

Aplicação da Tribologia na Manutenção Preditiva em Equipamentos Industriais

Matheus Paulmichl Hahnemann (UTFPR) hahnemann@alunos.utfpr.edu.br

Rodrigo Ulisses Garbin da Rocha (UFSC) eng.garbin@gmail.com

Nelson Casaroto Filho (UFSC) ncasarotofilho@gmail.com

Resumo:

O ramo da indústria de transformação utiliza um número grande de equipamentos. O bom funcionamento e durabilidade desses, é garantido por sistemas e estratégias de manutenção bem aplicadas e rigorosas. A manutenção preditiva é uma dessas metodologias, e se resume em acompanhamentos periódicos e coleta de dados dessas máquinas para prever o tempo de vida útil dos componentes. Máquinas necessitam da utilização de óleos e lubrificantes para garantir o seu bom funcionamento. Portanto torna-se necessário a verificação de que esses produtos estão sendo produzidos e aplicados corretamente. É nesse momento que surgem os ensaios de tribologia e os certificados de qualidade, que demonstram que as propriedades e utilização estão cumprindo com as expectativas. Para finalizar apresentaremos a metodologia da determinação do momento da troca de óleo utilizada por uma fabricante do ramo de lubrificação.

Palavras chave: Tribologia, Máquinas, Manutenção

Tribology Application in Predictive Maintenance of Industrial Equipment

Abstract

The branch of the processing industry uses a large number of equipment. Their smooth operation and durability are ensured by well-applied and rigorous maintenance systems and strategies. Predictive maintenance is one of these methodologies, and is summarized in periodic monitoring and data collection of these machines to predict the life span of the components. Machines need the use of oils and lubricants to ensure their proper functioning. Therefore, it becomes necessary to verify that these products are being produced and applied correctly. It is at that moment that the tribology trials and the quality certificates, which demonstrate that the properties and use are fulfilling with the expectations. To conclude, we will present the methodology for determining the moment of the oil change used by a lubricant manufacturer.

Key-words: Tribology, Machinery, Maintenance

1. Introdução

A indústria da transformação depende massivamente da utilização de equipamentos, que por sua vez dependem de energia, operadores, matéria-prima e lubrificantes para entregar os resultados esperados. Totten (2006) explica que os lubrificantes tem por funções: reduzir o desgaste, refrigeração de peças, vedação de componentes, evitar oxidação de peças, remoção de impurezas e principalmente reduzir o atrito entre duas peças em contato. Com essas realizações, os lubrificantes conseguem garantir o bom funcionamento dos equipamentos.

Mobley (2002), apresenta o fundamento de planejamento da manutenção preditiva como sendo o tempo gasto de operação de uma determinada máquina ou equipamento. Por este motivo, a hipótese de que os equipamentos se deterioram com o tempo é assumida como verdade. Também é assumido como verdade que o comportamento da máquina pode ser tanto previsível quanto imprevisível, logo a determinação do estado atual do maquinário é fundamental.

Um dos métodos utilizados na área de manutenção industrial é a tribologia. O termo tribologia, que vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (JOST, 1966).

Tribologia é a ciência que estuda fenômenos superficiais, como atrito, desgaste e lubrificação. É uma área multidisciplinar que inclui áreas como ciência e tecnologia de materiais, ciências e tecnologias químicas, biologia e biomedicina e uma variedade de áreas temáticas, como design, mecânica de sólidos, mecânica de fluidos, termodinâmica, lubrificação, metalurgia, entre outros (SANTA MARÍN; TORO BETANCUR, 2015).

De acordo com Mobley (2002), esse termo se refere ao desenvolvimento e dinâmica de operação de suporte da estrutura rolamento-lubrificação-mancal da maquinaria. Várias técnicas de tribologia podem ser usadas para manutenção preditiva: análise de óleo lubrificante, análise espectrográfica, ferrografia e análise de artículas de desgaste.

