

***“Desenvolvimento de um
Sistema de Análise de Imagem
para Quantificação do Tamanho
e Distribuição de Partículas
de Desgaste”***

VALDECI DONIZETE GONÇALVES

VALDECI DONIZETE GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA
QUANTIFICAÇÃO DO TAMANHO E DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS DE
DESGASTE

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na
área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

Co-orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

Guaratinguetá

2009

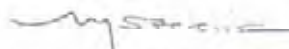
G635d	Gonçalves, Valdeci Donizete Desenvolvimento de um sistema de análise de imagem para quantificação do tamanho e distribuição de partículas de desgaste / Valdeci Donizete Gonçalves. – Guaratinguetá: [s.n.], 2009 135f.: il. Bibliografia: f. 88-94 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009. Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias Co-orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres 1. Partículas - Desgaste. 2. Tribologia 3. Microscopia I. Título. CDU 621.89
-------	--

VALDECI DONIZETE GONÇALVES

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

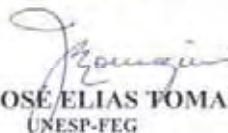


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Orientador / UNESP-FEG



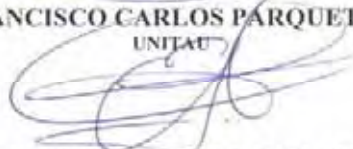
Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
UNESP-FEG



Prof. Dr. JOÃO ZANGRANDI FILHO
UNESP-FEG



Prof. Dr. FRANCISCO CARLOS PARQUET BIZARRIA
UNITAU



Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA
UNESP-FEB

Outubro de 2009

DADOS CURRICULARES
VALDECI DONIZETE GONÇALVES

NASCIMENTO	08.03.1969 – ITAJUBÁ / MG
FILIAÇÃO	José Ribeiro Gonçalves Maria Bernardes Gonçalves
1996 / 2001	Curso de Graduação Engenharia Elétrica UNITAU – Taubaté / SP
2002 / 2003	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na área de Automação Industrial, na UNITAU – Taubaté / SP
2004 / 2009	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na área de Projetos, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP.

DEDICATÓRIA

A meus pais,

Dou-lhes o sorriso que trago agora em minha face. O sorriso do trabalho, da luta, do carinho, da crença e da esperança que um dia espero ver na face dos meus filhos.

Dou-lhes também uma parte do meu futuro do qual vocês abriram mão para que nos reservasse um mundo melhor. Dividam conosco os méritos desta conquista, porque ela nos pertence; ela é tão sua quanto minha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo.

Ao professor Dr. Mauro Hugo Mathias, pela atenção irrestrita e pela preciosa orientação dedicada a mim durante todo o período que compreendeu este trabalho.

Ao professor MSc. Luis Fernando Almeida, pelas pesquisas e publicações que realizamos juntos sob a orientação do professor Dr. Mauro Hugo Mathias.

À minha esposa, pela compreensão da ausência devido à dedicação e tempo necessário para a realização deste trabalho.

As funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá, pela dedicação, eficiência e, principalmente, interesse pelo aluno que necessita de orientação.

As secretárias da Pós-Graduação, pela dedicação, presteza e simpatia no atendimento.

Gonçalves, V. D. **Desenvolvimento de um sistema de análise de imagem para quantificação do tamanho e distribuição de partículas de desgaste.** 2009. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de análise de imagens de partículas de desgaste encontradas em óleos lubrificantes de equipamentos industriais. Para tanto, foi utilizado um sistema de aquisição de imagem para capturar imagens de amostras de óleo retidas em membranas de filtro e, também, desenvolvida uma metodologia analítica que faz a classificação quantitativa e qualitativa das partículas, relacionando-as ao modo de desgaste na qual foram geradas. Para a classificação quantitativa utilizou-se a norma ISO 4406 e para a qualitativa, a análise por meio de Redes Neurais Artificiais. O sistema aplicado consiste em uma câmera digital, um microscópio óptico monocular, um sistema de filtragem de óleo e dois programas computacionais desenvolvidos para realização da análise automatizada das imagens das partículas de desgaste obtidas. Foram utilizados óleos minerais de redutores de máquinas industriais no processo de obtenção de amostras. As partículas de desgaste foram analisadas pelo processo de microscopia óptica para obtenção da imagem da amostra relacionada ao desgaste. Os resultados obtidos mostraram que o sistema de análise desenvolvido realiza a classificação individual das partículas, através de Redes Neurais Artificiais, com uma eficiência de até 96%, além de analisar as múltiplas partículas contidas nas amostras, exibindo um relatório de acompanhamento e evolução do desgaste. Os programas computacionais desenvolvidos para essa análise possuem interface gráfica de fácil utilização. Eles podem ser amplamente utilizados no estudo e avaliação das partículas de desgaste obtidas de amostras de óleos industriais em empresas ou em universidades para fins educacionais. O sistema pode ser utilizado para análise de superfícies de metais obtidos pelo processo de metalografia ou na análise de imagens de microorganismos obtidas de amostras de sangue, abrindo uma vasta área de utilização nas universidades e campos de pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: Partículas de desgaste. Interface gráfica. Microscopia óptica. Sistema de análise de imagens. Redes Neurais Artificiais.

Gonçalves, V. D. **Development of an image analysis system to quantification of the size and distribution of wear particles.** 2009. 135f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

ABSTRACT

This paper describes the development of an image analysis system for wear particles found in industrial equipment lubricating oil. Hence, it was utilized an image acquisition system to capture image samples of the oil held in filter membranes. An analytical methodology was also developed to classify the particles quantitatively and qualitatively, relating them to the wear mode where they had been generated. The ISO 4406 standard was applied for quantitative classification and Artificial Neural Networks were used for qualitative classification analysis. The applied system consists of a digital camera, a monocular optical microscope, one oil filtering system and two software programs developed to perform the automated analysis of the acquired wear particles images. Mineral oils of gearbox industrial machines were used in the process of achieving the samples. The wear particles were analyzed by an optical microscopy system, to obtain the sample image related to the wear. The results showed that the analysis system that was developed classifies the individual particles through Artificial Neural Networks with 96% accuracy, in addition to analyzing the multiple particles contained in the samples and generating an evaluation report and wear evolution. The software programs developed for the analysis have a graphical interface easy to use. They can be used in the study and evaluation of the wear particles obtained from industrial oil samples in the companies or in the universities for educational purposes. The system can be applied to analyze the surface of metals acquired by metallographic processes or in the image analysis of microorganisms acquired from blood samples, opening a wide field of application within universities and researches.

KEYWORDS: Wear particles. Graphical interface. Optical microscopy. Image analysis system. Artificial Neural Networks.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Coletor magnético (HUNT, 1993)	26
FIGURA 2	– Componentes básicos da análise de partículas e características do desgaste (LAGHARI, 2003).....	27
FIGURA 3	– Desgaste por fricção (Fonte Tribolab)	37
FIGURA 4	– Desgaste por abrasão (Fonte Tribolab).....	37
FIGURA 5	– Deslizamento severo (Fonte Tribolab).....	37
FIGURA 6	– Desgaste por fadiga (Fonte Lubrosoft)	38
FIGURA 7	– Diagrama de blocos da relação entre características das partículas e o modo de desgaste	39
FIGURA 8	– Imagem da partícula em 3D	49
FIGURA 9	– Imagem da partícula em 2D	49
FIGURA 10	– Perímetro	53
FIGURA 11	– Retângulo limite	53
FIGURA 12	– Elipse circunscrita	54
FIGURA 13	– Distribuição simétrica	55
FIGURA 14	– Assimetria Positiva	55
FIGURA 15	– Assimetria Negativa.....	55
FIGURA 16	– Mesocúrtica.....	55
FIGURA 17	– Platicúrtica	55
FIGURA 18	– Leptocúrtica	55
FIGURA 19	– Diagrama de blocos da arquitetura proposta	57
FIGURA 20	– Bomba de vácuo e os respectivos elementos de filtragem.....	58
FIGURA 21	– Disco de Petri com identificação da análise	59
FIGURA 22	Fluxograma do processo utilizado no IASS.....	61
FIGURA 23	– Tela do programa IASS com imagem digital de amostra de óleo	62
FIGURA 24	– Diagrama de blocos da classificação de partículas por similaridade	65

FIGURA 25	– Amostra adquirida.....	66
FIGURA 26	– Padrão para classificação	66
FIGURA 27	– Processo de ajuste de escala.....	67
FIGURA 28	– Limiarização de uma imagem capturada	68
FIGURA 29	– Estrutura do módulo de análise morfológica	69
FIGURA 30	– Partículas de abrasão estilizadas	70
FIGURA 31	– Módulo de treinamento da RNA_CPD	72
FIGURA 32	– Módulo para classificação da RNA_CPD.....	73
FIGURA 33	– Relatório obtido pelo método da similaridade.....	76
FIGURA 34	– Resultado do relatório de amostra de óleo	79
FIGURA 35	– Fluxograma do padrão de comparação	82
FIGURA 36	– Taxa de acerto em função do número de eventos	85
FIGURA 37	– Pixels RGB, pixels em tons de cinza (Gonçalves, 2004).....	96
FIGURA 38	– Componentes de Cores.....	98
FIGURA 39	– Limiarização utilizando limiar T: (a) histograma original, (b) histograma da imagem binarizada (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999)	99
FIGURA 40	– Limiarização: (a) imagem original (b) imagem binarizada	100
FIGURA 41	– Lâminula de calibração	102
FIGURA 42	– Filtro com 20 quadrados selecionados.....	103
FIGURA 43	– Estrutura do programa CD-SDK.....	106
FIGURA 44	– Relatório de classificação das partículas.....	107

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Características extraídas das partículas de abrasão.....	71
TABELA 2	– ISO 4406 para cada atuador e variação da pressão.....	78
TABELA 3	– Teste realizado de verificação de uma partícula de abrasão	83
TABELA 4	– Amostra x número de partículas encontradas	83
TABELA 5	– Melhor configuração para combinações entre características ...	84

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	– Duas dimensões
3D	– Três dimensões
AALM SQN	– A Administração de Logística do Esquadrão de Aeronave do Exército
Ab	– Partícula de desgaste por abrasão (cutting wear)
AES	– Atomic Emission Spectrometry.
API	– Application Programming Interface
AutoCAD	– Computer Aided Design (Autodesk, Inc).
Bit	– Binary digit
BMP	– Bit map (mapa de bits)
CASPA	– Computer-Aided Systematic Particle Analysis
CAVE	– Computer Aided Vision Engineering
CCD	– Charge-coupled device
CD-SDK	– Canon digital camera SDK
CGL	– Cromatografia Gás-líquido.
CGS	– Cromatografia Gás-sólido.
DLL	– Dynamic-link library
E	– Nível de contaminação encontrado
DSTO	– Organização de Defesa, Ciência e Tecnologia
Ds	– Partícula de desgaste por deslizamento severo (severe sliding)
EFDCs	– Centro de detecção de falha precoce da RAF
EOS	– Extended Operating System
Fa	– Partícula de desgaste por fadiga (fatigue)
Fr	– Partícula de desgaste por fricção (rubbing wear)
IASS	– Image Acquisition System Software
INI	– Arquivo de informações de inicialização de software
ISO	– International Organization for Standardization
JOAP	– Joint Oil Analysis Program.

JPEG	– Joint Photographic Experts Group
MCD	– Magnetic Chip Detector
Md	– Mediana
MLP	– Multilayer Perceptron
N	– Valor do atributo
Nmáx	– Valor máximo do atributo
Nmín	– Valor mínimo do atributo
Ne	– valor do atributo de entrada
R	– Nível de contaminação recomendado
RAF	– Royal Air Force (Força aérea do Reino Unido)
RAW	– Formato que contém todas as informações básicas de uma imagem
RGB	– Red; green; blue
RNA	– Redes Neurais Artificiais
RNA_CPD	– Redes neurais artificiais para classificação de partículas de desgaste
SDK	– Software development kit
SEM	– Microscópio de varredura eletrônica
Skew	– Skewness (Oblicuidade)
SOA	– Spectrometric Oil Analysis
SOAP	– Spectrometric Oil Analysis Program.
SYCLOPS	– Systematic Classification of Oil-wetted Particles
T	– Valor do limiar
TA	– Taxa de acerto
USB	– Universal Serial Bus
VBA	– Visual Basic® for Applications
WDA	– Wear debris analysis
WPTA	– Wear particle texture analysis

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Síntese do trabalho	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Métodos de análise de óleo.....	23
2.1.1 Espectrometria de emissão atômica na análise do óleo.....	24
2.1.2 Técnica da ferrografia na análise de partículas de desgaste	25
2.1.3 Cromatografia gasosa	28
2.1.4 Análise de graxa	30
2.2 Sistemas de quantificação e avaliação de partículas de desgaste	30
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	51
3.1 Recursos para classificação do formato de partículas de desgaste.....	51
4 SISTEMA DE ANÁLISE DE PARTÍCULAS DE DESGASTE.....	56
4.1 Arquitetura proposta	56
4.1.1 Módulo de filtragem	57
4.1.2 Módulo de aquisição de imagens por microscopia	59
4.1.3 Módulo de processamento de imagens.....	63

4.1.4 Módulo de análise morfológica	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
5.1 Relatório da análise de amostra de óleo pelo método de similaridade.....	75
5.2 Relatório da análise de amostra de óleo pelo método de contagem e classificação computacional.	77
5.3 Classificação das partículas por seus atributos morfológicos	80
5.4 Classificação individual das partículas pelo formato usando redes neurais.....	84
 6 CONCLUSÕES	 86
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A – Conceitos básicos para o processamento de imagens	95
APÊNDICE B – Quantificação das partículas com microscópio óptico	102
APÊNDICE C – Complementos do Programa computacional IASS e Macros desenvolvidas.....	105
 ANEXO – Cópias de artigos publicados pelo autor	 112

1 INTRODUÇÃO

A condição do óleo ou da graxa utilizada como lubrificante afeta a condição de trabalho de uma máquina ou equipamento de forma significativa. As propriedades físicas e químicas de um lubrificante têm efeito sobre a condição de lubrificação. Uma lubrificação insuficiente ou inadequada pode gerar uma mudança na condição de operação de uma máquina e, conseqüentemente, dar início ao mecanismo de desgaste.

O acompanhamento da condição de lubrificantes e dos mecanismos de desgaste em máquinas pode ser efetuado por meio de análises física e química dos lubrificantes. O mecanismo de desgaste em sistemas tribológicos é resultado de vários fatores inter-relacionados.

A avaliação dos modos de desgaste envolve especialistas da área de tribologia bem como sistemas de suporte fundamentados na microscopia, espectroscopia, etc.

Com o avanço da área de computação, relacionado à inteligência artificial, houve o desenvolvimento de sistemas especialistas e de reconhecimento de padrões. A partir da década de noventa, foi iniciado o desenvolvimento de sistemas automatizados de análise de óleos lubrificantes com a capacidade de realizar o diagnóstico dos mecanismos de desgaste em máquinas sem a necessidade de intervenção de um especialista da área.

A tribologia pode ser definida como a ciência e tecnologia das superfícies que interagem entre si mediante um movimento relativo (DOWSON, 1997).

Vários métodos de análise de óleo são aplicados ao monitoramento das condições de máquinas industriais. Dentre os métodos usuais se destacam: a ferrografia (FISHER, 1998), a cromatografia gasosa, a espectrometria de emissão atômica e contagem de partículas (XU; LUXMORE, 1997).

A análise de óleo é um recurso de diagnóstico de manutenção utilizado para detectar a quantidade e morfologia das partículas de desgaste de metais, e também para avaliação dos níveis de contaminantes em lubrificantes.

O processo da análise de óleo consiste no acompanhamento periódico de amostras, visando à avaliação dos mecanismos de desgaste que são produzidos em máquinas, nas quais ocorre o movimento das partes mecânicas em contato.

Esse recurso encontra aplicação em sistemas de caixa de engrenagem, equipamentos robotizados, máquinas agrícolas e equipamentos mecânicos que utilizam óleo lubrificante e graxas para reduzir o atrito provocado pela aderência das partes móveis.

A análise de partículas de desgaste pode ser considerada uma das técnicas da manutenção preditiva (LEVITT, 2003).

O uso das técnicas de análise de óleo é fundamentado em sistemas de inspeção visual com auxílio de microscópio (MAYER, 2006).

Com a evolução dos sistemas mecatrônicos, a identificação e a análise das partículas de óleo podem ser implementadas por meio de sistemas automatizados que têm por base um processo de visão computacional (LAGHARI; BOUJARWAH, 1996).

O trabalho realizado objetivou o desenvolvimento de um sistema de análise de óleos lubrificantes que utiliza técnicas de processamento de imagens.

Nesta pesquisa foi proposto o desenvolvimento de um sistema de análise de partículas de desgaste de óleos lubrificantes que consiste de quatro módulos, sendo estes: de filtragem de óleo, de aquisição de imagens por microscopia, de processamento de imagens e de análise morfológica.

Este sistema se aplica à contagem e avaliação do tamanho das partículas de desgaste em óleos lubrificantes de máquinas industriais. Para isso, um ensaio não destrutivo foi realizado acompanhando a evolução do aumento do tamanho e das características de distribuição das partículas de desgaste coletadas em uma membrana de um elemento filtrante.

Para o processamento das imagens, rotinas computacionais foram desenvolvidas para a análise quantitativa do tamanho das partículas de desgaste.

O processo de contagem foi realizado a partir de imagens obtidas por um sistema de coleta e filtragem de óleo.

No sistema desenvolvido, as imagens das partículas de desgaste, retidas em uma membrana de filtro (de poro de $1,2 \mu m$), foram analisadas por um sistema de processamento de imagem, que consiste em um microscópio, uma câmera digital, um computador e um programa de captura e processamento de imagens.

O processo de contagem de partículas atende aos critérios da norma ISO 4406 (1999).

1.1 Síntese do trabalho

Capítulo 1: é feita uma introdução do trabalho, dando ênfase à motivação e seus objetivos principais.

Capítulo 2: é feita uma revisão da literatura, em que são abordados assuntos como os métodos de análise de óleo e graxa, os sistemas de quantificação e avaliação de partículas de desgaste.

Capítulo 3: são apresentados os fundamentos teóricos para a classificação do formato de partículas de desgaste.

Capítulo 4: é apresentada a metodologia adotada neste trabalho. Descreve de forma sucinta como é realizada a análise de partículas de desgaste. É descrito como é estruturado o sistema de contagem e classificação de partículas de desgaste. São discutidos todos os módulos do sistema apresentado e faz-se uma abordagem sobre o funcionamento de cada módulo. São apresentados os *softwares* desenvolvidos neste trabalho (IASS e RNA_CPD), mostrando seus benefícios e discutido o seu funcionamento. No final deste capítulo é apresentada uma conclusão.

Capítulo 5: os resultados obtidos pelos sistemas desenvolvidos são apresentados e discutidos.

Capítulo 6: são apresentadas as conclusões e contribuições da tese .

Apêndice A: são descritos os conceitos básicos para o processamento de imagens.

Apêndice B: é descrito o processo de contagem das partículas com microscópio óptico.

Apêndice C: são descritas as principais rotinas computacionais do programa IASS, para que ele possa se comunicar com a câmera Canon usando a interface USB e executar suas rotinas para salvar e processar as imagens adquiridas de um microscópio óptico utilizado no experimento.

No anexo são apresentadas três publicações do autor, sendo um artigo em revista nacional, outro em revista internacional e um artigo em congresso internacional

que foi aceito para posterior publicação no *Journal of Mechanical Engineering* na Eslovênia, Europa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desgaste pode ser definido como a progressiva perda de substância resultante da interação mecânica de duas superfícies de contato (NEALE, 1973). As perdas resultantes geram as partículas de desgaste. Para a redução do desgaste entre as superfícies, faz-se uso de lubrificante. O estudo e análise de partículas de desgaste estão inseridos no campo da tribologia, área que envolve o estudo do desgaste, do atrito e da lubrificação (LAGHARI; MEMON; KHUWAJA, 2004). Os resultados obtidos pela tribologia são usados para reduzir a perda de energia no atrito, para reduzir a perda de material devido ao desgaste e para melhorar a vida útil dos componentes utilizados (GORYACHEVA, 1997).

A análise de partículas de desgaste em lubrificantes é um recurso fundamental na área de manutenção, tendo em vista que as partículas carregam informações importantes relacionadas à condição das máquinas e dos equipamentos. Os mecanismos de desgaste são influenciados diretamente pela morfologia das partículas de desgaste.

Os recursos para avaliação da condição das máquinas, com base na análise de óleos lubrificantes, são fundamentados na análise espectrométrica, ferrográfica e de partículas de desgaste (FISHER, 1998).

2.1 Métodos de análise de óleo

Os métodos de análise de óleo podem ser divididos em métodos de avaliação em campo (*on-line / in-line*) e métodos de análise laboratorial (*off-line*).

O método *on-line* pode ser usado para determinar a quantidade de partículas em amostras de óleos, a concentração de água no óleo e sua condição geral, como a degradação do óleo, que pode ser analisada com fundamentos nos princípios de espectroscopia por infravermelho ou condutividade elétrica (ROYLANCE & HUNT, 1999; VÄHÄOJA, 2006). Também podem ser usados métodos *on-line* para coletar partículas de desgaste por meio de detectores magnéticos de cavacos de metal (MCD) (RAADNUI, 2003).

O método off-line é utilizado para uma inspeção mais aprofundada das partículas de desgaste e que pode ser realizada com os métodos de microscopia. O método laboratorial de análise necessita de uma amostra de óleo representativa (TOMS, 1998; ROYLANCE & HUNT, 1999).

2.1.1 Espectrometria de emissão atômica na análise do óleo

Análise Espectrométrica de Óleo (SOA) é uma técnica analítica para identificar a composição elementar de partículas de até, aproximadamente, oito microns contidas em amostras de óleo de máquinas ou equipamentos industriais lubrificados por óleo, (ANDERSON et al., 1999). Devido ao desgaste dos componentes mecânicos ocorre a dispersão de pequenas partículas metálicas no óleo. Como o desgaste se relaciona com as falhas, o aumento proporcional das partículas de desgaste pode ser observado através da SOA. O conhecimento dos metais constituintes em um sistema particular determina a origem provável das partículas de desgaste.

Marsden e Becker (2002) realizaram um projeto para a DSTO (Organização de Defesa, Ciência e Tecnologia) para o laboratório de pesquisa da divisão de máquinas e equipamentos aeronáutico e marítimo australianos. Esse projeto designado como SOAP (Programa de Análise Espectrométrica do Óleo), contém uma descrição detalhada de um banco de dados que foi projetado e desenvolvido para o DSTO para uso na frota de helicópteros do exército australiano do tipo CH-47D.

