



AUXÍLIO DA FERROGRAFIA ANALÍTICA NA INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS DE DESGASTES REALIZADOS COM BIOLUBRIFICANTES

Gonçalves, A.C.^(a,*); Albuquerque, M. da C. F. de.^(b)

^a, Mechanical Engineering Department, UNESP – University of State of Sao Paulo. Ilha Solteira, Brazil, aparecido.carlos@unesp.br.

^b Civil Engineering Department, UNESP – University of State of Sao Paulo. Ilha Solteira, Brazil, maria.albuquerque@unesp.br

* Autor para correspondência.

RESUMO:

A ferrografia analítica desempenha um papel crucial na manutenção preditiva, que é uma abordagem proativa para a gestão de ativos e equipamentos. Essa técnica fornece informações valiosas sobre a condição interna de máquinas e componentes, permitindo a identificação precoce de problemas potenciais e a programação de intervenções de manutenção antes que ocorram falhas catastróficas. A ferrografia permite identificar partículas desgastadas, inclusões não metálicas e outros indicadores de desgaste nos componentes. Ao analisar amostras de óleo lubrificante ou fluido hidráulico, a ferrografia analítica pode oferecer insights sobre a saúde dos componentes internos, como engrenagens, rolamentos e outros elementos críticos. Mudanças na concentração e na composição de partículas podem indicar desgaste anormal. Este trabalho trata-se da utilização da Ferrografia analítica para interpretação de resultados de desgastes realizados com dois lubrificantes vegetais aditivados, comparados a um mineral, também aditivado. Para auxiliar na interpretação dos resultados foi utilizado o software open source Image J e um pequeno programa desenvolvido em Python. Verificou-se que é possível o auxílio destas duas ferramentas para auxiliar a interpretação dos ferrogramas.

Palavras-chave: Ferrografia analítica, desgaste, biolubrificante

INTRODUÇÃO

A técnica de ferrografia tem um papel fundamental na manutenção preditiva, uma estratégia proativa na administração de ativos e equipamentos. Esta metodologia é essencial para fornecer dados relevantes sobre a condição interna de máquinas e componentes, facilitando a detecção antecipada de eventuais

problemas e o planejamento de manutenções preventivas para evitar falhas graves [1,2]. A ferrografia é eficaz na identificação de partículas de desgaste, inclusões não metálicas e outros sinais de deterioração nos componentes [3]. Por meio da análise de amostras de óleo lubrificante ou fluido hidráulico, é possível obter informações importantes sobre a integridade de componentes internos como engrenagens, rolamentos e outras peças vitais [4,5]. Alterações na quantidade e tipo de partículas presentes podem ser indicativos de desgaste atípico.

Ao focar a manutenção nos componentes que realmente precisam de atenção, as organizações podem otimizar o uso de recursos, direcionando esforços e investimentos para áreas críticas, onde são necessários [6,7].

Numerosos estudos [8-16] foram realizados para investigar a análise tribológica de óleos lubrificantes, e a técnica de ferrografia foi introduzida para avaliar a geração de desgaste durante a operação contínua de sistemas. Na ferrografia, partículas de desgaste são separadas do óleo e passam por análises adicionais através da caracterização de partículas, incluindo tamanho e forma [11]. Ferrografia de Leitura Direta (DR) e Ferrografia Analítica são os métodos mais prevalentes de ferrografia para monitoramento de condições de sistemas [14]. Essas duas técnicas de monitoramento de condições permitem que os usuários identifiquem fatores que levam à falha e realizem manutenção oportuna do sistema [11]. Pocock et al. [9] realizaram um estudo para determinar os aspectos quantitativos da técnica de ferrografia, concluindo que ela é capaz de medir o início do aumento do desgaste. Hu et al. [8] desenvolveram um modelo para examinar o comportamento de decomposição de lubrificantes, que pode prever tanto o coeficiente de atrito quanto a espessura da película de lubrificante. Os resultados indicaram que o regime de transformação do lubrificante desempenha um papel crucial no processo de atrito deslizante e auxilia na previsão eficaz do tempo de decomposição da película de lubrificação. Wu et al. [17] conduziram uma pesquisa em um ferrógrafo visual online para análise de desgaste. Esse sistema incorporou um ferrógrafo de leitura direta e um sistema de análise de imagem digital. Os resultados deste estudo demonstraram que o sistema desenvolvido produz resultados significativos em comparação com os instrumentos de referência disponíveis comercialmente.

No que diz respeito aos biolubrificantes, é notável que óleos de sementes naturais estão ganhando atenção global por suas propriedades físicas e potencial como alternativas aos óleos lubrificantes industriais. Entre eles, óleos como o de mamona são reconhecidos por sua viscosidade superior, tornando-os viáveis para diversas aplicações em lubrificação. Vahaoja et al. [18] exploraram o uso da análise de vibração e ferrografia para detectar falhas em caixas de engrenagens de rosca sem fim, propondo que esse método prevê efetivamente as condições do equipamento. Kirankumar et al. [19] aplicaram ferrografia para monitorar a saúde do óleo, auxiliando nas decisões de substituição de óleo em tempo hábil e manutenção preventiva do equipamento. Pesquisas de N. Govindarajan e R. Gnanamoorthy [20] demonstraram análise de concentração de partículas de desgaste usando ferrografia, enquanto Avinash Kumar Agarwal [21,22] empregou-a para avaliar concentrações de partículas de desgaste em motores biodiesel usando diferentes misturas de óleo. O estudo de Joseph et al. [23] revelou que, entre três óleos de sementes naturais de origem indiana, o óleo de mamona exibe estabilidade termo-oxidativa excepcional. Anand et al. [24] realizaram uma análise de viabilidade sobre o uso de óleos naturais como lubrificantes, favorecendo o óleo de mamona. Kazeemet et al. [25] avaliaram os atributos físicos do óleo de mamona, considerando-o um substituto adequado para lubrificantes tradicionais. De acordo com os resultados de experimentos de campo em nove óleos naturais por Krz̃an et al. [26], a alta viscosidade do óleo de mamona o torna uma excelente escolha como lubrificante. M.H. Jabal et al. [27] observaram que óleos vegetais naturais possuem características tribológicas adequadas comparadas aos óleos à base de fósseis. Adhvaryu et al. [28] determinaram que as capacidades de desgaste e carga desses óleos podem ser significativamente aprimoradas por meio de modificações químicas e térmicas. Romsdahl et al. [29] observaram notável estabilidade térmica no óleo de mamona durante seus experimentos. Por último, Chauke et al. [30] enfatizaram a importância dos combustíveis à base de óleo de plantas, particularmente o óleo de mamona, em sua revisão.

Nos nossos trabalhos ensaiamos vários lubrificantes de origem vegetal, sem e com aditivos, em vários pares de materiais em desgaste. Para análise foram utilizadas várias técnicas como análise de vibrações, Algoritmo genético, Espectrometria de raio X, Espectrometria no infravermelho, Índice de partículas

magnéticas, etc. Neste trabalho atual apresentado, utilizamos a Espectrometria de Raio X e Ferrografia Analítica para auxiliar nas interpretações dos resultados. Focamos em dois lubrificantes de origem vegetal em comparação com um mineral básico, onde utilizou-se combinação de programação em Python e software de imagem para oferecer flexibilidade e poder analítico, permitindo uma abordagem personalizada e adaptável às necessidades específicas de interpretação da ferrografia analítica.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Óleos de origem vegetal

O uso de lubrificantes derivados de origem vegetal ou animal foi extremamente diminuído com o advento dos lubrificantes minerais e sintéticos, principalmente por não suportarem altas temperaturas, oxidando com facilidade e formando ácidos [1].

No entanto, a preocupação crescente com o impacto causado ao meio ambiente tem motivado a demanda por pesquisa de lubrificantes biodegradáveis. A estrutura química dos lubrificantes é responsável pela velocidade de degradação e por suas outras propriedades, o que afeta diretamente o desempenho do lubrificante. Por serem biodegradáveis e renováveis, os óleos de origem vegetal (graxos) são vistos novamente com uma opção [31].

Óleo de canola

O óleo de canola é produzido a partir de sementes de plantas de três espécies do gênero *Brassica* e deve conter menos de 2% de ácido erúxico e no máximo 30 micromoles de glucosinolatos no componente sólido, segundo regulamentação internacional [32].

O nome canola tem como origem na contração das palavras Canada e ola, que se refere a óleo [33].

A tabela 1 apresenta algumas características do óleo de canola.

Tabela 1: Características físico-químicas do óleo de canola

Índices	Unidades	Valor de Referência
Peso Específico (20°C)	g/cm^3	0,914 – 0,920
Índice de Refração (40°C)	-	1,465 – 1,467
Índice de Iodo	$g I_2 / 100g$	110 – 126
Índice de Saponificação	$mg KOH/g$	182 – 193
Matéria Insaponificável	%	< 2,0
Acidez (óleo refinado)	$g \text{ ácido oleico}/100g$	< 0,3
Índice de Peróxido	meq/kg	< 10,0

Fonte: *Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes – AOCS.*

Óleo de milho

O Óleo de Milho é extraído do germe do milho, é considerado um produto secundário no mercado produtor de milho e tem aplicações muito variadas, dentre as quais: indústria farmacêutica, cosmética, alimentícia, entre outros [34].