A tribologia reúne os conhecimentos adquiridos na física, na química, na mecânica e na ciência dos materiais para explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos. O que unifica a tribologia não são os conhecimentos básicos, mas sim a área de aplicação. Assim como os campos do conhecimento que formam a tribologia existiam antes dela, os estudos dos fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste antecedem muito a 1966 (SINATORA, 2005).

Em 1979, o MIT produziu um relatório sobre manutenção com foco na tribologia. Eles estimaram que US\$ 200 bilhões foram gastos com os custos diretos associados à confiabilidade e manutenção. No momento também foi estimado que sobre 14% do produto interno bruto (PIB) de 1979 perdeu a oportunidade devido a práticas inadequadas de manutenção e confiabilidade. Este nível continuou aumentar à medida que a infra-estrutura industrial envelhecida, bem como outras razões baseadas em confiabilidade, para mais de 20% do PIB dos EUA ou sobre US \$ 2,5 trilhões em oportunidade de negócios perdidos. Isso é maior do que todas as outras economias do mundo! Neste momento é estimado que a indústria de R & M é de aproximadamente US\$ 1,2 trilhões em tamanho com até US\$ 750 bilhões sendo o custo direto da avaria manutenção (reativa) ou geralmente pobre, incorreta ou excessiva práticas (PENROSE, 2009).

Nesse estudo de caso aplicaremos os ensaios aplicados por uma fabricante de lubrificantes, com o objetivo de determinar se está no momento de descartar o óleo e introduzir uma emulsão nova.

2. Referencial Teórico

Mobley (2002) apresenta a análise como uma técnica que determina as condições do óleo utilizado em maquinários mecânicos e elétricos, diferente do que muitos pensam como tendo objetivo de determinar o estado das próprias máquinas. Essas análises podem fornecer informações precisas de quando elementos químicos começaram a perder suas propriedades. Outros comparativos podem fornecer o aumento de traços de metal nas amostras, indicando um possível colapso mecânico.

Até recentemente essas análises apresentavam altíssimo custo, devido à utilização de equipamentos laboratoriais e mão de obra muito qualificada. Mas com o início da utilização sistemas baseados em microprocessadores, é possível automatizar parte das análises, reduzindo assim custo e trabalho manual.

As aplicações primárias para a análise de óleos são controle de qualidade, redução de inventário de lubrificantes e determinação das trocas com melhor relação de custo e eficiência.

Roylance (2003) explica que no atual momento em que a indústria se encontra, onde ocorre alta concorrência e requisitos tecnológicos avançados, obter a máxima eficiência em processos para obter retorno financeiro é uma grande prioridade para a direção das empresas. Por isso, os princípios que guiam a lubrificação, fricção e desgaste de componentes vitais para o funcionamento da máquina, são examinados para tentar garantir que o maquinário cumpra com sua função proposta e continue a fazer durante sua expectativa de vida.

2.1 Teste Bosch

Este método é empregado na avaliação das características anticorrosivas de óleos solúveis, emulsões/soluções de óleos solúveis em uso e aditivos anticorrosivos (solúveis). Utiliza-se a propriedade de manchamento (pontos de ferrugem) em papel de filtro, provocados pela oxidação de aparas (cavacos) de ferro fundido.

O procedimento se inicia com uma proveta graduada com de 100 ml com tampa de vidro esmerilhado, seguindo com a adição de 60 ml de água de diluição e completando o volume restante com a amostra. A proveta deve ser fechada e agitada até sua total diluição.

Sobre a tampa de uma placa de petri coloca-se um Papel de filtro qualitativo (ex:Whatmann^o4) com diâmetro de 90 mm, marcado com uma circunferência de 40 mm de diâmetro. Dentro da circunferência espalha-se 2,0 gramas de cavaco de ferro fundido GG25. Com o auxílio de uma pipeta, aplica-se 2 ml da emulsão sobre os cavacos de forma homogênea e a seguir cobra-se o conjunto com a base da placa de petri. Após um período de duas horas de repouso em temperatura ambiente e evitando luz direta, a placa é aberta, o cavaco descartado e o filtro lavado em água potável corrente.