As análises Espectrométricas de Óleo (SOA) administradas em caixas de câmbio, máquinas e amostras de óleo hidráulico são feitas periodicamente em todas as aeronaves na frota CH-47D. As tendências observadas do SOA podem ajudar com a descoberta de falhas incipientes de componentes mecânicos (mancais, engrenagens etc). No CH-47D, amostras de SOA são analisadas por um contratante local na cidade de Townsville na Austrália. A Administração de Logística do Esquadrão de Aeronave do Exército (AALM SQN) e Esquadrão C mantém cópias dos relatórios obtidos de amostras que são produzidos pelo contratante e também utilizam aplicativos de planilha eletrônica da Microsoft Office Excel para coletar e registrar todos os dados do SOAP em uma tentativa de identificar tendências. O formato dessa planilha eletrônica

não era ideal para este tipo de aplicação e foram encontradas falhas estruturais significantes. Depois de avaliar a condição do banco de dados antigo, foi decidido que um banco de dados totalmente novo era necessário. Microsoft Excel foi retido como o programa subjacente, porém, uma interface visual foi elaborada o que tornou os dados mais fáceis de serem vistos pelos operadores. Outra vantagem era que nenhuma licença de novo *software* precisou ser comprada ou mantida, considerando que o Excel era uma parte da rede existente do computador na AALM SQN. O banco de dados DSTO projetado foi comissionado ao AALM SQN.

2.1.2 Técnica da ferrografia na análise de partículas de desgaste

Segundo Dalley (1991) a ferrografia é uma técnica laboratorial que, por meio de exame microscópico, é capaz de fazer a análise de partículas, separando-as de fluidos. Foi desenvolvida em 1971, e usada, inicialmente, para precipitar magneticamente partículas ferrosas de óleos lubrificantes.

É uma técnica em que as partículas são separadas do lubrificante e arranjadas de acordo com o tamanho em um substrato transparente para análise, o que permite uma observação além das partículas. A variação, ou os limites, está entre um e cem microns, (BOWER et al., 1976). Outro método utilizado para extrair partículas é o *plug* magnético, também denominado chip detector magnético (*MCD*), que apesar de ser comumente designado como um detector, sua função é de coletor. A Figura 1 ilustra um chip coletor com seus componentes.

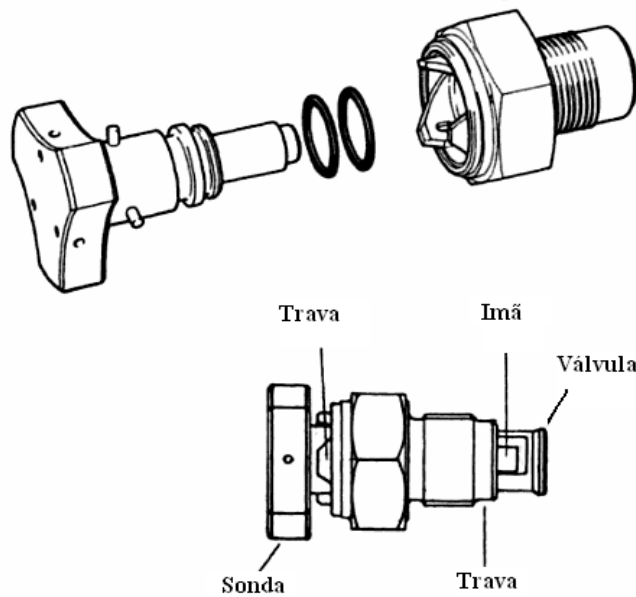


Figura 1 – Coletor magnético (HUNT, 1993)

Os coletores magnéticos são unidades pequenas e removíveis adaptadas com um ímã permanente, localizado em uma posição conveniente na máquina. Por causa da força de atração magnética, as partículas aderem ao *plug*, que é mais tarde limpo sobre um substrato ou lamínula. O tamanho da partícula nesse caso é maior que 100 microns (CUMMING, 1989).

Seifert e Westcott (1972) no artigo *A method for the study of wear particles in lubricated oil*, publicado na revista *Wear*, afirmaram que “foi desenvolvido um novo instrumento capaz de precipitar partículas magnéticas que variam de poucos micrômetros para aproximadamente 20nm (nanômetros) de líquidos como óleos lubrificantes. Com esse instrumento, nomeado de ferrógrafo, partículas são organizadas de acordo com o tamanho sobre uma base transparente...” O instrumento foi utilizado na pesquisa sobre lubrificantes, no estudo de mecanismos de desgaste e como um dispositivo de detecção do desgaste anormal em falha de rolamentos e motores a jato. Por meio do ferrógrafo, houve um grande desenvolvimento na análise das partículas de desgaste. A base dos princípios de análise das partículas de desgaste são brevemente revisados em relação a como o método da ferrografia responde aos critérios dos principais requisitos. É abordado o desenvolvimento que tem ocorrido e discutido as implicações em termos da aplicação presente e futura em relação aos

estudos dos fundamentos do desgaste e a aplicação dos programas de manutenção baseados na ferrografia.

Roylance (2005) escreveu sobre o papel da ferrografia na análise das partículas de desgaste. A geração e transporte de partículas de desgaste em lubrificantes é um fenômeno há muito tempo conhecido, mas somente após a segunda guerra mundial é que foi desenvolvido um equipamento para realizar uma análise com uma base compreensível.

A Figura 2 ilustra o diagrama em blocos do processo para capturar e analisar as partículas de desgaste e as características de desgaste dos componentes críticos de um equipamento.

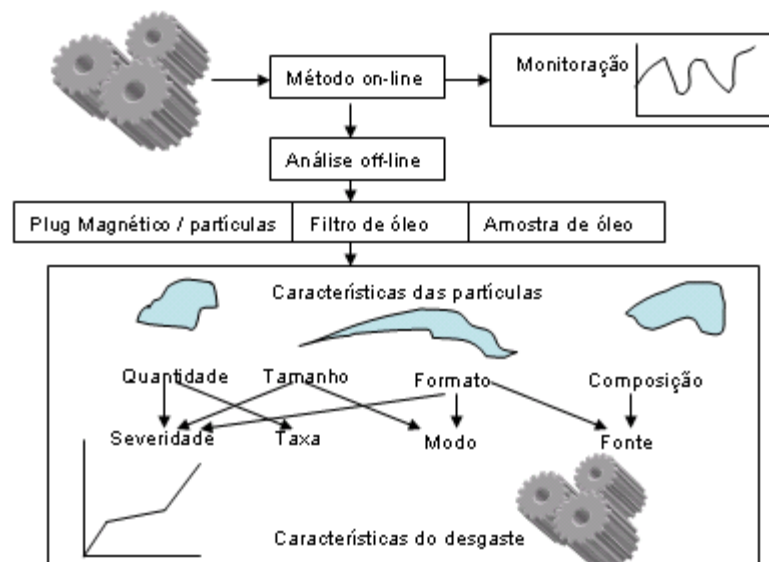


Figura 2 – Componentes básicos da análise de partículas e características do desgaste (LAGHARI, 2003)

Na análise de partículas de desgaste pela ferrografia, a primeira prioridade é a determinação da quantidade de partículas de desgaste e isso proporciona determinar a progressão da taxa do desgaste. A informação do tamanho é também muito importante e, às vezes, crítica, mas é o tipo da fonte do desgaste a informação mais importante a ser estabelecida. Entretanto, a quantidade e o tamanho podem ser estabelecidos sem a inspeção visual das partículas de desgaste, as características morfológicas podem ser determinadas pela observação delas. Essa informação é realizada de uma maneira qualitativa e mais subjetiva, sendo por isso uma atividade um pouco mais demorada.

Embora diferentes dispositivos possam executar análises de cada tipo específico, podem-se ter benefícios se o mesmo dispositivo for utilizado para determinar todas as características. A ferrografia foi o primeiro método que evidenciou a variação do tamanho das partículas visíveis por um dispositivo significativo.

2.1.3. Cromatografia gasosa

Cromatografia é uma técnica laboratorial usada para separar misturas químicas em seus componentes individuais, (JENNINGS et al., 1997). O princípio básico da cromatografia é que componentes diferentes aderem a uma superfície sólida, ou se dissolvem em um filme de líquido, formando uma graduação, (THOMSON GALE, 2005). A cromatografia pode ser comparada a uma corrida na qual os corredores têm as solas de sapatos pegajosas e umas são mais pegajosas que as outras. Os corredores que possuem as solas de sapatos mais pegajosas correm mais devagar e deixam um rastro dos seus sapatos ao longo da corrida, esse rastro depende da viscosidade dos sapatos de cada corredor. De forma semelhante, as combinações químicas diferentes aderem a uma superfície sólida ou líquida. Quando um gás ou um líquido que contém uma mistura de combinações diferentes fluem sobre uma superfície, as moléculas das combinações tendem a aderir à superfície. Se a viscosidade for baixa, uma determinada molécula vai aderir centenas ou milhares de vezes ao longo da superfície. Essa repetição realça as pequenas diferenças até mesmo na viscosidade das diversas moléculas. Depois de um determinado tempo, as combinações diferentes terão chegado a lugares diferentes ao longo da superfície e serão separadas fisicamente uma da outra, ou permitirão uma reação no final da superfície para que seja detectado cada vez que eles emergirem. Com variações desse fenômeno básico, métodos cromatográficos se tornaram um recurso adequado e versátil devido à condição de separar e analisar uma grande variedade de combinações químicas em quantidades de picogramas (10^{-12} gramas) por tonelada.

Os métodos cromatográficos compartilham certas características, embora elas se diferem em tamanho, forma, e configuração. Um fluxo de líquido ou gás, na fase móvel flui por um tubo (a coluna) e é acumulado em um material sólido poroso (a fase

estacionária). Uma amostra de mistura química é injetada para dentro de uma fase móvel no fim de uma coluna e os seus componentes individuais são separados e podem ser removidos após sair da coluna.

Uma vez que não altera a estrutura molecular dos compostos, a cromatografia pode prover um modo não destrutivo de se obterem substâncias químicas de várias fontes. Ela trabalha bem com escalas grandes e pequenas. Os processos cromatográficos são usados por cientistas que estudam microgramas de uma substância no laboratório e por indústrias químicas que separam toneladas de material. A tecnologia da cromatografia avançou rapidamente nas últimas décadas, e atualmente é possível obter separação de misturas nas quais os componentes semelhantes só diferem do modo como os átomos são orientados no espaço, ou seja, eles são isômeros dos mesmos compostos. Também é possível obter separação de algumas partes por milhões de um contaminante de uma mistura de materiais muito mais concentrados.

Referente ao desenvolvimento da cromatografia, o primeiro estudo sobre esse assunto ocorreu em 1903, e foi realizado por Mikhail Semyonovich Tsvet (1872-1919), um russo-italiano bioquímico que criou o termo cromatografia. Tsvet tinha conseguido separar uma mistura de pigmentos de planta, inclusive clorofila, em uma coluna empacotada com carbonato de cálcio finamente moído, usando éter de petróleo como a fase móvel. Como a mistura colorida passou por baixo da coluna, separou-se em faixas coloridas individuais (o termo cromatografia vem do grego, formado por *chroma*, significando cor, e *graphein*, significando escrever ou desenhar). Embora ocasionalmente usado por bioquímicos, cromatografia foi pouco utilizada até 1942, quando Martin (1910-2002) e Synge (1914-1994) desenvolveram as primeiras explicações teóricas para o processo de separação cromatográfico. Embora eles tenham recebido o Prêmio Nobel em química por esse trabalho, a cromatografia não entrou amplamente em uso até que James e Martin (1952) apresentaram um processo que descreve um modo de usar um gás em vez de um líquido como a fase móvel, e um líquido altamente viscoso cobrindo as partículas sólidas como a fase estacionária. Cromatografia gás-líquido, nomeada de cromatografia gasosa, foi um avanço enorme. A cromatografia é extensamente usada na indústria química, laboratórios de certificação ambiental procuram quantidades de vestígios de contaminantes como

PCBs (bifenil policlorado) em óleo usado, e praguicidas, como DDT (Dicloro-Difenil-Tricloroetano), em água subterrânea. As agências de proteção ambiental usam a cromatografia para testar água potável e monitorar qualidade de ar. Companhias farmacêuticas usam cromatografia para preparar quantidades grandes de materiais extremamente puros, e também para analisar as combinações purificadas para vestígios de contaminantes.

2.1.4 Análise de graxa

Segundo Herguth (2004), em seu artigo, *When to Regrease*, descreve a importância da análise da graxa nos rolamentos. Segundo o autor, noventa por cento de todos os rolamentos são lubrificados com graxa. A análise de graxa quando aplicada corretamente, pode reduzir os custos de manutenção do equipamento e evitar quebras da máquina. A graxa é utilizada para a lubrificação de sistemas onde não é possível o uso do óleo e em geral, são caixas de engrenagens, e rolamentos. Graxas são compostas de óleo, produto sólido ou semi-sólido (agente espessante) e aditivo. O agente espessante é projetado com os componentes para segurar o óleo e aditivos no lugar e lhes permitir lubrificar o sistema. Considerando só as propriedades da graxa, sem a contaminação, todas as graxas parecem ser satisfatórias no processo de lubrificação. Para se determinar os intervalos de engraxamento é necessária uma informação adequada sobre o estado de contaminação e degradação dos componentes da graxa e se foi utilizado métodos de teste adequados para avaliar esses componentes durante a vida útil do equipamento lubrificado. Uma vez estabelecidos os períodos de engraxamento, pode-se aperfeiçoar a atividade de manutenção de maneira adequada, lubrificando o equipamento em intervalos corretos.

2.2 Sistemas de quantificação e avaliação de partículas de desgaste

Neste tópico são discutidos aspectos de alguns trabalhos relacionados à classificação automática de partículas de desgaste em máquinas ou equipamentos industriais.

No País de Gales, no Centro de Tribologia da *University College of Swansea*, trabalhos relacionados à área de tribologia vêm sendo amplamente estudados. Nesse centro, projetos de desenvolvimento de sistemas classificatórios de partículas de desgaste são desenvolvidos com auxílio de computadores, como os sistemas CASPA e CAVE. No trabalho de Roylance et al. (1992) é apresentado um sistema que propõe combinar os métodos convencionais de análise de partículas de desgaste com um sistema especialista para avaliação sistemática das características morfológicas das partículas em análise. Esse sistema, descrito pelo acrônimo CASPA (*Computer-Aided Systematic Particle Analysis*) é estruturado por um microscópio óptico aliado a um sistema especialista auxiliado por um computador. Esse sistema tem por objetivo a classificação morfológica das partículas por um procedimento que aborda a descrição e o reconhecimento associado aos mecanismos, processos e modos de desgaste em equipamentos industriais monitorados. Requer a interação de um especialista para a interpretação e tomada de decisões. As partículas devem ser definidas e classificadas sistematicamente pelas características morfológicas de formato, detalhe de borda, textura de superfície, cor, tamanho e espessura ou por suas características de composição que se subdividem em materiais metálicos e materiais não metálicos.

O CASPA é um procedimento computacional sistemático que foi desenvolvido para realizar análises e gravar os principais atributos morfológicos para partículas depositadas no filtro ou lamínula plana, e é visto através de um microscópio óptico. O procedimento de análise é estruturado a partir de um menu de um programa computacional manuseado por um operador, que deve ser treinado para um uso inicial do sistema. Esse sistema, na sua versão original, foi desenvolvido no sistema operacional DOS para auxiliar o procedimento de classificação das partículas de desgaste com foco nos modos de desgaste.

Outro sistema aplicado à quantificação de partículas de desgaste e aos aspectos relacionados aos atributos morfológicos, desenvolvido na Universidade de *Wales*, é o CAVE (*Computer Aided Vision Engineering*) (ROYLANCE et al., 1993). Esse sistema consiste de uma interface gráfica de múltiplas janelas que controla um ambiente de programação e de *hardware*. O ambiente de *hardware* do CAVE consiste

de microscópio, de um sistema de visão por microcomputador e de uma placa de captura de imagens (XU; LUXMOORE, 1997).

O CAVE opera através de um processo de segmentação de imagem de partículas de desgaste, e é utilizado para distinguir o objeto de interesse (a partícula analisada) do plano de fundo (superfície sobre a qual se encontra a partícula em análise). O processo inicial de identificação das partículas de desgaste é fundamentado em um algoritmo que converte uma imagem de 256 níveis de cinza para uma imagem binária (limiarização).

No ambiente do CAVE são utilizados três processos para identificar partículas individuais para a análise de partículas de desgaste. Os processos correspondem aos processos manuais, automáticos e processo de realce das partículas.

No processo manual, uma imagem em escala cinza da partícula é transmitida do campo de visão de um microscópio óptico por meio de uma câmera CCD e armazenada na memória RAM de uma câmera de captura. A imagem é limiarizada e é realizado o processo de varredura por scanner. Partículas individuais são interativamente selecionadas utilizando um cursor. Um algoritmo rastreador de limites é usado para rastrear os limites da imagem usada. O processo de rastreamento começa a partir de um ponto de pixel pré-especificado no perímetro e armazena na memória de um computador cada ponto rastreado nas coordenadas (x, y).

No processo automático, todas as partículas de desgaste no campo das imagens são selecionadas automaticamente; este processo é adaptado às situações nas quais as partículas são bem separadas umas das outras em um substrato, sem a ocorrência de sobreposição. A imagem em escala cinza é armazenada e limiarizada para o fundo branco (plano de fundo) e preto (partículas). A imagem é escaneada e as partes pretas da região amostrada são devidamente codificadas e nomeadas. O processo de codificação identifica quais pixels estão agrupados de modo a formar uma região separada. A imagem completa do campo de visão é rotulada com valores de 1 a n pixels das partículas identificadas. As coordenadas dos perímetros são armazenadas na memória do computador, e o processo permite que as partículas sejam classificadas pelo tamanho.

Outro processo é o de realce das imagens das partículas, que é um procedimento manualmente controlado e é aplicado para manipular a análise em que ocorre a junção e sobreposição de partículas e problemas de luz incidente no sistema óptico. Nesse processo, um mecanismo de ajuste por botões de cursor é aplicado para ajustar o limiar da imagem e marcar interativamente, podendo então separar as partículas sobrepostas para uma subsequente análise individual.

É conveniente destacar que o sistema CAVE foi desenvolvido visando operar com o CASPA, através de uma interface que envolve a interação entre o analista e o sistema especialista. As rotinas do CAVE são utilizadas para quantificar a características morfológicas com relação ao tamanho, formato e detalhes de borda.

Uma versão atualizada dos sistemas CAVE/CASPA foi posteriormente implementada visando substituir o sistema operacional original “DOS” pelo sistema operacional “MS Windows”. Na atualização dos sistemas, foram introduzidos no CAVE redes neurais aplicadas à automação do processo de análise da morfologia das partículas de desgaste, com base em atributos definidos na base de dados do CASPA (XU; LUXMORE, 1997).

Em 2002, foi apresentado um trabalho intitulado *An integrated intelligence system for wear debris analysis* (PENG, 2002). Nesse sistema, as partículas de desgaste geradas pelo movimento de duas superfícies que se atritam entre si são produtos diretos da operação de uma máquina. O estudo dessas partículas pode revelar os mecanismos, modos e fases de desgaste que ocorrem no interior do equipamento. A análise de desgaste da partícula pode ser um sistema viável para estimar as condições da máquina, no entanto, as técnicas atuais para análise de partículas individuais demandam bastante tempo e são caras. O elevado custo é devido à necessidade da análise de um especialista para executar a inspeção e determinar a morfologia que caracteriza a partícula; tal limitação impediu uma aplicação mais ampla desse método. Entretanto, é necessário o desenvolvimento efetivo e confiável de técnicas que apresentam um custo eficiente para executar as análises das partículas de desgaste em uma aplicação industrial. No trabalho de Peng (2002) foi desenvolvido um pacote computacional para análise de partículas de desgaste. O pacote inclui três grandes sistemas correspondendo a um processo de análise de partículas de três dimensões, um

de identificação automática, e um responsável pela comunicação através de uma interface de fácil acesso ao usuário. O sucesso do desenvolvimento desse sistema possibilitou o crescimento da análise computadorizada, que é aplicada na monitoração das condições das máquinas e diagnósticos de falhas.

Em 2003 foi apresentado um trabalho intitulado *Recognition of texture types of wear particles* (LAGHARI, 2003). Esse trabalho evidencia que as partículas de desgaste microscópicas são produzidas em todas as máquinas que contenham partes de movimento em contato. As partículas transportadas pelo lubrificante da área de desgaste carregam informações importantes relacionadas às condições do equipamento. Essas informações são classificadas pela composição e por seis atributos morfológicos como: tamanho da partícula, formato, detalhes de borda, cor, espessura e textura da superfície. Esse artigo descreve um sistema automático para identificação das partículas de desgaste usando Redes Neurais Artificiais. O objetivo é classificar essas partículas de acordo com seus atributos morfológicos, usando-se as informações obtidas para prever o modo de desgaste em motores e máquinas. O procedimento tem como base o nível cinza com matrizes simultâneas, que são usadas para treinar a classificação de redes neurais e para distinguir entre sete tipos de padrões que são utilizados para identificar a partícula de desgaste.

Utiliza-se a técnica de visão computacional como um processo para localizar e reconhecer objetos em imagens digitais. O uso da segmentação da imagem é uma função importante da visão computadorizada e do processamento da imagem, ela fundamenta-se na divisão da imagem em seções de modo que cada uma mostre uma propriedade distinta de seus vizinhos sendo um requisito básico para classificação e identificação de objetos em um cenário. A segmentação pode ser abordada pela identificação das bordas e formas que correm através de uma imagem ou por identificação das regiões como uma textura. Esse sistema de inspeção inclui aplicativos em que informações são obtidas por meio de um microscópio.

Convencionalmente partículas de desgaste têm sido usadas considerando seu tamanho, forma e detalhamento de bordas. No entanto, a textura de superfície é um atributo que também pode ser usado para caracterizar os desgastes de partículas, a

classificação das partículas pode ser feita de acordo com seus detalhes e textura superficial, usando-se Redes Neurais Artificiais (LAGHARI, 2003).

Uma comparação visual entre as matrizes co-ocorrentes representa sete tipos de diferentes classes de textura das superfícies das partículas de desgaste, que podem ser classificadas como lisas, rugosas, estriadas, esburacadas, furadas, rachadas e serrilhadas. Com base nessa comparação, matrizes de tamanhos reduzidos são utilizadas para treinar e introduzir um classificador de redes neurais como sendo uma única camada oculta para discutir entre as várias classes de textura. Experimentos são executados variando o número de nós da camada oculta das redes neurais. A classificação possui a precisão de 94,6%.

Na definição das partículas de desgaste, esse termo é associado ao campo da tribologia que é o estudo do desgaste, fricção e lubrificação (JOST, 1990). Usando a técnica proposta para monitoração num estágio inicial, podem ser evitadas falhas de equipamentos que podem ser caras e provocar uma perda de tempo e de produção. Com relação à observação e separação das partículas, utiliza-se a ferrografia. As partículas geradas por diferentes mecanismos de desgaste têm características identificadas em um mecanismo específico de desgaste. Alguns exemplos são: o desgaste provocado pela fricção, *Rubbing wear*, (Figura 3) gera partículas de desgaste normais como resultados de um atrito normal de uma máquina. O desgaste produzido por essas partículas é considerado normal e é causado por partículas que possuem a superfície de textura lisa. Essas partículas são encontradas em lubrificantes na maioria das máquinas na forma de plaquetas, podendo variar de 0,5 a 15 micrômetros de comprimento (LAGHARI, 2003).

