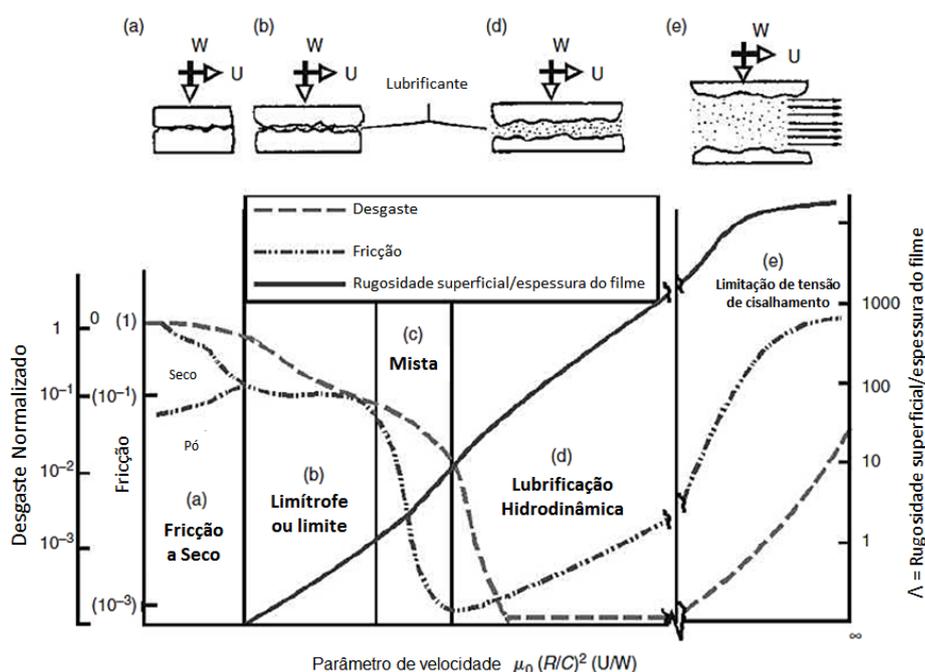
Fonte: Adaptado de Hasan (2017)

Analisando que praticamente 84% dos sistemas automotivos (motor de combustão interna, trem de acionamento, sistemas hidráulicos, direção e sistema de freio) onde é contabilizado o maior volume de falhas, grande parte dos eventos relacionados estão ligados à deficiência de lubrificação provocando algum posterior modo de desgaste detectável em análises de falhas após a desmontagem do conjunto de peças.

FUNDAMENTOS DA LUBRIFICAÇÃO

Em aproximadamente 100 anos passados, um engenheiro mecânico alemão cujo nome é Richard Stribeck desenvolveu uma teoria chamada de diagrama ou curva de Stribeck. No campo da tribologia (estudo de interações entre superfícies em movimento) entende-se que em condições de variação da velocidade, viscosidade (espessura do óleo) e coeficiente de atrito superficial são fatores que provocam variações nos regimes ou formas de lubrificação. Totten (2006) ilustra didaticamente os conceitos de Stribeck a seguir:

Figura 4 – Diagrama detalhado de Stribeck



Fonte: Adaptado de Totten (2006, p.123)

Podem-se descrever as principais etapas ilustradas no diagrama de Stribeck compartilhado anteriormente da seguinte forma:

- Fricção a seco (a) – contato direto entre superfícies sem a ação do lubrificante para minimização do atrito e desgaste;

- Lubrificação limítrofe ou limite (b) – contato direto entre superfícies com início de passagem de lubrificante, mas ainda insuficiente para flutuação das peças. Geralmente ocorre em momentos de partida, cargas elevadas ou paradas rápidas;

- Lubrificação Mista (c) – conhecido como regime misto, essa condição existe contato direto entre superfícies, mas com presença mista de lubrificação minimizando desgaste entre contatos;

- Lubrificação Hidrodinâmica (d) – neste ponto as peças encontram-se em flutuação sobre o óleo, dessa forma tendo o contato direto evitado em função do aumento da espessura da camada de lubrificação conhecida como “filme” de óleo entre os corpos em movimento.

Ainda existe um regime intermediário de lubrificação chamado EHD (Elasto-hidrodinâmica) que ocorre na transição do regime misto para o regime hidrodinâmico. Segundo Fitch & Troyer (2010) essa condições possui as seguintes características:

“Sob condições de contato ou linha, pouca área de superfície está disponível na zona de carga correspondente. No entanto, devido à elasticidade do material do mancal, durante a operação, o metal do mancal realmente se deforma para produzir uma pequena área de carga sob qual uma lubrificação é formada por uma película de óleo.” (FITCH & TROYER, 2010, p.7)

No regime elasto-hidrodinâmico de lubrificação existe um auxílio desempenhado por substâncias químicas adicionadas no óleo base que chamamos de aditivos AW (Anti Wear = Anti Desgaste). Esses aditivos fornecem uma camada de proteção ou revestimento superficial que não permitem o contato direto entre as superfícies, dessa forma, minimizando desgaste nas interações.