A tabela 2 apresenta algumas características do óleo de milho.

Tabela 2: Características físico-químicas do óleo de milho

Índices	Unidades	Valor de Referência
Peso Específico (20°C)	g/cm^3	0,917 – 0,925
Índice de Refração (40°C)	-	1,470 – 1,473
Índice de Iodo	$g I_2 / 100g$	107 – 135
Índice de Saponificação	$mg KOH/g$	187 – 195
Matéria Insaponificável	%	< 3,0
Acidez (óleo refinado)	$g \text{ ácido oleico}/100g$	< 0,3
Índice de Peróxido	meq/kg	< 10,0

Fonte: *Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes – AOCS.*

Óleo mineral básico

O óleo mineral básico ou óleo mineral branco é obtido através da remoção de impurezas orgânicas como: instaurações, enxofre, nitrogênio, oxigênio e hidrocarbonetos aromáticos. No Brasil o óleo é produzido em dois graus de qualidade: o Técnico e o Medicinal [35].

O óleo mineral básico é utilizado em diversos segmentos da indústria devido ao seu alto grau de pureza, podendo-se destacar os segmentos: farmacêuticos, cosméticos, alimentícios, veterinário, têxtil, lubrificantes, etc [35].

A tabela 3 apresenta algumas características do óleo mineral básico.

Tabela 3: Características físico-químicas do óleo mineral básico

Índices	Unidades	Valor de Referência
Peso Específico (20°C)	g/cm^3	0,832 – 0,865
Viscosidade Cinemática 100°F	cSt	13,08 – 15,66
Viscosidade Saybolt, 100°F	SSU	70,0 – 80,0
Parafina Sólida	-	Passa
Acidez / Neutralidade	-	Neutro
Ponto de Fulgor	°C	> 176

Fonte: (CAMPESTRE, 2005).

Aditivos

Sabe-se que a oxidação é a causa principal na degradação dos óleos, assim é muito importante que a oxidação seja estabilizada em nível mínimo nos lubrificantes, resguardando sua eficiência e tempo de vida [36].

Cada óleo tem sua própria característica de resistência a oxidação, que é intimamente ligada com a ocorrência natural de antioxidantes, que variam devido a fatores como refino e origem [36].

Os aditivos são usados para diminuir as deficiências naturais dos óleos, sendo que, atualmente, praticamente todo lubrificante comercializado contém pelo menos um tipo de antioxidante misturado em sua composição [36].

Propil Galato

Propil Galato é um antioxidante usado extensivamente nas indústrias: cosméticas, alimentícias, farmacêuticas e de perfumes, pois previne auto-oxidação de óleos [37].

Ácido Bórico

Ácido Bórico é usado como conservante antimicrobiano e para controle de pH de substâncias. É usado na produção de colírios, produtos cosméticos e pomadas [38].

Molykote® A-2

Molykote A-2 é uma solução de micropartículas de bissulfeto de molibdênio em óleo mineral neutro. Usado como lubrificante em motores de combustão interna automotivos, o Molykote A-2 é resistente ao desgaste e mantém-se aderido aos metais [39].

Ácido Esteárico

Ácido Esteárico é utilizado amplamente em produtos farmacêuticos como lubrificante para pastilhas e capsulas. Além de poder ser usado com agente emulsificador e solubilizador [40].

A primeira abordagem na pesquisa para desenvolvimento de um software de análise de partículas de desgaste em imagens digitais foi verificar as soluções já utilizadas em outras aplicações semelhantes.

O software ImageJ é um programa open source de processamento de imagens desenvolvido para análise de imagens multidimensionais científicas. Tendo muitas aplicações, especialmente na área médica e em micrografia, foram explorados seus recursos.

PROCEDIMENTOS E MATERIAIS

Neste Trabalho foram utilizados, nos ensaios PIN –ON-DISK, um pino de aço e um disco (copo) de bronze. Como lubrificantes vegetais foram utilizados óleo de Canola e óleo de milho para comparação a um mineral básico.

A carga utilizada foi de $(5,000 \pm 0,001)$ kg e a velocidade foi de 0,495 m/s, As rotações foram monitoradas por um tacômetro Oppama modelo Pet – 2000 DX.

Cada amostra foi submetida a 12 horas de ensaio de desgaste, totalizando aproximadamente 21,36 km.

Todos estes óleos foram aditivados com vários aditivos como ácido bórico, ácido esteárico, molykote e propil galato.

Para cada óleo foram definidas nomenclaturas que determinam o óleo ensaiado, o tipo de aditivo e a proporção do aditivo utilizado, como pode ser visto na Tabela 4.

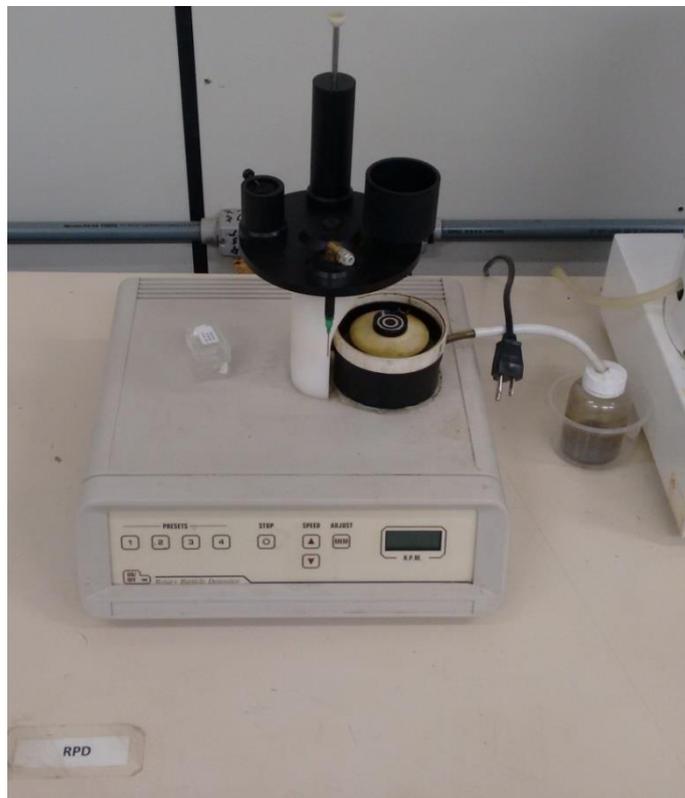
Tabela 4: Discriminação dos ensaios

Tipo de (Bio) lubrificante	Tipo de aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra
Canola (B)	Propil Galato (A)	0 (A)	BAA
		2,5 (B)	BAB
		5 (C)	BAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	BBA=BAA
		2,5 (B)	BBB
		5 (C)	BBC
	Molykote (C)	0 (A)	BCA=BAA
		2,5 (B)	BCB
		5 (C)	BCC
	Ácido Esteárico (D)	0 (A)	BDA=BAA
		2,5 (B)	BDB
		5 (C)	BDC
	Combinado (A)+(B)+(C)+(D)=(E)	0(A) +2,5(B) +2,5(C) +2,5(D) = (A)	BEA
		2,5(A) +0(B) +2,5(C) +2,5(D) = (B)	BEB
		2,5(A) +2,5(B) +0(C) +2,5(D) = (C)	BEC
Milho (C)	Propil Galato (A)	0 (A)	CAA
		2,5 (B)	CAB
		5 (C)	CAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	CBA=CAA
		2,5 (B)	CBB
		5 (C)	CBC
	Molykote (C)	0 (A)	CCA=CAA
		2,5 (B)	CCB
		5 (C)	CCC
	Ácido Esteárico (D)	0 (A)	CDA=CAA
		2,5 (B)	CDB
		5 (C)	CDC
	Combinado (A)+(B)+(C)+(D)=(E)	0(A) +2,5(B) +2,5(C) +2,5(D) = (A)	CEA
		2,5(A) +0(B) +2,5(C) +2,5(D) = (B)	CEB
		2,5(A) +2,5(B) +0(C) +2,5(D) = (C)	CEC
Mineral Básico (E)	Propil Galato (A)	0 (A)	EAA
		2,5 (B)	EAB
		5 (C)	EAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	EBA=EAA
		2,5 (B)	EBB
		5 (C)	EBC
	Molykote (C)	0 (A)	ECA=EAA
		2,5 (B)	ECB
		5 (C)	ECC
	Ácido Esteárico (D)	0 (A)	EDA=EAA
		2,5 (B)	EDB
		5 (C)	EDC

		$0(A) + 2,5(B) + 2,5(C) + 2,5(D) = (A)$	EEA
	Combinado $(A) + (B) + (C) + (D) = (E)$	$2,5(A) + 0(B) + 2,5(C) + 2,5(D) = (B)$	EEB
		$2,5(A) + 2,5(B) + 0(C) + 2,5(D) = (C)$	EEC

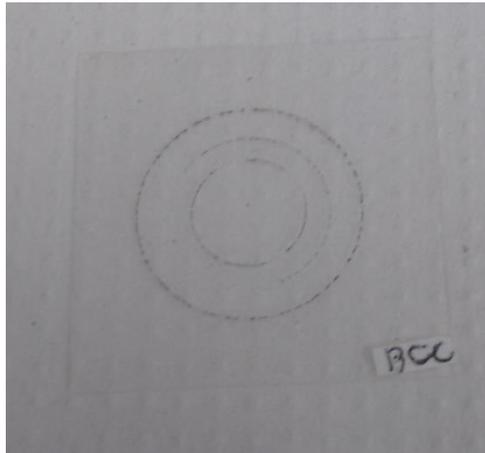
Após cada ensaio no Equipamento Pin-on-disk, amostras foram retiradas para preparação de amostras no Depositador Rotativo de Partículas (RPD), mostrado na Figura 1.