Desgaste de abrasão, *Cutting wear*, (Figura 4), ou partículas de desgaste abrasivo, é gerado do desgaste de uma superfície penetrando uma na outra. Ela toma forma de espirais semelhante a longos filamentos metálicos retorcidos como os produzidos em tornos mecânicos. O tamanho típico de uma partícula de desgaste por abrasão varia de dois a cinco microns de espessura por 25-200 μm de comprimento. A concentração de tais partículas indica o modo de desgaste severo e eminente falha da máquina. Essa partícula não tem uma textura de superfície particular, exceto que as espirais são lisas e brilhantes.

Partículas de desgaste por deslizamento severo, *Severe sliding*, (Figura 5) são formadas quando a fadiga da superfície de desgaste se torna excessiva pela falha na lubrificação, ou pelo excesso de carga ou velocidade. Essas partículas de desgaste variam em tamanho a partir de quinze microns. As partículas geradas por deslizamento têm os detalhes muito distintos de formas estriadas. A concentração de tais partículas, que apresentam mais marcas de estrias proeminentes, indica o modo de desgaste severo.

Partículas de desgaste por fadiga, *Fatigue*, (Figura 6) são associadas a fadigas em esferas de rolamentos. São partículas de metais muito finas, geralmente entre vinte e cinquenta microns, podendo ultrapassar este tamanho dependendo do nível de desgaste. São geradas pela passagem das partículas de desgaste através do contato das esferas, provavelmente depois de aderir ao elemento rolante. Seu detalhe de superfície é reconhecido por freqüente ocorrência de furos na partícula.

Combinados rolante e deslizante, *rolling and sliding*, é um regime de desgaste anormal de fadiga como os associados a engrenagens. Essa partícula geralmente tem uma superfície lisa e de forma desordenada. No caso do desgaste em engrenagens, todas as partículas apresentam a tendência de uma superfície áspera e circunferência serrilhada. Pesquisas realizadas na área de partículas de desgaste sugerem 29 tipos diferentes de partículas (ALBIDEWI, 1993).

As Figuras 3, 4 e 5 são de cortesia da ¹TRIBOLAB e ilustram as partículas de desgaste de fontes específicas.

A Figura 6 foi extraída do atlas da ²Lubrosoft.

¹ Figuras 2, 3 e 4 foram obtidas na página eletrônica www.tribolab.com.br, em março/2008.

² Wear Particle Atlas, CD ROM, Lubrosoft, 1998.



Figura 3 – Desgaste por fricção (Fonte Tribolab)

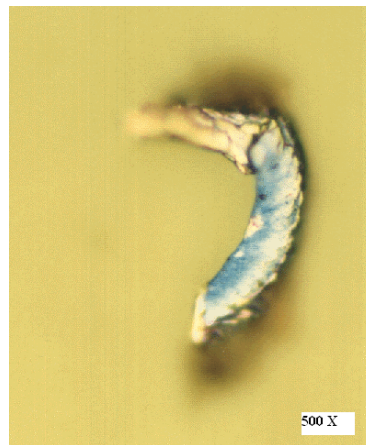


Figura 4 - Desgaste por abrasão (Fonte Tribolab)

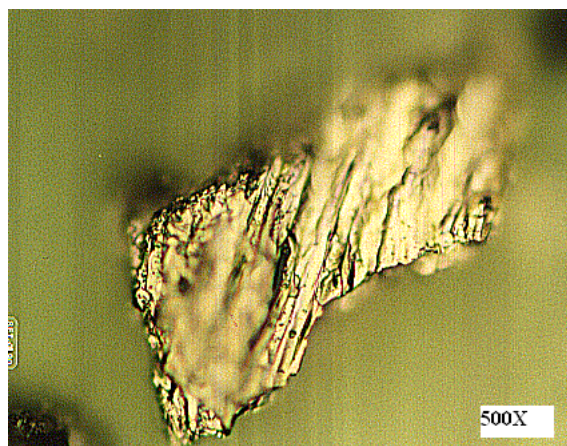


Figura 5 – Deslizamento severo (Fonte Tribolab)

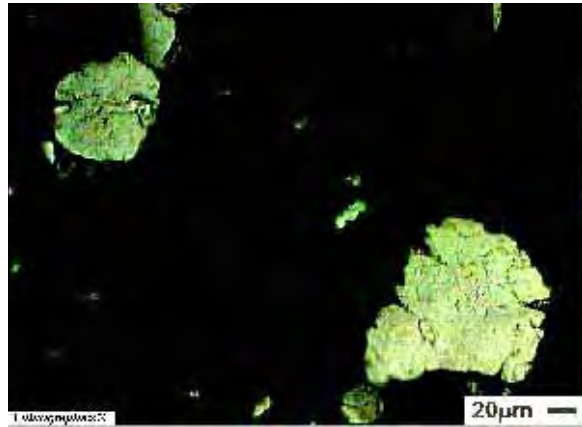


Figura 6 – Desgaste por fadiga (Lubrosoft, 1998)

A relação entre as propriedades das partículas de desgaste e as condições em que elas foram formadas permite a classificação das partículas em termos de números ou tipos. As características das partículas podem ser divididas em termos do seu tamanho, quantidade, morfologia e composição. Por meio desses quatro atributos, os tribologistas sabem que a quantidade de partículas indica a severidade e o grau no qual eles estão sendo gerados. A composição indica a fonte geradora das partículas. A morfologia indica a fonte tipo e proporção e o tamanho da partícula mostra a porcentagem do tipo e severidade do desgaste do equipamento. A Figura 7 ilustra o diagrama de blocos da relação entre as características das partículas e o modo de desgaste.

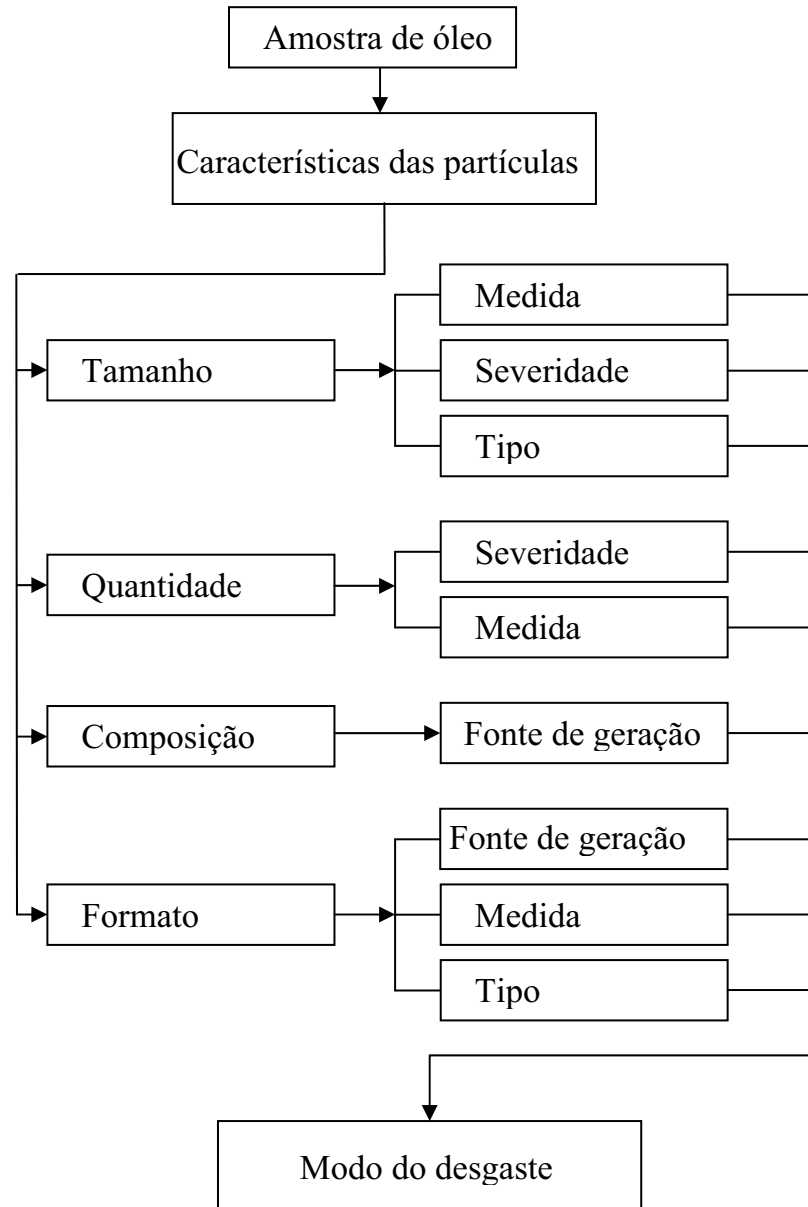


Figura 7 – Diagrama de blocos da relação entre características das partículas e o modo de desgaste

As partículas de desgaste podem ser classificadas de acordo com seus atributos morfológicos e de composição. Os atributos de composição indicam se as partículas obtidas são metálicas, então ferrosas (magnéticas), ou não metálicas, provenientes de metais não ferrosos. A análise morfológica é um procedimento *off-line* conduzido pelo uso do microscópio.

Especialistas no campo caracterizam as partículas de acordo com seus atributos morfológicos de tamanho, formato, detalhe de borda, cor, espessura e textura, e as

relacionam com os modos de desgaste conhecidos. A análise fornece informação específica sobre a condição das superfícies em movimento nas quais elas são produzidas, o mecanismo de sua formação e o modo do desgaste. Esses, se diagnosticados corretamente, podem prever o modo de falha do equipamento causado pelo desgaste.

Na pesquisa de Laghari (2003), o sistema de hardware utilizado consiste de um microscópio óptico que facilita a visão através de luz transmitida ou luz incidente. As imagens das partículas são transmitidas do campo de visão do microscópio através de uma câmera colorida com um CCD (dispositivo de carga acoplado), para um computador que contém uma placa mãe, da marca Transtech (TRANSTECH, 1989), com espaço para conectar 10 módulos de *transputer*, que é um microprocessador para processamento paralelo (KOZA; ANDRE, 1995). Na placa mãe é acoplada uma placa de captura de imagens com 1MB de memória de armazenamento e 4MB de memória de programação. Um processador gráfico mostra a imagem capturada pela câmera.

O sistema é capaz de processar 25 imagens de 512X512 pixels por segundo. A linguagem utilizada na programação do sistema do *transputer* é a “Parallel C” que foi utilizada para escrever a seqüência de programas (SARATCHANDRAN et al., 1996, p.22). O tratamento de processamento paralelo em sistemas de *transputer* é fundamentado na comunicação de processos seqüenciais. Nesse modelo, um sistema computacional ativa os processos seqüenciais de concorrência e por meio dos canais permite uma comunicação bilateral. O uso do processamento paralelo é bastante importante para o reconhecimento das partículas com o uso dos atributos de morfologia mencionados nesse trabalho, e também é utilizado para a análise do reconhecimento de textura das partículas de desgaste.

Por meio de procedimentos desenvolvidos para fornecer um conjunto de dados que representam os atributos morfológicos de forma, detalhe de borda, tamanho e textura. Dois tipos de análise são considerados, um trata da classificação das partículas pelo perfil que é relacionado ao tamanho, à forma e ao detalhe de borda. O outro é análise de textura, que classifica as partículas de acordo com sua textura superficial. Segundo Thomas et al. (1991) a análise do perfil é realizada no perímetro e produz dados sob a forma de partículas de tamanho, com dimensões variáveis, alongamento,

circularidade, análise do detalhe de borda na forma de desvio-padrão, obliquidade e curtose.

A análise de textura das partículas de desgaste é um procedimento desenvolvido para ser executada com um programa computacional designado por Laghari (2003) de “WPTA” (*Wear Particle Texture Analysis*). O “WPTA” é uma janela múltipla, hierárquica de interface gráfica interativa que controla o ambiente do *software*. No problema de classificação de textura, uma amostra de textura específica é atribuída a um número determinado de k possíveis classes. A decisão é tomada por um classificador, que, normalmente, é alimentado por dados coletados a partir de medições efetuadas ao longo de toda a amostra. Uma abordagem caracterizada por um conjunto de recursos estatísticos é usada para descrever a textura. Uma vez que esse conjunto de características é estabelecido, um método de reconhecimento de padrões é utilizado, a fim de realizar a classificação. Esse método é fundamentado nas matrizes de co-ocorrências, que descreve estatísticas de segunda ordem da textura, utilizado para o cálculo de funcionalidades, que captura algumas características de texturas tais como a homogeneidade, rugosidade e periodicidade.

Em uma imagem digital, em níveis de cinza, o pixel é a menor divisão que a caracteriza. Por isso, a distribuição dos níveis de cinza dos pixels pode ser descrita por estatísticas de primeira ordem, como média, variância, desvio padrão, obliquidade; ou estatísticas de segunda ordem, que descreve a probabilidade de dois pixels terem um determinado nível de cinza em uma posição espacial específica. A matriz de co-ocorrência é a medição da quantidade de variações de intensidade dos pixels que ocorrem em uma imagem. Ela descreve a textura de uma imagem por meio de características das ocorrências de cada nível de cinza.

As características de textura das partículas são importantes para a classificação dos atributos morfológicos dessas e a classificação da textura é fundamental no auxílio do reconhecimento das partículas de desgaste.

Segundo Stachowiak (2005), em seu trabalho intitulado *A comparison of texture feature extraction methods for machine condition monitoring and failure analysis*, evidencia que o diagnóstico de desgaste e dano na superfície é um importante item na análise de falha de máquinas e condições de monitoramento. De todas as abordagens

usadas, a classificação da imagem é fundamentada nos parâmetros de atributos que têm freqüentemente provado ser particularmente útil. A classificação apurada pode ser limitada pelo fato de que os parâmetros de detalhes variam com escala e orientação. Portanto, é essencial determinar quais parâmetros de detalhes não variam na escala e na rotação.

Uma comparação de seis métodos é conduzida para encontrar o método que fornece os resultados mais consistentes de uma grande gama de tamanhos de imagem em diferentes direções. Os métodos analisados são matrizes co-ocorrentes, transformadas de Wavelet, a combinação dos dois métodos, filtro de Gabor, campo circular randomizado de Gaussian Markov e Padrão binário local. Para a comparação, quatro grupos de dados com imagens com diferentes tamanhos e direções são usados, por exemplo, as texturas de Brodatz, imagens fractais isotrópicas artificialmente geradas e imagens de superfícies de aço jateadas de areia conhecidas como imagens de Talysurf. O desempenho de cada método é avaliado em cada conjunto de dados, usando os classificadores “k-nearest neighbours” e densidade normal baseada linearmente. Os resultados apresentados por Stachowiak mostraram que os métodos de extração de detalhes combinados produziram os resultados mais exatos e consistentes para cada grupo de conjuntos e parece ser adequado para a classificação de superfícies tribológicas.

Sperring e Nowell (2005) publicaram um artigo na revista *Tribology International* intitulado *SYCLOPS — a qualitative debris classification system developed for RAF early failure detection centres*. A análise do material das partículas de desgaste que se originam da lubrificação dos sistemas das aeronaves é um dos principais suportes dos programas de monitoramento da RAF. Embora esse seja um recurso efetivo para verificar a condição do equipamento, ele está fundamentado na experiência do tribologista. Esse trabalho resume o desenvolvimento do SYCLOPS, que é um programa computacional para a caracterização das partículas de desgaste utilizado para desenvolver os procedimentos de análise das partículas de desgaste (WDA). O WDA é um método não destrutivo para a inspeção de óleos lubrificantes industriais.

Os modos de desgaste dos equipamentos podem ser determinados pelas características das partículas, permitindo a predição do comportamento da máquina. Muitas vezes podem ser tomadas medidas para corrigir o desgaste anormal, entretanto a ação corretiva no equipamento pode ser onerosa e provocar danos secundários.

A análise de amostras de partículas de desgaste em motores de aeronaves e sistemas de lubrificação de caixas de transmissão é uma parte importante do programa do sistema de manutenção de análise de falha conduzido pelo centro de detecção de falha precoce da RAF (EFDCs). Nesse centro, a taxa de produção de partículas de desgaste é rotineiramente controlada por meio de um sensor indutivo para detecção de detritos ferrosos, e se utiliza a microscopia óptica para analisar a dimensão e as características morfológicas das partículas. A deterioração, que ocorrem nos componentes críticos devido ao desgaste de rolamentos, engrenagens e eixos, é monitorada em relação à gravidade e à taxa de deterioração, aliada ao tipo de desgaste e da sua localização dentro do sistema de lubrificação. O sistema de classificação de partículas de desgaste depende do conhecimento dos processos de desgaste e falha, e como esses processos geram partículas com tamanhos, morfologias e textura de superfícies específicas.

As diferentes condições de operações em componentes lubrificados aumentam os mecanismos de desgaste que produzem uma variedade de tipos de desgaste característicos. Embora os mecanismos de desgaste sejam os mesmos, cada plataforma possui padrões de desgaste característicos que devem ser utilizados para indicar o tipo de falha do componente específico.

Um modelo computacional robusto foi utilizado para realizar a classificação das partículas com precisão e a chave para isso foram os dados de entrada. Esses dados foram coletados a partir de um extensivo programa de testes experimentais em laboratório e da análise detalhada do desgaste de sistemas de lubrificação em aeronaves. As características das partículas de desgaste são associadas aos diferentes tipos e condições do desgaste ativo que, sistematicamente caracterizadas, produzem um compreensivo banco de dados.

Para o desenvolvimento do SYCLOPS, inicialmente, foi compilado um sistema de classificação genérico e desenvolvida uma plataforma de *software* flexível e modular que permite adicionar os tipos de desgaste de componentes específicos.

Para a informação visual, verificou-se que os módulos específicos deveriam conter a informação do material e permitir ao usuário combinar a origem de um desgaste específico com os componentes que provocaram o desgaste. Identificou-se a importância da compreensão dos mecanismos envolvidos na produção de tipos específicos de desgaste e como eles relatam as condições dentro de um motor ou caixa de redução de engrenagens. Isso implicou na produção de partículas de desgaste sob condições controladas e na simulação de uma variedade de sistemas em ambientes industriais onde se utiliza óleo como lubrificante.

É fundamental a relação entre as partículas de desgaste individuais e o modo pelo qual elas foram originadas. Do mesmo modo, a relação entre quais atributos morfológicos distingue as partículas de desgaste umas das outras em relação aos diferentes modos de desgaste.

O principal critério escolhido para os testes de laboratório foram materiais, lubrificante, carga e velocidade.

Embora seja reconhecido que outros fatores podem influenciar na geração do desgaste, percebeu-se que a limitação do número de variáveis habilita a formação de um programa de testes mais controlado.

Foi desenvolvida uma matriz de testes para simular as condições operacionais, usando-se uma variedade de lubrificantes e aços de diferentes durezas e diferente acabamento superficial. A intercalação dos dados obtidos desses testes e a combinação com a base de dados de imagens de alta resolução de partículas de desgaste foram usadas como base para o desenvolvimento de um sistema de classificação de partículas de desgaste.

O sistema de classificação foi desenvolvido com a premissa de que há quatro tipos primários de partículas de desgaste gerados em motores e sistemas de transmissão, os quais são: desgaste provocado por fricção, deslizamento severo, fadiga e abrasão.

Na fricção as partículas são menores que 20µm, com poucas características de superfície e baixo alongamento (medida relativa ao formato), que é o resultado do desgaste abrasivo da interação de contato entre as superfícies.

No deslizamento severo as partículas exibem estrias na superfície devido às condições pelas quais são formadas. A superfície dessa partícula pode ser áspera e de cor escura devido à exposição a altas temperaturas.

Na fadiga as partículas são geradas como consequência direta de um ciclo de carga, causando micro poros e fendas na superfície.

A abrasão ou desgaste abrasivo é formado pela fricção de duas superfícies de diferentes durezas quando a de maior dureza atua como uma ferramenta de corte sobre a de menor dureza. Pode ser o resultado do arraste de um corpo estranho, como areia ou de óxido de alumínio, ou a partir do efeito de têmpera provocado pelo trabalho.

O SYCLOPS foi desenvolvido para fornecer uma fonte consistente de material em forma de imagens e informações técnicas que relatam as partículas de desgaste. Para encontrar esses recursos foram definidos três modos de operação, o classificador, o tutorial e a galeria.

O classificador assiste o operador na classificação das partículas de desgaste. Ao desenvolver o sistema de classificação, previa-se que o usuário fosse capaz de examinar as partículas de desgaste utilizando um microscópio comum e o SYCLOPS para classificar as características das partículas, por meio da comparação dessas com uma seleção de imagens previamente padronizadas.

Por exemplo, pela definição do formato das partículas como regular, irregular ou alongada, o usuário pode determinar qual imagem corresponde ao formato da partícula comparada. Depois que o usuário tenha definido todas as características requeridas (forma, tamanho, borda, cor, superfície, esburacadas, estrias e rachaduras), a classificação as combina com as imagens de diferentes tipos de partículas de desgaste contidas em um banco de dados. O operador pode, então, relacionar as partículas de desgaste examinadas com os modos de desgaste, permitindo assim uma avaliação objetiva da resistência de um componente.

O tutorial habilita o usuário a preparar a classificação das partículas de desgaste. Os usuários são providos com imagens de partículas de desgaste selecionados

aleatoriamente a partir de uma base de dados de artigos com classificação prévia. A galeria é um modo que prevê um fácil acesso à base de dados comum de imagens de partículas de desgaste com informações relacionadas às características específicas ou modos de falha. O *software* SYCLOPS permite a classificação de desgaste e é um programa que não depende de um sistema especial de captura de imagens diferente do padrão de um microscópio binocular. O usuário categoriza as partículas de desgastes individuais comparando o que ele vê no microscópio com uma série de imagens padronizadas em uma tela de um computador e o programa exibe o provável mecanismo de desgaste.

Um método de visualização de imagens consiste de um sistema de iluminação da amostra, um aparato óptico para formar e ampliar a imagem, um sistema de câmera para capturar a imagem, que possui interface com um computador. Esses sistemas são fortemente interdependentes e devem ser cuidadosamente selecionados e utilizados para obter o melhor e mais consistente desempenho. A captura das imagens de alta resolução, obtidas de partículas de desgaste, deve ser de uma forma simples, confiável e consistente, o que é fundamental para uma boa classificação morfológica.

Existem fatores que comprometem a avaliação visual e podem tornar o *software* de análise de imagem ineficaz entre eles. Os principais são as condições inadequadas de iluminação, a má qualidade do microscópio óptico, a má escolha de ampliação ou a resolução indevida da câmera.

O SYCLOPS concentra-se na análise individual de partículas de desgaste que são retiradas de amostras maiores, coletadas por *plugs* ou filtros magnéticos, localizados em sistemas de lubrificação de motores ou caixa de engrenagens. Reconhece-se que a amostra completa retém valiosa informação relativa à saúde do sistema. Tais características como o número total de partículas, distribuição do tamanho e forma, razão do modo de desgaste ativo, são identificadas na amostra e fornecem valiosas informações para um sistema de diagnóstico. As primeiras investigações em sistemas de classificação semi-automáticos de partículas de desgaste fundamentaram o desenvolvimento do *software* para a classificação do desgaste denominado SYCLOPS.