Após secar e temperatura ambiente, procede-se com a avaliação visual do grau de corrosão. A graduação varia de 0 a 4, e significa sem corrosão, vestígios de corrosão, ligeira corrosão, corrosão moderada e forte corrosão, respectivamente. Junto com o resultado do grau deve sempre acompanhar a concentração da mistura.

Para garantir a precisão do teste, são utilizados dois métodos. Repetição, que é executada por um mesmo analista e mesmos equipamentos, e Reprodutibilidade, quando é aplicada por múltiplos analistas e laboratórios diferentes. Quando a divergência dos resultados não ultrapassa um grau, os resultados são considerados corretos e é selecionado o maior grau como o oficial.

Mais informações sobre esse ensaio encontram-se na norma DIN 51360-2.

2.2 Determinação de PH

Este teste, como o próprio nome já diz, tem como objetivo a determinação do ph de soluções aquosas ou emulsões. Frewing (1962) definiu como acida uma substância que quando dissolvida em água se dissocia em íons de hidrogênio H^+ e OH^- , e o equilíbrio desses dois componentes determina a acidez do líquido. Quando a concentração de H^+ for maior que 10^{-7} , essa solução será ácida e quando menor será básica. O valor de acidez normalmente é informado com valores de 0 a 14, sendo 7 uma solução neutra, acima disso ácida e abaixo neutra.

Para a medição da acidez é embarcado o uso de um peagômetro digital, que inicialmente será calibrado com soluções tampões. Estas têm como função atenuar a variação dos valores de pH, e nesse caso serão utilizadas duas com valores de 7 e 9. Após a calibragem os eletrodos devem ser limpos com água destilada e secos com material absorvente macio. Finalizando o procedimento introduzindo os eletrodos na emulsão que se deseja descobrir a acidez. A precisão desse teste é obtida da mesma forma que o teste Bosch, através de repetibilidade e reprodutibilidade.

A fabricante optou por não fornecer as normas utilizadas para esse ensaio.



Figura 2 – Fitas medidoras

Outro método mais simples de se averiguar o pH é através de fitas medidoras. Estas devem ser inseridas na solução, e mantidas por alguns minutos, até que o indicador presente em suas pontas mudem de cor. A embalagem dessas fitas apresenta uma escala de cores e cada uma representa um valor de pH. A grande vantagem desse método é o seu custo, centenas de vezes inferior ao peagômetro. O método mais custoso é mais aplicado em laboratórios, onde a nível da precisão é mais importante e a repetição do ensaio é alta.

2.3 Alcalinidade livre/total e concentração em uso/novo

Os valores de alcalinidade livre e total e concentração pela alcalinidade total servem como parâmetros adicionais na caracterização das alterações sofridas pelo produto em uso ao longo de sua vida útil. Dickinson (1981) define a alcalinidade como a capacidade de uma solução aquosa tem para neutralizar ácidos fracos.

Para a determinação da alcalinidade de um sistema aquoso utiliza-se uma solução de ácido clorídrico em meio alcoólico. Em decorrência da dificuldade da leitura de indicadores ácidos-básicos, devido à produtos em ação, usa-se potenciometria na indicação do ponto final. Para a alcalinidade livre e total, são utilizados os valores da escala de pH de 8,30 e 3,20.

O procedimento se inicia com a transferência da emulsão para um Becker de 250 ml, a seguir mergulha-se uma barra magnética e coloque o sobre um agitador magnético. A seguir inicie a titulação da solução alcoólica de HCl 1,0N e anote os volumes necessários para atingir 8,30 e 3,20 na escala de pH. Aplicando as fórmulas 1 e 2 obtém-se os valores desejados:

$$\text{Alcalinidade livre (mg KOH/100 ml)} = \frac{V1 \times N \times K \times 100}{\text{volume}} \quad (1)$$

$$\text{Alcalinidade total (mg KOH/100 ml)} = \frac{V1 \times N \times K \times 100}{\text{volume}} \quad (2)$$

Onde:

V1 = Volume de ácido clorídrico consumido para atingir o pH 8,30;

V2 = Volume de ácido clorídrico consumido para atingir o pH 3,20;

K = 56,1 (Massa molar do KOH);

N = normalidade real da solução de HCl 1,0N.