Figura1: Depositador rotativo de partículas (RPD).



O equipamento funciona utilizando forças magnéticas, gravitacionais e centrífugas para depositar partículas em três anéis concêntricos sobre uma lâmina de vidro, figura 2. No anel externo se depositam as partículas menores, de 1 a 10 μ m, no anel do meio são depositadas as de tamanho médio, de 10 a 50 μ m, e no anel interno as maiores partículas, de 50 a 100 μ m.

Figura 2: Ferrograma de uma amostra.



O aparelho gera um arquivo com os dados obtidos, usado na elaboração dos resultados.

A porção de óleo que foi utilizada no equipamento deve primeiramente ser aquecida até 60 °C para diminuição da viscosidade. Um forno elétrico foi utilizado para aquecer uma pequena porção do óleo em um béquer.

A lamina de vidro foi colocada sobre uma ventosa de borracha e prensada para fixação. Com uma pipeta o óleo aquecido foi depositado sobre o centro da lamina. Com a velocidade mínima de 70 RPM, gotas de Tetracloretileno foram depositadas vagarosamente sobre o óleo, limpando-o da lamina de vidro. O procedimento é repetido com a velocidade aumentada para 100 RPM e depois com 130 RPM, eliminando quase que completamente os vestígios de óleo.

Uma vez bem limpa a lamina foi deixada para secar, ainda girando. Depois de seca, retira-se a lamina, pronta para inspeção no microscópio.

Estas lâminas preparadas foram analisadas no Ferrosκόpio ou microscópio óptico. Foi utilizado o microscópio óptico da marca OLYMPUS, modelo BX 41.

Os três anéis foram percorridos em toda a sua extensão e as partículas de interesse foram documentadas. As partículas foram observadas e fotografadas com aumentos de 100, 500 e 1000 vezes, dependendo da necessidade, ou do que foi mais adequado para o estudo posterior.

Para análise das imagens foram utilizados a experiência adquirida no Laboratório juntamente com o Software Image J e um programa desenvolvido em Python.

1.1 Espectrômetro Raios-X

O aparelho usado foi o Espectrômetro de Raios-X Oxford X-Supreme. Esse aparelho utiliza a refração de ondas energéticas de raios-X para obtenção da quantidade e tipo das partículas encontradas na amostra. O espectrômetro usado obtém resultados para 18 elementos da tabela periódica. Neste trabalho foram utilizados somente os resultados para Fe e Cr.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Da análise dos ferrogramas das amostras de óleos, centenas de partículas foram observadas, fotografadas e analisadas.

As Figuras 3 a 5 apresentam algumas partículas obtidas com o óleo de canola como lubrificante.

Figura3 : BAB anel do meio aumento: 100x e BCB anel do meio aumento: 100x.

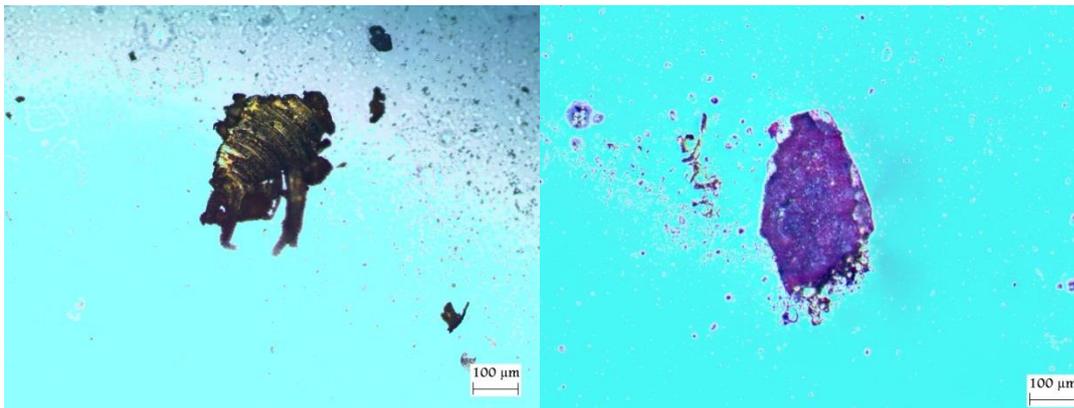


Figura4: BCC anel do meio aumento: 500x e BCB anel do meio aumento: 1000x.

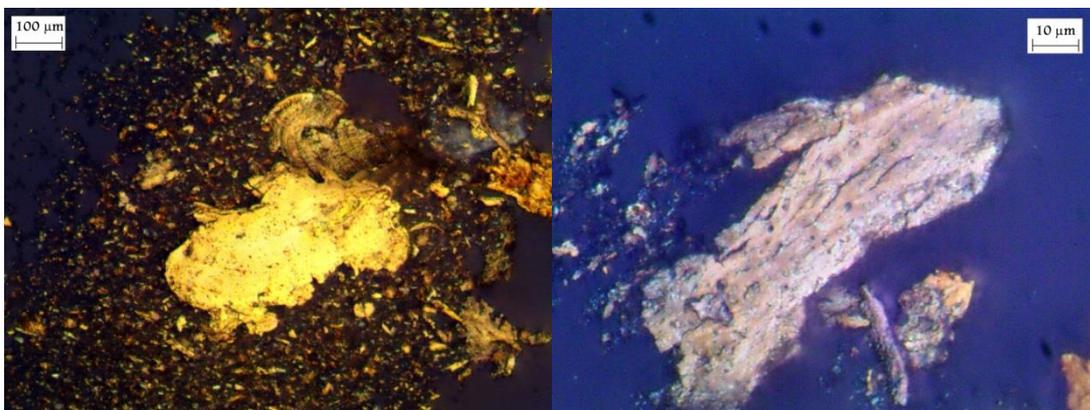
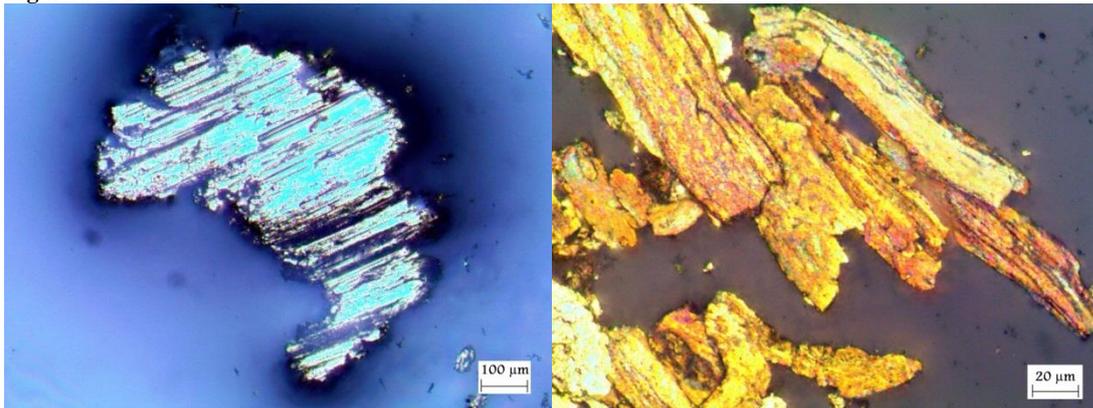


Figura 5: BBB anel interno aumento: 100x e BDB anel externo aumento: 500x



As Figuras 6 a 8 apresentam algumas partículas obtidas com o óleo de milho como lubrificante

Figura 6: CAA anel externo aumento: 500x e CAB anel externo aumento: 500x.

