

DETECÇÃO DE FALHA EM EQUIPAMENTO INDUSTRIAL ATRAVÉS DA ANÁLISE FERROGRÁFICA

Samuel Sander de Carvalho, sandercomputacao@yahoo.com.br¹

Junior das Graças Pereira, jrclegrip@yahoo.com.br¹

Maykon Henrique Sales, maykonhs@yahoo.com.br¹

Lucas Costa Brito, brito.lcb@gmail.com¹

Jorge Nei Brito, brito@ufs.edu.br¹

¹Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ),Praça Frei Orlando, 170, São João del Rei - MG, CEP 36307-352

Resumo: Uma das formas de prever o que poderá ocorrer em um determinado equipamento é realizar o exame do óleo lubrificante. A Análise Ferrográfica é uma técnica que avalia as condições mecânicas de uma máquina. Ela é feita através da quantificação e observação visual das partículas em suspensão no óleo lubrificante, ou seja, trata-se de uma avaliação do estado de uma máquina a partir do exame dos resíduos presentes no lubrificante. Essa técnica pode ser empregada na análise de falhas e na avaliação rápida do desempenho de lubrificantes. Neste trabalho é apresentada a Análise Ferrográfica do motor do trator de esteiras D11R Caterpillar TR-64. O resultado mostra a eficiência da técnica podendo aumentar a disponibilidade e confiabilidade do equipamento inspecionado.

Palavras-chave: Análise Ferrográfica, Análise de Óleo, Manutenção Preditiva.

1. INTRODUÇÃO

No meio industrial é nítida a preocupação das empresas com a manutenção de seu maquinário. Elas buscam aumentar sua competitividade de mercado através do gerenciamento dos gastos com a manutenção, que podem representar entre 15% a 30% do custo dos bens produzidos, (Cunha, 2005).

A manutenção é uma combinação de ações conduzidas para substituir, reparar, revisar ou modificar componentes ou grupo identificável de componentes de uma fábrica, de modo que esta opere dentro de uma disponibilidade especificada, em um intervalo de tempo específico, (Kelly e Harris, 1980). Apoiados nessa necessidade, a manutenção nas empresas deve buscar a melhoria de modo constante, utilizando as melhores práticas conhecidas, (Comitti, 2004).

A manutenção preditiva trata-se do monitoramento regular da condição mecânica real, o rendimento operacional, e outros indicadores da condição operativa das máquinas e sistemas de processo, os quais fornecerão os dados necessários para assegurar o intervalo máximo entre os reparos. Ela também minimizaria o número e os custos de paradas não-programadas criadas por falhas da máquina. Em outras palavras, trata-se de um meio de se melhorar a produtividade, a qualidade do produto, o lucro, e a efetividade global de uma planta industrial de manufatura e de produção (Almeida, 2000). Existem várias técnicas de manutenção preditiva tais como a análise de vibração, análise de corrente, análise de fluxo magnético, termografia infravermelha e análise de óleo, foco desse trabalho.

Uma das formas de prever o que poderá ocorrer em um determinado equipamento pode ser verificada através de um exame feito no óleo lubrificante da máquina que está sendo avaliado.

A lubrificação consiste na formação de uma película que impede o contato direto entre duas superfícies que se movam relativamente entre si, reduzindo ao mínimo, o atrito entre as partes. Através da análise de óleos lubrificante é possível detectar a deterioração do óleo e do próprio equipamento, identificar contaminantes ferrosos e não ferrosos e, portanto, economizar os custos com lubrificação. Mesmo com todos esses benefícios, essa técnica não recebe a sua devida atenção, (Alvez, 2007).

A ferrografia é uma técnica que avalia as condições mecânicas de uma máquina. Ela é feita através da quantificação e observação visual das partículas em suspensão no óleo lubrificante, ou seja, trata-se de uma avaliação do estado de uma máquina a partir do exame dos resíduos presentes no lubrificante. Essa técnica pode ser empregada na análise de falhas e na avaliação rápida do desempenho de lubrificantes.

Este trabalho tem por finalidade elucidar a importância de uma análise de óleo através de um exame ferrográfico, apontando seus princípios básicos, os procedimentos dessa análise, bem como, apresentar o equipamento em que se faz o exame e por fim, ilustrar através de um caso prático como foi possível identificar e corrigir problemas provenientes de um óleo contaminado.

2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA FERROGRAFIA

A técnica de ferrografia foi descoberta em 1971 pelo americano Vermon C. Westcott, e desenvolvida com a ajuda de vários outros cientistas. O objetivo era quantificar a severidade do desgaste das máquinas. Os princípios básicos para esse estudo foram:

- Toda máquina se desgasta antes de falhar;
- O desgaste gera partículas;
- A quantidade e o tamanho das partículas são diretamente proporcionais à severidade do desgaste;
- Os componentes de máquinas que sofrem atrito normalmente são lubrificadas e assim as partículas resultantes do desgaste ficam em suspensão no lubrificante durante algum tempo;
- Como as máquinas e seus componentes são feitos em geral de ligas de ferro a maior parte das partículas encontradas nos lubrificantes são provenientes dessas ligas.

A Figura (1) mostra o comportamento vital de um determinado equipamento.