A separação das superfícies pela camada de óleo, ou película filme de lubrificante tem papel fundamental na redução de atrito e desgaste proveniente dessa interação de elementos. Não é uma condição ideal o trabalho de elementos em regime limítrofe de lubrificação, conforme Taylor (1993) esse modo equivale-se ao contato direto entre materiais:

“Se as superfícies dos sólidos não estiverem separadas pelo lubrificante e ocorre em uma área comparável àquela que se desenvolve em contato, a condição é chamada 'lubrificação de limite', uma vez que as características de fricção são determinadas pelas propriedades dos sólidos e lubrificantes em suas interfaces comuns” (TAYLOR, 1993, p. 76)

ADITIVOS E SUAS FUNÇÕES

Aditivos podem-se comparar as vitaminas e sais minerais que existem no organismo humano, afirmando que são substâncias essenciais para o equilíbrio e desempenho deste complexo mecanismo. Aditivos são produtos químicos

desenvolvidos e introduzidos na fabricação do óleo base com intuito da melhoria de desempenho. Conforme Fitch & Troyer (2010) essas substâncias adicionadas no desenvolvimento de lubrificantes possuem três funções básicas: 1) Melhorar as propriedades existentes no óleo base; 2) Suprimir propriedades indesejadas no óleo base; 3) Atribuir novas propriedades aos óleos base.

Quanto aos tipos de aditivos, existem inúmeras aplicações no mercado, dentre as principais podem-se destacar conforme a classificação:

Quadro 2 - Classificação de aditivos por tipo de desempenho

Classificação	Descrição
Aditivos de Controle de Depósito	Antioxidantes Ditiofosfatos de zinco Detergentes Dispersantes
Aditivos formadores de filme	Lubrificantes Sólidos Modificadores Orgânicos de Fricção
Aditivos Anti-desgaste e aditivos de extrema pressão	Anti-desgaste sem cinzas Aditivos de extrema pressão Portadores de Enxofre
Aditivos de Controle de Viscosidade	Modificadores de Viscosidade de Copolímero de Olefina Modificadores de Viscosidade de Poli metacrilato Depressores de Ponto de Fluidez

Fonte: Adaptado de Rudnick (2009)

- Aditivos de controle de depósito – São substâncias evitam formação de depósitos (impregnação de contaminantes) nas paredes ou superfícies de contato dos materiais. Atuam realizando a limpeza das superfícies e também dispersando agrupamento de moléculas dos contaminantes;

- Aditivos formadores de filme – Formam filmes, ou camadas à seco e fornecem lubrificação nessas condições para aplicações variadas envolvendo baixas velocidades de deslizamento e altas cargas de contato;

- Aditivos anti-desgaste e aditivos de extrema pressão - Desenvolvem películas químicas ou revestimentos protetivos sólidos entre as superfícies de contato, minimizando o atrito e conseqüentemente o desgaste e também suas moléculas possuem resistência superior ao esmagamento quando submetidas a regimes extremos em operações severas;

- Aditivos de controle de viscosidade – Mantém a viscosidade do óleo lubrificante constante independente da variação de temperatura de operação dentro de limites preestabelecidos na especificação de desenvolvimento do fluido.

SISTEMAS E COMPONENTES LUBRIFICADOS COM ÓLEO

Máquinas são integradas por sistemas e componentes que por sua vez são subdivididos em subconjuntos, elementos de máquinas e peças individuais. Todos esses itens se integram e necessitam trabalhar com mínimo atrito e contatos superficiais protegidos da fricção direta com objetivo da minimização do

desgaste superficial. Neste contexto, a lubrificação fornece a condição ideal de trabalho para o equilíbrio na aplicação e desempenho adequado do maquinário em operação com baixos custos de manutenção.

Sistemas de máquinas geralmente compreendem vários componentes básicos projetados para desenvolver, alterar, transferir ou consumir energia mecânica (TOMS & TOMS 2008, p.142). Diversos são os componentes lubrificados à óleo, mas em linhas gerais, pode-se considerar o agrupamento dos principais conforme o Quadro 3:

Quadro 3 - Sistemas e componentes lubrificados com óleo

Descrição	Observações
Mancais de fricção (jornal, tipo luva ou planos)	Geralmente o eixo é fisicamente içado da superfície do mancal por lubrificação hidrodinâmica. Isso resulta em baixos níveis de atrito e vibrações durante a operação.
Mancais anti-fricção	São subdivididos basicamente em rolamentos de esferas, rolos e agulhas. Os rolamentos de esferas e rolos são comumente usados em aplicações de máquinas de alta velocidade e alta carga, como aeronaves ou turbinas a gás derivadas de aerodinâmica, material rodante automotivo e ferroviário, turbinas eólicas, caixas de engrenagens industriais e etc.
Pistões, anéis e camisas	Conjuntos de pistões, anéis e camisas são os principais componentes de máquinas alternativas, como motores de combustão interna, compressores de gás e bombas.
Engrenagens	Engrenagens são utilizadas para alterar o torque rotacional, a velocidade ou a direção em praticamente todos os tipos de motores de combustão e na maioria dos equipamentos industriais. Nos sistemas de engrenagens, os movimentos diferenciais de contato deslizante e de rolamento ocorrem quando os dentes se engrenam durante a rotação.
Acoplamentos estriados	Os acoplamentos estriados são frequentemente utilizados para acoplar os eixos em linha de dois módulos de máquinas. O uso de um estriado permite que módulos de componentes como caixas de engrenagens, bombas e outros acessórios sejam desconectados casualmente para inspeções.
Elos e correntes	Os acionamentos por correntes de roletes são usados extensivamente para acoplamento de potência em aplicações de máquinas automotivas e industriais, se a distância entre eixos paralelos for muito grande para uso efetivo de engrenagens e os requisitos de torque forem altos demais para uso efetivo das correias.