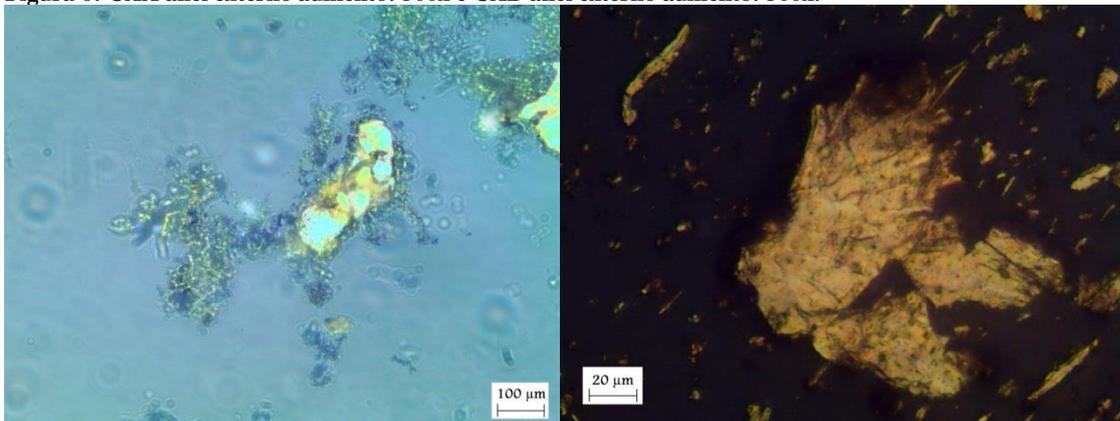


Figura 7: CAC anel externo aumento: 500x e CAC anel externo aumento: 100x.

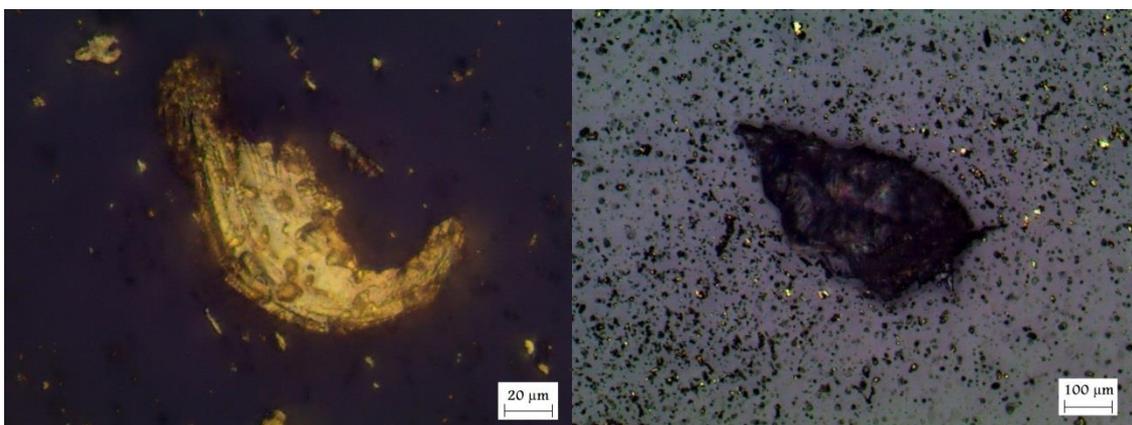
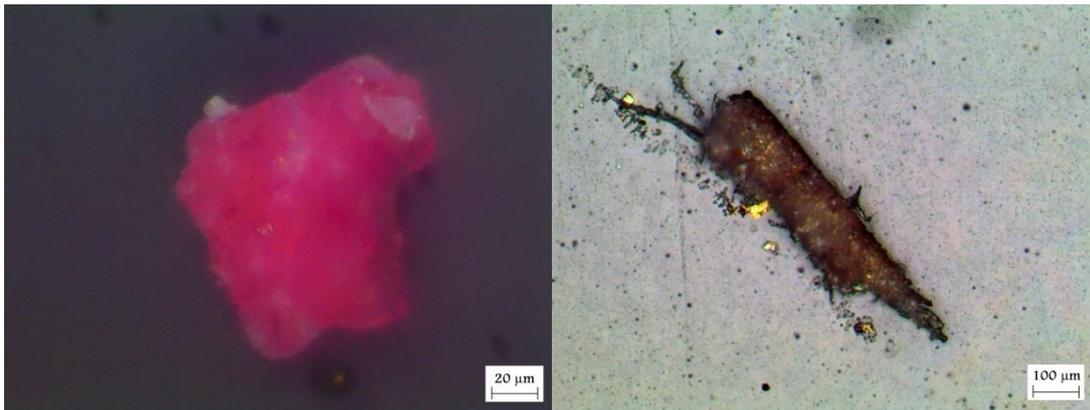


Figura 8 CBB anel interno aumento: 500x e CCB anel do meio aumento: 100x.



As Figuras 9 a 11 apresentam algumas partículas obtidas com o óleo de mineral como lubrificante

Figura 9 : EAA anel externo aumento: 500x e EAA anel do meio aumento: 500x.

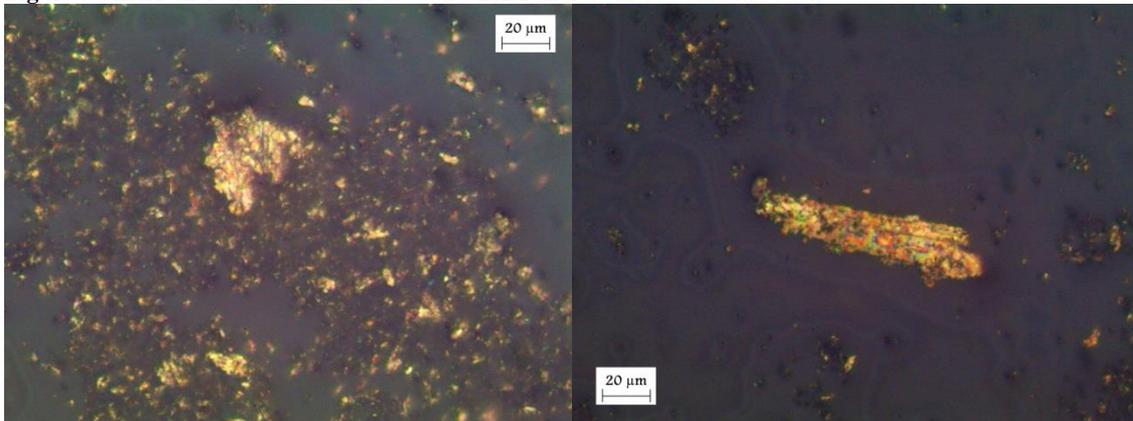


Figura10: EAB anel externo aumento: 500x e EAB anel interno aumento: 100x.

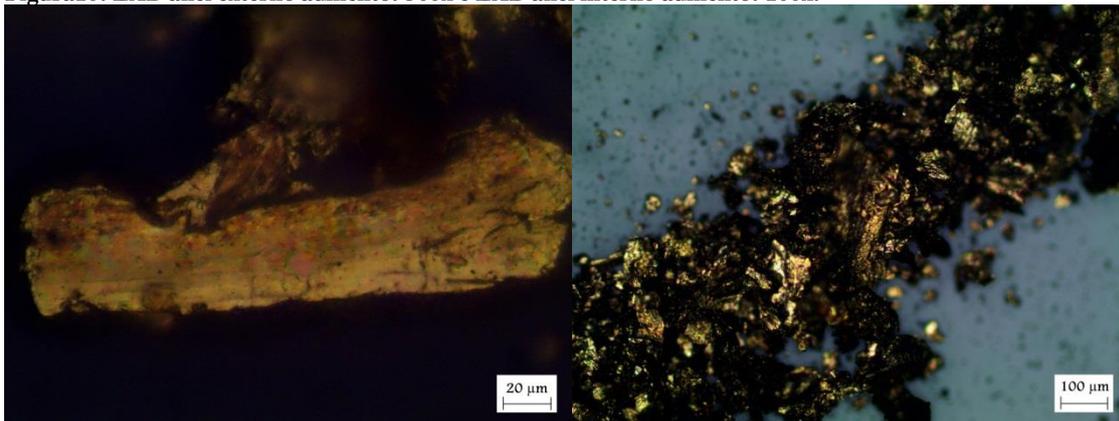
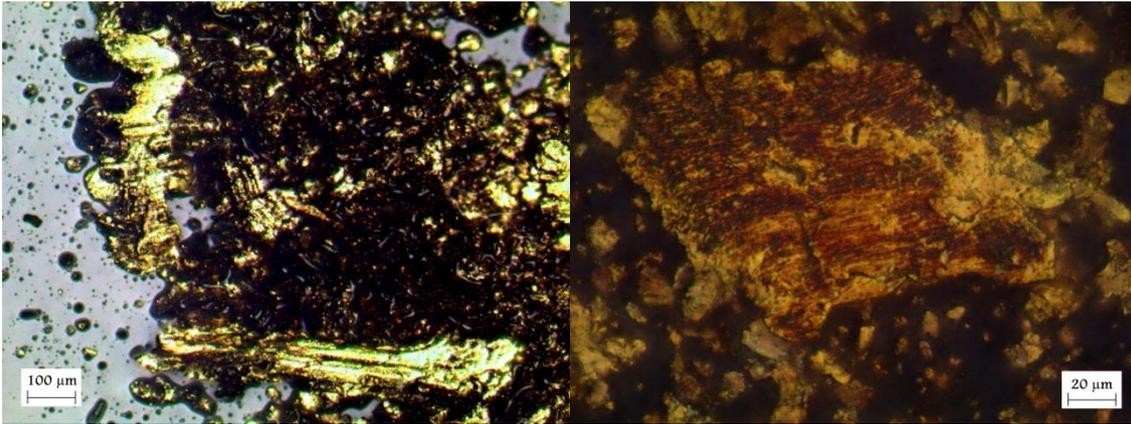
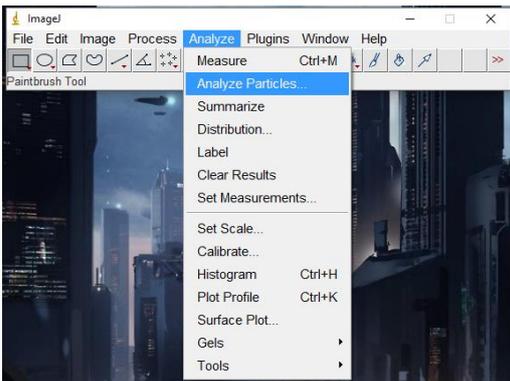


Figura 11: EAB anel do meio aumento: 100x e EAC anel do meio aumento: 500x.