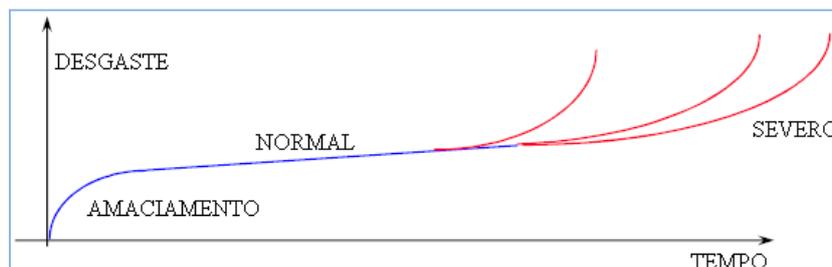


Figura 1. Gráfico desgaste x tempo de um equipamento. (Baroni e Gomes, 2011)

A ferrografia é uma técnica de monitoramento e diagnose de condições de máquinas. A partir da quantificação e análise da morfologia das partículas de desgaste (limalhas), encontradas em amostras de lubrificantes, determinam-se: tipos de desgaste, severidade, contaminantes, desempenho do lubrificante etc. Com estes dados torna-se possível à tomada de decisão quanto ao tipo e urgência de intervenção de manutenção necessária. Ela é classificada como uma técnica de manutenção preditiva, embora possua inúmeras outras aplicações, tais como desenvolvimento de materiais e lubrificantes.

Há dois níveis de Análise Ferrográfica: quantitativa e analítica. A quantitativa consiste numa técnica de avaliação das condições de desgaste dos componentes de uma máquina por meio da quantificação das partículas em suspensão no lubrificante. A analítica que utiliza a observação das partículas em suspensão no lubrificante.

3. PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE FERROGRÁFICA DO ÓLEO

O método usual de quantificação da concentração de material particulado consiste na contagem das partículas depositadas em papel de filtro e observadas em microscópio. Este método, porém, não proporciona condições adequadas para a classificação dimensional, que é de grande importância para a avaliação da intensidade do desgaste de máquinas. Orientando-se pelo fato de que há predominância de ligas ferrosas nas máquinas e seus elementos, Westcott inventou o ferrógrafo para separar as partículas de acordo com o tamanho, conforme mostrado na Fig.(2).

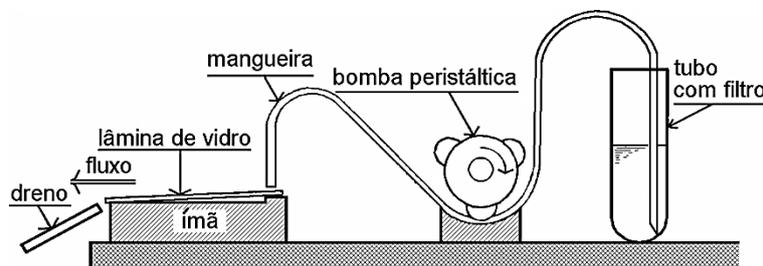


Figura 2. Esquema simplificado de um ferrógrafo (Weber et al. 2010).

O funcionamento desse equipamento ocorre quando a bomba peristáltica puxa o fluido do tubo de ensaio, fazendo esse passar pela mangueira em direção à lâmina de vidro (ferrograma) que se encontra ligeiramente inclinada. O lubrificante escorrerá sobre o vidro em uma única direção, porém, as partículas de metal presentes no óleo são atraídas pelo ímã. As maiores são atraídas com maior intensidade, desta forma, elas são fixadas bem no início da descarga do lubrificante, ou seja, elas vão se depositando de acordo com seu tamanho. Dessa forma, as partículas maiores estarão no início, as intermediárias no meio e as menores no final da lâmina.

Na Fig.(3) tem-se a representação do esquema de deposição do fluido e das partículas sobre o vidro.



Figura 3. Esquema de deposição das partículas metálicas sobre a lâmina de vidro (Weber et al. 2010).

Na Fig. (4) tem-se uma lâmina preparada que permite obter a dimensão aproximada de partículas depositadas, essa lâmina é denominada ferrograma.

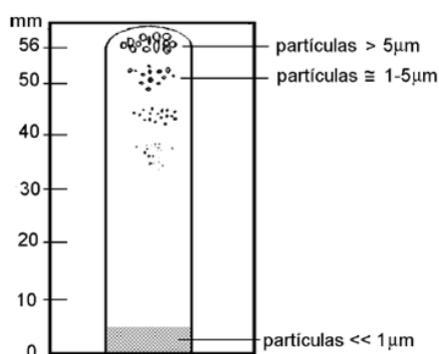


Figura 4. Esquema representativo de um ferrograma (Weber et al. 2010).

O dimensionamento de partículas é efetuado com o auxílio de um microscópio de alta resolução.

3.1. Exame analítico

O exame analítico permite a observação visual das partículas de desgaste para que sejam identificados os tipos de desgastes presentes. Na Fig.(5) tem-se o ferrógrafo analítico, o qual foi utilizado para o estudo de caso. Na (6) tem-se um microscópio metalográfico combinado com um biológico.

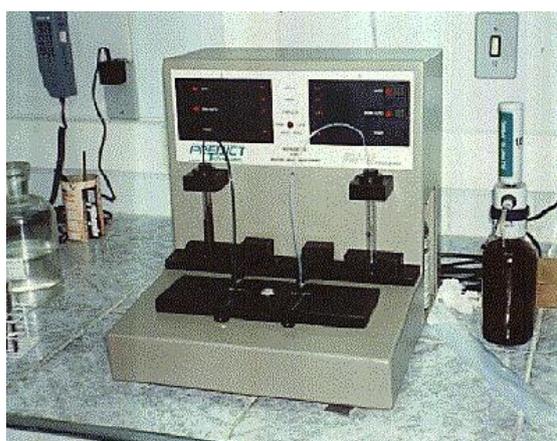


Figura 5. Ferrógrafo analítico.