Fonte: Adaptado de Toms & Toms (2008)

Ponto de coleta primário representa um local estrategicamente localizado para obter-se uma “visão geral” da condição da máquina e do fluido lubrificante. Pontos de coleta secundários são distribuídos em locais diversos da máquina para função principal de isolar componentes para fins de diagnósticos localizados.

Observando o esquema da Figura 5, o ponto de coleta primário está localizado na linha de retorno, ou seja, obtendo a amostra do óleo hidráulico após ter fluido por todo o sistema e estar retornando para o tanque de armazenamento. Já os pontos secundários possuem localizações após a bomba hidráulica, bomba de recirculação e mancais de rolamento e bloco de junção do fluxo para o retorno.

REALIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM

A obtenção da amostra de fluidos determina o sucesso do programa de análise de óleo, sem amostras coletadas não é possível realizar análises. Devem ser respeitadas as boas práticas de limpeza e nível completo de enchimento dos frascos, Bloch (2000) recomenda as melhores práticas nestes requisitos:

“As válvulas de amostragem devem ser completamente lavadas antes da amostragem. Se outro dispositivo portátil de amostragem é empregado, esses dispositivos precisam ser liberados também. Uma vez que a lavagem está completa, o frasco de amostra pode ser preenchido. No entanto, nunca preencha um frasco de amostra mais de três quartos completos. O espaço no topo da garrafa (nível máximo de enchimento) permite agitação adequada pelo laboratório.” (BLOCH, 2000, p.515)

Ainda segundo Bloch (2000), existem passos da tarefa à serem seguidos afim da realização de uma amostragem de fluidos com confiabilidade, a sequência de atividades é disposta abaixo:

- Obter uma boa amostra de óleo começa com um frasco do tamanho correto e limpeza;
- Antes de sair para realizar a coleta, coloque os frascos tampados em sacos com *zip-lock*, um por embalagem;
- Após a ponto de amostragem ou a válvula ter sido devidamente lavado (incluindo a bomba ou sonda, se usado) remova da embalagem segurando um único frasco de amostra;
- Passe o frasco na cavidade do dispositivo de amostragem (bomba de vácuo ou sonda);
- A amostra é então obtida da maneira usual até que a quantidade correta de óleo preencha o frasco;
- Com o frasco tampado, pode-se abrir o zíper da embalagem e remover o frasco. Confirme se o frasco está bem fechado para assim evitar contaminação da amostra.

Tendo a disciplina necessária para realização correta da amostragem de óleo, elimina-se a possibilidade de resultados incorretos referente às práticas de campo, tendo assim o resultado esperado de um programa de análise de óleo com dados confiáveis para a tomada de ação gerencial e manutenções programadas.

ESTABELECENDO O INTERVALO DA AMOSTRAGEM

Diversos fatores podem exercer influência sobre o intervalo de amostragem e geralmente são analisados os agentes como severidade do ambiente de aplicação da máquina, idade ou vida útil da máquina e do fluido, perdas financeiras consequentes das falhas entre outros. Bloch (2000) orienta os critérios macro que devem ser observados como:

- Criticidade da máquina;
- Severidade ambiental Fluida;
- Idade da máquina;
- Idade do óleo;

Porém, tratando-se da complexidade e diferenças tanto em modelos de maquinário como tipo de aplicação, apenas as definições macro não são suficientes. É necessária a definição ou orientação da frequência de amostragem com base nos diferentes componentes que integram os equipamentos. Seguindo a lógica relatada, a Tabela a seguir traz a orientação recomendada e aplicável em variados tipos de compartimentos:

Tabela 2 - Distribuição da frequência de amostragem dos fluidos por tipo de compartimento

Compartimento	Intervalo (horas)
Motores diesel	150
Transmissões, diferenciais e reduções finais	300
Hidráulicos – equipamentos móveis	200
Turbinas à gás –Industrial	500
Turbinas à vapor	500
Compressores de Ar/Gás	500
Resfriadores	500
Caixas de engrenagens – Alta velocidade, aplicação pesada	300
Caixas de engrenagens – Baixa velocidade, aplicação pesada	1000
Mancais – Sólidos e elementos rolantes	500
Motores de reciprocidade – Aviação	25 – 50
Turbinas à gás – Aviação	100
Caixas de engrenagens - Aviação	100 – 200
Hidráulicos - Aviação	100 – 200

Fonte: Adaptado de Flitch & Troyer (2010)

ENSAIOS DE MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DO LUBRIFICANTE

A análise de lubrificantes possui diversas técnicas utilizadas para determinar variadas características encontradas no óleo quanto a utilização, condições atuais bem como vida útil do fluido e dos componentes das máquinas. Basicamente podem-se classificar os ensaios realizados com os lubrificantes por possuir três objetivos de detecção no monitoramento e aplicação de testes que são a degradação, a contaminação e o desgaste.

