



## PROJETO, CONSTRUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA SEPARAR PARTÍCULAS DE DESGASTES EM LUBRIFICANTES

Aparecido C. Gonçalves<sup>1</sup>, Anderson I J. Junior<sup>2</sup>

1 - Departamento de Engenharia de Mecânica, Universidade do Estado de São Paulo (UNESP),  
Avenida Brasil, 56, Ilha Solteira, CEP 15385-000, SP. [Aparecido.carlos@unesp.br](mailto:Aparecido.carlos@unesp.br)

2 - Departamento de Engenharia de Mecânica, Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), Ilha  
Solteira, SP.

### RESUMO

*O desgaste é comum mesmo com a utilização de óleos lubrificantes nas superfícies em interação. Um dos artifícios para se verificar este desgaste é a análise das partículas presentes nos óleos lubrificantes. Esta técnica é conhecida como ferrografia analítica. Dessa maneira, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo separador rotativo de baixo custo para obtenção de ferrogramas, por meio de cinco combinações distintas de ímãs permanentes e dispositivos eletrônicos. Várias combinações de ímãs foram utilizadas e conclui-se que as combinações 03, 04 e 05 apresentaram melhor qualidade de formação de anéis de partículas ferrosas de desgaste.*

**Palavras-chave:** *Manutenção preditiva. Análise de lubrificantes. Ferrografia. Separador rotativo de partículas.*

### INTRODUÇÃO

Os lubrificantes são compósitos com o objetivo de reduzir o atrito e o desgaste entre as superfícies interativas, produzindo um tipo de filme, preenchendo as lacunas ásperas superficiais. A característica de aplicação irá definir o tipo de lubrificante, uma vez que os tipos mais comuns são sólidos como o grafite em pó, semifluidos como a graxa e líquidos como o óleo. As partículas de desgastes que permanecem no lubrificante contém informações importantes sobre o estado do mesmo e do aparelho ou equipamento que este lubrifica.

Para o estudo das partículas sólidas misturadas nos óleos, a ferrografia é a técnica laboratorial mais importante. Esta consiste na determinação da severidade, modos e tipos de desgaste em máquinas por meio da identificação da morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e tamanho das partículas encontradas em amostras de óleos ou graxas lubrificantes de qualquer viscosidade, consistência e opacidade<sup>(1-3)</sup>

A ferrografia é a única que permite a determinação potencial da quantidade e do tipo de desgaste assim como a fonte do desgaste. Os avanços progressivos em instrumentação ferrográfica permitiram o estudo e a classificação ampla das partículas do desgaste produzidas por muitos metais e substâncias diferentes, magnéticas e não-magnéticas<sup>(4-6)</sup>.

As técnicas ferrográficas se dividem em dois níveis de análise. Uma quantitativa, que consiste numa técnica de avaliação das condições de desgaste dos componentes de uma máquina por meio da quantificação das partículas em suspensão no lubrificante e uma analítica, que utiliza a observação das partículas em suspensão no lubrificante<sup>(7,8)</sup>.

Enquanto a ferrografia quantitativa indica uma tendência anormal de desgaste, as técnicas ferrográficas analíticas podem ser utilizadas para identificar especificamente a natureza dos problemas potenciais da máquina, permitindo um estudo profundo das partículas cujo tamanho esteja entre 1 e 250  $\mu\text{m}$ <sup>(9)</sup>. Para tal constrói-se um ferrograma e então faz-se a análise com o auxílio de microscopia ótica e eletrônica o que possibilita a identificação da morfologia das partículas e, conseqüentemente a possível anomalia.

São raras as publicações referentes a ferrografos com separação circunferencial das partículas.

Foi encontrado somente o trabalho de Chiou<sup>(10)</sup>. Este desenvolveu um equipamento que separa partículas de desgaste sem o emprego de solventes. Foram adotadas lamínulas de quartzo, com espessura de 1 mm. Para o controle da centrifugação foi adotado um motor elétrico do tipo passo. Foi confeccionado um disco rotativo, constituído por quatro ímãs de cilindros concêntricos de samário-cobalto de 6 mm de espessura, entre os ímãs foi adotado cilindros concêntricos de cobre<sup>(10)</sup>.