100 = constante de proporcionalidade.

Finalmente a concentração é obtida pela divisão da alcalinidade total encontrada do produto em uso pela alcalinidade do produto novo.

A fabricante optou por não fornecer as normas utilizadas para esse ensaio.

2.4 Contagem de microrganismos pelo método da lâmina de duas faces

O laminocultivo é um instrumento eficaz na avaliação in loco da contaminação microbiológica em sistemas diversos. Seu uso permite que se evite a degradação de sistemas aquosos sem a necessidade da existência de laboratório microbiológico, onde o usuário pode verificar de maneira bastante confiável o nível de contaminação do sistema. O laminocultivo contém amplo meio de desenvolvimento microbiológico com indicador de crescimento de bactérias, fungos e leveduras. Composto de uma lâmina de duas faces, uma face é impregnada com meio de cultura para bactérias de várias espécies (cor creme) e a outra é impregnada com meio de cultura, fungos e leveduras de espécies variadas (cor rosa). A lâmina é acoplada a uma cápsula, em meio estéril, hermeticamente fechada e lacrada. O laminocultivo pode ser utilizado para testar os mais variados líquidos, onde a contaminação é indesejável.

O procedimento se inicia com a higienização da bancada com álcool 70%, a seguir ocorre a imersão do instrumento de laminocultivo no óleo a ser testado. Prossegue-se ao remover o dispositivo, deixar escorrer o óleo e remover os excessos com absorvente. O instrumento a seguir é fechado e introduzido numa estufa a uma temperatura de 35°C por cerca de 24 horas.

Ao fim do período de incubação, deve-se comparar os resultados com as escalas padrões. A verificação de colônias na face das bactérias é feita pelo surgimento de pontos característicos de cor avermelhada e na face de fungos pela formação de pontos de cores branca e acinzentada. Numericamente os resultados são dados em colônias/ml e variam entre 10^2 e 10^7 .

2.5 Teste de Dureza Total

Finalmente, um último teste muito simples e importante é o de dureza total. A presença de íons metálicos, como Cálcio, Magnésio, Ferro, Alumínio, Manganês e Zinco, confere a solução o que se convencionou chamar de Dureza Total. A Dureza da água é expressa em equivalentes de CaCO₃ (mg / litro ou ppm) ou em Grau Alemão (°dH).

O teste é muito similar ao teste de medição de pH com fitas, apresentado posteriormente. Basta inserir uma fita numa amostra do líquido a ser avaliado, aguardar a mudança de cor dos marcadores. Uma escala na embalagem de produto mostra as cores que representam o grau da Dureza da solução.



Figura 3 – Fitas medidoras

3. Métodos e técnicas de pesquisa

Esta seção descreve os métodos e técnicas de pesquisa utilizadas, compreende a delimitação da pesquisa, a estratégia de pesquisa utilizada, o estudo de caso e seus procedimentos.

3.1 Delimitação da pesquisa

Este projeto apresenta características de uma pesquisa empírica de abordagem qualitativa, uma vez que é desenvolvido para fornecer evidências e apoiar os pressupostos formulados. Objetiva compreender um fenômeno específico e não enumerar acontecimentos (GUPTA; VERMA; VICTORINO, 2006).

Fleury (2012) destaca que a preocupação deve ser obter informações sobre a perspectiva dos indivíduos bem como interpretar o ambiente em que o objeto da pesquisa acontece. Acrescenta o autor que na pesquisa qualitativa em engenharia de produção, o pesquisador precisa visitar as organizações para fazer observações e coletar evidências.

Por conseguinte, este trabalho se utilizará do estudo de caso como método. A finalidade é obter elementos empíricos que evidenciem o esquema teórico-conceitual examinado no contexto da tribologia na manutenção preditiva de equipamentos industriais.