DEGRADAÇÃO

A degradação possui associação direta com a perda das características ou especificações iniciais do fluido trabalhado em laboratório. Entende-se que o fluido degradado é aquele que perde suas propriedades básicas e que se encontra no fim de vida útil, podendo ser o ponto ótimo de substituição ou falha prematura provocada por fatores de aceleração da falha do óleo.

Ensaio de degradação de lubrificantes avaliam a qualidade do fluido que determina a viabilidade de uso e o momento de substituição, pode-se afirmar que:

“As características de serviço dos óleos lubrificantes são avaliadas por características de qualidade. Para determiná-las métodos padrão foram desenvolvidos incluindo a medição de números ácidos e básicos, viscosidade cinemática, ponto de fulgor, etc.” (MYSHKIN & MARKOVA, 2018, p.22)

Como relatadas, as características qualitativas do lubrificante são determinadas por ensaios normalizados, a compilação desses ensaios é agrupada por Myshkin & Markova (2018) seguindo os padrões internacionais da normas ASTM (American Society for Testing and Materials - Sociedade Americana de Ensaio e Materiais):

Quadro 4 - Métodos padrão e normalizados para análise qualitativa de fluidos lubrificantes

Característica qualitativa do óleo	Descrição do método	Meta da análise
Número Ácido (AN), mg KOH/g (ASTM D664, ISO 6619-88)	Titulação potenciométrica da amostra de óleo com solução alcoólica de hidróxido de potássio	É avaliado o envelhecimento do óleo a partir da oxidação
Número Básico (BN), mg KOH/g (ASTM D4739, ISO 6619-88)	Titulação potenciométrica da amostra de óleo com solução alcoólica de ácido clorídrico (HCl)	Capacidade do óleo para neutralizar ácidos
Viscosidade cinemática, mm ² /s (ASTM D445/446, ISO 3104-94)	Medida do tempo de escoamento do óleo por unidade de tempo com gravidade e temperatura constante (40 ou 100°C) com viscosímetro de vidro calibrado	As características da viscosidade são avaliadas. Queda de viscosidade evidencia a contaminação do sistema com combustível ou líquido refrigerante
Ponto de fulgor, °C (ASTM D92)	A amostra de óleo é aquecida a uma taxa fixa acima do ponto de fulgor de vaporização do óleo em um cadinho aberto acima da superfície do óleo de um dispositivo de ignição	A presença de matéria leves, voláteis e inflamáveis são avaliadas. Baixo ponto de fulgor evidencia teor de combustível no óleo

Fonte: Adaptado de Myshkin & Markova (2018)

CONTAMINAÇÃO

Pode-se definir contaminação como tudo aquilo que está no fluido e que não faz parte originalmente dele, sendo incorporado ao ambiente externo ou interno no local de armazenamento e/ou fluxo do óleo. Nem sempre é possível enxergar a contaminação, por esse motivo classifica-se contaminação como três tipos básicos:

“No que diz respeito à operação e manutenção de máquinas, deve-se observar que os óleos lubrificantes de qualquer grau ou especificação, geralmente sofrem de três fontes comuns de contaminação: sujeira; hidrocarbonetos, gases ou outros diluentes do processo; e intrusão de água.” (BLOCK 2000, p. 463)

Sujidade ou particulado, geralmente são oriundos de ingresso externo de contaminação e são filtráveis, ou seja, existe possibilidade de remoção dos contaminantes por meio de elementos filtrantes no circuito hidráulico do sistema, o que facilita o controle de particulado no fluido.

O segundo contaminante que é a diluição de outros fluidos, por exemplo, em motores de combustão interna ou compressores à gás, passam pelos anéis de pistão ou vedações e misturam-se dentro do lubrificante provocando redução de viscosidade, redução do ponto de fulgor (ignição ou incandescência do fluido) e queda drástica da eficiência e funcionalidade do fluido lubrificante.

Por último, mas não menos nociva, sem dúvida o pior contaminante dos fluidos, a água. Quando ocorre passagem de água para o óleo lubrificante, ocorre não só a modificação da viscosidade do óleo, mas é provocada a oxidação das peças e aumento das propriedades corrosivas no fluido, ainda ocorre formação de gases ácidos como em casos de motores de combustão interna. Acrescenta-se ainda, crescimento biológico de microrganismos que obstruem passagens de óleo.

DESGASTE

Refere-se ao desgaste como “dano a uma superfície sólida que geralmente envolve perda de material devido ao movimento relativo entre essa superfície e uma substância ou substâncias em contato” (ASM 1995, p.337). Dependendo do tipo de desgaste relacionado, partículas geradas da interação irregular entre superfícies em movimento podem descrever a gravidade do dano, o que segundo ASM (1995) relacionam-se aos regimes de desgaste, de leve a grave e caracterizam-se por partículas de tamanhos diferentes, sendo as mais severas associadas a partículas maiores que 1 mm.