Os ímãs para construção de tais aparelhos são a parte mais importante a ser estudada.

Os ímãs de samário-cobalto são obtidos pelo processo de fabricação por sinterização. Os pós metálicos como o samário e cobalto apresentam um alto custo de aquisição<sup>(11,12)</sup>.

Os ímãs em geral são fabricados através da sinterização. Este processo é recomendado para produções seriadas, pois este requer equipamentos e ferramentais de grande custo aquisitivo, fora a complexidade em manusear os pós metálicos<sup>(13)</sup>. Há grande dificuldade em desenvolver um equipamento para gerar o campo magnético necessário durante a compactação ou no aquecimento para orientação magnética do ímã. Assim o recurso adotado para diminuição de custos, foi adoção de ímãs permanentes vendidos comercialmente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Ao se projetar este equipamento teve-se o cuidado de fazer com que os componentes em contato com óleo fossem confeccionados em poliamida 6, pois o mesmo é inerte a quase todos os tipos de solvente e óleos<sup>(13)</sup>.

Optou-se um motor elétrico de corrente contínua de ímã permanente com escovas, o mesmo é acoplado em caixa de redução, modelo AK280/1.1PF5R193SC, marca Akiyama Motors. No eixo moto-redutor é fixado a cúpula cônica, que por sua vez é conectado à base de teste, transmitindo o movimento rotativo para a centrifugação das amostras.

Para o controle do movimento rotativo, foi empregado um microcontrolador que utiliza uma placa de prototipagem *open-source*, de plataforma do tipo Arduino modelo Mega 2560, sendo que este é conectado Motor Shield L293D Driver Ponte H, assim, propicia-se controle do movimento rotativo como sentido de rotação e velocidade. Para o presente trabalho o sentido de rotação empregado foi em sentido anti-horário.

Para alterar a velocidade de rotação durante o ensaio, foi empregado um teclado matricial, para a tecla "A" o conjunto trabalhará em uma rotação de 70 RPM, na tecla "B" em 100 RPM, na tecla "C" em 130 RPM e a tecla "D" em 200 RPM.

Todos os dispositivos elétricos e eletrônicos necessários foram alojados em um case de polimetilmetacrilato, comumente denominado de acrílico. Este material apresenta baixa condutividade elétrica<sup>(14)</sup>, além do baixo custo de aquisição. Através da figura 1 é possível visualizar o protótipo desenvolvido.

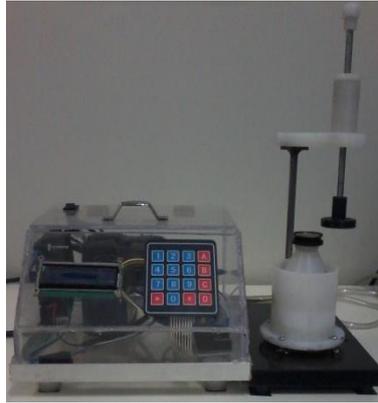


Figura 1: Protótipo desenvolvido

Foram adotados neste trabalho ímãs permanentes comerciais. Desta forma foram criadas cinco combinações distintas de ímãs como descrita na tabela 1.