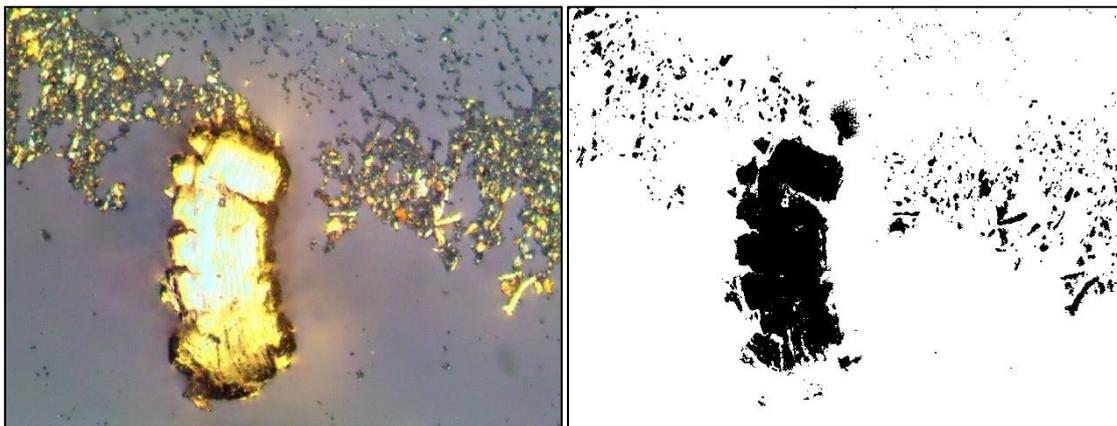
No Software Image J foi utilizado, primeiramente, o recurso de análise de partículas conforme Figura 12.

Figura12: Recurso Analyze Particles do software ImageJ



Com uma imagem mais bem iluminada e com a partícula de interesse mais destacada do fundo (figura 13) foram obtidos resultados adequados para quantificação da área da partícula.

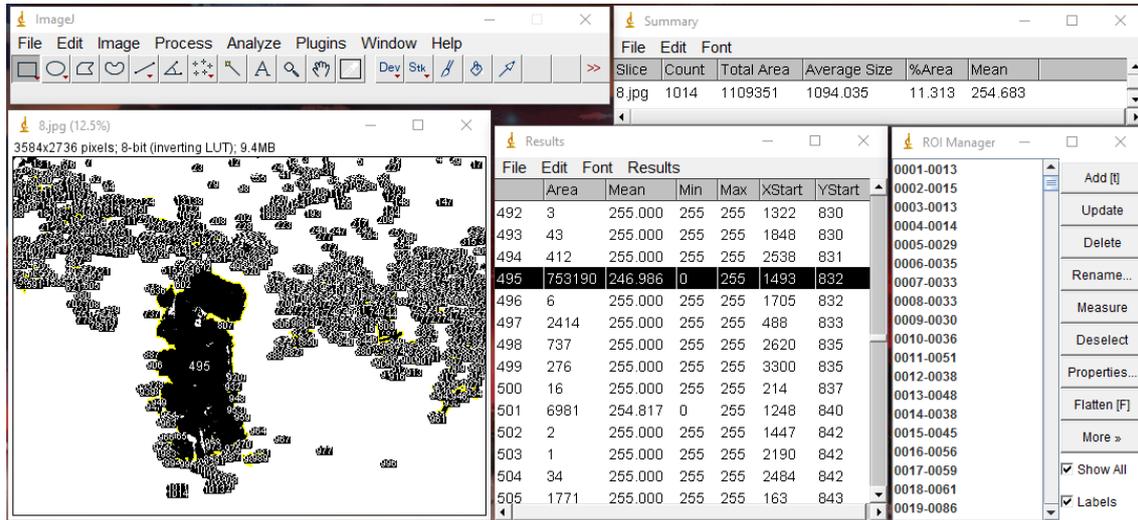
Figura 13: Partícula do ensaio BCC com magnificação de 500x e sua versão binarizada por threshold



Na figura 13 é possível observar o threshold automático para binarização.

Os dados estimados pelo recurso podem ser vistos na figura 14, onde foi dado destaque para as características da partícula 495, sendo ela a partícula de interesse na imagem.

Figura 1 4: Dados fornecidos pelo recurso de Analyze Particles do software ImageJ



Nesse ponto uma abordagem mais geral do problema de identificação de partículas foi encontrada no conceito de aprendizagem de máquina, mais especificamente em técnicas de classificação.

Dessa forma, com as partículas devidamente identificadas e rotuladas entre os tipos de desgaste estudados foi escrito um código de aprendizado de máquina em Python.:

É possível identificar nesse caso que o modelo utilizado é o de support vector machines, porém todos os outros foram testados em um código análogo. Os outros códigos não foram adicionados por serem redundantes.

Dentre as partículas de interesse observadas foram identificados: desgaste severo, caracterizadas por partículas alongadas maiores que 20 μm estriadas; riscamento, partículas achatadas e estriadas; falha de contato de escorregamento, caracterizadas por plaquetas laminares; partículas vindas de aditivos sólidos, partículas não ferrosas com muitos planos de corte; e impurezas.

1.2 Espectrômetro Raios-X

A análise no espectrômetro para os elementos Fe e Cr estão nas Figuras 15 a 20.