Figura 6. Microscópio metalográfico e biológico

Fonte: SPLabor.

No ensaio analítico as partículas são classificadas em função das suas características quando observadas no microscópio. Esta classificação pode ser em função do tipo, pela forma e pela natureza.

- Pelo tipo: esfoliação, abrasão, corrosão etc.;
- Pela forma: laminares, esferas etc.;
- Pela natureza: óxidos, polímeros, contaminantes, orgânicas etc.

A Fig. (7) tem-se um exemplo de esfoliação. Este é o tipo de desgaste mais comum. O tamanho das partículas pode variar de 5 a 15 micra. Tem a forma de flocos de aveia. Este tipo de partícula pode ser gerado sem o contato metálico, mas apenas pela transmissão da força tangencial entre duas peças separadas por filme de lubrificante. A quantidade e o tamanho aumentarão com a redução da espessura do filme.

Em contrapartida, na Fig. (8) tem-se o desgaste por abrasão. Estas partículas são semelhantes a cavacos de torno com dimensões de dois a centenas de micra. A principal causa para este tipo de desgaste é a contaminação por areia. Os pequenos grãos de areia se incrustam, por exemplo, num mancal de metal patente e o canto vivo exposto usina o eixo que está girando, tal qual um torno mecânico.



Figura 7. Esfoliação. (Supremelub, 2009)



Figura 8. Abrasão. (Supremelub, 2009)

Para um melhor entendimento os resultados de um ferrograma analítico realizado pela empresa Supremelub, são apresentados na Fig.(9). Esses resultados estão visualizados através de um gráfico antes e após a corrosão.

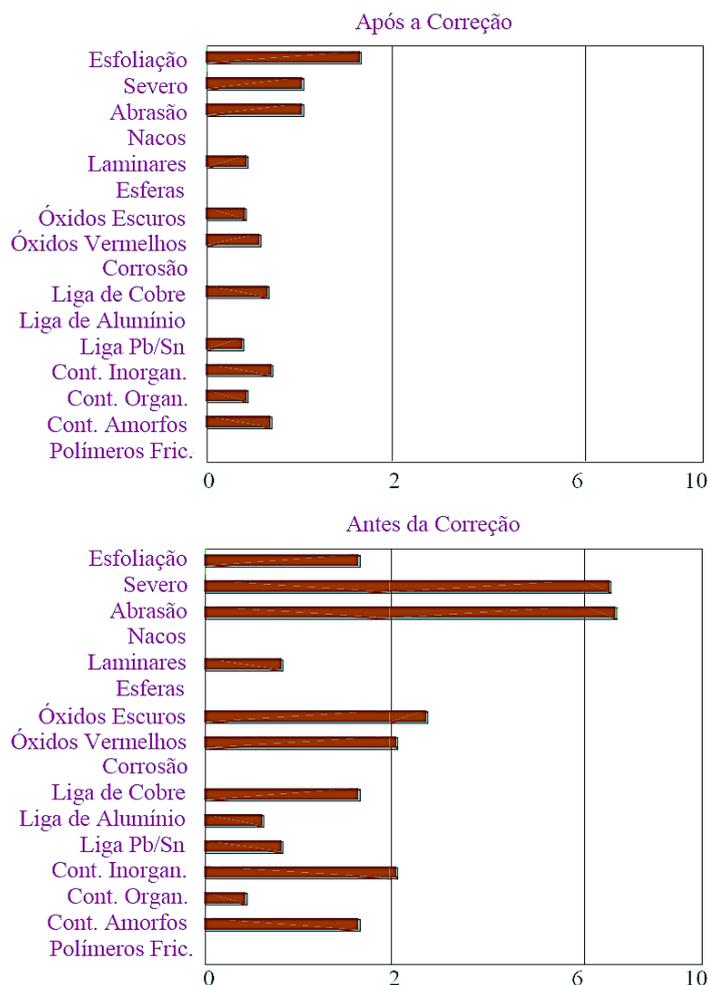


Figura 9. Exemplo de ferrograma analítico. (Supremelub, 2009)

3.2. Exame quantitativo

O exame quantitativo permite a classificação das partículas de acordo com o tamanho e a quantidade. O acompanhamento da evolução destes valores permite avaliar as condições de degradação do equipamento.

Essa técnica apresenta um sistema de feixe de luz, sensores óticos e um processador que possibilita a leitura das partículas diretamente, indicando o valor no display do equipamento. Na Fig.(10) tem-se o esquema de funcionamento desse exame. Na Fig. (11) apresenta-se como ilustração o aparelho em que um exame quantitativo é realizado.