Os regimes ou tipos de desgaste possuem diferentes classificações, dentre as descrições normalizadas podem-se associar da seguinte maneira:

Quadro 5 - Classificações dos tipos de desgaste normalizados

Classificação dos tipos de desgaste	Observações
Desgaste abrasivo	Partículas duras ou protuberâncias duras que são forçadas contra e mover-se ao longo de uma superfície sólida.
Desgaste de polimento	Interações entre dois sólidos que removem o material, enquanto ao mesmo tempo em que produz um acabamento polido, a superfície de pelo menos um dos dois.
Erosão por partículas sólidas	Perda de material resultante do impacto repetido de pequenas partículas sólidas.
Erosão por cavitação	Nucleação repetida, crescimento e colapso violento de cavidades ou bolhas em um líquido.
Erosão por impacto líquido	Perda progressiva do material original de uma superfície sólida devido à exposição contínua a impactos por quedas ou jatos líquidos.
Erosão por lama	Mistura de partículas sólidas em um líquido (geralmente água) de tal consistência que pode ser prontamente bombeado causando desgaste erosivo.
Desgaste adesivo e deslizante	Tipo de desgaste gerado pelo deslizamento de uma superfície sólida ao longo de outra superfície.
Desgaste por atrito	É o movimento oscilatório de pequena amplitude que pode ocorrer entre superfícies de contato, que geralmente estão nominalmente em repouso.
Desgaste de contato rolante	Resulta do esforço mecânico repetido da superfície de um corpo rolando outro corpo.
Desgaste por impacto	Definido como o desgaste de uma superfície sólida devida à percussão, que é uma exposição repetitiva a contato dinâmico de outro corpo sólido.
Desgaste corrosivo	Degradação de materiais nos quais os mecanismos de corrosão e desgaste são envolvidos
Desgaste oxidativo	Pode ocorrer sob condições de deslizamento sem lubrificação ou lubrificado quando a espessura do filme de óleo é menor que a rugosidade da superfície dos tribo elementos, por exemplo, sob condições de lubrificação limítrofe.

Fonte: Adaptado de ASM (1995)

Em relação aos tipos de desgaste mencionados, outro fator deve ser levado em consideração para determinação da severidade do desgaste em componentes por meio da análise sensitiva ou instrumentada, que é o tamanho das partículas geradas.

A progressão das dimensões das partículas de desgaste indica o estágio da potencial falha, determina a capacidade de detecção bem como a propagação do desgaste. A figura 6 ilustra as condições mencionadas:

Figura 6 - Progressão típica de desgaste severo



Fonte: Adaptado de ASM (1995)

LIMITES DE AÇÃO PARA DIAGNÓSTICOS

ESTABELECENDO LIMITES DE AÇÃO

Historicamente, a técnica de análise de fluidos lubrificantes (novos e usados) possui um paradigma que permeia os analistas de laboratórios comerciais de lubrificantes, que se relaciona em quais limites para ação de intervenções de manutenção devem confiar embasados nos resultados dos ensaios. “Percebendo as limitações dessa abordagem, as organizações de classe mundial estão encarregando-se de suas próprias configurações de alarme para garantir que seus objetivos específicos sejam atendidos” (FLITCH & TROYER 2009, p.111).

O objetivo principal dos “alarmes” ou como são conhecidos comumente, “limites de desgaste”, é estabelecer um parâmetro confiável com embasamento científico para servir como uma espécie de gatilho de ação. Quando atingido um limite preestabelecido, é necessária a tomada de ação, podendo ser imediata, programada ou apenas monitoramento (dependendo do nível atingido do limite).

Dependendo do tipo de análise à ser realizada, os tipos de gatilhos de ação possuem variações. Flitch & Troyer relatam descrevendo:

“Alguns parâmetros de dados exibem limites inferiores, como BN, elementos aditivos, ponto de fulgor, estabilidade à oxidação e FTIR, usam limites superior e inferior, geralmente relacionados a importantes propriedades químicas e físicas do lubrificante, onde a estabilidade é desejada.” (FLITCH & TROYER 2009, p. 111)

Ainda classificam-se os gatilhos de ação como alarmes proativos ou preditivos. Alarmes proativos relacionam-se com condições anormais controlando causas raízes das anomalias, falhas de operação ou degradação do lubrificante. Já os alarmes preditivos detectam condições anormais nas máquinas, taxas de desgaste, falhas em estágios iniciais ou avançados (desgaste já presente).

Conforme mencionada, a existência de limites com nível inferior e superior a serem atingidos para tomada de ação, Myshkin & Markova (2018) ilustram a aplicação considerando a análise da viscosidade de fluidos de forma proativa:

Tabela 3 - Limites proativos de ação para parâmetros de viscosidade em fluidos

Limite	Óleo do Motor** (%)	Óleo Industrial ** (%)	Óleo industrial operando em modos de carga severos** (%)
Crítico (superior)	+20	+10	+7
Alerta (superior)	+10	+5	+4
Alerta (inferior)	-5	-5*	-5*
Crítico (inferior)	-10	-10*	-10*

Notas *Valor estando com dois períodos analisados acima para óleos com aditivos melhoradores do índice de viscosidade (IV); **Limites de óleo de motor indicado para viscosidade em 100°C; óleo industrial para viscosidade em 40°C

Fonte: Adaptado de Myshkin & Markova (2018)

Considerando a modalidade de análise com limites preditivos na análise de elementos de desgaste em óleos lubrificantes, Flitch & Troyer apresentam uma metodologia que considera dois níveis, o alerta e crítico para atuação:

Quadro 6 - Limites preditivos de ação para análise elementar (2 subdivisões)

Limite do Alarme	Método de Cálculo do Limite
Nível Alerta	Média da amostra (μ) + 1X Desvio Padrão (σ)
Nível Crítico	Média da amostra (μ) + 2X Desvio Padrão (σ)

Fonte: Adaptado de Flitch & Troyer (2010)

Ainda complementando a metodologia citada anteriormente, pode-se utilizar a orientação definida por Toms & Toms (2008), considerando quatro níveis para gatilhos de ação na análise de elementos de desgaste em fluidos, a tendência moderada, tendência rápida, nível alerta e nível relatável:

Quadro 7 - Limites preditivos de ação para análise elementar (4 subdivisões)

Limite do Alarme	Método de Cálculo do Limite
Tendência Moderada	60% do Nível Alerta
Tendência Rápida	90% do Nível Alerta
Nível Alerta	Média da amostra (μ) + 2X Desvio Padrão (σ)
Nível Crítico	Média da amostra (μ) + 4X Desvio Padrão (σ)

Fonte: Adaptado e Toms & Toms (2008)

IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE COMPOSIÇÃO DOS SISTEMAS MECÂNICOS

Existe uma necessidade latente de capacitação ao analista de lubrificantes, no que se diz respeito não somente a análises químicas, mas também ao conhecimento dos sistemas de máquinas, seus componentes e materiais de composição das peças montadas. Com a associação dos conhecimentos relatados, amplia-se a capacidade técnica de diagnóstico e antecipação de falhas, o que tem relação direta na redução de custos de manutenção por falhas evitadas.

Compreendendo essa necessidade, Toms & Toms (2008) compilam as principais fontes de desgaste elementar em indicadores primários e secundários (consequentes), o que a exemplo de motores de combustão interna (Quadro 8), transmissões e engrenagens (Quadro 9), sistemas hidráulicos móveis (Quadro 10) e máquinas industriais (Quadro 11) democratizando o entendimento das fontes elementares das peças que compõem esses sistemas relacionando o desgaste com sintomas de falhas:

Quadro 8 - Indicadores de falha em motores de combustão interna

Problema	Indicador principal	Indicador secundário
Mancais principais e mancais das bielas	Chumbo (Pb) Cobre (Cu) Alumínio (Al)	Cobre (Cu), Níquel (Ni), Estanho (Sn) Estanho (Sn) Ferro (Fe), Chumbo (Pb), Estanho (Sn)
Saia do pistão	Ferro (Fe) Alumínio (Al)	-
Pino do pistão	Ferro (Fe)	Manganês (Mn)
Bucha do pino do pistão	Cobre (Cu) Prata (Ag)	Chumbo (Pb), Estanho (Sn)
Anéis de pistão	Cromo (Cr) Ferro (Fe)	Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo) Manganês (Mn)
Camisas	Cromo (Cr) Ferro (Fe)	Ferro (Fe) Silício (Si)
Placa de came do turbo	Níquel (Ni)	-
Mancais do turbo	Cobre (Cu) Prata (Ag)	-
Ressaltos do eixo comando	Ferro (Fe)	-
Mancais do eixo comando	Cobre (Cu) Alumínio (Al)	Zinco (Zn), Chumbo (Pb) Estanho (Sn) Silício (Si), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn)
Contaminação por fuligem	Fuligem	Viscosidade
Circulação de sujeira	Silício (Si)	Alumínio (Al)
Ingresso de água	Água	-
Líquido arrefecedor/Anticongelante	Água Glicol	Sódio (Na), Boro (B), Silício (Si) Sódio (Na), Boro (B), Silício (Si)
Água salgada	Água	Sódio (Na), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Potássio (K)
Diluição por combustível	Combustível	Viscosidade
Oxidação por produtos	Oxidação	Número básico (BN), Número ácido (AN)
Nitração por produtos	Nitração	Número básico (BN), Número ácido (AN)
Sulfatação por produtos	Sulfatação	Número básico (BN), Número ácido (AN)
Depleção de aditivo Antidesgaste	AW	Zinco (Zn), Fósforo (P), Molibdênio (Mo), Enxofre (S)
Depleção de antioxidante	AO	-
Juntas/vedadores de silicone	Si	-

Fonte: Adaptado de Toms & Toms (2008)