Estudos laboratoriais em mecanismos para a geração de específicas partículas de desgaste levaram ao desenvolvimento de uma metodologia para a classificação a qual fundamentou este trabalho.

Outro trabalho é o de Stachowiak e Podsiadlo (2006), intitulado *Towards the development of an automated wear particle classification system*, o qual relata que os métodos de análise manuais ou semi-automáticos requerem mais tempo para o diagnóstico, que é realizado por técnicos capacitados.

Realizaram-se esforços recentes para o desenvolvimento de um sistema automatizado de classificação de partículas de desgaste. Essa não foi uma tarefa simples, pois existem três grandes problemas para serem resolvidos, antes que o sistema possa encontrar uma aplicação industrial prática.

O primeiro problema é a criação de uma extensiva e detalhada base de dados de morfologias de partículas de desgaste geradas sob diferentes condições de operação e com diferentes pares de materiais com superfícies que se atritam entre si.

O segundo problema é criar o desenvolvimento de um confiável e preciso programa computacional para a descrição da morfologia da partícula de desgaste em três dimensões e, finalmente, o desenvolvimento de um sistema de classificação de partícula de desgaste.

Como o sistema deve ser robusto e confiável, isso envolve a criação, seleção e testes de classificadores apropriados. Espera-se que quando o sistema se tornar totalmente operacional, seja eliminada a necessidade de um especialista e que ele possa prover um preciso e confiável diagnóstico do estado de uso de uma máquina.

O trabalho de Stachowiak e Podsiadlo (2006) mostra como esses problemas são tratados e como são escolhidas as possíveis soluções. Também são apresentados os avanços recentes no desenvolvimento de um sistema automático de classificação de partículas de desgaste para a aplicação no monitoramento das condições de máquinas. A análise das partículas de desgaste já é utilizada há décadas na monitoração das condições de uma máquina. A análise morfológica de partículas, porém, apesar de suas vantagens óbvias, não é amplamente utilizada. O principal problema é que, na avaliação morfológica, a classificação da partícula e o resultado da avaliação são feitos por um especialista e isso requer tempo, custo elevado e nem sempre há um resultado

confiável e objetivo, considerando que a análise morfológica das partículas de desgaste é usada apenas em casos especiais.

Atualmente foram realizados avanços em computação, tanto em *hardware* como em *softwares*. Avanços que eram impossíveis há duas décadas e agora é alcançado.

Foram realizados muitos esforços em pesquisas focados no desenvolvimento de sistemas automáticos para a caracterização e a classificação de partículas de desgaste. O progresso é gradual e ainda existem inúmeros problemas para serem resolvidos primeiro, antes do sistema se tornar operacional, e esses problemas não são triviais.

Primeiramente, deve ser criado um banco de dados detalhados de partículas de desgaste gerados de diferentes condições de operação e de diferentes pares de materiais que se atritam entre si.

As imagens geradas dessas partículas sobre diferentes condições devem ser coletadas e precisam ser criados métodos confiáveis que permitam uma precisa descrição em 3D da morfologia das partículas de desgaste, bem como devem ser considerados que as superfícies das partículas são geradas por condições apropriadas de desgaste do material e das condições do meio em que são gerados. Finalmente, é imprescindível o desenvolvimento de um confiável sistema de classificação de partículas de desgaste, isso envolve o desenvolvimento de uma seleção de classificadores apropriados que possibilite ao sistema ser confiável, preciso e robusto.

Foram conduzidas experiências em vários tribômetros sob diferentes condições de operação e simulados mecanismos de desgaste típicos como: abrasão, adesão, fadiga, etc.

As partículas de desgaste exibindo diferentes formatos foram coletadas através da ferrografia. Imagens de alta resolução foram obtidas dessas partículas pelo uso do microscópio eletrônico de varredura (SEM). Para partículas menores foi utilizado o campo de ensaio do SEM.

As imagens coletadas sofreram uma pré-qualificação, usando-se um especialista para agrupar essas imagens em diferentes classes de acordo com um mecanismo específico de desgaste. Novas partículas, depois de terem suas imagens digitalizadas, foram incluídas em um banco de dados de partículas de desgaste.

Para se caracterizar e classificar as imagens, primeiramente foi capturada a topografia da superfície das imagens pelo uso do SEM. Tanto a resolução horizontal quanto a vertical dessas imagens é suficiente para o processamento futuro da imagem. Essas imagens em três dimensões (3D) são convertidas em imagens de duas dimensões (2D), nas quais os dados da elevação da partícula em 3D são codificados em um pixel de valor mais brilhante. O pixel de valor mais brilhante “255” representa o ponto de elevação mais alto da superfície da partícula, enquanto o mais escuro é o pixel de valor “0” que representa a mais baixa elevação do ponto da superfície da partícula. As Figura 8 e 9 ilustram as imagens das partículas em 3D e 2D.

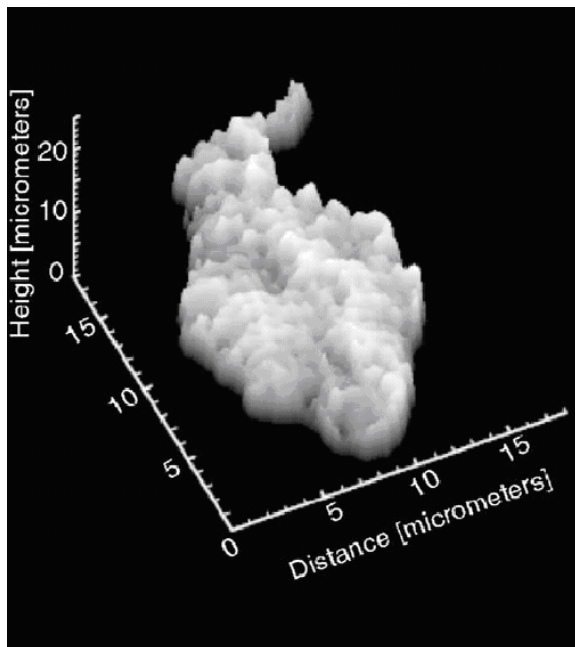


Figura 8 – Imagem da partícula em 3D
(STACHOWIAK; PODSIADLO, 2006)

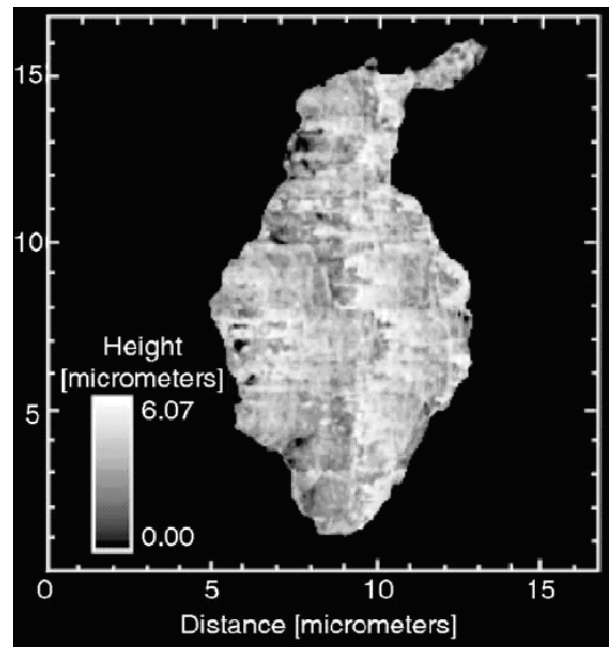


Figura 9 – Imagem da partícula em 2D
(STACHOWIAK; PODSIADLO, 2006)

As topografias das superfícies das partículas de desgaste são divididas em partes isotrópicas, enquanto os dados das superfícies das partículas exibem características não estacionárias, ou seja, características sobrepostas em diferentes posições da superfície.

Para o desenvolvimento da unificação do registro de dados da superfície das partículas deve-se levar em conta tanto as partes isotrópicas quanto as características não estacionárias da topografia da superfície das partículas de desgaste.

O problema é que a maioria dos métodos utilizados trabalha bem com superfícies isotrópicas como as superfícies que exibem a mesma característica estatística em todas as direções. Entretanto muitas superfícies não são isotrópicas e exibem diferentes padrões ao longo de várias direções.

Para resolver esses problemas foi considerada a aplicação dos coeficientes de orientação de Hurst (PODSIADLO; STACHOWIAK, 1998).

Esses coeficientes são calculados ao longo do contorno da superfície originada de um ponto central localizada sobre a superfície das partículas. Quando é desenhado apresenta o formato de uma rosa, pois possui um ponto central definido e o contorno possui o formato de pétalas de rosa. Quando é gerado o “desenho de rosa” ele pode ser aproximado por um círculo e então a topografia da superfície pode ser classificada como isotrópica. Por outro lado, se uma elipse for ajustada ao invés de um círculo, a superfície poderá ser classificada como anisotrópica.

Essa solução não se mostrou eficiente devido o envolvimento de muitos parâmetros e isto a tornou inviável na classificação automática das partículas.

Outra solução envolve a aplicação de fractais. Essa teoria mostra que a maioria das estruturas complexas observadas na natureza pode ser descrita e modelada pela combinação de regras matemáticas simples. Pode ser notada que a variedade das imagens da superfície exhibe interessantes atributos, como a auto-reprodução, que é a capacidade de uma parte da imagem poder ser transformada em outra parte da imagem de maneira a se auto-reproduzir.

A informação completa de uma topografia de superfície 3D pode ser resumida em um conjunto de transformadas matemáticas. O princípio fundamental dessa operação é que uma parte grande da imagem pode se transformar em uma parte pequena usando transformadas matemáticas que possuem informações de escala, translação e rotação, utilizadas para realizar essa operação.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As características de distribuição de formato são fatores importantes utilizados no reconhecimento de partículas de desgaste (RAADNUI, 2005), desde que apresentem uma estreita relação com os modos de desgaste e condições das máquinas.

3.1 Recursos para classificação do formato de partículas de desgaste

As características de formato analisadas nesse trabalho são classificadas em três tipos: arredondamento, alongamento e área.

O fator de arredondamento, Equação 1, é definido como a razão entre o perímetro quadrado e a área contida no formato desenhado (THOMAS; DAVIES; LUXMORE, 1991). Esse parâmetro é normalmente escalonado para proporcionar um valor mínimo de unidade ao círculo e valores maiores para formas irregulares limítrofes.

$$\text{Arredondamento} = \text{Perímetro}^2 / (4 \pi \times \text{área}) \quad (1)$$

A circularidade, Equação 2 é o inverso do arredondamento (Pratt, 2007). Quando um objeto é totalmente circular o arredondamento é igual a circularidade e possui o valor de um. Quando o objeto possui a forma elíptica a circularidade possui o valor menor que um.

$$\text{Circularidade} = (4\pi \times \text{area}) / \text{Perímetro}^2 \quad (2)$$

Outra técnica utilizada para identificar a forma de partículas de desgaste é o alongamento, o qual não é um fator adimensional definido como uma proporção entre a largura e a altura de uma imagem digital (Thomas; Davies; Luxmore, 1991).

Tomando-se, por exemplo, uma figura geométrica em formato de elipse, na qual seu maior eixo é dado por $|\alpha_1| + |\alpha_{-1}|$ e o menor eixo é dado por $||\alpha_1| - |\alpha_{-1}||$, o fator de alongamento é dado pela Equação 3.

$$\text{Alongamento} = \frac{|\alpha_1| + |\alpha_{-1}|}{||\alpha_1| - |\alpha_{-1}||} \quad (3)$$

O programa ⁴ImageJ fornece suporte a outros parâmetros que também podem ser utilizados para análise das partículas de desgaste, por exemplo: área, centróide, centro de massa, perímetro, retângulo circunscrito, elipse ajustada, circularidade, diâmetro de Feret. Relacionado aos níveis de cinza dos pixels da imagem tem-se: a média, o desvio padrão, densidade integrada, assimetria, curtose, modal e os valores máximo e mínimo.

A área da partícula amostrada é expressa em pixels ao quadrado. Pode-se transformar a área em uma unidade calibrada como milímetros ao quadrado ou microns ao quadrado.

A média $\bar{x}$ dos valores de cinza da partícula refere-se à média dos valores de cinza dos pixels que formam a imagem digitalizada, $\bar{x}$ é a soma de todos os valores de tons de cinza de todos os pixels da amostra dividido pelo número de pixels. Para imagens coloridas tipo RGB (vermelho, verde, azul), a média é calculada convertendo cada pixel colorido para tons de cinza usando a equação 4, ou equação 5 quando se considera que cada cor tem a mesma proporção de tonalidade.

$$\text{Cinza} = 0,299 \times \text{vermelho} + 0,587 \text{verde} + 0,114 \text{azul} \quad (4)$$

$$\text{Cinza} = \frac{(\text{vermelho} + \text{verde} + \text{azul})}{3} \quad (5)$$

O desvio padrão (σ) de tons de cinza é usado para gerar o valor médio da tonalidade da amostra selecionada.

O modal (Mo) de tons de cinza em uma imagem selecionada corresponde ao valor do maior pico obtido em um histograma.

Mínimo e máximo tom de cinza em uma seleção corresponde ao menor e maior valor de tons de cinza em uma imagem selecionada.

⁴ Disponível em: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>

O centróide é o ponto central de uma imagem selecionada, é a média das coordenadas x e y de todos os pixels de uma imagem selecionada.

Centro de massa é a média balanceada das coordenadas x e y de todos os pixels em uma imagem ou seleção. O centro de massa é expresso pelas coordenadas XM e YM que indicam o ponto onde fica localizado o centro de massa da imagem em questão.

O perímetro é o comprimento da borda externa de uma imagem selecionada. A Figura 10 ilustra o perímetro de uma imagem (em amarelo) de 10x10 pixels na escala de 0,2 pixel/mm.

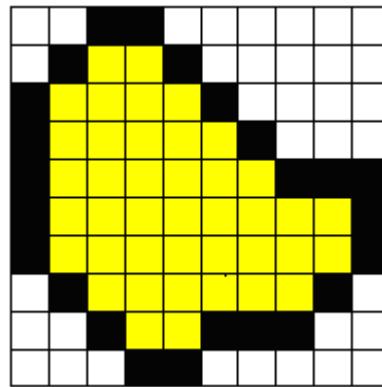


Figura 10 – Perímetro

Retângulo limite, Figura 11, é o menor retângulo que inclui a figura. A direção BX e BY se refere, respectivamente, a largura e altura, em que BX e BY são as coordenadas a partir do canto superior esquerdo do retângulo.

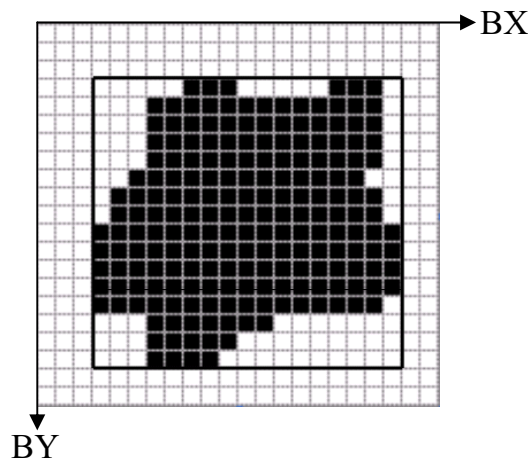


Figura 11 – Retângulo limite

Elipse circunscrita é a elipse que se ajusta na figura selecionada. Para obtê-la utiliza-se das direções maior e menor ângulo. A maior e menor são o eixo primário e o eixo secundário da melhor elipse que se encaixa na figura. O ângulo é o que se forma entre o eixo primário e a linha paralela ao eixo da imagem. A Figura 12 ilustra a elipse circunscrita.

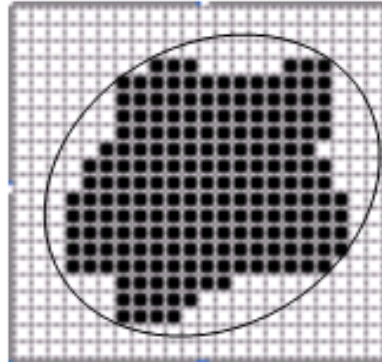


Figura 12 – Elipse circunscrita

Diâmetro de Feret é a maior distância entre dois pontos da imagem selecionada. Essa distância caracteriza o tamanho da partícula.

Densidade Integrada é o produto da área e a média dos tons de cinza da imagem.

Mediana (Md) é o valor médio de pixels na imagem. Essa medida localiza o centro de distribuição de dados de uma partícula.

Obliquidade (Skew) ou *Skewness* é a medida que possibilita analisar uma distribuição de acordo com as relações entre a média, a moda e a mediana. Seu valor pode ser calculado, utilizando-se do 1º coeficiente de Pearson. As equações 6, 7 e 8 se referem ao cálculo de obliquidade.

A Equação 6 traz a obliquidade para dados populacionais,

$$\text{Skew} = (\bar{x} - Mo) / \sigma \quad (6)$$

A Equação 7 traz a obliquidade para dados amostrais e a Equação 8 traz a obliquidade para distribuição simétrica.

$$\text{Skew} = (\bar{x} - Mo) / S \quad (7)$$

$$\text{Skew} = 0 \quad (8)$$

Quando:

Skew “> 0” implica uma distribuição assimétrica positiva;

Skew “< 0” distribuição assimétrica negativa.; Skew “= 0” distribuição simétrica.

As figuras 13, 14, 15 ilustram as distribuições com essa característica.

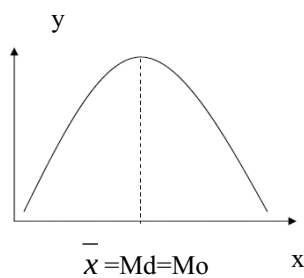


Figura 13 – Distribuição
simétrica

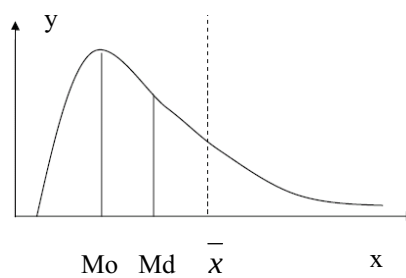


Figura 14 – Assimetria
positiva

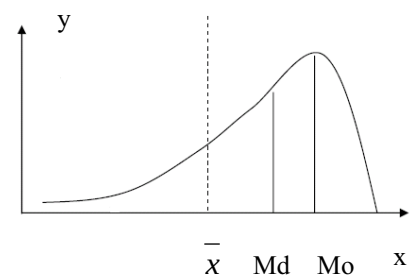


Figura 15 – Assimetria
negativa

Curtose é o grau de achatamento da distribuição ou o quanto uma curva de frequência será achatada em relação a uma curva normal de referência. As curvas podem ser Mesocúrtica, curva normal ilustrada na Figura 16; Platicúrtica é uma achatada, ilustrada na figura 17 e Leptocúrtica que é alongada e ilustrada na Figura 18.

A curtose é uma medida estatística que pode ser representada por uma curva de distribuição, a qual se refere à concentração de pixels na amostra adquirida.



Figura 16 – Mesocúrtica



Figura 17 – Platicúrtica

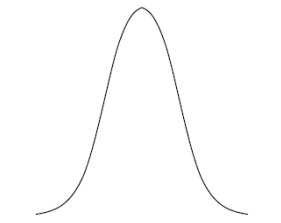


Figura 18 – Leptocúrtica

4 SISTEMA DE ANÁLISE DE PARTÍCULAS DE DESGASTE

O sistema desenvolvido consiste de um analisador de partículas de desgaste em óleos lubrificantes que utiliza recursos de microscopia e processamento de imagens. Este sistema pode ser utilizado no diagnóstico e avaliação do mecanismo de desgaste de equipamentos industriais por meio da contagem, distribuição e análise morfológica de partículas de desgaste em óleos lubrificantes. O sistema foi projetado para efetuar a contagem e classificação de partículas de acordo com os critérios da norma ISO 4406:1999. No processo de análise morfológica as características geométricas das partículas são obtidas com recursos do ImageJ e são analisadas por um programa desenvolvido que aplica redes neurais artificiais na comparação dessas características aos padrões de mecanismos de falha estabelecidos no *Wear Particle Atlas* comercializado pela empresa Lubrosoft.

4.1 Arquitetura proposta

O sistema de contagem e classificação de partículas de desgaste foi estruturado nos módulos de filtragem, de aquisição de imagens por microscopia, de processamento de imagens e de análise morfológica. Na Figura 19 é ilustrado o diagrama de blocos da arquitetura proposta.

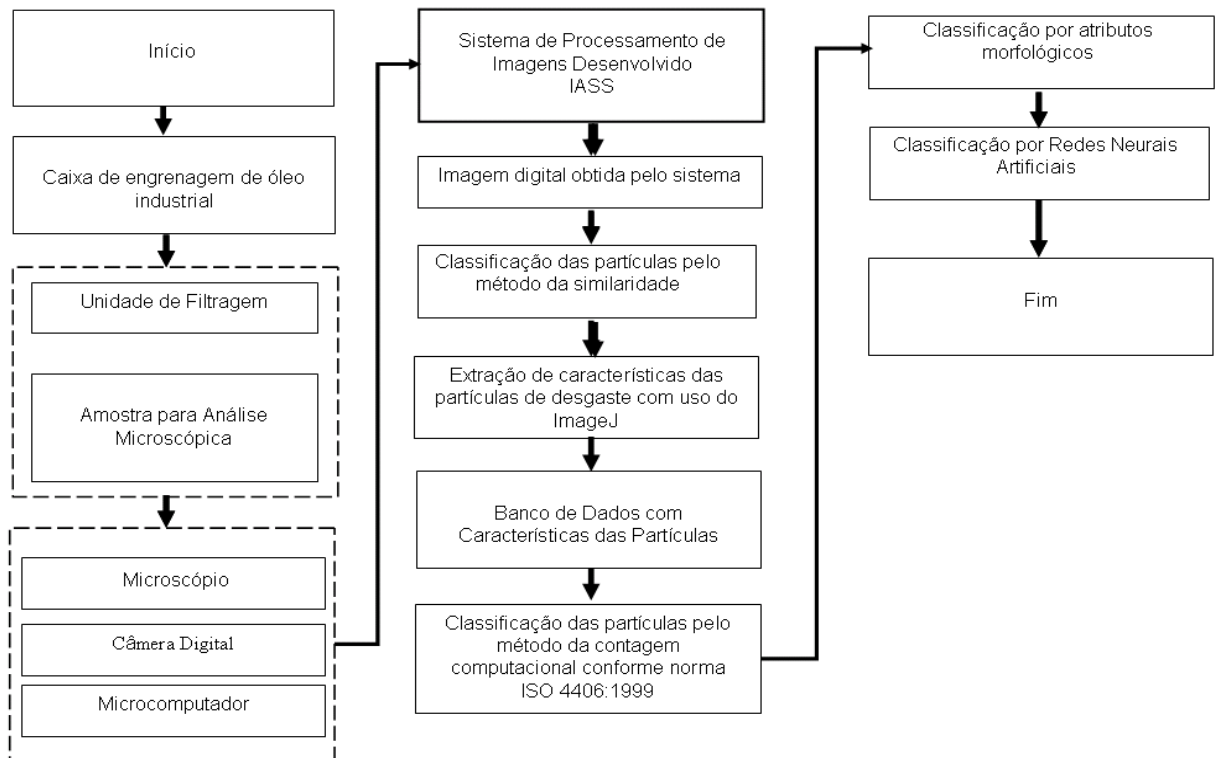


Figura 19 – Diagrama de blocos da arquitetura proposta

4.1.1 Módulo de filtragem

O módulo de filtragem é utilizado para obtenção das partículas de desgaste em amostras de óleo obtidas nos equipamentos em análise. Nesse processo as partículas de desgaste são coletadas em uma membrana de filtro de éster celulose.