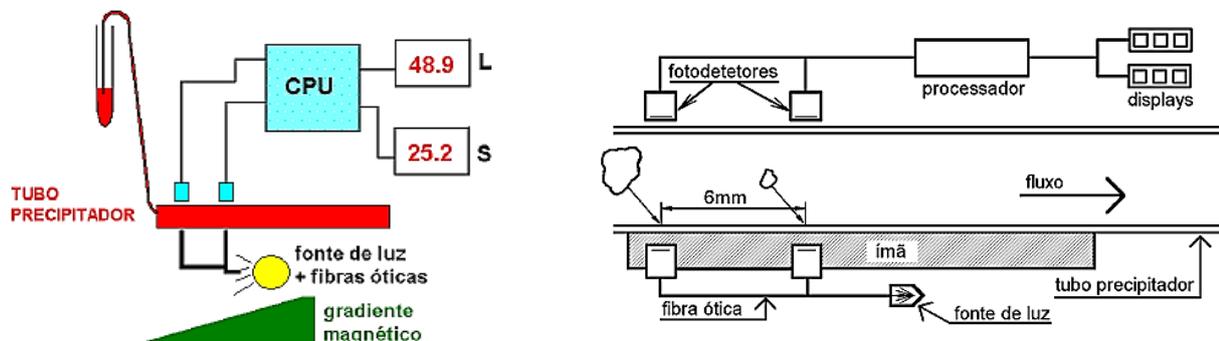


Figura 10. Esquema de funcionamento de um exame quantitativo. (Baroni e Gomes, 2011)



Figura 11. Aparelho de exame quantitativo. (Baroni e Gomes, 2011)

As partículas são classificadas como *Large* (L), maiores do que 5 micra, e *Small* (S), menores ou iguais a 5 micra. L + S significa que há concentração total de partículas. $PLP = (L-S)/(L+S)*100$ significa que há desgaste. $IS = (L^2 - S^2)/diluição^2$ significa índice de severidade.

Na Fig.(12) tem-se um exemplo do acompanhamento das condições de um equipamento através da ferrografia quantitativa. Na condição **A** foi trocado o lubrificante da máquina, porém a análise em **B** ficou próxima do nível de alerta e as novas análises seguintes demonstraram a continuidade do aumento de partículas na amostra. Somente a troca do rolamento em **C** permitiu obter uma análise **D** dentro dos níveis normais.

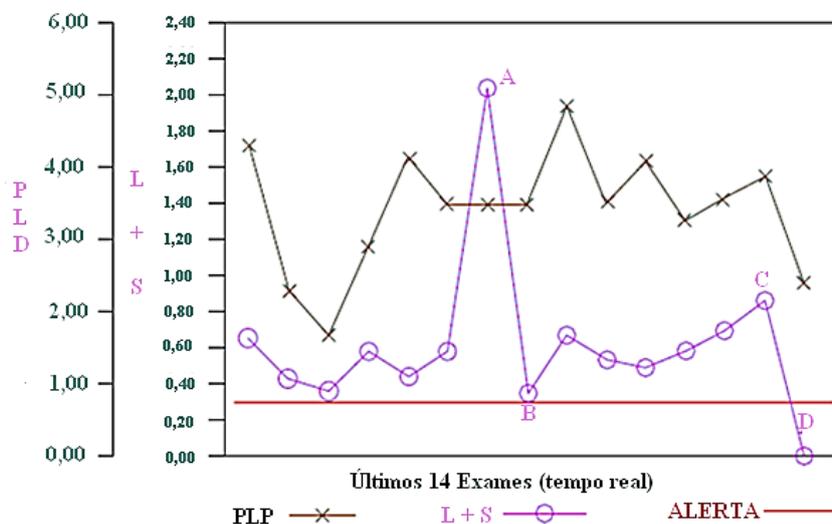


Figura 12. Exemplo de acompanhamento pela ferrografia quantitativa. (Supremelub, 2009)

Essa técnica permite a construção de gráficos, que funcionam de forma similar a um exame laboratorial da máquina, conforme exemplo ilustrativo da Fig. (13). Leituras feitas em períodos regulares podem indicar o crescimento da concentração de partículas maiores, acusando a ocorrência de um desgaste mais acentuado, o que levará o equipamento a uma futura falha.



Figura 13. Exemplo de um gráfico de tendências (Weber et al. 2010).

A Análise Ferrográfica comparada à Espectrometria tem suas vantagens e desvantagens. Como vantagens apresentam-se a detecção de partículas em ampla faixa de tamanhos (entre 2 e 50 micra), a distinção das partículas pelo tamanho e forma e a facilidade de análise das partículas segregadas. Como desvantagens podem ser citados a não detecção de todos os elementos presentes na amostra e à baixa sensibilidade na detecção de partículas menores que 1 micron.

4. Detecção de falha trator de esteiras D11R Caterpillar TR-64 através da Análise Ferrográfica

As amostras de óleo foram tiradas do motor diesel do trator de esteiras D11R Caterpillar TR-64, Fig. (14). As análises, conforme detalhamento a seguir, apresentou contaminação do óleo do motor, indicando desgaste de componentes (mancais, buchas, arruelas de encosto, tubulações do óleo etc.). Para tal, fora utilizado um aparelho de exame quantitativo, conforme mostrado na Fig. (11). O exame se deu no próprio laboratório da empresa a qual o trator está lotado. A vida útil estimada era de 12.000 horas e as horas trabalhadas totalizaram 10.375 horas



Figura 14. Trator D11R Caterpillar TR-64.

O que é importante para os sistemas hidráulicos, e de lubrificação, não é apenas reduzir o nível de contaminação para o patamar exigido, e sim manter constantemente esse nível de contaminação de acordo com as exigências.

O nível de contaminação depende do controle e do gerenciamento, uma vez que se consegue abaixar o nível de contaminação do equipamento hidráulico. Neste sentido é de extrema importância que seja dimensionado um sistema de filtragem para manter o nível da contaminação aceitável para a máquina. Todo sistema hidráulico gera contaminantes sólidos.