Quadro 9 - Indicadores de falha em transmissões e sistemas de engrenagens

Problema	Indicador principal	Indicador secundário
Buchas/mancais planos	Chumbo (Pb) Cobre (Cu)	Cobre (Cu), Estanho (Sn) Estanho (Sn)
Rolamentos anti-fricção	Ferro (Fe)	-
Gaiolas de rolamentos	Ferro (Fe) Cobre (Cu) Cromo (Cr)	-
Engrenagens	Ferro (Fe)	-
Embreagens e placas de fricção	Ferro (Fe) Alumínio (Al)	Cobre (Cu)
Placa de desgaste	Cobre (Cu)	-
Vedadores	Silício (Si)	-
Trocador de calor	Cobre (Cu) Alumínio (Al)	-
Carcaça de bomba	Alumínio (Al)	-
Buchas de bomba	Chumbo (Pb) Ferro (Fe)	Cobre (Cu) Silício (Si)
Circulação de sujeira	Partículas ISO	Silício (Si)
Ingresso de água	Água	-
Líquido arrefecedor/ Anticongelante	Água Glicol	Sódio (Na), Boro (B), Silício (Si) Sódio (Na), Boro (B), Silício (Si)
Água salgada	Água	Sódio (Na), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Potássio (K)
Oxidação por produtos	Oxidação	Número ácido (AN)
Nitração por produtos	Nitração	Número ácido (AN)
Sulfatação por produtos	Sulfatação	Número ácido (AN)
Depleção de aditivo antidesgaste	AW	Zinco (Zn), Fósforo (P), Molibdênio (Mo), Enxofre (S)
Depleção de antioxidante	AO	-
Alteração de viscosidade	Viscosidade	-
Água salgada	Água	Sódio (Na), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Potássio (K)

Fonte: Adaptado de Toms & Toms (2008)

Quadro 10 - Indicadores de falha em máquinas industriais

Problema	Indicador principal	Indicador secundário
Mancais tipo jornal (planos)	Cobre (Cu) Chumbo (Pb) Alumínio (Al)	Estanho (Sn)
Rolamentos anti-fricção, roletes & anéis	Ferro (Fe)	Níquel (Ni), Cromo (Cr)
Gaiolas	Cobre (Cu) Plástico	-
Engrenagens	Ferro (Fe) Cobre (Cu)	-
Eixo	Ferro (Fe) Cromo (Cr)	-
Antioxidante/ Antidesgaste	Zinco (Zn) Molibdênio (Mo) Enxofre (S)	Fósforo (P)
Inibidor de corrosão	Enxofre (S)	-
Antiespumante	Silício (Si)	-
Sujeira no ar	Partículas ISO	Silício (Si), Alumínio (Al)
Ingresso de água	Água	-
Água salgada	Água	Sódio (Na), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Potássio (K)
Oxidação por produtos	Oxidação	Número ácido (AN)
Nitração por produtos	Nitração	Número ácido (AN)
Sulfatação por produtos	Sulfatação	Número ácido (AN)
Depleção de aditivo antidesgaste	AW	Zinco (Zn), Fósforo (P), Molibdênio (Mo), Enxofre (S)
Depleção de antioxidante	AO	-
Alteração de viscosidade	Viscosidade	-

Fonte: Adaptado de Toms & Toms (2008)

Quadro 11 - Indicadores de falha em sistemas hidráulicos móveis

Problema	Indicador principal	Indicador secundário
Bomba hidráulica	Chumbo (Pb) Cobre (Cu)	-
Pistão & haste	Ferro (Fe) Cobre (Cu)	-
Válvulas de controle	Partículas ISO	-
Circulação de sujeira	Partículas ISO	-
Ingresso de água	Água	-
Água salgada	Água	Sódio (Na), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Potássio (K)
Oxidação por produtos	Oxidação	Número ácido (AN)
Nitração por produtos	Nitração	Número ácido (AN)
Sulfatação por produtos	Sulfatação	Número ácido (AN)
Depleção de aditivo antidesgaste	AW	Zinco (Zn), Fósforo (P), Molibdênio (Mo), Enxofre (S)
Depleção de antioxidante	AO	-
Alteração de viscosidade	Viscosidade	-
Bomba hidráulica	Chumbo (Pb) Cobre (Cu)	-
Pistão & haste	Ferro (Fe) Cobre (Cu)	-
Válvulas de controle	Partículas ISO	-
Circulação de sujeira	Partículas ISO	-
Ingresso de água	Água	-
Água salgada	Água	Sódio (Na), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Potássio (K)
Oxidação por produtos	Oxidação	Número ácido (AN)
Nitração por produtos	Nitração	Número ácido (AN)
Sulfatação por produtos	Sulfatação	Número ácido (AN)
Depleção de aditivo antidesgaste	AW	Zinco (Zn), Fósforo (P), Molibdênio (Mo), Enxofre (S)

Fonte: Adaptado de Toms & Toms (2008)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de óleo como técnica preditiva conforme apresentada na presente pesquisa é um método que possui foco de detecção prévia de sistemas de contaminação, degradação e desgaste estando presentes no fluido lubrificante do maquinário. Tendo em vista a atual filosofia empresarial de extrair máximo desempenho dos equipamentos industriais com menor custo, antecipar anomalias nas máquinas possibilita manutenções programadas, com isso, consegue-se ter perdas de produção controladas devido planejamento das intervenções e maximização das possibilidades de reparos pontuais com desperdício mínimo de recursos humanos, materiais e lucro cessante.

Considerando que o objetivo geral em estudar, analisar e caracterizar a utilização do monitoramento das condições de fluidos lubrificantes aplicados em sistemas de máquinas bem como ações resultantes do cruzamento de dados oriundos das técnicas de interpretação das informações analisadas, pode-se dizer que foi atendido, na pesquisa detalhou-se tanto princípios básicos da análise de óleo quanto de forma metódica discutiu-se acerca dos métodos de obtenção das amostras bem como dos métodos de análise e metas de monitoramento baseadas em melhores práticas aplicadas mundialmente.