A Figura 20 mostra os componentes do sistema de filtragem, o qual consiste de uma bomba de vácuo, de um frasco em vidro Pyrex com saída lateral tipo Kitasato, suporte de filtração em vidro Pyrex de 47 mm de diâmetro com tela em aço inox, funil de 300ml, base de funil com rolha e garra porta filtro, membrana filtrante em éster e celulose de 1,2 μ m e disco de Petri tipo lâmina para exame em microscópio de membrana de 47 mm, com base retangular e receptáculo circular (PetriSlides™).

A bomba de vácuo é da marca Biomec, modelo B2P-730 SC, com capacidade de vácuo máximo de 730mmHg e deslocamento de 18 l/min.

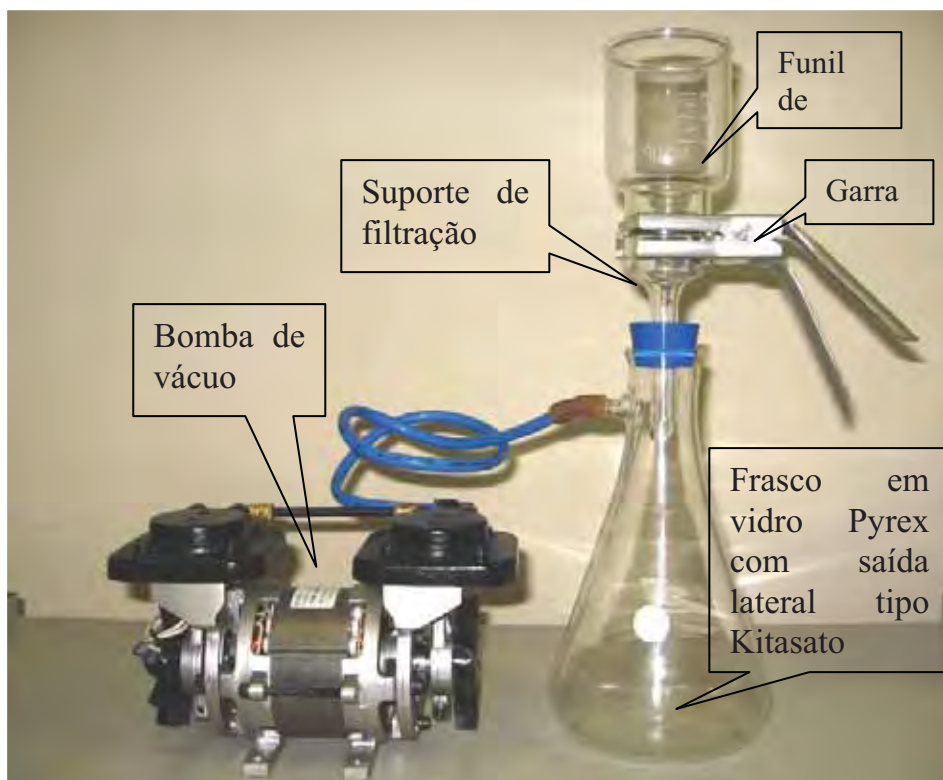


Figura 20 – Bomba de vácuo e os respectivos elementos de filtração

No processo de filtração foi adotado o procedimento de determinação da contaminação de partículas em líquidos por meio do método de contagem de partículas estabelecido na norma SAE ARP 598B: 1986. Nesse método, as partículas de desgaste de uma amostra de óleo de 50 ml são filtradas e retidas na membrana de filtro especificada.

Para amostras de óleo de alta viscosidade é recomendado adicionar 50ml de um solvente desengraxante para facilitar o processo de filtração. Nos ensaios realizados foi utilizado o solvente tipo UNISOLVE-200 da UnichemicalsTM. Após a filtração as membranas de filtro foram colocadas em discos de Petri devidamente identificados conforme ilustrado na Figura 21.



Figura 21 – Disco de Petri com identificação da análise

4.1.2 Módulo de aquisição de imagens por microscopia

O módulo de aquisição de imagens para análise microscópica das partículas de desgaste consiste de uma câmera digital Canon A-520 acoplada a um microscópio monocular Quimis, modelo Q-705M1. Para o processamento e análise das imagens digitais foi utilizado um microcomputador conectado à câmera digital por meio de uma interface USB.

A especificação do microscópio foi definida de acordo com o estabelecido na norma ARP598B:1986. Segundo a norma o microscópio pode ser binocular ou monocular com um fator de ampliação de 50 a 100. O microscópio escolhido apresenta as seguintes características: uma ocular de 10x, aumentos configuráveis entre 40x a 400x, tubo de observação monocular, com 160 mm de comprimento, inclinado a 45°.

A escolha da câmera Canon A520 foi fundamentada a partir dos recursos disponibilizados pelo fabricante para acesso via computador aos dispositivos de comando da câmera.

Para acoplar a câmera ao microscópio foi projetado e confeccionado um dispositivo.

O projeto da interface da câmera digital com o microcomputador foi executado a partir do programa SDK (*Software Development Kit*) (CANON, 2004). O SDK consiste de um conjunto de interfaces para programação de aplicativos (*APIs*), bibliotecas de vínculos dinâmicos (*DLLs*) e bibliotecas de vínculos estáticos (*statically-linked libraries*).

O programa computacional intitulado IASS - “Image Acquisition System Software” (GONÇALVES; MATHIAS, 2007) foi desenvolvido para controle da câmera digital. O IASS permite ao usuário adquirir imagens digitais das partículas de desgaste retidas nas membranas de filtro, possibilita avaliar a imagem de uma amostra analisada no microscópio óptico, e também realizar tarefas fundamentais como tirar fotos, modificar parâmetros, visualizar e armazenar os dados da imagem no disco rígido do computador.

O programa IASS utiliza os recursos disponibilizados pelo SDK, e com a aplicação do Visual Studio v.6.0 da Microsoft foram desenvolvidas funções para que o programa possa acessar outros programas como, por exemplo, o ImageJ, e realizar a limiarização automática e manual de uma imagem após ser capturada pelo sistema. A Figura 22 ilustra o fluxograma do processo utilizado no IASS.

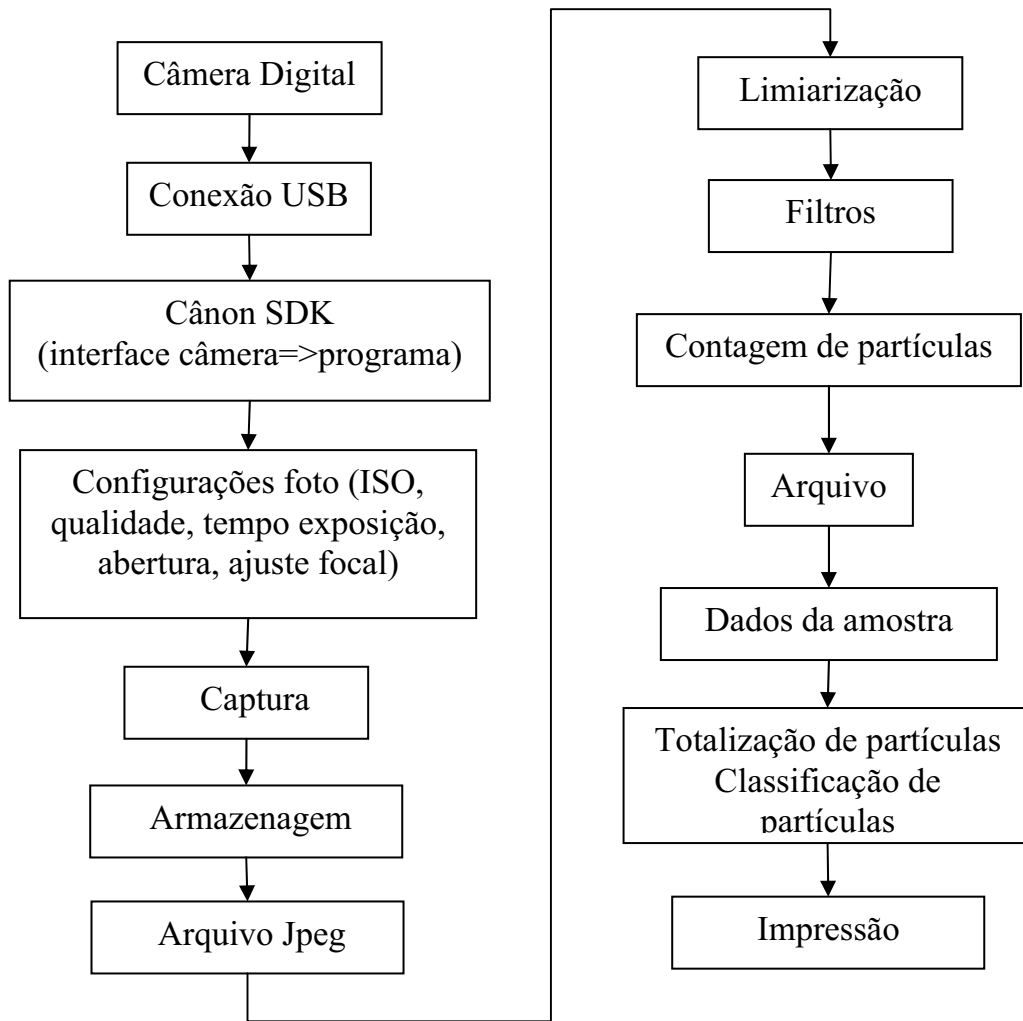


Figura 22 – Fluxograma do processo utilizado no IASS

O processo inicia-se quando a câmera digital é conectada a uma interface USB e é inicializada. Para que o programa IASS possa abrir os comandos da câmera utiliza-se da interface SDK. O programa tem o comando “Captura” que tira a foto da imagem visualizada por meio do microscópio óptico e armazena no disco rígido do computador no formato JPEG. A imagem será acessada novamente pelo programa para passar pelo processo de limiarização; por meio de filtros ocorre a contagem das partículas, e o resultado é disponibilizado em um arquivo. Os dados da amostra do arquivo são lidos por uma macro da planilha Excel e apresentado na forma de um relatório. A totalização das partículas e a classificação conforme norma ISO 4406 são impressas no relatório final da amostra. A macro é construída com o *Microsoft® Visual Basic® for Applications* (VBA), que é uma linguagem de programação de computador usada para controlar a funcionalidade do Microsoft Excel.

No programa existem cinco principais tipos de itens de menu, com as suas janelas *pop-up* para os usuários realizarem o acesso ao sistema.

No menu câmera constam as janelas *pop-up* com os comandos “Conectar/desconectar”, “Visor”, “Capturar” e “Diretório”. Na operação do sistema a câmera é ligada (ou desligada) pelo comando “Conectar/desconectar”. A visualização da imagem na tela é obtida por meio do comando “Visor ativo”. A imagem pode ser gravada pelo comando “Captura”, que armazena a imagem em local definido previamente no comando diretório. Os demais comandos do menu principal são aplicados na operação de tratamento de imagens.

A imagem capturada pelo microscópio é gravada em formato JPEG. Na Figura 23 é ilustrada a tela do programa IASS com um exemplo de imagem digital de uma amostra de óleo.

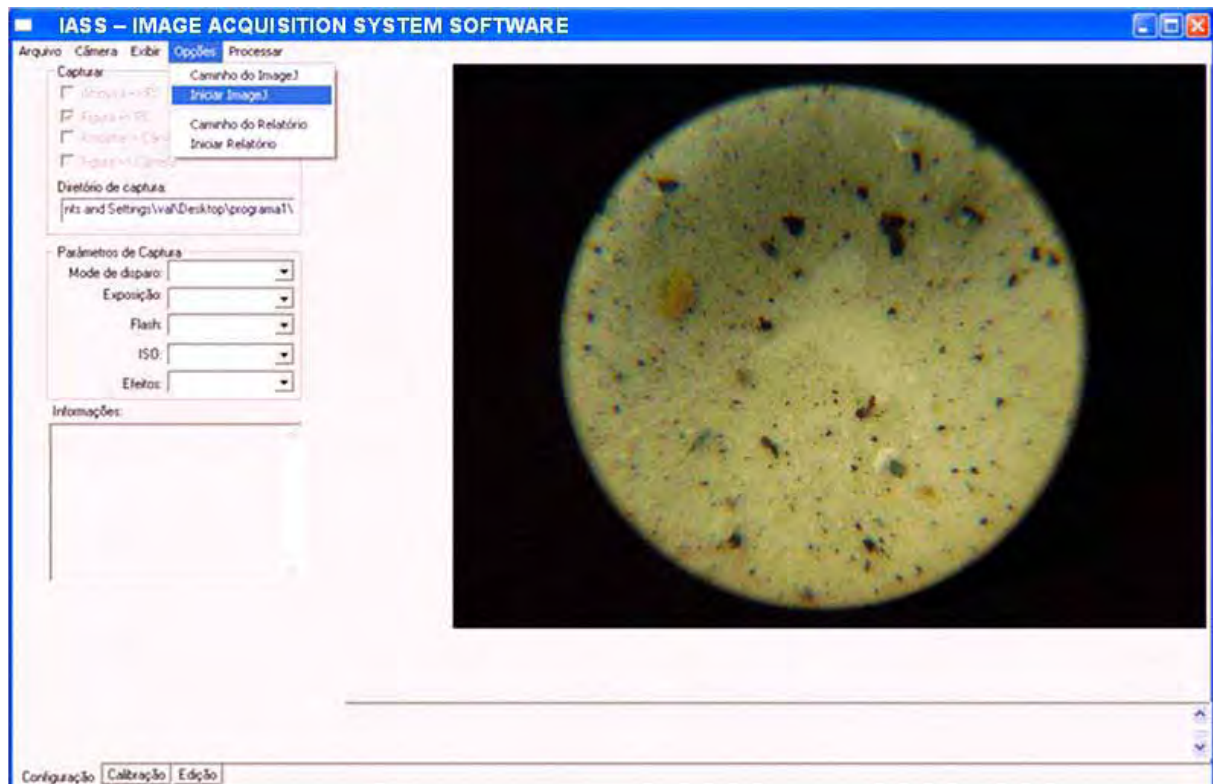


Figura 23 – Tela do programa IASS com imagem digital de amostra de óleo

4.1.3 Módulo de processamento de imagens

O módulo de processamento de imagens foi desenvolvido para a contagem de partículas de desgaste retidas na membrana de filtro e análise das características morfológicas de partículas individuais, associadas a um mecanismo de desgaste.

O sistema desenvolvido permite contar partículas de tamanhos superiores a 1,2 microns e também possibilita a classificação de acordo com o tamanho. A classificação por tamanho é um parâmetro de acompanhamento da evolução de desgaste de uma máquina.

A contagem e classificação de tamanho das partículas estabelece o diagnóstico de duas condições: (i) da operação normal da máquina, quando partículas de dimensões pequenas estão presentes no óleo e (ii) da condição severa de desgaste, quando o número e o tamanho de partículas cresce consideravelmente (LAGHARI et al., 2004). Nesta tese foram abordados dois métodos de para a classificação de partículas de desgaste. O método de similaridade e o método de contagem e classificação computacional.

Na classificação das partículas pelo método de similaridade a imagem das partículas de desgaste retidas na membrana de filtro e visualizadas por um microscópio monocular é comparada com padrões de amostras classificados na norma ISO 4406:1999. Este método não resulta em uma medição exata do nível de contaminação de lubrificantes e fluidos hidráulicos, mas é amplamente utilizado por empresas de prestação de serviços na área de análise de óleos e lubrificantes industriais e pela Marinha Real Britânica no diagnóstico da condição de máquinas (JOINT AIR PUBLICATION, 2001).

Neste trabalho o método de análise por similaridade foi implementado utilizando-se as imagens de classificação dos níveis de contaminação em óleo lubrificante da ⁵*Swansea Tribology Services*. O diferencial do sistema proposto é que a imagem visualizada no microscópio é gravada, por meio da câmera digital em um arquivo no computador para análise posterior. Esse recurso possibilita a criação de um

⁵ http://www.trib.co.uk/iso_guide/iso_guide.html - último acesso 03-03-2008

banco de dados que auxilia o analista no acompanhamento e diagnóstico da condição de um equipamento.

Esse método proporciona um acompanhamento da evolução do desgaste em um equipamento industrial e pode ser utilizado de uma forma direta para o controle de desgaste em equipamentos industriais como redutores e equipamentos hidráulicos de pequeno ou grande porte. A Figura 24 apresenta um diagrama de blocos que ilustra esse método.

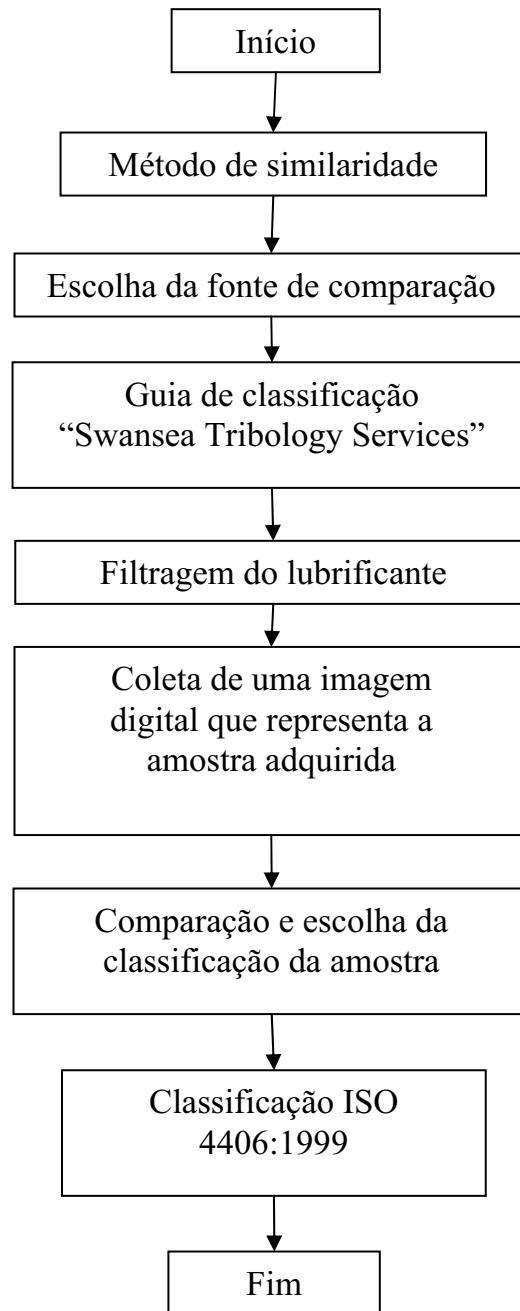


Figura 24 – Diagrama de blocos da classificação de partículas por similaridade

A Figura 25 ilustra uma imagem de uma amostra adquirida por meio da filtragem de óleo industrial. Na classificação dessa amostra pelo método de similaridade foi utilizada uma amostra padrão do *Swansea Tribology Services* conforme ilustrada na Figura 26.

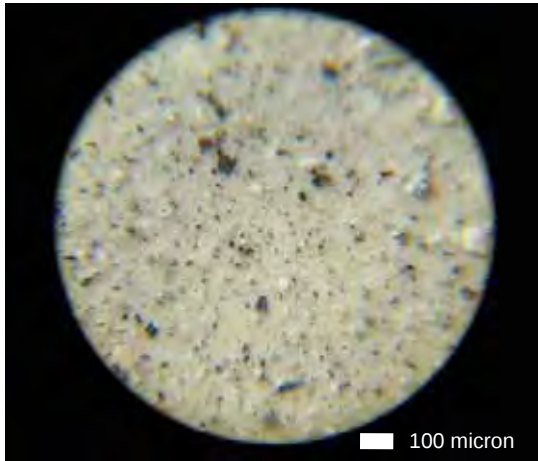


Figura 25 - Amostra adquirida

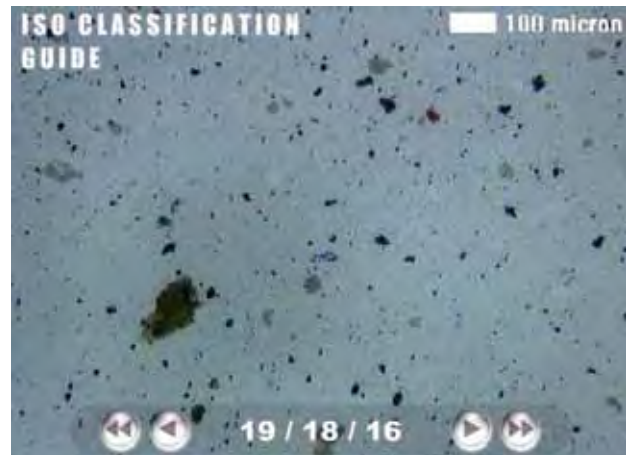


Figura 26 - Padrão para classificação

O método de contagem e classificação computacional de partículas foi implementado utilizando recursos do programa ImageJ e da planilha Excel.

A imagem digitalizada das partículas retidas na membrana de filtro é processada por meio do programa ImageJ, o qual se acessa por intermédio do menu “Opções” do programa de aquisição de imagens.

A utilização do ImageJ no sistema desenvolvido envolve a definição de escala de medida, a limiarização da imagem digital, a obtenção do diâmetro de Feret (máxima distância entre 2 tangentes paralelas que tocam lados opostos de uma imagem) das partículas e geração de arquivo de dados.

A limiarização da imagem é processada de maneira automática pelo ImageJ, e é importante que a imagem adquirida seja homogênea para que não ocorra perda de informações neste processo.

A definição da escala de medida é um processo importante na classificação das partículas de desgaste, pois objetiva estabelecer a relação entre o pixel e a dimensão das partículas. Uma vez estabelecida a escala, é possível medir o diâmetro de *Feret*, que é um dos atributos de dimensão da partícula (Thomas; Davies; Luxmoore, 1999).

Essa escala de medida foi implementada com auxílio de uma régua micrométrica com graduação de 0,01 mm conforme ilustrado na Figura 27.