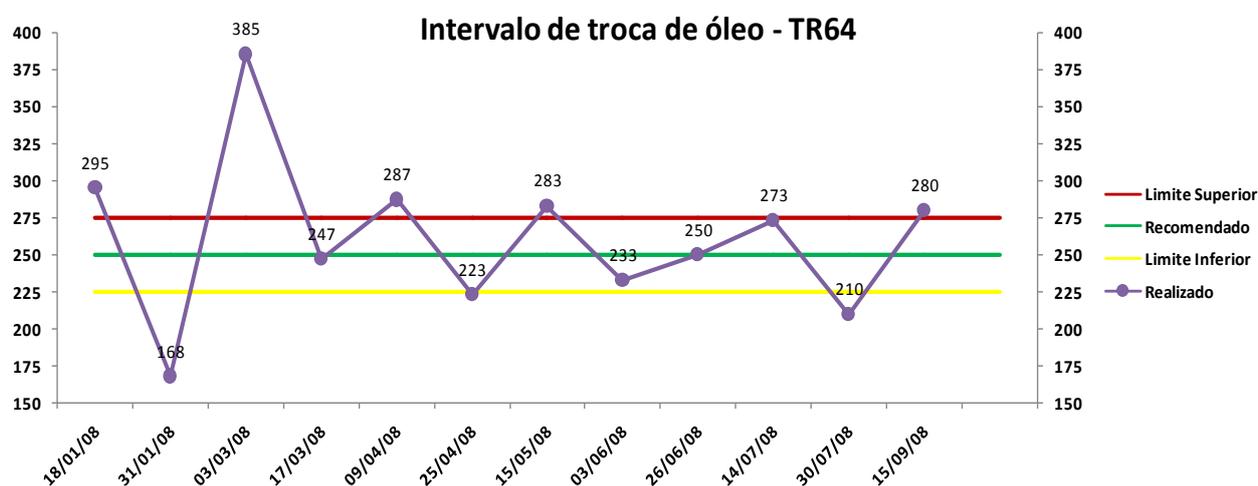
O trator de esteiras D11R Caterpillar TR-64 é um equipamento móvel que trabalha em condições adversas em uma mina de minério de ferro. Foram constatadas inúmeras ocorrências envolvendo o motor nos últimos três meses antes da análise das amostras de óleo conforme mostrado na Tab.(1).

Tabela 1. Indicação das ocorrências no motor do trator de esteiras D11R Caterpillar TR-64.

| DATA DE ÍNICIO | OCORRÊNCIA |
|-----------------|--|
| Julho | |
| 01/07/08 | Atuando baixo fluxo do líquido de arrefecimento |
| 02/07/08 | Completar E.L.C. (Extended Live Cold) |
| 02/07/08 | Alta temperatura do carter |
| 02/07/08 | Atuou alta pressão do carter |
| 20/07/08 | Vazamento de líquido de arrefecimento |
| 28/07/08 | Vazamento de líquido de arrefecimento |
| 30/07/08 | Atuando alta temperatura do E.L.C. |
| 30/07/08 | Atuando alta temperatura do E.L.C.. |
| 30/07/08 | Atuando alta temperatura do E.L.C. |
| Agosto | |
| 05/08/08 | Completar líquido de arrefecimento |
| 05/08/08 | Vazamento de líquido de arrefecimento |
| 10/08/08 | Vazamento de E.L.C.. |
| 25/08/08 | Atuando alta temperatura do motor |
| 26/08/08 | Atuou alta temperatura motor |
| 26/08/08 | Vazamento de líquido de arrefecimento |
| 27/08/08 | Vazamento de líquido de arrefecimento |
| 28/08/08 | Aguardando comboio // completar E.L.C. |
| Setembro | |
| 01/09/08 | Vazamento de óleo motor / estourou turbina (lado esquerdo) |
| 13/09/08 | Vazamento de líquido de arrefecimento |

O motor do trator de esteiras D11R Caterpillar TR-64 não apresenta o sistema ORS (*OilRenewal System*) e necessita de troca de óleo em intervalos de 250 horas.

Através da análise da carta de controle de troca do óleo durante o ano pode-se notar que houve uma melhora no cumprimento do intervalo de troca. Porém, ainda há trocas de óleo realizadas fora do limite superior e inferior, conforme pode ser observado na Fig.(15).

**Figura 15. Carta de controle da troca de óleo do motor no período de um ano.**

4.1. Análises gráficas

O cobre é proveniente de casquilhos, arruelas de encosto de virabrequim, buchas, engrenagens de distribuição. Pode ter sua causa relacionada à temperatura anormal de operação, falta de lubrificação e degradação do óleo lubrificante. Na Fig.(16) tem-se um histórico da quantificação de cobre nas amostras de óleo do motor.

O sódio é proveniente de líquido de arrefecimento ELC, portanto, podemos associar como causa deste contaminante a passagem de líquido de arrefecimento para o óleo lubrificante, ou seja, danos no trocador de calor. Na Fig.(17) tem-se um histórico da quantificação de cobre nas amostras de óleo do motor.