3.2 Estudo de Caso

A empresa Alfa é uma metalúrgica do estado de São Paulo, e possui uma máquina mandrilhadora com tanque de 110.000 litros que realiza furos e desbastes em peças de alumínio. Esse equipamento está utilizando um óleo solúvel sintético com base de Éster e aditivos de alta pressão para metais ferrosos e não-ferroso.

Semanalmente a empresa A envia amostras da emulsão presente na mandrilhadora para a fabricante do óleo. O laboratório realiza uma série de ensaios com essas amostras enviadas, posteriormente emite laudos e recomendações.

A seguir é apresentado o laudo fornecido pela fabricante de lubrificantes, onde é possível notar uma redução no valor de ph, aumento nas colônias de bactérias, redução na alcalinidade livre e aumento da concentração pela alcalinidade total. Os outros parâmetros analisados neste artigo se mantiveram constantes.

As tabelas 1 e 2 também apresentam outros parâmetros que a metodologia não foi fornecida pela fabricante com a dureza, condutividade elétrica, concentração por refratometria e teor de óleo não emulsificado. A refratometria é um dos parâmetros mais importantes no dia-a-dia das máquinas, e controla a concentração de óleo na solução.



Figura 4 – Refratômetro

Análises		Laudos: 5219 07/11/2016 Resultados	Laudos: 5448 22/11/2016 Resultados	Laudos: 5570 29/11/2016 Resultados	Laudos: 5697 06/12/2016 Resultados	Laudos: 5818 12/12/2016 Resultados
#	Tempo de uso	685 dias	700 dias	707 dias	714 dias	720 dias
701	Ph especificação base: 8,9 mín	9,2	9	9	9	9
702	Concentração por refratometria	7,8	8	8,1	8,1	9
704	Teor de óleo não emulsificado	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
705	Teste Bosh GG 25	0	0	0	0	0
707	Bactéria col/ml	10 ³	<10 ³	<10 ³	<10 ³	<10 ³
708	Fungos	<10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²
709	Leveduras	<10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²
710	Alcalinidade livre mgKOH/100ml	169	154	106	120	118
711	Alcalinidade total mgKOH/100ml	567	642	540	564	542
714	Concentração % pela alcalinidade total	7,5	7,6	7,2	7,5	7,2
715	Condutividade elétrica 25°C, ms/cm	2,58	2,48	2,48	2,36	2,62
717	Dureza	4	4	4	4	7

Tabela 1 – Resultados de ensaios 2016

Análises		Laud: 6149 20/01/2017 Resultados	Laud: 6332 30/01/2017 Resultados	Laud: 6603 13/02/2017 Resultados	Laud: 6749 21/02/2017 Resultados	Laud: 7116 20/03/2017 Resultados
#	Tempo de uso	759 dias	769 dias	783 dias	791 dias	818 dias
701	Ph especificação base: 8,9 mín	9	8,9	8,9	8,9	8,7
702	Concentração por refratometria	9	9	9	9	9
704	Teor de óleo não emulsificado	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
705	Teste Bosh GG 25	0	0	0	0	0
707	Bactéria col/ml	10 ⁴	10 ³	<10 ³	<10 ³	10 ⁴
708	Fungos	10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²
709	Leveduras	<10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²	<10 ²
710	Alcalinidade livre mgKOH/100ml	110	158	192	197	87
711	Alcalinidade total mgKOH/100ml	658	642	634	665	631
714	Concentração % pela alcalinidade total	8,7	8,5	8,4	8,8	8,4
715	Condutividade elétrica 25°C, ms/cm	2,71	2,74	2,44	2,44	2,98
717	Dureza	7	7	4	7	7

Tabela 2 – Resultados de ensaios 2017

Ao concluir que muitas das propriedades da emulsão já se deterioraram, a fabricante de lubrificantes sugere o descarte de todo o fluido e limpeza da máquina para receber a nova emulsão. Tendo em vista aos inúmeros problemas de limpeza ineficientes em sistemas que utilizam fluídos a base de água (entupimentos de tubulações, sensores de nível, bombas, bicos de alimentação e principalmente contaminação do banho novo com resíduos do banho velho contaminado), foi elaborado procedimento geral para a realização do descarte, limpeza e montagem de banho novo para este tipo de fluído.