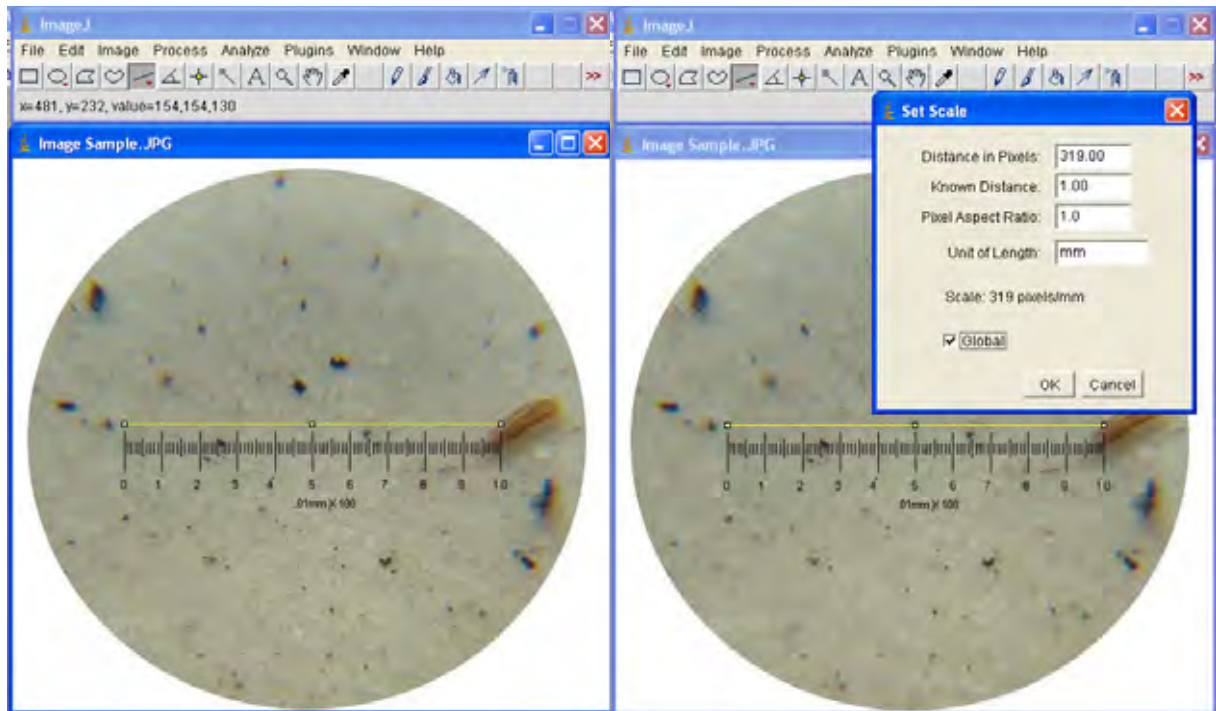


Figura 27 – Processo de ajuste de escala

No processo de ajuste de escala uma reta sobreposta à escala de graduação é criada por intermédio da barra de ferramentas do ImageJ. Essa linha é sobreposta à escala de graduação de modo a estabelecer o fator de calibração entre a escala métrica e a medida do pixel ($\mu\text{m}/\text{pixel}$).

Após o ajuste da escala a imagem é submetida a um processo de segmentação de imagem denominado limiarização (Laghari; Boujarwah, 1997). Nesse processo, que separa o campo visual entre o fundo e o primeiro plano, conforme níveis de intensidade o valor limiar pode ser selecionado automaticamente pelo ImageJ, ou manualmente por meio da escolha do valor limiar. A Figura 28 ilustra o método de limiarização de imagem capturada, processada pelo ambiente ImageJ.



Figura 28 – Limiarização de uma imagem capturada

Após o processo de limiarização, todas as partículas de desgaste detectadas são classificadas pelo tamanho e um relatório da análise de óleo é gerado em uma planilha Excel.

A planilha de relatório consiste de campos reservados aos dados de entrada e dados de saída. Os dados de entrada incluem o volume filtrado da amostra, o campo visual de análise microscópica, o diâmetro útil da membrana de filtro, o volume padrão para o cálculo da concentração das partículas, o nível de concentração de partículas recomendado para o equipamento em análise, o valor limite de concentração de partículas para operação normal do equipamento e o número de partículas total da amostra. Os dados de saída consistem da classificação da distribuição quantitativa das partículas nos intervalos de $\geq 4\mu m < 6\mu m$, $\geq 6\mu m < 14\mu m$, $\geq 14\mu m$; essa classificação das partículas é realizada conforme norma ISO 4406:1999.

4.1.4 Módulo de análise morfológica

O módulo de análise morfológica foi desenvolvido com a finalidade de associar as características morfológicas de partículas individuais aos mecanismos de desgaste.

Neste trabalho, utilizou-se uma metodologia de análise fundamentada em redes neurais artificiais. O primeiro passo para a aplicação desse método é a escolha de um conjunto de tipos de partículas que deverão ser utilizadas como padrão para análise. Foram escolhidos também quatro tipos de partículas, cada uma delas está relacionada com um tipo de desgaste específico. As partículas de desgaste escolhidas são: de desgaste por abrasão (*cutting wear*), por deslizamento severo (*severe sliding*), por fricção (*rubbing wear*) e desgaste provocado pela fadiga (*fatigue*). Após a escolha do tipo de partículas foi necessária a elaboração de um banco de dados específico para essas partículas. Para este projeto foram escolhidas dez partículas de cada tipo de desgaste. Outra etapa importante para tornar possível a classificação por redes neurais foi a extração das características geométricas das partículas individuais, que foi realizada com o uso do software ImageJ.

Os tipos de caracteres morfológicos para a classificação das partículas foram: área, perímetro, largura, altura, circularidade, alongamento, diâmetro de Feret, diâmetro principal, diâmetro secundário, razão de aspecto. A Figura 29 ilustra a estrutura do módulo de análise morfológica, no qual as partículas de desgaste conhecidas são analisadas por seus atributos, que são enviados para um banco de dados para treinamento e teste, para serem categorizados por um classificador de redes neurais nos quatro tipos de desgaste selecionados para este projeto.

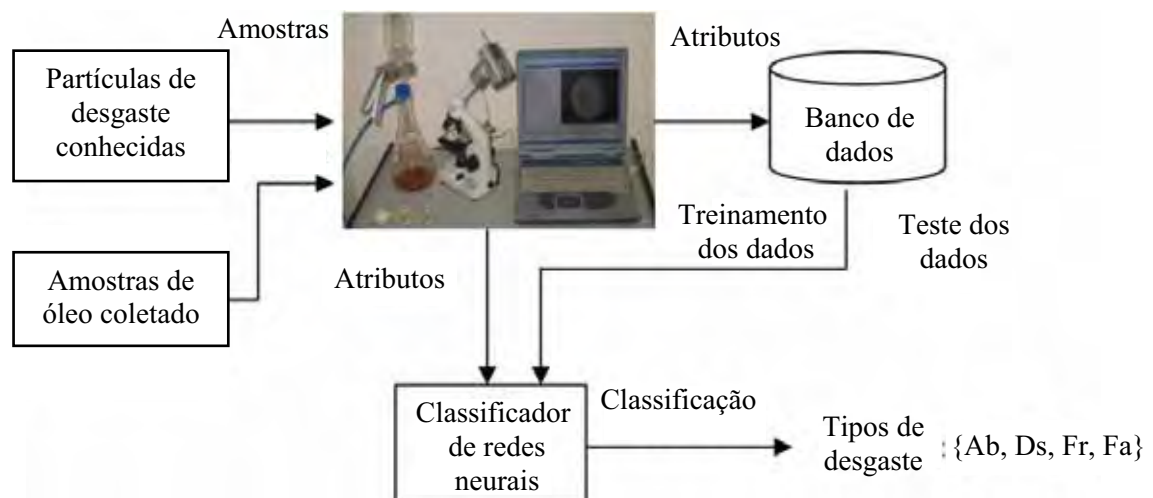


Figura 29 – Estrutura do módulo de análise morfológica

O processo de extração das características de desgaste das partículas inicia-se com a seleção da partícula específica que será estudada. Dentro das amostras podem existir diversos tipos de partículas de desgaste, porém, neste trabalho, foram selecionados quatro tipos já mencionados. Para cada tipo característico de desgaste foi escolhida uma imagem que irá passar por um processo de estilização. A Figura 30 ilustra partículas de abrasão estilizadas.

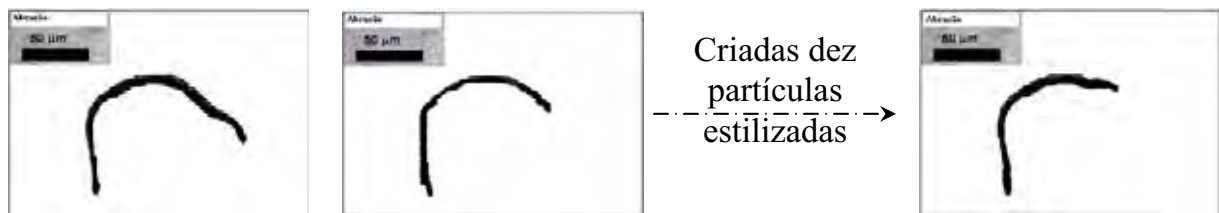


Figura 30 – Partículas de abrasão estilizadas

Nesse processo, para cada tipo de desgaste serão criados dez diferentes tipos de imagens binarizadas em escala micrométrica, as quais serão submetidas ao *software* ImageJ, que será utilizado para a extração das características de cada uma das imagens estilizadas. A Tabela 1 exemplifica os valores das características extraídas para as imagens digitalizadas das partículas de abrasão (Gonçalves V. D. et al. 2009).

Tabela 1 – Características extraídas das partículas de abrasão

Abrasão	Área	Perímetro	Largura	Altura	Diâmetro principal	Diâmetro secundário	Circularidade	Diâmetro Feret	Alongamento	Razão de aspecto
Unidade	μm^2	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	Adimensional	Adimensional
1	1436,57	385,25	108,28	83,43	60,56	30,20	0,12	113,57	2,989	1,297
2	1408,21	469,78	120,12	98,82	55,24	32,46	0,08	123,7	3,849	1,215
3	1333,99	431,45	108,28	100,59	55,08	30,84	0,09	120,36	3,544	1,076
4	766,43	347,65	91,12	84,02	46,57	20,95	0,08	105,93	2,635	1,084
5	1533,91	491,82	120,71	108,28	56,21	34,74	0,08	128,62	4,236	1,114
6	1093,10	376,65	90,53	100	56,43	24,66	0,1	122,71	2,552	0,905
7	981,41	401,65	117,75	50,89	56,79	22,00	0,08	118,24	2,264	2,313
8	965,65	406,38	97,63	99,41	51,01	24,10	0,07	118,49	2,791	0,982
9	1325,58	554,81	129,59	95,27	60,74	27,79	0,05	150,86	2,686	1,360
10	1206,54	531,65	118,34	100	48,24	31,85	0,05	124,52	4,886	1,183

Os dados obtidos, a partir da extração de características das partículas, foram processados pelas redes neurais que realizaram o processo de análise das partículas classificando-as por meio de suas características morfológicas escolhidas.

Para a realização dos testes foi criado um programa denominado “Redes Neurais Artificiais para Classificação de Partículas de Desgaste”, abreviado como RNA_CPD, em sua versão 1.0. O RNA_CPD foi desenvolvido em linguagem C++ com a finalidade de analisar configurações apropriadas à classificação de partículas de desgaste utilizando as características morfológicas geométricas dessas partículas. Tal recurso consiste em dois módulos: treinamento da rede e classificação de partícula.

O primeiro módulo permite o treinamento de arquiteturas MLP (*Multilayer perceptron*), disponibilizando um gráfico com a taxa de acerto da RNA treinada. A Figura 31 ilustra o módulo de treinamento no qual foi selecionada uma configuração de redes neurais com dez camadas ocultas, sendo cinco camadas de entrada que correspondem aos parâmetros: área, circularidade, altura, diâmetro secundário, alongamento, e quatro camadas de saída que são tipos de desgaste das partículas analisadas. O gráfico da Figura 31 ilustra a taxa de acerto para a configuração selecionada, que no exemplo é de 92,5%. É importante salientar que no módulo de

treinamento podem ser escolhidas inúmeras configurações que resultam em diferentes taxas de acerto. As configurações para encontrar as melhores taxas de acerto serão discutidas no próximo capítulo desta tese.

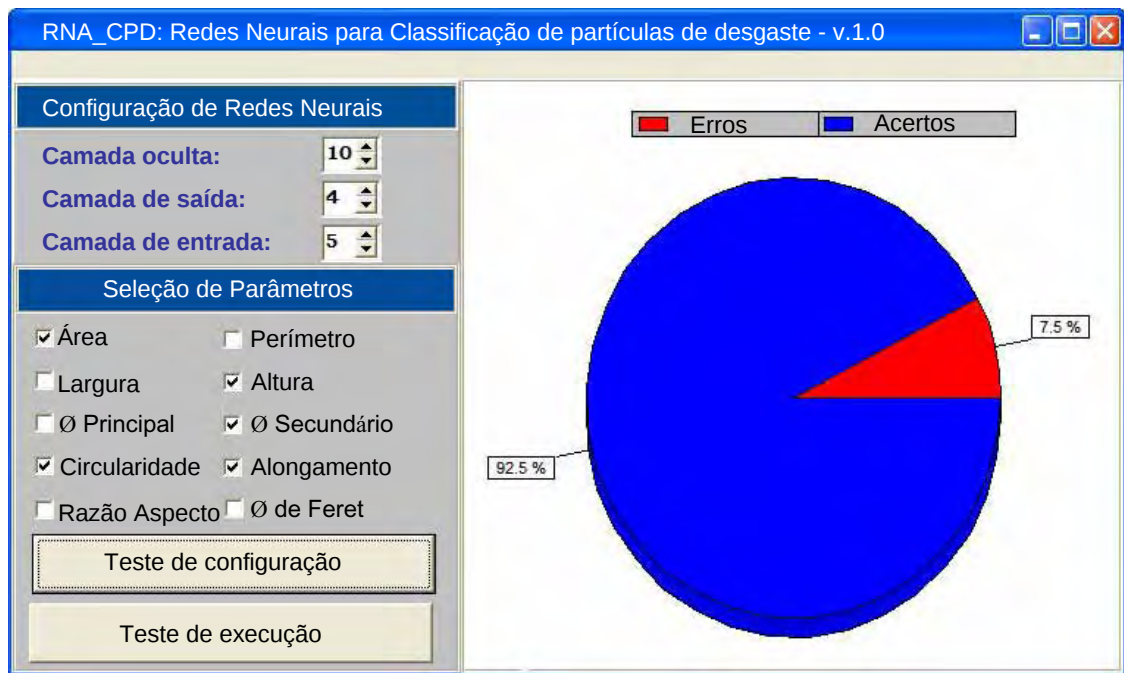


Figura 31 – Módulo de treinamento da RNA_CPD

O módulo para classificação da RNA_CPD ilustrada na Figura 32 permite a sistematização de um conjunto de partículas de acordo com os tipos de desgastes conhecidos pela RNA treinada.

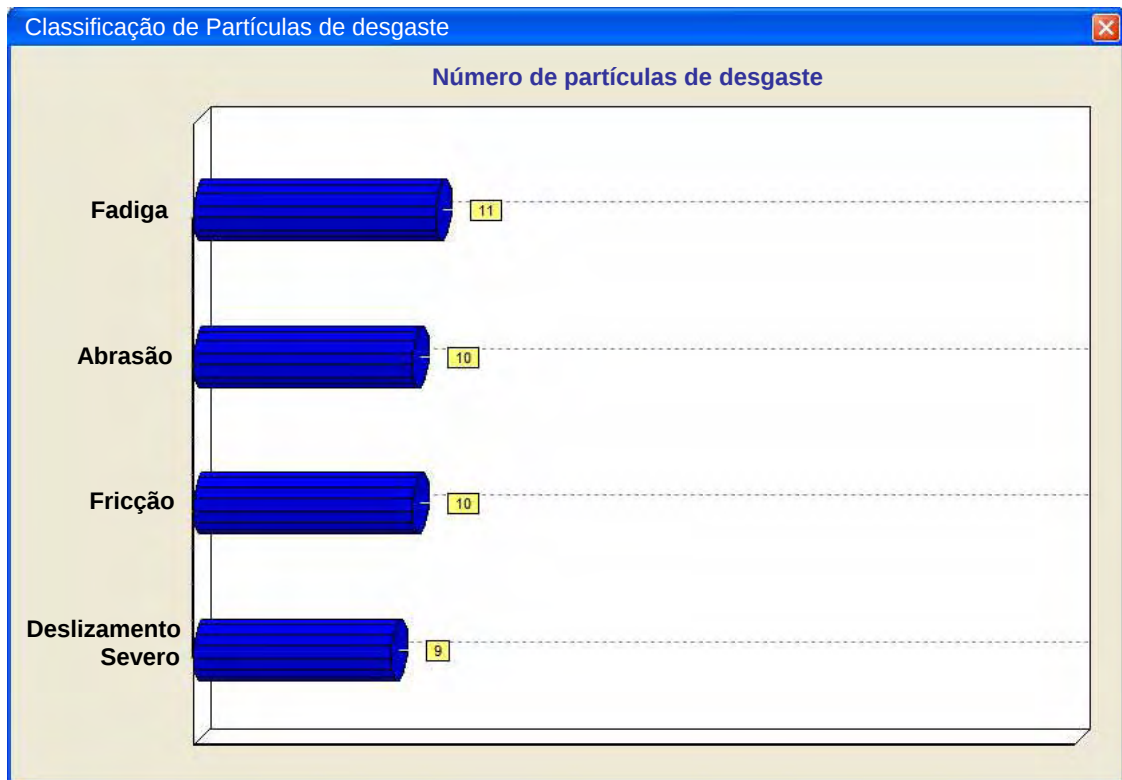


Figura 32 – Módulo para classificação da RNA_CPD

A arquitetura de redes neurais proposta neste trabalho tem a vantagem de ser de fácil uso por causa de sua versão de interface gráfica interativa.

O sistema mencionado pode ser mudado para alterar e adicionar regras para identificação do modo de desgaste. Foi estabelecido para a avaliação do desgaste, mas também é útil para muitas outras tarefas que requerem o exame de objetos particulados. Isto ocorre porque as redes neurais e o IASS são adaptáveis, com a configuração e os parâmetros lidos dos arquivos que são facilmente acessíveis ao usuário.

As características usadas na análise de partículas de desgaste incluem os principais aspectos morfológicos que podem ser obtidas por meio da avaliação microscópica das partículas de desgaste.

Este trabalho apresenta uma aplicação para a análise microscópica de partículas de desgaste encontradas em óleos lubrificantes industriais, realizando a classificação e análise de partículas de desgaste que incluem o uso de um sistema especialista e de redes neurais. As vantagens desta aplicação incluem: (1) seu uso computacional, (2) o

investimento necessário para implantação do sistema é reduzido, e (3) o uso de uma interface gráfica interativa com aplicação de técnicas de processamento de imagens.

As duas tecnologias, IASS e RNA_CPD realizam suas tarefas com sistemas especialistas para os diagnósticos qualitativo e quantitativo e redes neurais para análise morfológica das partículas.

A integração entre sistemas especialistas e redes neurais possibilitou um processo computacional capaz de controlar as operações de classificação e análise de partículas de desgaste.

O sistema pode ser utilizado por usuários sem experiência em análise de partículas de desgaste. Os programas IASS e RNA_CPD também podem ser adaptados para a análise genérica de outros tipos de partículas de desgaste.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do sistema de análise de partículas de desgaste.

Os relatórios a seguir foram elaborados com os recursos desenvolvidos neste trabalho e estão em formato para uso na indústria, proporcionando uma avaliação eficiente do processo de desgaste no equipamento.

5.1 Relatório da análise de amostra de óleo pelo método de similaridade

Com a aplicação deste método é possível avaliar a evolução do desgaste no equipamento. Este método necessita da avaliação de um especialista, mas possui uma grande facilidade de aplicação. O relatório obtido a partir deste processo é muito útil para o diagnóstico da condição do equipamento que se encontra em operação. As imagens foram obtidas a partir de unidades hidráulicas de redutores em equipamentos industriais em pleno funcionamento. A Figura 33 ilustra o relatório obtido pelo método da similaridade.

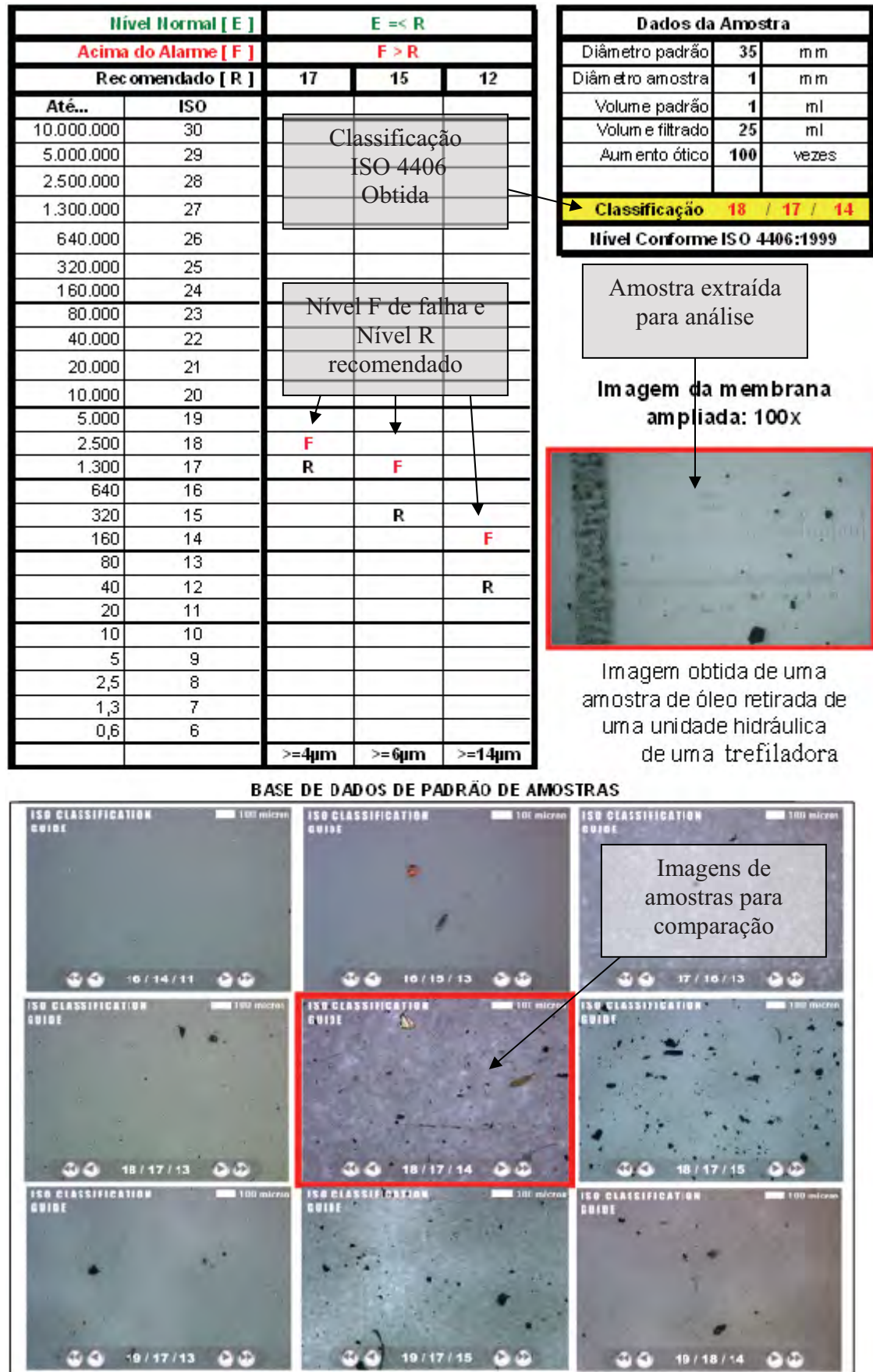


Figura 33 – Relatório obtido pelo método da similaridade

No relatório ilustrado na Figura 33 é apresentada uma imagem da membrana de filtro, que foi obtida de uma amostra de óleo retirado de uma unidade hidráulica de uma máquina trefiladora. Essa imagem é comparada com o padrão de amostras disponibilizado pelo *Swansea Tribology Services* e pelo método de similaridade é escolhido o perfil mais compatível ao analisado. Após a escolha deste perfil, os valores referentes à classificação ISO 4406, que para o exemplo ilustrado corresponde a 18/17/14, são colocados no campo de classificação ilustrado na parte superior à direita da Figura 33. Porém, para este tipo de aplicação, o recomendado pela norma ISO é 17/15/12, que é apresentado na Tabela 2, sendo indicado para o uso de uma válvula proporcional que é submetida a uma pressão menor ou igual a 1500 psi. Na planilha à esquerda da Figura 33, que corresponde à norma ISO 4406, é inserido o valor 18/17/14, sendo 18 para o campo de partículas $\geq 4\mu\text{m}$ e $< 6\mu\text{m}$, 17 para o campo de partículas $\geq 6\mu\text{m}$ e $< 14\mu\text{m}$ e 14 para o campo de partículas $> 14\mu\text{m}$, e verificado que os valores estão no nível de falha, pois são maiores que os valores recomendados. Este relatório é utilizado como forma de acompanhamento da condição do equipamento e para programação de ações corretivas ou preventivas, evitando o desgaste e futura quebra do sistema hidráulico do equipamento.