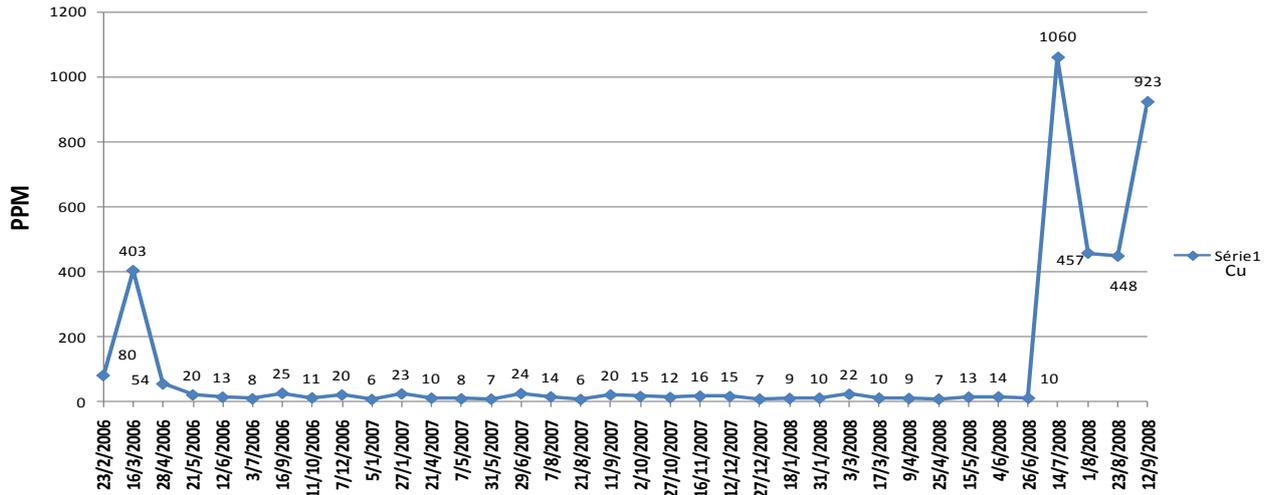


Figura 16. Quantificação de cobre nas amostras de óleo do motor TR-64.

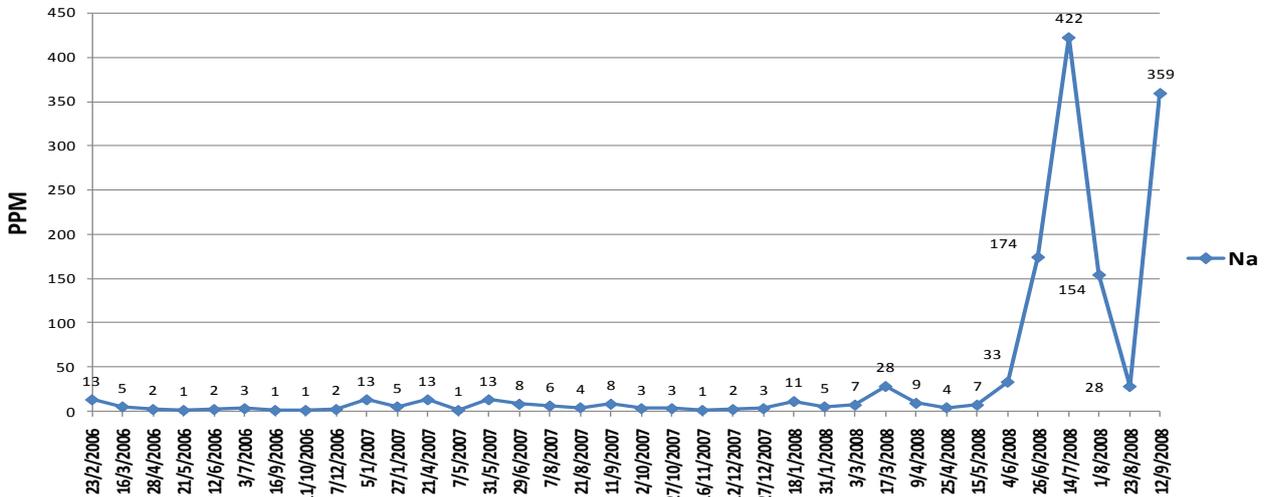


Figura 17. Quantificação de sódio nas amostras de óleo do motor TR-64.

O Chumbo também está associado a casquilhos. Neste caso a provável causa é falta de lubrificação ou contaminação por diesel no lubrificante. Na Fig.(18) tem-se o histórico da quantificação de chumbo nas amostras de óleo do motor.

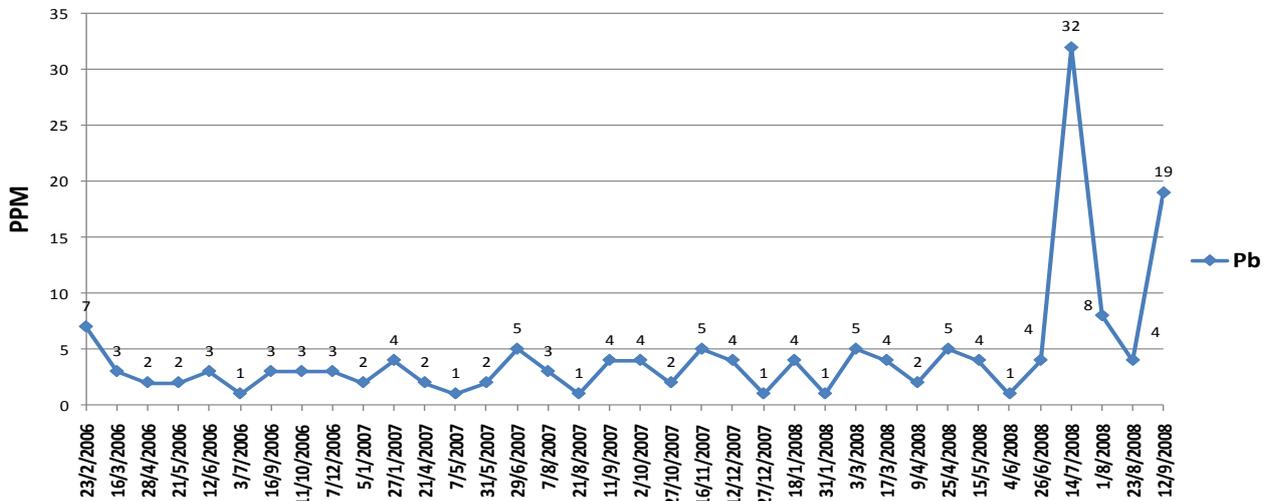


Figura 18. Quantificação de chumbo nas amostras de óleo do motor TR-64.