A fabricante recomenda que, antes da troca do lubrificante, seja adicionado à mistura já utilizada um produto de ação detergente e antisséptica. A quantidade de desinfetante recomendada é entre 0,5% até 3% do volume do tanque da máquina. Após a adição, a máquina deve permanecer trabalhando por até 48 horas para que o processo de limpeza seja eficaz.

Ao término do período de 48 horas, a emulsão velha já pode ser descartada. Mas se faz necessário ainda uma limpeza mecânica das canaletas, tanque, tubulações e base do equipamento, para garantir que não permaneça resíduos incrustados. E para finalizar, um enxague com água por todo o sistema por onde passa fluido garante a eliminação de resíduos do fluido antigo.

O procedimento de enchimento do tanque se inicia com a adição de água de 70% do volume do tanque. A seguir, adicione o óleo solúvel de forma que a emulsão atinja 80% da concentração ideal de trabalho. Se faz necessário colocar a máquina em funcionamento e avaliar a formação de espuma e vazamentos. Se tudo ocorrer conforme o esperado, complete o tanque com o produto até obter a concentração ideal de trabalho, ajustando simultaneamente a quantidade de água.

4. Conclusões

O artigo propôs uma análise mais profunda sobre lubrificantes e ensaios de tribologia, com o intuito de mostrar sua importância para a indústria da transformação.

A partir do auxílio e apresentação de metodologias por parte da fabricante de lubrificantes, foi possível compreender melhor as mais importantes propriedades dos fluídos lubrificantes que devem ser analisadas.

Com o estudo de caso apresentado, a importância da manutenção preditiva para a indústria fica evidente, já que a troca do lubrificante numa máquina de 110.000 litros representa um investimento altíssimo para a empresa e saber exatamente o momento certo para realizar o procedimento resulta no benefício imediato, redução de custo.

Para finalizar, a metodologia de descarte e enchimento da máquina apresentada pelo fabricante, apesar de se afastar um pouco do tema da manutenção preditiva, também mostra-se importante e relevante, já que resulta numa redução de custos devido ao fato dos contaminantes do óleo antigo não prejudicarem a nova emulsão.

Referências

DICKSON, A. G., AND FRANK J. MILLERO. *An exact definition of total alkalinity and procedure for the estimation of the alkalinity and total inorganic carbon from titration data.* Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research volume 28 issue 6 (1981)

FREWING, J. J. *The Significance and Interpretation of ACIDITY and BASICITY IN LUBRICATING OILS.* Industrial Lubrication and Tribology 14.3 (1962): 16-21.

GUPTA, S.; VERMA, R.; VICTORINO, L. Empirical research published in production and operations management (1992–2005): trends and future research directions. **Production and Operations Management**, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 432-448, 2006.

JOST, H.P, 1966, “Lubrication (tribology) education and research, Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966, p.4. Citado em: SINATORA, A., 2005, “Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte”, Prova de Erudição, São Paulo.

MOBLEY, R. Keith. *An introduction to predictive maintenance.* Butterworth-Heinemann, 2002.

PENROSE, Howard W. Simple Time-to-Failure Estimation Techniques for Reliability and Maintenance of Equipment. IEEE Electrical Insulation Magazine, v.25, n. 4, p. 14-18, July 2009.

ROYLANCE, B. J. *Machine failure and its avoidance—what is tribology's contribution to effective maintenance of critical machinery?* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 217.5 (2003): 349-364.

SANTA MARIN, JUAN FELIPE; TORO BETANCUR, ALEJANDRO. Tribología: pasado, presente y futuro. **Tecno. Lógicas.**, Medellín, v. 18, n. 35, p. 09-10, July 2015. Available from <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000200001&lng=en&nrm=iso>. access on 10 Sept. 2017.

SINATORA, A., 2005, “Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte”, Prova de Erudição, São Paulo.

TOTTEN, George E., ed. *Handbook of Lubrication and Tribology: Volume I Application and Maintenance.* Vol. 1. CRC Press, 2006.