Este método requer a análise de um especialista para fazer a seleção e avaliação das partículas que possuem o perfil adequado ao do banco de dados de figuras disponibilizados para a comparação. Como descrito no capítulo 3 desta tese, este processo é utilizado pela marinha britânica e também é utilizado em empresas de manutenção preditiva, e tem a função de avaliação e emissão de relatórios de equipamentos para a programação da manutenção preventiva dos mesmos.

5.2 Relatório da análise de amostra de óleo pelo método de contagem e classificação computacional

Com base no sistema desenvolvido para contagem de partículas de desgaste, foi elaborado um relatório de amostra de óleo que é apresentado em forma de uma planilha Excel. Essa planilha ilustra a imagem de uma amostra de óleo e a sua classificação, conforme a norma ISO 4406:1999, e também apresenta a distribuição

das partículas, fundamentada nas características de formato como área, arredondamento e alongamento, que são utilizadas para o reconhecimento de padrões de desgaste.

A Figura 34 ilustra o resultado do relatório de amostra de óleo. O campo “dados da amostra” contém os elementos que se referem à amostra coletada para análise. Esse campo possui como dados de entrada o diâmetro padrão, que corresponde à seção da área utilizada pelo elemento filtrante. O diâmetro da amostra, correspondente ao campo visual do microscópio. O volume de referência para a quantificação das partículas utilizada pela norma ISO 4406 é de 1 ml. O volume filtrado corresponde ao necessário para obter a amostra; os valores mais comuns utilizados são de 25, 50 ou 100ml. O aumento óptico utilizado é de 100x, e pode ser definido como a ampliação da imagem da amostra. O nível normal é menor ou igual ao recomendado. O nível recomendado é obtido pela consulta e depende do tipo de atuador em que será utilizado o óleo e da pressão de trabalho a que está submetido. A Tabela 2 ilustra um exemplo do nível recomendado de limpeza do óleo (expresso no código ISO 4406) para diferentes atuadores mecânicos em função da pressão de trabalho exercida na pressurização do óleo do sistema.

⁶Tabela 2 – ISO 4406 para cada atuador e variação da pressão

Tipo de Atuador Mecânico	Pressão		
	< 1500psi	1500-2500psi	>2500psi
	< 103 bar	103-172bar	>172 bar
Servo válvula	16/14/12	15/13/11	14/12/10
Válvula proporcional	17/15/12	16/14/12	15/13/11
Bomba de vazão variável	17/16/13	17/15/12	16/14/12
Válvula de cartucho	18/16/14	17/16/13	17/15/12
Bomba de pistão	18/16/14	17/16/13	17/15/12
Bomba de palhetas	19/17/14	18/16/14	17/16/13
Válvula de controle de fluxo	19/17/14	18/16/14	17/16/13
Válvula solenóide	19/17/14	18/16/14	18/16/14
Bomba de engrenagens	19/17/14	18/16/14	18/16/14

⁶ Fonte Noria Corporation

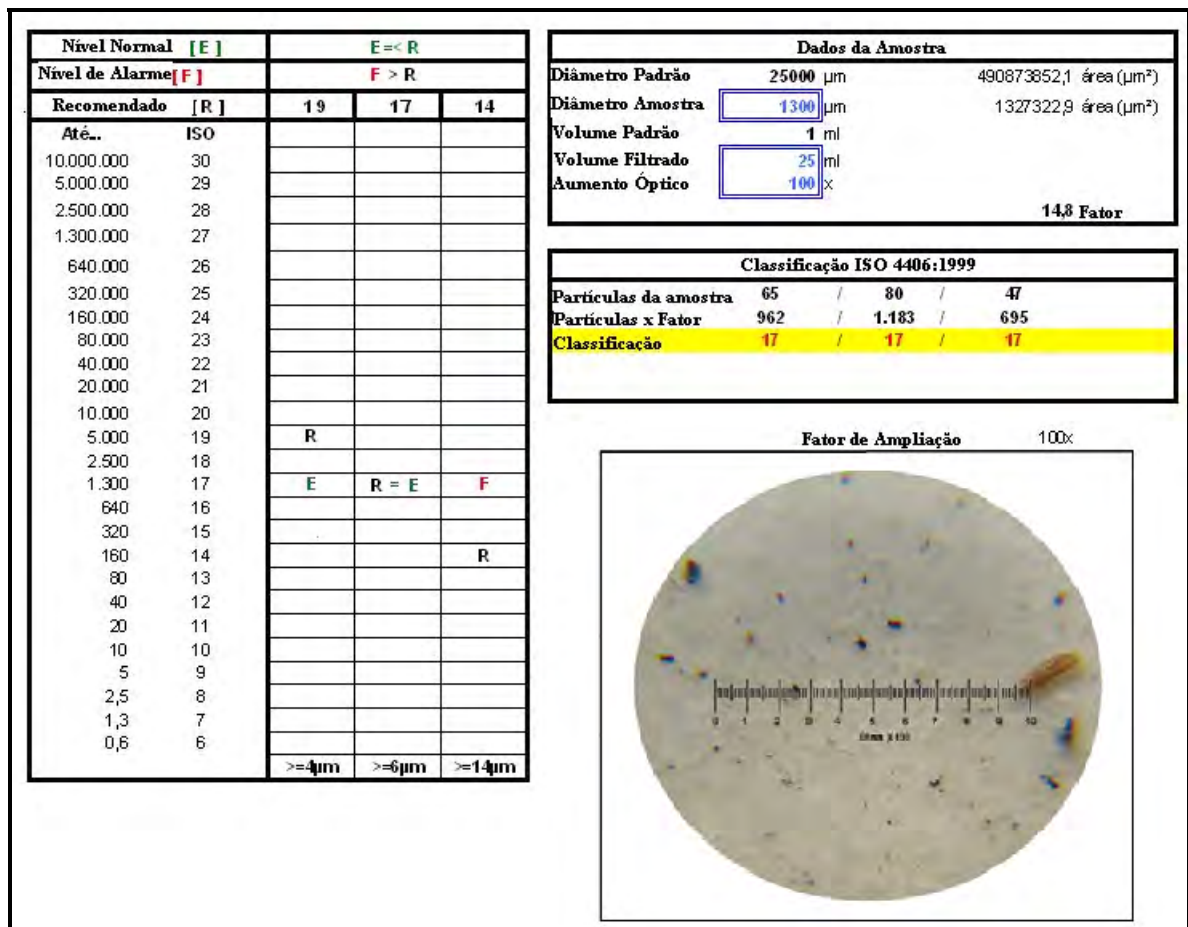


Figura 34 – Resultado do relatório de amostra de óleo

O relatório apresentado na Figura 34 ilustra a imagem de uma área da membrana de nitrocelulose, com ampliação de 100 vezes. Com base na imagem capturada, são realizadas a contagem e a classificação do tamanho das partículas. A planilha Excel fornece os dados de acompanhamento da amostra, de acordo com a codificação da norma, e também indica se os níveis de contaminação do óleo estão na faixa recomendada. Para obter o tamanho das partículas, foi estabelecida uma calibração com o auxílio de uma lamínula graduada, cuja menor escala de graduação é de 10 micrômetros.

No canto superior esquerdo do relatório é apresentado o nível recomendado para esta amostra correspondente ao valor de ISO 4406 igual a 19/17/14. Com a aplicação da contagem automatizada encontrou-se o valor ISO 17/17/17. A interpretação deste valor é feita da seguinte forma: o primeiro valor de 17 significa que para partículas

maiores ou iguais a quatro microns a amostra encontrada possui a quantia equivalente a 962 partículas para cada 1_ml de amostra de óleo, mas para esta aplicação é recomendado o número de até 5.000 partículas. Isto significa que a amostra atende à especificação para este primeiro item da classe de contaminação, pois o nível encontrado é menor que o recomendado ($E \leq R$). Analogamente, para o segundo valor do código ISO 17/17/17, o valor encontrado foi de 1.183 partículas, o que atende à especificação, e esta classe 17 permite até 1.300 partículas do tamanho entre seis e quatorze microns por mililitros de óleo da amostra. Porém, no último número do código ISO 17/17/17, o valor encontrado de partículas foi de 695 partículas por mililitro de óleo, sendo que o recomendado para esta classe é de até 160 partículas; então, a amostra apresenta-se com falha para esta classe de partículas. Interpretando este relatório com base nos critérios estabelecidos pela norma ISO 4406, conclui-se que o equipamento deve ser submetido a um acompanhamento mais aprimorado, pois poderão ocorrer quebras futuras por causa do desgaste identificado pelo aumento das partículas de desgaste. É recomendada a filtragem deste óleo e sua troca. Outra ação é a seleção desta amostra para a classificação das partículas pelo formato. Esta classificação associa o formato geométrico das partículas ao modo de desgaste e seus resultados serão evidenciados a seguir.

5.3 Classificação das partículas por seus atributos morfológicos

O estudo das partículas individuais envolve a caracterização distinta dos atributos morfológicos da partícula de desgaste e a identificação das partículas dentro de certos tipos específicos.

O objetivo desta classificação é seu uso em uma amostra para classificar as partículas de tipos específicos de desgaste. Neste trabalho foram selecionados os quatro tipos mais comuns e, para cada tipo, foi utilizado um conjunto de dez amostras, das quais foram extraídas suas características morfológicas e foi constituída uma base de dados para fazer a análise.

Os resultados encontrados são provenientes da análise de uma amostra em que todas as partículas foram submetidas ao processo de classificação por características de formato. Para identificar as partículas de uma maneira qualitativa, foram

selecionadas dez partículas individuais do modo de desgaste abrasão; nessas partículas foram extraídas as características do formato por meio do programa ImageJ.

A classificação das partículas pelas características do formato foi realizada por intermédio de um sistema especialista, que se utilizou de regras definidas para o critério de avaliação, fundamentando-se na faixa de valor que compreende o valor mínimo e máximo de cada atributo. Por exemplo, na Tabela 1 o atributo área varia de $766,43 \mu m^2$ até $1533,91 \mu m^2$. Para o atributo área a partícula é considerada de abrasão se estiver dentro desta faixa de valores. É realizada uma verificação para todos os outros atributos da Tabela 1; após esse processo a partícula é considerada de abrasão se todos os valores encontrados satisfizerem a faixa de valor para cada atributo.

De uma forma genérica tem-se:

N = Valor do atributo;

$N_{\text{máx}}$ = Valor máximo do atributo;

$N_{\text{mín}}$ = Valor mínimo do atributo;

N_e = valor do atributo de entrada.

n = Número total de atributos

O fluxograma apresentado na Figura 35 ilustra o padrão de comparação utilizado.

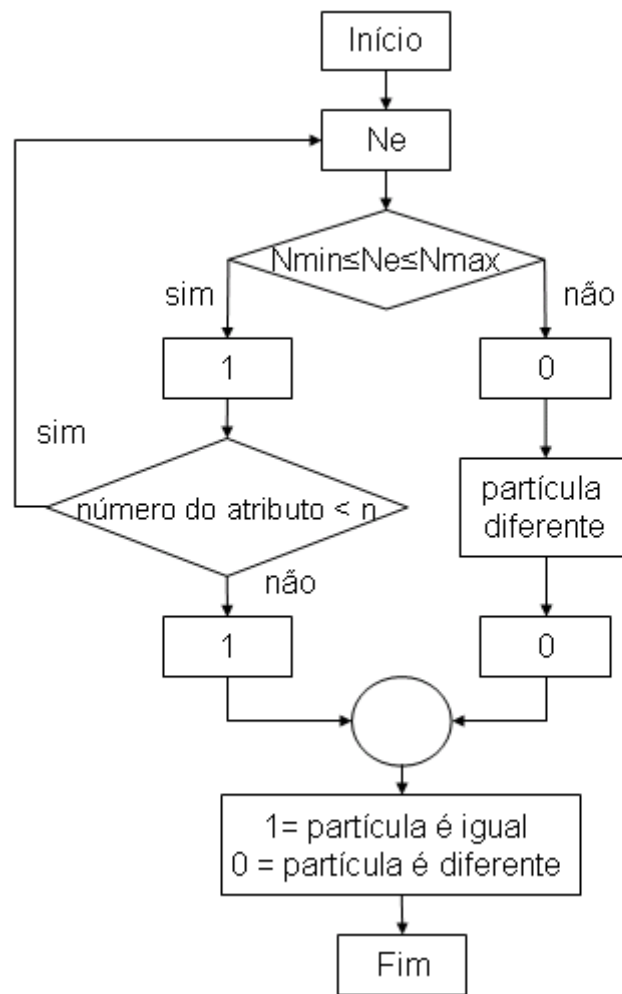


Figura 35 – Fluxograma do padrão de comparação

O critério do sistema especialista aplicado nesta avaliação é fundamentado na análise dos valores obtidos pela extração das características de cada partícula de desgaste. Para tal aplicação foram selecionados os valores compreendidos entre $N_{máx}$ e $N_{mín}$. O sistema realiza um teste lógico para cada Ne , verificando-se $N_{máx} \leq Ne \leq N_{mín}$, após a verificação, se Ne estiver entre a faixa de valores mínimo e máximo dos atributos, então retorna com valor igual a 1 e continua o teste para os outros atributos. Se um dos valores testados não estiver na faixa de valores, o valor retorna zero e a partícula será classificada como uma partícula diferente. O sistema considera que a partícula é similar à avaliada se todos os atributos após o teste lógico retornarem com o valor igual a 1.

Foram realizados testes com este processo utilizando-se um banco de dados de quarenta partículas, e o sistema classificou para esse espaço de amostragem 100% das partículas de cada grupo.

A Tabela 3 ilustra o resultado de uma partícula analisada por meio dos critérios adotados considerando uma partícula de abrasão. A vantagem desse sistema é que uma vez estabelecidas as regras, a classificação é executada com eficiência. O banco de dados disponibilizado para este trabalho corresponde a dez partículas de cada tipo de desgaste, mas é importante que sejam acrescentadas mais partículas para cada tipo de desgaste para que o sistema possa ter uma abrangência maior. A maior dificuldade é encontrar imagens de amostras de partículas específicas para se extrair as características morfológicas.

Tabela 3 – Teste realizado de verificação de uma partícula de abrasão

Desgaste	Área	Perímetro	Largura	Altura	Diâm. Principal	Diâm. Secundário	Circularidade	Diâm. Feret	Alongamento	Razão Aspecto
Ne	982	402	117	51	57	22	0,1	119	2,26	2,31
Abrassão	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Com os critérios apresentados, foi submetida uma amostra para análise de todas as 40 partículas encontradas e classificadas mediante esse critério; o resultado é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Amostra x número de partículas encontradas

Amostra de Partículas Avaliadas	Número de Partículas Encontradas	%
Abrassão	10	25%
Fadiga	10	25%
Deslizamento Severo	10	25%
Fricção	10	25%
Total de Partículas da Amostra	40	100%

Dos resultados obtidos verificou-se que o sistema classifica todas as partículas de cada tipo específico de desgaste. Para que a classificação fosse realizada de uma

maneira automática, foram criadas macros no *Visual Basic* v.6.3 disponível na planilha Excel da Microsoft.

5.4 Classificação individual das partículas pelo formato usando redes neurais

Os resultados obtidos pela avaliação das redes neurais são estabelecidos após o envio da imagem da partícula de desgaste, que é analisada por meio do microscópio óptico, e em seguida enviada ao sistema de visão computacional para que seus atributos morfológicos possam ser extraídos e utilizados para treinar as redes neurais.

A eficiência das redes neurais é importante para que a classificação da partícula analisada seja satisfatória; para isso foram realizados testes para determinar o melhor conjunto de características da MLP para ser utilizado pelo classificador. Por esta razão, todas as dez combinações possíveis entre esses atributos, citados na Tabela 1 do capítulo 4 da presente tese, foram considerados.

Após o treinamento das redes neurais encontram-se as melhores combinações possíveis para a melhor taxa de acerto da RNA_CPD, e para este exemplo a MLP usada tem cinco neurônios em sua camada de entrada, dez em sua camada oculta e quatro em sua camada de saída. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos da melhor configuração de atributos de entrada para se obter as melhores taxas de acerto na comparação entre partículas relacionadas aos modos de desgaste analisados.

Tabela 5 – Melhor configuração para combinações entre características

Atributos (camada de entrada)					TA (%)
área	altura	Ø menor	alongamento	razão de aspecto	96,0
área	altura	Ø menor	circularidade	alongamento	95,2
área	Ø menor	circularidade	alongamento	razão de aspecto	95,2
área	altura	circularidade	alongamento	razão de aspecto	95,2
área	altura	Ø menor	circularidade	razão de aspecto	94,1

Utilizando os atributos da camada de entrada das redes neurais ilustrados na primeira linha da Tabela 5, um teste foi conduzido para medir a taxa de acerto (TA) do sistema classificatório variando o número de eventos de 100 até 2.000 e medindo a TA. O resultado final é ilustrado na Figura 36, que mostra a taxa de acerto em função do número de eventos para os parâmetros selecionados, os quais foram: área, razão de aspecto, altura, diâmetro menor e alongamento.

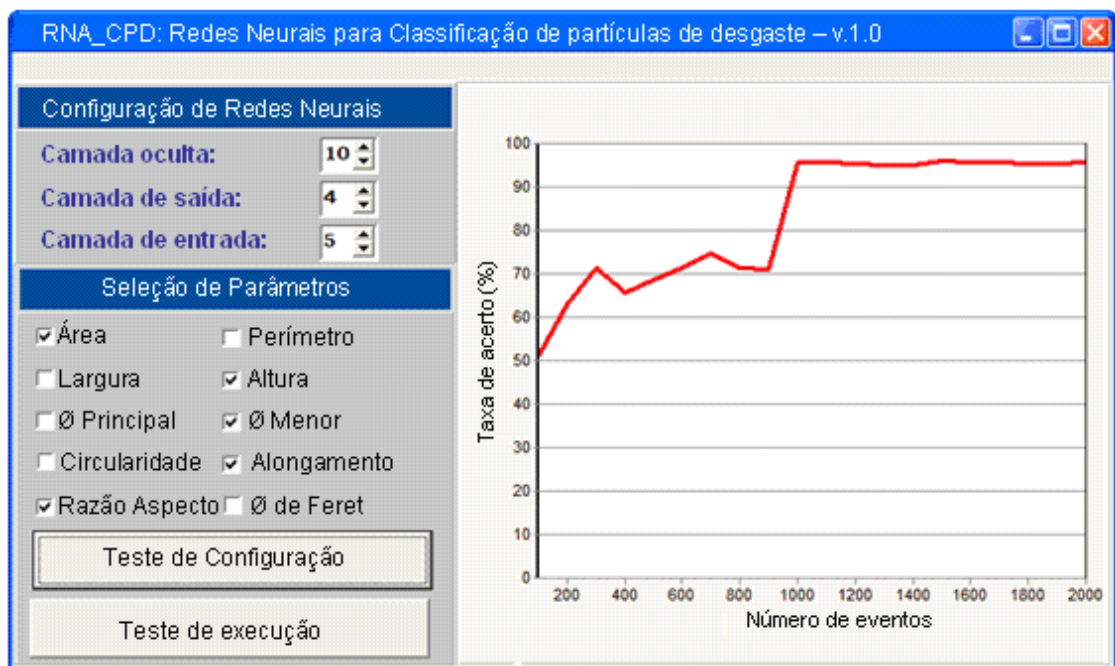


Figura 36 – Taxa de acerto em função do número de eventos

Verificou-se que não foi necessário utilizar todos os atributos disponibilizados pelo RNA_CPD para que a melhor taxa de acerto, que se estabilizou a partir de 1.000 eventos, fosse alcançada.

6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, técnicas de processamento de imagem e análise computacional de dados foram aplicadas para obter informações relevantes das imagens de partículas de desgaste. Foi desenvolvido um sistema fundamentado em técnicas de processamento de imagens para ser utilizado na análise de partículas de desgaste de óleos lubrificantes industriais. Esse sistema permite avaliar o tamanho das partículas de desgaste de acordo com os critérios da norma ISO 4406:1999. Também foi introduzida a análise morfológica das partículas envolvidas na amostra, classificando-as de acordo com os critérios morfológicos adotados.

Apresentou-se uma aplicação para a análise microscópica de partículas de desgaste que utiliza um sistema especialista (IASS) e redes neurais (RNA_CPD). As vantagens desta aplicação incluem: (i) seu uso computacional, (ii) viabilização do projeto e (iii) o uso de uma interface interativa com aplicação de técnicas de processamento de imagens. As duas tecnologias, IASS e RNA_CPD realizam suas tarefas para o diagnóstico qualitativo e quantitativo e para análise morfológica das partículas. A integração entre esses sistemas possibilitou o controle das operações de classificação e análise de partículas de desgaste.

O sistema desenvolvido apresenta a vantagem de poder ser utilizado por usuários com pouca experiência em análise de partículas de desgaste, podendo ser adaptado para a análise de outros tipos de partículas.

A contribuição da pesquisa se concentra no desenvolvimento de um sistema de programas computacionais que apresenta uma interface gráfica interativa e que integra recursos de processamento de imagens à área de análise de partículas de desgaste em óleos lubrificantes industriais. Esse sistema utiliza os recursos tecnológicos da área computacional e de tribologia, o que viabiliza a aplicação tanto no meio acadêmico como no setor industrial.