Tabela 1: Combinações utilizadas no protótipo

	Quantidade	Item	Medidas (mm)
Combinação 1	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 23,5 x Ø int 19 x h 10
	1	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Ø ext 19 x Ø int 14 x h 10
	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 14 x Ø int 9 x h 10
	1	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Ø ext 9 x Ø int 3 x h 10
	1	Bronze TM23 Cilindro	Ø 3 x h 10
Combinação 2	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 23,5 x Ø int 19 x h 10
	1	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Ø ext 19 x Ø int 14 x h 10
	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 14 x Ø int 6 x h 10
	1	Ímã de Neodímio N42 Níquel Cilindro	Ø 6 x h 10
Combinação 3	1	Ímã de Ferrite Anisótropico Disco	Ø 16 x h 5
	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 23,5 x Ø int 16 x h 6,5
	1	Aço 1020 Anel	Ø ext 16 x Ø int 12,5 x h 1,5
	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 12,5 x Ø int 8 x h 1,5
	1	Aço 1020 Cilindro	Ø 8 x h 1,5
Combinação 4	1	Ímã de Neodímio N35 Níquel Disco	Ø 16 x h 5
	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 23,5 x Ø int 16 x h 6,5
	1	Aço 1020 Anel	Ø ext 16 x Ø int 12,5 x h 1,5
	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 12,5 x Ø int 8 x h 1,5
	1	Aço 1020 Cilindro	Ø 8 x h 1,5
Combinação 5	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 23,5 x Ø int 12 x h 1,5
	1	Ímã de Neodímio N45 Níquel Anel	Ø ext 12 x Ø 9 x h 1,5
	1	Bronze TM23 Anel	Ø ext 9 x Ø int 3 x h 1,5
	1	Ímã de Neodímio N35 Níquel Cilindro	Ø 3 x h 1,5

Todas as combinações foram montadas sobre uma base de teste individual. A fixação das combinações e da base de teste e os ímãs se deu através de um adesivo a base de cianoacrilato TEKBOND 793. Foi utilizado uma ventosa em todos os anéis externos de bronze TM23 para a fixação das lamínulas para a realização dos testes.

Através de um Gaussímetro TLMP - HALL-10 foi mensurado a densidade de fluxo magnético das superfícies das combinações, com o intuito de verificar a correlação da dimensão de partícula obtida no ferrograma.

Através de um forno mufla marca EDG, modelo EDG10P-S 7000, as amostras foram aquecidas à 60 °C. Como solvente para lavagem do lubrificante e fixador na lâmina foi utilizado o tetracloroetileno.

Para a deposição do óleo lubrificante e do tetracloroetileno sobre a lamínula, foi utilizada uma pipeta dosadora de ponta descartável, no total foram usadas quatro pontas, cada ponta foi identificada para a devida amostra, evitando-se a mistura entre amostras.

Os ferrogramas obtidos foram analisados por um ferrosópio (microscópio óptico) da marca Olympus, modelo BX 41.

As amostras de óleo utilizadas para confecção dos ferrogramas do presente trabalho foram fornecidas por Silva<sup>(15)</sup>.

No Trabalho de Silva foram realizados 12 testes que correspondiam as várias coletas de lubrificante da caixa do multiplicador. A numeração era progressiva, por exemplo, a amostra 2 foi coletada após um tempo maior de ensaio do que o tempo da amostra 1, e assim sucessivamente.

Para este trabalho foram pegos, aleatoriamente, apenas 3 amostras do experimento de Silva.

A amostra de 60 horas de trabalho foi intitulada de número 07, a amostra de 120 horas de trabalho foi nomeada de número 27, já a amostra que ficou submetida a 180 horas de trabalho foi designada de número 36.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 apresenta a imagem de cada lamínula obtida para sua respectiva amostra de óleo. As combinações 01 e 05 apresentaram a formação de três anéis concêntricos, apesar que na combinação 05 os anéis central e externo são bem próximos (3 mm de espaço). Já as combinações 02, 03 e 04 apresentaram formação de dois anéis.

Por meio do Gaussímetro, a combinação 01 apontou uma leitura média no anel externo de 4549 G (N) e no anel interno de 3020,7 G (S). A combinação 02 apresentou uma leitura média no anel de 3916,6 G (S) e no cilindro de 4031,2 G (N). Na combinação 03, o ímã de ferrite ficou disposto sob os itens de aço e bronze, a leitura média do anel de aço foi de 1309,2 G (S) e do cilindro de 1221,4 G (S). Assim como a combinação 03, na combinação 04, o ímã de neodímio foi posicionado abaixo dos itens de aço e bronze, a leitura média do anel de aço foi de 2144,2 G (N) e do cilindro de 1630 G (N). A combinação 05 a leitura média no anel é de 2509,7 G (S) e enquanto no cilindro de 2131,2 G (N).