Os princípios do tema foram fundamentados de forma sólida, mencionaram-se técnicas para análise disponíveis na bibliografia explorada bem como a aplicação elucidando a composição das estruturas gerais dos equipamentos monitorados pela técnica de análise de fluidos lubrificante. Com as

informações estruturadas e mencionadas anteriormente, torna-se então possível a busca de ganhos tangíveis através dessa técnica de monitoramento.

A hipótese de utilização da técnica de análise de óleo como método de prevenção de falhas em maquinário foi confirmada com os argumentos demonstrados na pesquisa.

A metodologia aplicada para obtenção das informações e base teórica de estudo originaram-se em bibliografias estrangeiras, uma grande limitação encontrada ao construir-se a pesquisa foi que na biblioteca nacional de trabalhos, artigos e livros sobre o tema e suas aplicações é de extrema escassez de informações especificamente direcionadas ao monitoramento de máquinas com a técnica de análise de óleo.

Pode-se elencar como as principais contribuições do trabalho de pesquisa fornecer base inicial científica no tema tão pouco explorado nacionalmente que é a análise de fluidos para prevenção de falhas, proporcionar uma lógica estruturada para desenvolver um programa coeso de análise de óleo bem como informações de fontes de desgaste que compõe os aspectos construtivos de elementos de máquinas aplicados em larga escala em equipamentos industriais.

Para trabalhos futuros sugerem-se desenvolvimentos de pesquisas na aplicação das técnicas de análise de óleo em cruzamento as análises das causas raízes de falhas das máquinas, evidenciando o pré-diagnóstico com a peritagem física das peças pós-falha, bem como aplicabilidade dos conceitos de estruturação dos limites de diagnósticos.

Predictive analysis of lubricating oil used in automotive equipment and heavy machinery systems

ABSTRACT

The parameters related to oil analysis (contamination, degradation and wear) when interpreted correctly with the aid of specific techniques, can support decision making of punctual maintenance, as well as define the maintenance strategy in organizations with the philosophy of predictive maintenance, extending to maximum operating gain and detecting anomalous symptoms that precede major failures. The research relates to the understanding of lubrication principles, lubricant condition monitoring tests and action limit development techniques and predictive diagnostics. Through bibliographic references of authors specializing in the subject, we sought to concatenate the main foundations of the subject and survey data with qualitative content in order to apply the techniques addressed regarding the classification and statistics of fluid analysis results. As a research product, it is possible to clarify the importance of the technique as a pillar of predictive maintenance and its benefits for the maintenance of mobile equipment and industrial plants.

KEYWORDS: Oil analysis. Monitoring. Predictive maintenance.

REFERÊNCIAS

- ASM HANDBOOK, Volume 18. **Friction, lubrication and wear technology. Tribology International**. Materials Park: ASM International (American Society for Metals), 1995.
- BLOCH, Heinz P. **Practical Lubrication for Industrial Facilities**. Lilburn, The Fairmont Press, Inc., 2000. **crossref**
- BUDINSKI, Kenneth G. **Friction, Wear, and Erosion Atlas**. Boca Raton. Taylor & Francis Group, 2014. **crossref**
- FITCH, Jim, TROYER, Drew. **Oil Analysis Basics**. 2ªEd.Tulsa. Noria Corporation, 2010.
- HASAN, Md. Raquibul. **Failure Investigation Report on Different Components of an Automotive Engine**. International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Vol. 5, No. 1, 2017, pp. 47-51. **crossref**
- MYSHKIN, Nikolai K., MARKOVA, Liubou V. **On-line Condition Monitoring in Industrial Lubrication and Tribology**. Cham, Springer International Publishing, 2018. **crossref**
- RUDNICK, Leslie R. **Lubricant Additives: Chemistry and Applications**. 2ª Ed. Boca Raton. Taylor & Francis Group, 2009. **crossref**
- TAYLOR, C.M. **Engine Tribology**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
- TOMS, Larry A., TOMS, Allison M. **Machinery Oil Analysis: Methods, Automation & Benefits**. 3ª Ed. Park Ridge. Society of Tribologists & Lubrication Engineers, 2008. **crossref**
- TOTTEN, George E. **Handbook of Lubrication and Tribology Volume I: Application and Maintenance**. 2ª Ed. Boca Raton. Taylor & Francis, 2006. **crossref**
- Understanding the P-F curve and its impact on reliability centered maintenance**. UE Systems, 2014: Disponível em <<http://www.uesystems.com/news/understanding-the-p-f-curve-and-its-impact-on-reliability-centered-maintenance>>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

Recebido: 12 Dez. 2019

Aprovado: 07 Out. 2020

DOI: 10.3895/gi.v16n1.11392

Como citar:

SILVA FILHO, L. P. Análise Preditiva do óleo lubrificante usado em sistemas automotivos de equipamentos e maquinário pesado. **R. Gest. Industr.**, Ponta Grossa, v. 16, n. 1, p. 40-63, Jan./Mar. 2020. Disponível em:

<http://periodicos.utfpr.edu.br/revistaqi>

Correspondência:

Leonardo Pereira da Silva Filho

Rua Prudente de Moraes, número 922 Apto 02, Bairro Centro, Barra Bonita, São Paulo, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