Figura 15:Ferro nas amostras de óleo de Canola

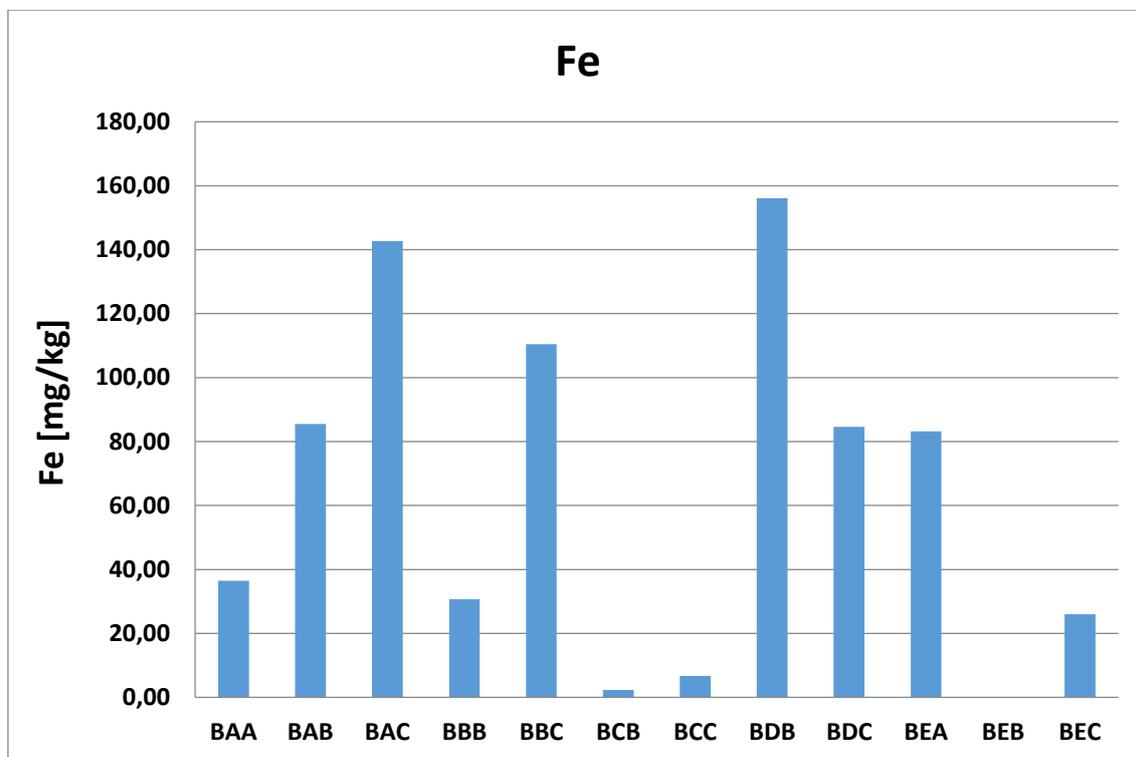


Figura 16: Cobre nas amostras de óleo de Canola

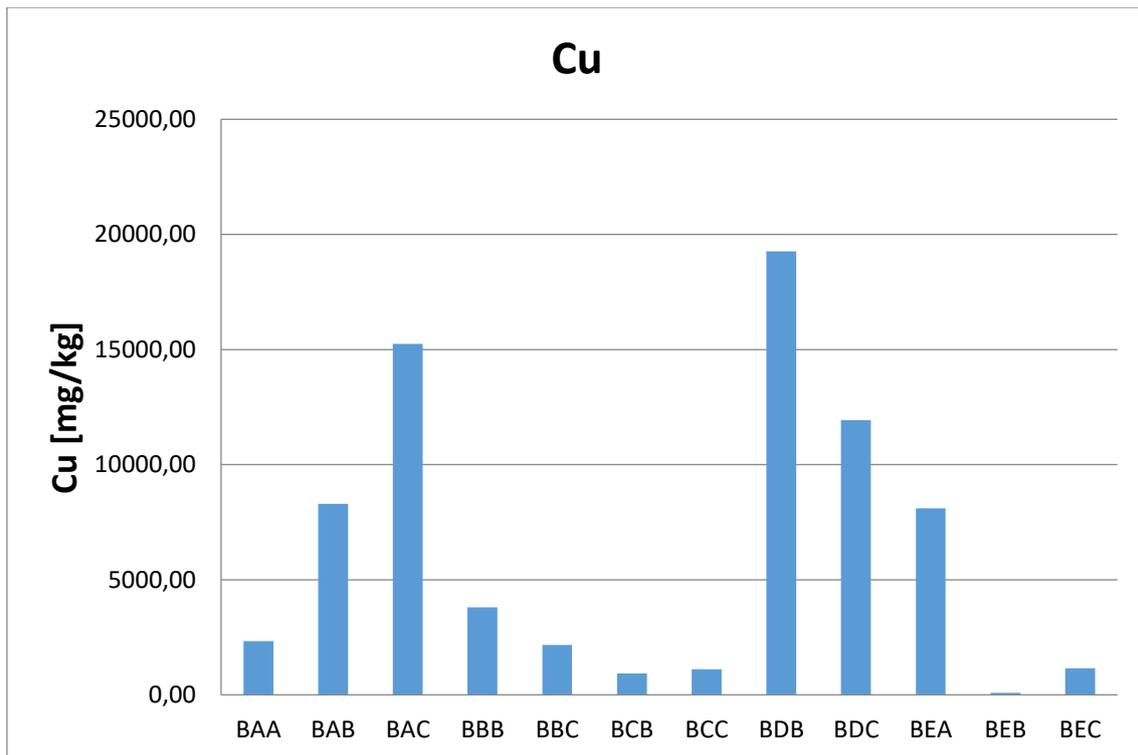


Figura 17: Ferro nas amostras de óleo de Milho

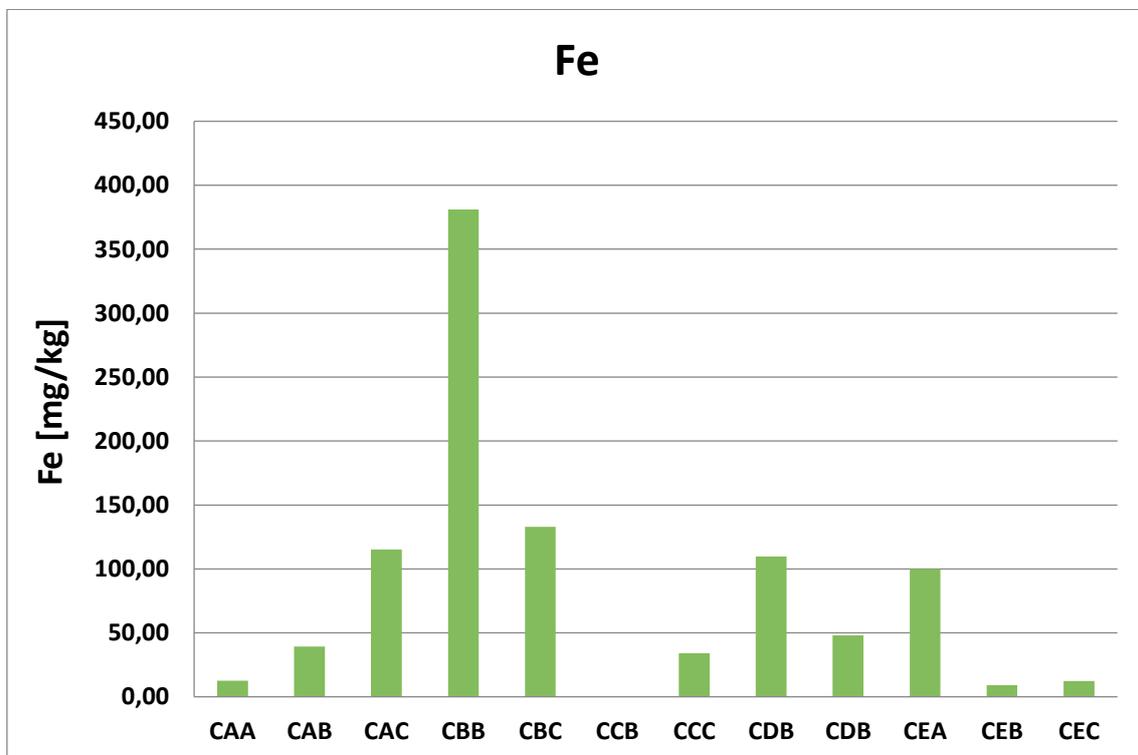


Figura 18: Cobre nas amostras de óleo de Milho

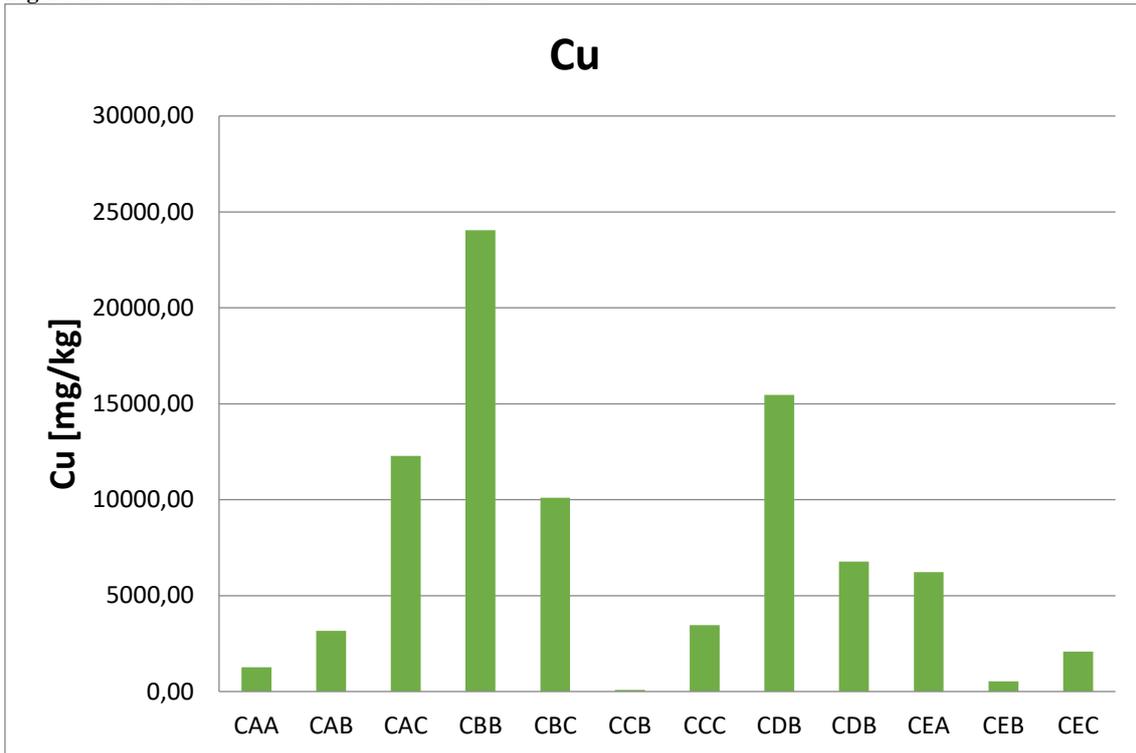


Figura 19: Ferro nas amostras de óleo mineral

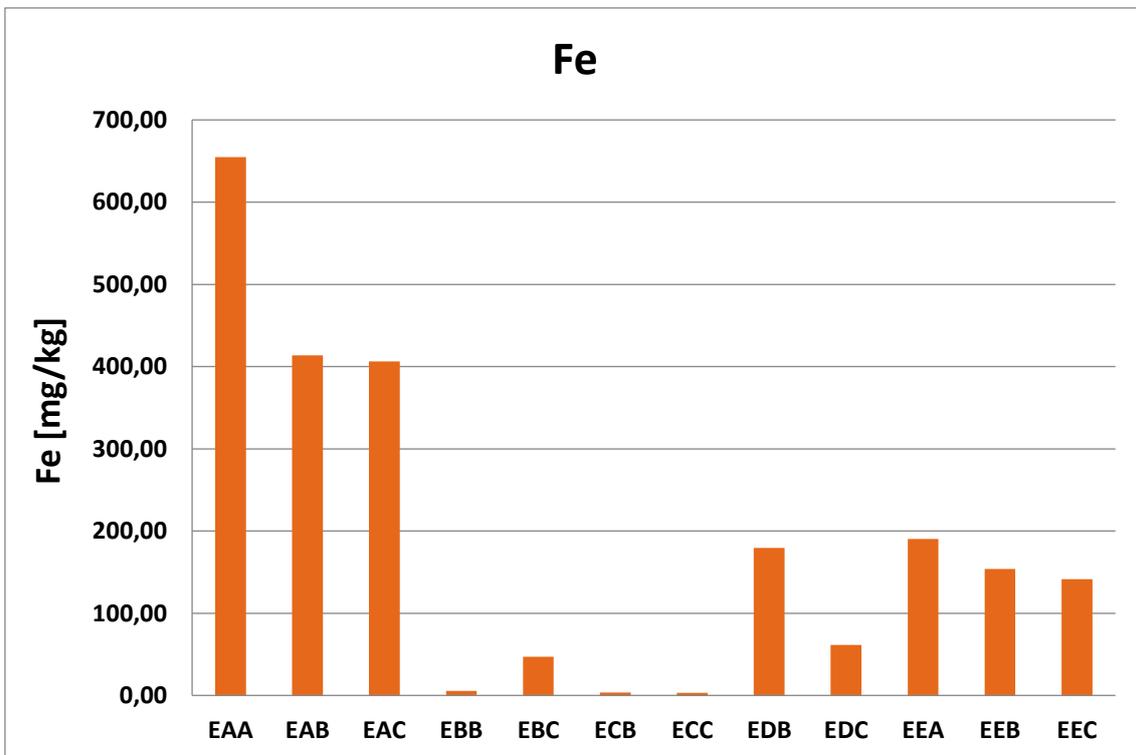
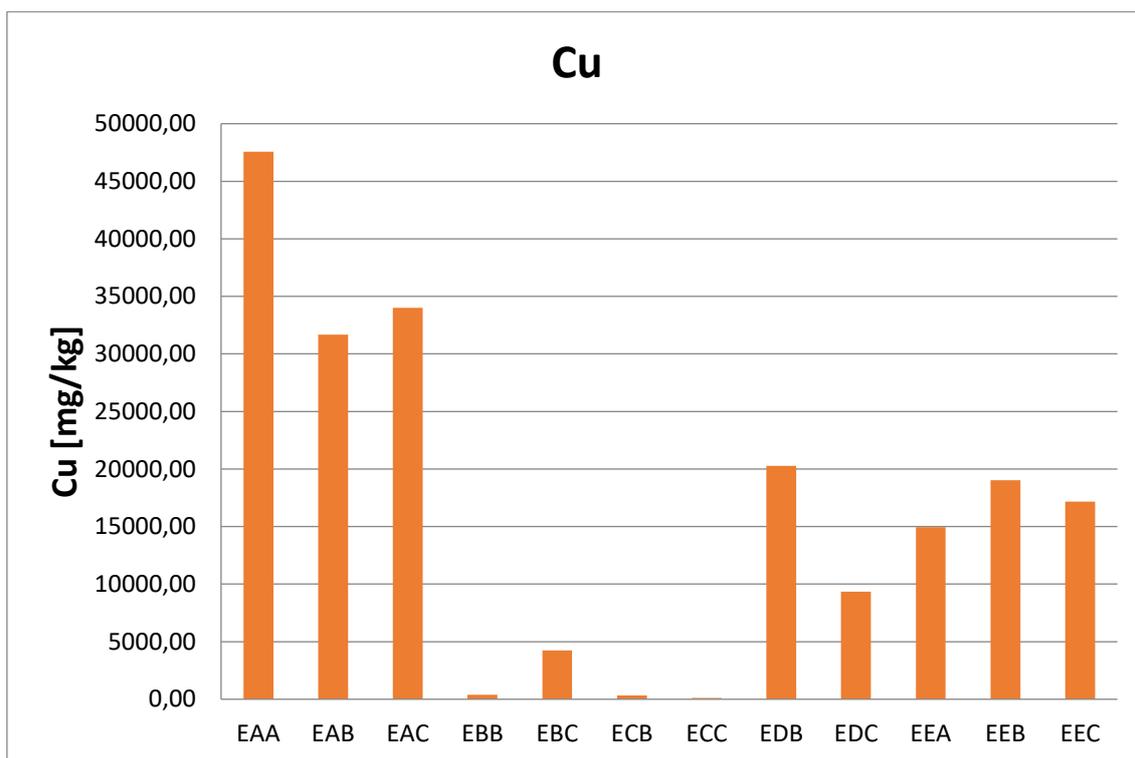


Figura 20: Cobre nas amostras de óleo mineral



CONCLUSÃO

Os ensaios de PIN-ON-DISK apresentaram desgaste concentrado principalmente no copo de bronze, enquanto o desgaste no pino de aço foi proporcionalmente pequeno. Este resultado foi confirmado pelos valores observados na análise do espectrômetro de raios-X, onde a quantidade de cobre nas amostras foi consideravelmente maior em todos os ensaios quando comparada as quantidades de ferro.

Quanto às partículas observadas nos ferrogramas das amostras pode-se destacar o desgaste severo, com partículas alongadas e com estriados paralelos, encontrados em mais quantidade nas amostras de óleo mineral. Enquanto nas amostras de óleo de canola as partículas mais comuns foram as de riscamento, caracterizadas por partículas planas e estriadas. As amostras de óleo de milho apresentaram mais partículas consistentes com falha de contato de escorregamento, partículas em forma de plaquetas laminares.

As amostras de óleo de milho e óleo de canola apresentaram quantidades bem menores de particulados, mas as partículas encontradas nos ferrogramas foram consistentes com os desgastes de riscamento e falha de contato de

escorregamento, em detrimento das partículas de desgaste comum, observadas em menor.