Buchas de bombas d'água e buchas de árvores de comando possuem estanho em sua composição. Uma lubrificação deficiente provoca o aparecimento deste elemento no óleo lubrificante. O histórico da quantificação de estanho nas amostras de óleo do motor pode ser visto na Fig.(19).

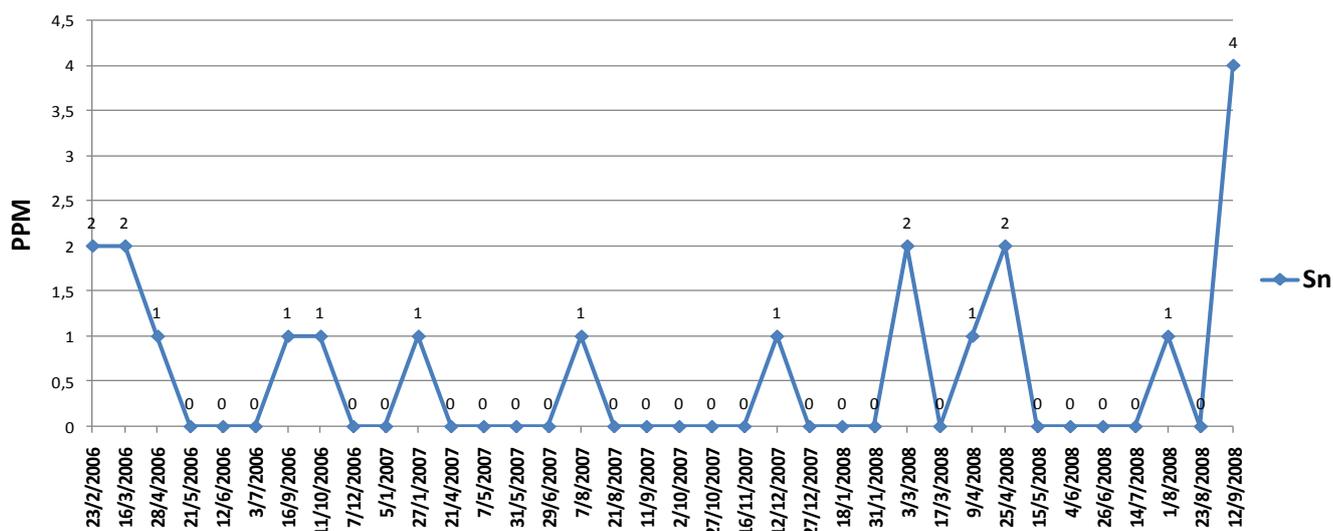


Figura 19. Quantificação de estanho nas amostras de óleo do motor TR-64.

Temperaturas anormais de operação, a falta de lubrificação e degradação do óleo pode provocar desgastes em camisas, engrenagens, mecanismos de válvulas, virabrequim, anéis de seguimento e pistões, fazendo com que o ferro apareça nas amostras de óleo. Na Fig.(20) tem-se a quantificação de ferro nas amostras de óleo do motor.

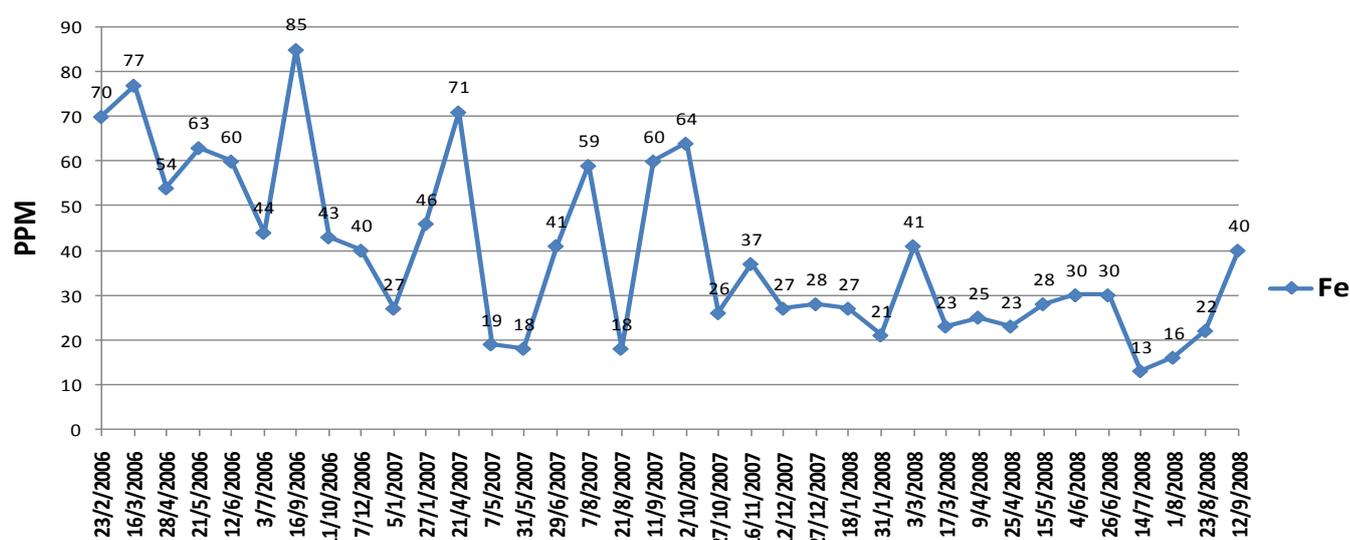


Figura 20. Quantificação de ferro nas amostras de óleo do motor TR-64.