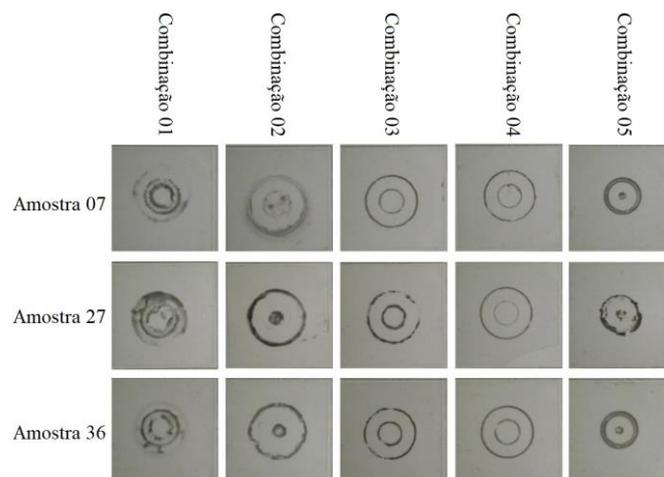


Figura 2: Lamínulas do ensaio RPD do protótipo desenvolvido.

Em todos os ferrogramas obtidos, houve deposição de partículas escuras de óxidos alinhadas ao campo magnético, é notório que são mais presentes na amostra 36 em comparação as amostras 07 e 27.

Na combinação 01 não houve boa formação de três anéis concêntricos em nenhuma das três amostras. Na amostra 07, obteve-se partículas de desgaste da ordem de 1 à 36  $\mu\text{m}$  no anel externo, no anel central tamanho de 1 à 37,5  $\mu\text{m}$ , e 1 à 46  $\mu\text{m}$  no anel interno. Para a mostra 27, as partículas obtidas são da ordem de 1 à 40  $\mu\text{m}$  no anel externo, no anel central tamanho de 1 à 52,5  $\mu\text{m}$ , e 1 à 124  $\mu\text{m}$  no anel interno. Já na amostra 36 as partículas encontradas são da ordem de 1 à 24  $\mu\text{m}$  no anel externo, no anel central são de 1 à 37,5  $\mu\text{m}$ , e 1 à 60,5  $\mu\text{m}$  no anel interno.

Utilizando a combinação 02 não houve boa formação de anéis concêntricos. Na amostra 07, obteve-se partículas desgaste da ordem de 1 à 66  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 45 $\mu\text{m}$  no anel interno. Amostra 27, as partículas obtidas são da ordem de 1 à 87  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 30  $\mu\text{m}$  no anel interno. Já na amostra 36 as partículas encontradas são da ordem de 1 à 37  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 18  $\mu\text{m}$  no anel interno.

A combinação 03 houve boa formação de anéis concêntricos. Na amostra 07, obteve-se partículas desgaste da ordem de 1 à 22  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 33  $\mu\text{m}$  no anel interno. Amostra 27, as partículas obtidas são da ordem de 1 à 25  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 49  $\mu\text{m}$  no anel interno. Já na amostra 36 as partículas encontradas são da ordem de 1 à 22  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 43  $\mu\text{m}$  no anel interno.

Empregando a combinação 04 houve boa formação de anéis concêntricos. Na amostra 07, obteve-se partículas desgaste da ordem de 1 à 22  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 33  $\mu\text{m}$  no anel interno. Amostra 27, as partículas obtidas são da ordem de 1 à 24  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 117  $\mu\text{m}$  no anel interno. Já na amostra 36 as partículas encontradas são da ordem de 1 à 24  $\mu\text{m}$  no anel externo, e 1 à 92  $\mu\text{m}$  no anel interno.

A combinação 05 apresentou boa formação de três anéis concêntricos nas amostras 07 e 36. Já na amostra 27 não houve boa formação de três anéis concêntricos, em todos os três anéis desta amostra surgiram grandes partículas de desgaste (partículas maiores do que 170  $\mu\text{m}$ ). Na amostra 07, obteve-se partículas desgaste da ordem de 1 à 57  $\mu\text{m}$  no anel externo, no anel central tamanho de 1 à 24  $\mu\text{m}$ , e 1 à 10  $\mu\text{m}$  no anel interno. Já na amostra 36 as partículas encontradas são da ordem de 1 à 59  $\mu\text{m}$  no anel externo, no anel central são de 1 à 23  $\mu\text{m}$ , e 1 à 9  $\mu\text{m}$  no anel interno.