Foram fotografadas 110 partículas nas laminas obtidas com o óleo de canola com 49,1% de desgaste combinado, seguido por 27,3% de desgaste de rolagem e 19,1% de desgaste severo. Dentre os três óleos ensaiados foi o que apresentou maior concentração de desgaste combinado e por rolagem. Dos ensaios lubrificados com óleo de milho foram fotografadas 52 partículas, 40,4% de desgaste combinado e 34,6% de desgaste severo foram os tipos que mais se destacaram. Por fim, dos ensaios feitos com óleo mineral básico foram fotografadas 153 partículas, 88,2% das quais eram de desgaste severo.

As amostras de óleo de milho e óleo de canola apresentaram mais partículas consistentes com desgaste por rolagem e desgaste combinado de rolagem e deslizamento, o que pode indicar pior lubrificação ou distribuição inadequada de pressão do pino sobre o copo nos ensaios. Tal inadequação na distribuição de pressão pode ter sido causado pelo desgaste excessivo do copo de bronze.

O desenvolvimento do software de análise de partículas de desgaste, através das imagens digitais, necessita aprimoramento. A complexidade dos modelos necessários para uma abordagem de aprendizado de máquina é um obstáculo a ser superado e são assuntos para os próximos trabalhos.

A Ferrografia analítica, como auxílio a outras técnicas, é importante para uma perfeita análise do que ocorre em um sistema lubrificado. Neste trabalho auxiliou a compreensão do processo de lubrificação dos biolubrificantes aditivados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras FAPESP (Processo: 2023/17668-6) e CNPq (Processo: 303384/2021-2) pelo apoio contínuo.

REFERÊNCIAS

[1] Gonçalves, A.C., Cunha, R.C., Lago, D.F. Maintenance of a reducer by vibration and wear particles analysis (2006) *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12 (2), pp. 118-132.. doi: 10.1108/13552510610667156

[2] Gonçalves, A.C., Silva, J.B.C. [Predictive maintenance of a reducer with contaminated oil under an excentric load through vibration and oil analysis](#) (2011) *Journal of the Brazilian*

Society of Mechanical Sciences and Engineering, 33 (1), pp. 1-7. doi: 10.1590/S1678-58782011000100001.