4.2. Análise dos Resultados

Ao comparar os gráficos das Fig. (16) a (20) percebe-se que houve grandes variações no período avaliado. Com exceção do ferro, todos os demais picos de contaminação coincidiram.

Através do histórico de ocorrências deste equipamento verifica-se uma grande incidência de ocorrências ligadas a vazamento de ELC e superaquecimento do motor.

A alteração das propriedades do óleo lubrificante pode provocar uma aceleração no processo de desgastes de diversos componentes do motor.

Ainda de posse do histórico de ocorrências, constatou-se que houve quebra de turbina em 01/09/2008. Isto pode ter sido causado pela perda das propriedades originais do óleo lubrificante devido à contaminação do mesmo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento e controle de contaminantes nos fluidos é um meio extremamente importante para sanar as causas da falha raiz e aumentar a vida da máquina. Visando reduzir custos, a análise de óleo fornece apoio à manutenção preditiva e proativa, ou seja, através de uma série de técnicas analíticas do óleo usado pode-se avaliar onde e quando os prováveis problemas surgirão.

Com a implantação de um sistema de monitoramento de fluidos, há uma redução considerável das falhas e avarias. Sabendo através deste, que a determinação contínua da quantidade e dimensão das partículas, o teor de água e o estado do óleo, demonstram ser, portanto, um processo eficiente para um monitoramento das condições.

O estudo das dimensões das diferentes partículas serve para identificação dos diferentes níveis de desgaste, ou seja, a morfologia da partícula ajuda na identificação do modo de desgaste. Desta forma pode-se dizer que a análise dos óleos permite identificar os primeiros desgastes de um componente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. T., 2000. Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade. UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá.
- Alves, G. F., 2007. Análise de confiabilidade aplicada aos ensaios de óleos lubrificantes para motores de tratores. Botucatu, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Tese (Doutorado).
- Baroni, T. D'A.; Gomes, G.F., 2011. A Ferrografia como Técnica de Manutenção Preditiva: Estudo de Casos. Disponível em: <<http://tecem.com.br/site/downloads/artigos/baroni.pdf>>. Acesso em 18 de setembro de 2011.
- Comitti, A., 2004. Por que Investir em Manutenção Preditiva, Mecatrônica Atual - nº 16.
- Cunha, R. C., 2005, Análise do Estado de Conservação de um Redutor de Velocidade Através da Técnica de Partículas de Desgaste no Óleo Lubrificante Auxiliada pela Análise de Vibrações. Ilha Solteira, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Tese de mestrado, 2005.
- Kelly, A.; Harris, M. J., 1980. Administração da Manutenção Industrial. IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo.
- Supremelub, 2009. Artigo Técnico sobre Análise de Óleo. Disponível em <http://www.supremelub.com.br/downloads/tecnicas/analise_de_oleo.pdf>. Acesso em 9 de setembro de 2011.
- WEBER, Abílio José; FILHO, Dario do Amaral; Jr. ALEXANDRIA, João Pedro; CUNHA, José Antônio Peixoto; GONÇALVES, José Luiz; POEPKE, José Saturnino; ARAUJO, Pedro, 2010. Material didático sobre Análise de lubrificantes por meio da técnica ferrográfica, Produzido pelo SENAI-SP em parceria com a Fundação Roberto Marinho e pela Federação Industrial do Estado de São Paulo (FIESP). Disponível em <<http://www.acervotecnico.com.br/2010/02/telecurso-2000-manutencao.html>>. Acesso em 13 de setembro de 2011.

FAULT DETECTION IN INDUSTRIAL EQUIPMENT BY FERROGRAPH ANALYZING

Samuel Sander de Carvalho, sandercomputacao@yahoo.com.br¹

Junior das Graças Pereira, jrclegrip@yahoo.com.br¹

Maykon Henrique Sales, maykonhs@yahoo.com.br¹

Lucas Costa Brito, brito.lcb@gmail.com¹

Jorge Nei Brito, brito@ufsj.edu.br¹

¹Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ),Praça Frei Orlando, 170, São João del Rei - MG, CEP 36307-352

Abstract. One way to predict what may occur in a given unit is conducting the examination of the lubricating oil. Ferrograph Analysis is a technique that evaluates the mechanical condition of a machine. It is made by the measurement and visual observation of the particles in lubricating oil, i.e., it is an evaluation of the state of the machine from an examination of the residues present in the lubricant. This technique can be used in failure analysis and rapid assessment of the performance of lubricants. This paper presents the Ferrograph Analysis of the Caterpillar motor D11R bulldozer TR-64. The results show the effectiveness of the technique can increase the availability and reliability of the equipment inspected.

Keywords: Ferrograph Analysis, Oil Analysis, Predictive Maintenance.