## **CONCLUSÕES**

As partículas escuras de óxidos são ferromagnéticas e ficaram agregadas em conjunto as outras partículas.

As partículas de maiores dimensões ficaram acumuladas onde a densidade de fluxo magnético é inferior, enquanto as partículas de menores dimensões permaneceram depositadas na região de maior fluxo magnético.

Como observado na figura 3, não houve boa formação de anéis concêntricos nas combinações 01 e 02. Em relação às combinações 01, 02 e 05, esta última apresentou melhor separação de partículas por dimensão entre as três. A combinação 04 se apresentou a melhor combinação por separação de tamanho como verificado na figura 7, mesmo que tenha formado apenas dois anéis.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a FAPES e ao CNPQ (Processo: 303384/2021-2 ) pelos contínuos apoios recebidos ao longo da carreira acadêmica.

## REFERÊNCIAS

1. LUDEMA, K. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology. Boca Raton: CRC Press, 1996.
2. NEALE, M. J. The tribology handbook. 2. ed.. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.
3. GREEN, A. The study of the failure modes of a spur gear using vibration an particle analysis techniques. Melbornel: James Cook University, School of Engineering, 2003.
4. RABINOWICZ, E. Friction and wear of materials. 2. ed. New York: John Willey and Sons, 1995.
5. KATO K.; ADACHI K. Wear mechanisms. In: BHUSHAN, B. (Ed.). Modern tribology handbook: principles of tribology. Boca Raton: CRC Press, 2001.
6. LOCKWOOD, F. E.; DALLEY R. Lubricant analysis. In: HENRY, S. D. et al. (Ed.). ASM Handbook: friction, lubrication, and wear technology. Metals Park: The Materials Information Society, 1992. v.18, p.299-312.
7. BIBLIOTECA VIRTUAL DO ESTUDANTE BRASILEIRO - BIBVIRT. Manutenção Preditiva. Disponível em: [http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem\\_outros/cursoprofissionalizante/tc2000/manutencao/06manu.pdf](http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursoprofissionalizante/tc2000/manutencao/06manu.pdf)>. Acesso em: 20 mar. 2004.
8. BARONI, T. A. D. ;GOMES, G. F. A ferrografia como técnica de manutenção preditiva. Disponível em: <http://www.huno.com.br/tribolab/>. Acesso em: 15 mar. 2004.
9. ARATO JR., A. Manutenção preditiva usando análise de vibrações. Barueri: Manole, 2004. 190 p.
10. CHIOU, Y. C. “Study of wear particle deposition by an improved rotary ferrographic analyzer”. Wear, Lausanne, v. 146, n. 1, p. 137-147, 1991.
11. ROCIO, M. A. R. et al. Terras-raras: situação atual e perspectivas. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 369-420. (BNDES Setorial, 35).
12. GROOVER, M. P. Introdução aos processos de fabricação. LTC, 2014.
13. GUTIÉRREZ, J. C. H. et al. “Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas”. Polímeros, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 711-719, 2014.
14. CALLISTER, W. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. LTC, 2000.
15. SILVA, E. F. M. S., “Investigação de técnicas para o acompanhamento do desgaste de um par engrenado utilizando tribologia e análise da resposta dinâmica processada via função densidade probabilidade Beta”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, Brasil, 2015.

## DESIGN, CONSTRUCTION AND USE OF EQUIPMENT TO SEPARATE WEAR PARTICLES IN LUBRICANTS

### ABSTRACT

*Wear is common even with the use of lubricating oils on interacting surfaces. One of the tricks to verify this wear is the analysis of the particles present in lubricating oils. This technique is known as analytical ferrography. In this way, the present work presents the development of a low-cost rotary separator prototype for obtaining ferrograms, through five different combinations of permanent magnets and electronic devices. Several combinations of magnets were used and it was concluded that combinations 03, 04 and 05 presented better quality of formation of rings of ferrous wear particles.*

**Keywords:** *Predictive maintenance. Lubricant analysis. Ferrography. Rotary particle separator.*