- [3] Pereira, A.L.V., Gonçalves, A.C., Ribeiro, R., Chavarette, F.R., Outa, R. [Detecting Punctual Damage to Gears through the Continuous Morlet Wavelet Transform](#) (2020) *Shock and Vibration*, 2020, art. no. 8879565. doi: 10.1155/2020/8879565.
- [4] Outa, R., Chavarette, F.R., Mishra, V.N., Gonçalves, A.C., Roefero, L.G.P., Moro, T.C. Prognosis and fail detection in a dynamic rotor using artificial immunological system (2020) *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, 37 (9), pp. 3127-3145. doi: 10.1108/EC-08-2019-0351
- [5] Gonçalves, A.C., Paschoalini, A.T., Bazani, M.A. [Predictive maintenance of a worm reducer with an unbalanced load](#) (2014) *International Journal of Surface Science and Engineering*, 8 (4), pp. 302-317. doi: 10.1504/IJSURFSE.2014.065835
- [6] Cuerva, M. P, Goncalves, A. C, Alquerque, M.C.F, Chavarette, F.R., Outa,R, Almeida, E.F. Analysis of the Influence of Contamination in Lubricant by Biodiesel in a Pin-On-Disk Equipment. *Materials Research*. 2022; 25:e20210375, DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0375>.
- [7] Gonçalves, A.C., Padovese, L.R. [Vibration and oil analysis for monitoring problems related to water contamination in rolling](#) (2010) *Proceedings - International Brazilian Conference on Tribology*, pp. 80-90.
- [8] Y. Hu, L. Wang, D.J. Politis, M.A. Masen, Development of an interactive friction model for the prediction of lubricant breakdown behaviour during sliding wear, *Tribol. Int.* 110 (2017) 370–377.
- [9] G. Pocock, S.J. Courtney, Some quantitative aspects of ferrography, *Wear* 67 (3) (1981) 287–301.
- [10] D. Scott, V.C. Westcott, Predictive maintenance by ferrography, *Wear* 44 (1) (1977) 173–182.
- [11] R.B. Atkinson, S.G. Ellis, “Ferrography,” *J. Franklin Inst.*, vol. 252 (1951), no. 5, pp. 373–381.
- [12] B.J. Roylance, “Ferrography - Then and now,” *Tribol. Int.*, vol. 38 (2005), no. 10, pp. 857–862.
- [13] M.H. Jones, Ferrography applied to diesel engine oil analysis, *Wear* 56 (1) (1979) 93–103.
- [14] O. Levi, N. Eliaz, “Failure analysis and condition monitoring of an open-loop oil system using ferrography,” *Tribol. Lett.*, vol. 36 (2009), no. 1, pp. 17–29.
- [15] D.J. Smolenski, S.E. Schwartz, Automotive engine-oil condition monitoring, *Lubricat. Eng.* 50 (1994).
- [16] I.M. Flanagan, J.R. Jordan, H.W. Whittington, “Wear-debris detection and analysis techniques for lubricant-based condition monitoring,” *J. Phys. E.*, vol. 21, no. 11, pp. 1011–1016.

- [17] T.H. Wu, J.H. Mao, J.T. Wang, J.Y. Wu, Y.B. Xie, "A new on-line visual ferrograph," *Tribol. Trans.*, vol. 52 (2009), no. 5, pp. 623–631.
- [18]. P. Vahaoja , S. Lahdelma, J. Leinonen, On the condition monitoring of worm gears, in *Engineering Asset Management*. (Springer, London, 2006), p. 332–343.
- [19] A. Kirankumar, P. Archana, K. Rajanarender Reddy, Condition monitoring of steam turbine through ferrography. *Adv. Mater. Manuf. Charact.* 3(1), 183–187 (2013).
- [20]. N. Govindarajan, R. Gnanamoorthy, Ferrography—A procedure for measuring wear rate. *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 15, 377–381 (2008).
- [21]. A.K. Agarwal, Lubricating oil tribology of a biodiesel-fuelled compression ignition engine. *Intern. Combust. Eng. Division Spring Tech. Conf.* 36789, 751–765 (2003).
- [22]. A.K. Agarwal, J. Bijwe, L.M. Das, Wear assessment in a biodiesel fueled compression ignition engine. *J. Eng. Gas Turbines Power.* 125(3), 820–826 (2003).
- [23]. P.V. Joseph, D. Saxena, D.K. Sharma, Study of some non-edible vegetable oils of Indian origin for lubricant application. *J. Synth. Lubr.* 24(4), 181–197 (2007).
- [24]. A. Kalani, R. Jani, Comparative study of full journal bearing with Bio Lubricants-Jatropha Oil, Castor Oil, Neem Oil and Mineral Oil (SAE 20w50). *Int. J. Mech. Eng. Technol. (IJMET).* 6(6), 127–131 (2015).
- [25]. O. Kazeem, O. Taiwo, A. Kazeem, D. Mondiu, Determination of some physical properties of castor (*Ricinus communis*) oil. *Int. J. Scientif. Eng. Technol.* 3(12), 1503–1508 (2014).
- [26]. B. Kržan. Study on the tribological performance of vegetable oils. *Gorivaimaziva: časopis za tribologiju, tehnikupodmazivanjajprimjenutekucihiplinovitihgoriva i inžinjerstvoizgaranja*, 49(4), 360-367, (2010).
- [27]. M.H. Jabal, M.Z. Khlefa, A.R. Abdulmunem, Tribological performance of mustard seeds oil under different loads using pin-on-disk Tribotester. *Iraqi J. Mech. Mater. Eng.* 18(4), 527–537 (2018).
- [28]. A. Adhvaryu, S.Z. Erhan, J.M. Perez, Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants. *Wear.* 257(3–4), 359–367 (2004).
- [29]. T. Romsdahl, A. Shirani, R.E. Minto, C. Zhang, E.B. Cahoon, K.D. Chapman, D. Berman, Nature-guided synthesis of advanced bio-lubricants. *Sci. Rep.* 9(1), 1–11 (2019).
- [30]. N.P. Chauke, H.E. Mukaya, D.B. Nkazi, Chemical modifications of castor oil: a review. *Sci. Prog.* 102(3), 199–217 (2019).
- [31] Gonçalves, A.C., Padovese, L.R. [Identification of lubricant contamination by biodiesel using vibration analysis and neural network](#) (2012) *Industrial Lubrication and Tribology*, 64 (2), pp. 104-110. doi: 10.1108/00368791211208714.
- [32] CANOLA COUNCIL OF CANADA. What is canola? Canola Council of Canada. Disponivel em: <<http://www.canolacouncil.org/oil-and-meal/what-is-canola/>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

[33]AUN, J. K. Canola was a “calculated” risk. **Alberta Farmer Express**, 2013. Disponível em: <<http://www.albertafarmexpress.ca/2013/06/10/canola-was-a-calculated-risk/>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

[34]CORN REFINERS ASSOCIATION. **Corn Oil**. 5ª. ed. Washinton, D.C.: Corn Refiners Association, 2006.

[35] CAMPESTRE. ÓLEO MINERAL BRANCO. **Campestre**, 2005. Disponível em: <<http://www.campestre.com.br/oleo-mineral-branco.shtml>>. Acesso em: 09 abr. 2016.

[36] DONG, J.; MIGDAL, C. A. Antioxidants. In: RUDNICK, L. R. **Lubricant Additives: Chemistry and Applications**. 2ª. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2009. Cap. 1, p. 4-41.

[37] WELLER, P. J. Propyl Gallate. In: ROWE, R. C.; SHESKEY, P. J.; QUINN, M. E. **Handbook of Pharmaceutical Excipients**. 6ª. ed. Grayscale, IL: Pharmaceutical Press, 2009. p. 587-590.

[38] LADIPO, D. D.; BENTHAM, A. C. Boric Acid. In: ROWE, R. C.; SHESKEY, P. J.; QUINN, M. E. **Handbook of Pharmaceutical Excipients**. 6ª. ed. Grayscale, IL: Pharmaceutical Press, 2009. p. 68-70.

[39] ALL-TRACK. Aditivo para Motor com MoS2 Molykote A2. **All-Track Peças e Lubrificantes**. Disponível em: <<http://www.alltrackcomercial.com.br/?product=aditivo-para-motor-com-mos2-molykote-a2>>. Acesso em: 16 maio 2016.

[40]ALLEN JR., L. V. Stearic Acid. In: ROWE, R. C.; SHESKEY, P. J.; QUINN, M. E. **Handbook of Pharmaceutical Excipients**. 6ª. ed. Grayscale, IL: Pharmaceutical Press, 2009. p. 697-699.

ASSISTANCE OF ANALYTICAL FERROGRAPHY IN THE INTERPRETATION OF RESULTS OF WEAR TESTS PERFORMED WITH BIOLUBRICANTS

ABSTRACT

Analytical ferrography plays a crucial role in predictive maintenance, which is a proactive approach to asset and equipment management. This technique provides valuable information about the internal condition of machines and components, allowing for the early identification of potential problems and the scheduling of maintenance interventions before catastrophic failures occur. Ferrography enables the identification of worn particles, non-metallic inclusions, and other indicators of wear in components. By analyzing samples of lubricating oil or hydraulic fluid, analytical ferrography can offer insights into the health of internal components such as gears, bearings, and other critical elements. Changes in the concentration and composition of particles can indicate abnormal wear. This work involves the use of analytical ferrography to interpret wear test results performed with two additive-treated vegetable lubricants, compared to an additive-treated mineral lubricant. To assist in the interpretation of the results, the open-source software ImageJ and a small program developed in Python were used. It was found that these two tools can aid in the interpretation of ferrograms

Keywords: Analytical ferrography, wear, biolubricant