Outro aspecto diferencial é sua estrutura modular e aberta, o que permite a atualização, integração de sistemas de apoio e implementação de novas ferramentas de análise com recursos tecnológicos mais avançados. O sistema apresenta estrutura

flexível e pode ser configurado de modo a adicionar regras para identificação do modo de desgaste das partículas.

Há expectativa de utilização do método na implantação de laboratórios de análise de óleo de custo acessível no ambiente acadêmico e no setor industrial.

Para trabalhos futuros propõe-se o projeto de um sistema para gerar as partículas de desgaste, o uso de redes neurais para o reconhecimento das imagens de partículas coletadas, bem como melhorias no sistema de hardware com uso de um microscópio com melhor resolução.

REFERÊNCIAS

ARP 598B. **Aerospace Recommended Practice**. The determination of particulate contamination in liquids by particle count method, 1999.

ANDERSON, D. P.; LUKAS, M.; YURKO, R. J. **Recent improvements in oil analysis spectrometers**. International Conference on Condition Monitoring. Swansea, UK. 395-402. 1999.

BURGER, W.; BURGE, M. J. **Digital image processing – an algorithmic introduction using Java**. Springer, New York, 2007

CUMMING, AC. **Condition monitoring today and tomorrow – an airline perspective**. In: 1st Int. Conf. COMADEN 89, Birmingham, U.K, 1989.

CANON DIGITAL CAMERA, **Software Development Kit Software**, Developer's Guide. Ver 7.0. Copyright CANON INC, 2004.

DING, J. **Wear Particle Atlas**, CD ROM, Lubrosoft, 1998.

DALLEY, R. J. **An overview of ferrography and its use in maintenance**, Predictive Maintenance Seminar, 1991.

DOWSON, D. **History of Tribology**. Professional Engineering Publishing, 759p, 1997.

FISHER, G. C. **Evaluation of various methods to detect metallic wear particles in lube-oil filter debris**. Tribotest Journal, 4-3, pp. 261-274, 1998.

GONÇALVES, V. D.; ALMEIDA, L. F.; MATHIAS, M. H. **Wear Particle Classifier System Based on an Artificial Neural Network**, ECOTRIB 2009, Italy, v.1, pp 263-268, 2009.

GONÇALVES, V. D.; MATHIAS, M. H. **A Mechatronic System Applied to wear Particle Analysis**, Slovenian Society for Tribology, ECOTRIB, Slovenia, v.2, pp 1065-1072, 2007.

GONÇALVES, V. D. **Controle de um Manipulador Robótico Auxiliado por um Sistema de Visão**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, 2004.

GORYACHEVA, I. G. **Contact Mechanics in Tribology**, Kluwer Academic Publishers ISBN 0-7923-5257-2, Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, December 1997

HERGUTH, W. R. **When to Regrease**. Tribology & Lubrication Technology 60 no5, 2004.

HUNT, T.; EVANS, J. **Oil analysis handbook**. Coxmoor publishing company, Oxford, UK, 2004.

HUNT, T. M. **Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids**. Springer. ISBN: 978-1-85166-962-2, London, v.1, p.92-93, 1993.

ISO 4406, Hydraulic fluid power – Fluids. **Method for coding the level of contamination by solid particles**. 1999.

JAMES, A. T.; MARTIN, A. J. P. **Gas-liquid partition chromatography: the separation and microestimation of volatile fatty acids from formic acid to dodecanoic acid**. Biochemical Journal. National Institute for Medical Research, Mill Hill, London, England, v50, p.679-90, 1952.

JENNINGS, W.; MITTLEDEHLDT, E.; STREMPLE, P. **Analytical Gas Chromatography**. Academic Press, San Diego, USA, 1997.

JONES, M. H. **Effective use of the patch test for simple on-site analysis**. Swansea Tribology Services Ltd, U. K., September, 2004.

JOST, H. P. **Tribology – Origin and future**. Wear v.136, p.1–17, 1990.

KOZA, J. R.; ANDRE D. **Parallel Genetic Programming on a Network of Transputers**. Report No. STAN-CS-TR-95- 1542. Department of Computer Science Stanford University, Stanford, California, USA, jan, 1995.

LAGHARI, M. S. **Recognition of texture types of wear particles**. Neural Computing & Applications, Springer London, ISSN 0941-0643, v.12, p.18-25, 2003.

LAGHARI, M. S.; BOUJARWAH, A. **Wear particle identification using image processing techniques**. In: ISCA, 5th Int. Conf. Intelligent Systems, Reno, U.S.A., p. 22-30, 1996.

LAGHARI, M. S.; MEMON, Q. A.; KHUWAJA, G.A. **Knowledge Based Wear Particle Analysis**. Enformatika, Vol. 3, 112-116, 2004.

LEVITT, J. **Complete guide to preventive and predictive maintenance**. New York: Industrial Press, 2003.

LIM, Y. W. AND LEE, S. U. **On the colour image segmentation algorithm based on the thresholding and the fuzzy c-means techniques**, Pattern Recognition, 23, no. 9, p. 935 952, 1990.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 406 p.,1999.

MARSDEN, P.; BECKER, A. **A Replacement Database for the CH-47D Spectrometric Oil Analysis Program**. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia, 2002.

MAYER, A. **Particle Counting – Peril or Prize?** Practicing Oil Analysis, NORIA CORPORATION, Março, 2006.

MAYER, A. **What the tests really tell us**. Practicing Oil Analysis, NORIA CORPORATION, March, 2006.

MILLIPORE CORPORATION, **Millipore Particle Monitoring Guide**. Lit. No. AD030 rev.5/99 94-303, 1999.

NEALE, M. J. **Tribology Handbook**. Newnes-Butterworths, London, 1973.

PENG, Z. **An integrated intelligence system for wear debris analysis**. Wear v.252, p.730–743, 2002.

PODSIADLO, P.; STACHOWIAK, G.W. **The development of modified hurst orientation transform for the characterization of surface topography of wear particles**. Tribology Letters v.4, p.215–229, 1998.

PRATT, W. K. **Digital image processing** : PIKS Scientific inside , 4th ed, 2007.

RAADNUI, S. AND KLEESUWAN, S. **Low-cost condition monitoring sensor for used oil analysis**. Wear v.259, p.1502–1506, 2005.

RAADNUI, S. **Transmission condition evaluation through magnetic chip detector (MCD) ferrous wear particle analysis.** In: Shrivastav OP, Al-Najjar B & Rao RBKN (eds) Proc of the 16th Int Congress of COMADEM, Växjö, Sweden, 27th – 29th August 2003, 473–479, 2003.

RAADNUI, S. **Wear Particle Analysis – Utilization of Quantitative Computer Image Analysis: A Review.** Tribology International, v. 380, p.871-878, 2005

RAO, B. K. N. **Handbook of Condition Monitoring.** Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 1996.

RASBAND, W.S. **ImageJ, National Institutes of Health,** Bethesda, Maryland, USA, Disponível em: < <http://rsb.info.nih.gov/ij/> =>. Acesso em: 24 jan. 2005.

RN, ARMY, RAF. **Hydraulic Oil Monitoring,** Joint Air Publication (JAP(D)) 100A-01 Issue 19, Chapter 11.4.2, Page 4, 2007. Disponível em: < [http://www.jap100a-01.mod.uk/Jap\(d\)/engpolhtml.htm](http://www.jap100a-01.mod.uk/Jap(d)/engpolhtml.htm) =>. Acesso em: 20 fev. 2008.

ROYLANCE, B. J; ALBIDEVI, I. A.; LAGHARY M. S. **Computer-aided vision engineering (CAVE) – quantification of wear particle morphology.** Lubrication Engineering, v.50, n.2, p. 111-116, fev, 1993.

ROYLANCE, B. J; ALBIDEVI, I. A.; LUXMOORE, A. R. **The development of a computer-aided systematic particle analysis procedure–CASPA.** Lubrication Engineering, Dec, 1992.

ROYLANCE, B. J. **Ferrography — then and now.** Tribology International, v. 38, p.857–862, 2005.

ROYLANCE, B. J.; HUNT, T. M. **The Wear Debris Analysis Handbook.** Coxmoor, publishing company, Oxford, UK. p.129, 1999.

ROYLANCE, B. J.; RAADNUI, S. **The morphological attributes of wear particles - their role in identifying wear mechanisms**, *Wear*, 175, pp. 115–121, 1995.

RUSS, J. C. **Computer-Assisted Microscopy**. The Measurement and Analysis of Images. Plenum Publishing Corporation, New York, USA, 1990.

RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. Plenum Press, 1992.

SARATCHANDRAN, P.; SUNDARARAJAN N.; FOO, S. K. **Parallel Implementations of Backpropagation Neural Networks on Transputers: a Study of Training Set Parallelism**. *Progress In Neural Processing*, v.3: ISBN: 981-02-2654-3, p.220, 1996.

SEIFERT, W.W.; WESTCOTT, V.C. **A method for the study of wear particles in lubricated oil**, *Wear*, v.21, p.27–42, 1972.

SONKA, M.; HLAVAC, V.; BOYLE, R. **Image Processing, Analysis, and Machine Vision**. Thomson, ISBN: 13: 978-0-495-24428-7, USA, 2008.

SPERRING, T.P.; NOWELL T.J. **SYCLOPS—a qualitative debris classification system developed for RAF early failure detection centres**. *Tribology International*, v.38, p.898–903, 2005.

STACHOWIAK, G.P.; PODSIADLO. P.; STACHOWIAK G.W. **A comparison of texture feature extraction methods for machine condition monitoring and failure analysis**. *Tribology Letters*, v.20, n.2, p.133-147, 3^a edition, out, 2005

STACHOWIAK, G.W.; PODSIADLO, P. **Towards the development of an automated wear particle classification system**. *Tribology International*, v.39, p.1615–1623, 2006.

THOMSON GALE. **Chromatography**. World of Forensic Science. Encyclopedia.com, 2005. Disponível em <<http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-3448300127.html>>. Acesso em: 25 ago. 2008.

TRANSTECH DEVICES LIMITED. **Document Reference: TMBO8FLY0789**. Unid 17, Wye Industrial Estate London Road, High Wycombe Buckinghamshire, HP11 1LH, England, 1989.

VÄHÄOJA, P. **Oil analysis in machine diagnostics**. University of Oulu, Department of Mechanical Engineering, Oulu University Press, ISBN 951-42-8076-8, Oulu, Finland, 2006.

XU, K; LUXMOORE A. R. **An Integrated System for Automatic Wear Particle Analysis**. Wear, v.208, p.184-193, 1997.

XU, K; LUXMOORE A. R.; DERAVID, F. **Comparison of Shape Features for the Classification of Wear Particles**. Eng. Applic. Art. Intell. V.10, n. 5, p.485-493, 1997.

APÊNDICE A – Conceitos básicos para o processamento de imagens

O objetivo deste apêndice é descrever a teoria básica para o processamento de imagens que possui como requisitos mínimos a aquisição, o armazenamento e a operação de processamento de imagens. Serão apresentados os conceitos fundamentais para que uma imagem digital possa ser utilizada pelo programa de processamento de imagens desenvolvido na análise das partículas de desgaste.

Aquisição de imagem

Pela aquisição de uma imagem obtém-se uma informação visual que pode ser processada por um computador. Sua qualidade depende da iluminação do ambiente, da distância entre os objetos, da cor dos objetos e de outros fatores. São analisadas as imagens formadas a partir da radiação visível, que ao incidir sobre um sensor CCD, converte em tensão elétrica, que em seguida é enviada a uma placa de aquisição de imagens, e o computador processa essa informação para que possa ser feita a representação de uma imagem.

Digitalização de imagens

A digitalização de imagens possui menor complexidade que a aquisição de imagens sequenciais. Seu princípio de operação é o mesmo de um *scanner* ou de uma câmera fotográfica digital. A vantagem de um *scanner* é que ele dá uma grande nitidez na imagem, no entanto, para sua utilização é necessário manter uma distância fixa de uma imagem bidimensional. Já a câmera possui a lente que permite ajustar o foco da imagem.

O método de digitalizar ou escanear é feito utilizando-se um sensor CCD (*Charge Coupled Device*). Esse sensor é um dispositivo composto por um arranjo de células de foto sensibilidade à luz, o qual é usado para criar um mapa de bits da imagem. Os sinais analógicos dos capacitores do CCD são convertidos para imagem

digital, a qual é guardada na memória de uma câmera ou transferida para um computador. Os arquivos das imagens ficam gravados no disco rígido do computador em formato específico.

Tipos de arquivos de imagens

São abordados alguns tipos de arquivos para o armazenamento de imagens. A base sobre a descrição das imagens é em tons de escala cinza ou o formato colorido conhecido como RGB. Esse formato colorido é formado pela combinação dos tons vermelho, verde e azul.

Representação da imagem

Uma imagem bidimensional consiste em uma matriz de pixels de duas dimensões. Para cada pixel, é dada uma cor ou tonalidade de cinza correspondendo ao número de matrizes do tipo da imagem. No caso de uma imagem colorida, cada pixel é representado por três cores básicas, conforme ilustrado na Figura 37.

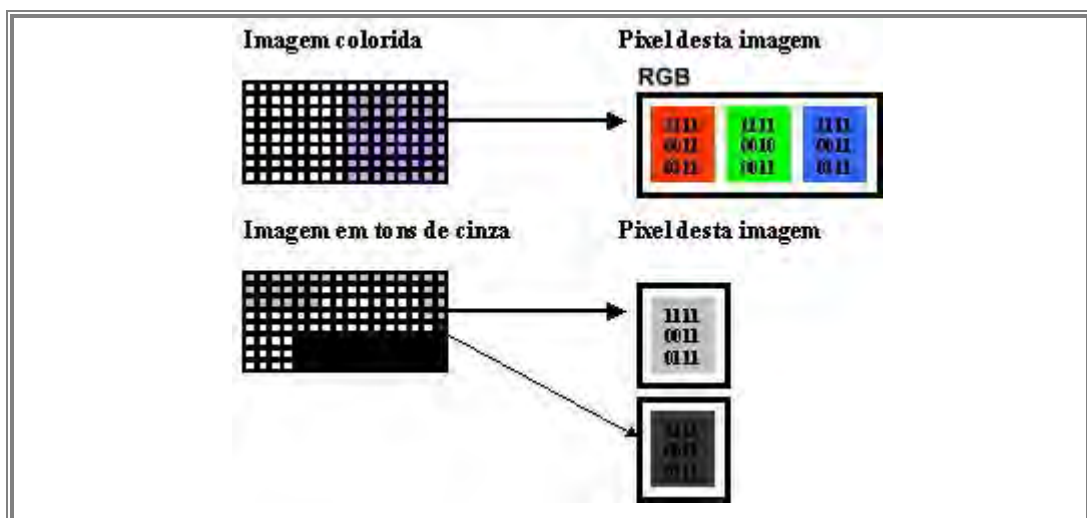


Figura 37 - Pixels RGB, pixels em tons de cinza (Gonçalves, 2004)

A imagem monocromática pode ser representada por um *bit* por pixel. Zero para preto e um para branco.

As imagens em tons de escala cinza possuem variação de tonalidades, sendo representadas por uma escala de 0 (zero) a 255. Alguns tipos de imagens em tons de cinza podem ter 16 diferentes níveis podendo ser armazenados em apenas 4 bits, sendo menores que a imagem com 256 tons de cinza que consome 8 bits da memória.

Imagens coloridas podem ter acima de 24 milhões de cores, mas elas consistem de três cores básicas que são vermelho, verde e azul. Cada uma dessas cores básicas tem a intensidade de 0 a 255 tons. Esse tipo de imagem usa cerca de 24 bits de memória por pixel..

Armazenamento da imagem

O armazenamento da imagem pode ser feito por diferentes métodos, tais como: vetor de imagens; pixels de imagens e imagens comprimidas.

Algumas imagens são armazenadas como vetores, nos quais a informação é a descrição do vetor de diferentes linhas da imagem. Um exemplo está no desenho de AutoCAD com a extensão de arquivo .dwg.

Os pixels das imagens são guardados com a descrição de cores ou níveis de cinza para cada pixel.

O formato de arquivo de imagem RAW

Diferente do formato BMP, em que temos um cabeçalho dando informações sobre o tamanho da imagem, bem como suas características de cores, no formato RAW não existe essa informação, mas esse formato contém apenas o mínimo de informações processadas de um sensor de imagem de uma câmera digital ou *scanner*. Este formato RAW não está pronto para ser utilizado, ele deve ser convertido para o formato BMP, JPEG ou outros formatos para ser acessado por meio de um editor gráfico. Cada marca de câmera ou scanner tem seu formato RAW específico.

O formato de arquivo de imagem JPEG

Este formato tem por abreviatura ⁷JPEG, que é o nome do comitê que criou este padrão. Existem no total 44 variações deste formato de compressão JPEG, algumas são utilizadas em aplicações específicas tais como análise de partículas de desgaste, metalografia, aplicações médicas, imagens astronômicas, entre outras.

Componentes de cores

A Figura 38 ilustra a decomposição da cor no sistema Windows dos componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B). Pode-se notar que, para cada cor, existe uma variação numérica.

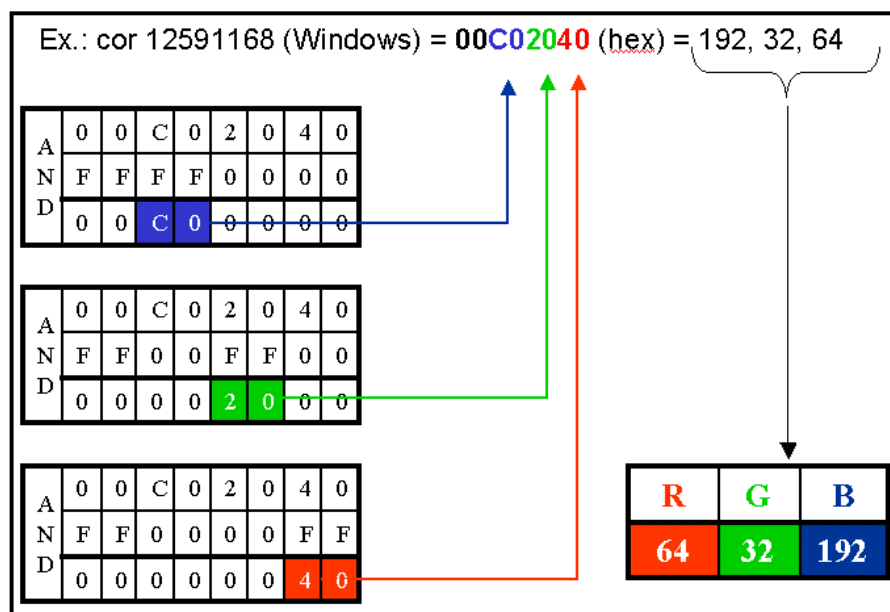


Figura 38 – Componentes de Cores

Para converter uma imagem de RGB para 256 tons de cinza, pode-se utilizar a Equação 9, que realiza a transformação (BURGER; BURGE, 2007).

$$\text{Gray} = 0,299 R + 0,587 G + 0,114 B \quad (9)$$

⁷ Obtida da página eletrônica www.jpeg.org/committee.html, em abril/2008.

Limiarização e binarização

O princípio da limiarização consiste em separar as regiões de uma imagem quando ela apresenta duas classes (o fundo e o objeto). A forma mais simples, e geral de limiarização, consiste na bipartição do histograma convertendo os pixels, cujo tom de cinza é maior ou igual a um determinado valor de limiar (T) em brancos e os demais em pretos, como é ilustrado na Figura 39.

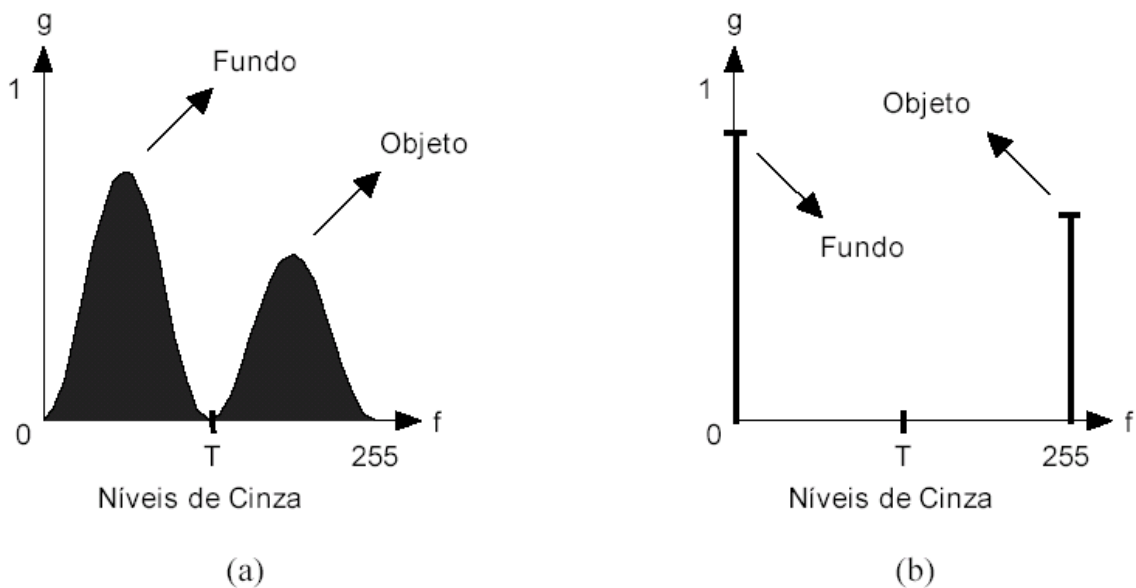


Figura 39 – Limiarização utilizando limiar T : (a) histograma original, (b) histograma da imagem binarizada (MARQUES; VIEIRA, 1999)

O nível do limiar pode ser calculado por métodos matemáticos ou pode ser fixado manualmente para o estudo da imagem e de seu histograma. Podem-se cometer erros ao selecionar o nível do limiar como o de não incluir todos os pixels que se quer estudar na nova imagem, pois os pixels incluídos poderiam não ser da nova imagem. Pode-se definir o limiar da seguinte forma: dada uma imagem $f(x, y)$ em tons de cinza, a limiarização tem como saída uma imagem binária $g(x, y)$ em que: $g(x, y) = 0$, se $f(x, y) < T$, ou $g(x, y) = 1$, se $f(x, y) \geq T$, onde T é o limiar. Sendo $g(x, y) = 1$ para os pontos dos objetos da imagem e $g(x, y) = 0$ para pontos que pertençam ao fundo da imagem.

A limiarização pode ser chamada de binarização, porque após este processo o resultado é uma imagem em preto e branco. A conversão para uma imagem binária

pode ser feita a partir de uma imagem com 256 tons de cinza. Após determinar-se o valor do limiar são convertidos todos os pixels que estão em níveis de cinza abaixo do nível do limiar para zero (preto), e todos os que estiverem iguais ou acima do nível do limiar ficarão valendo um (branco).

No processo de limiarização é determinado o valor de um limiar para a imagem da partícula de desgaste obtida pelo sistema desenvolvido. A Figura 40 ilustra a imagem original e a binarizada após a escolha do nível do limiar, que neste exemplo foi de 80. O programa IASS dispõe de uma barra de rolagem para o ajuste do valor do limiar em uma escala que vai de 0 a 255.

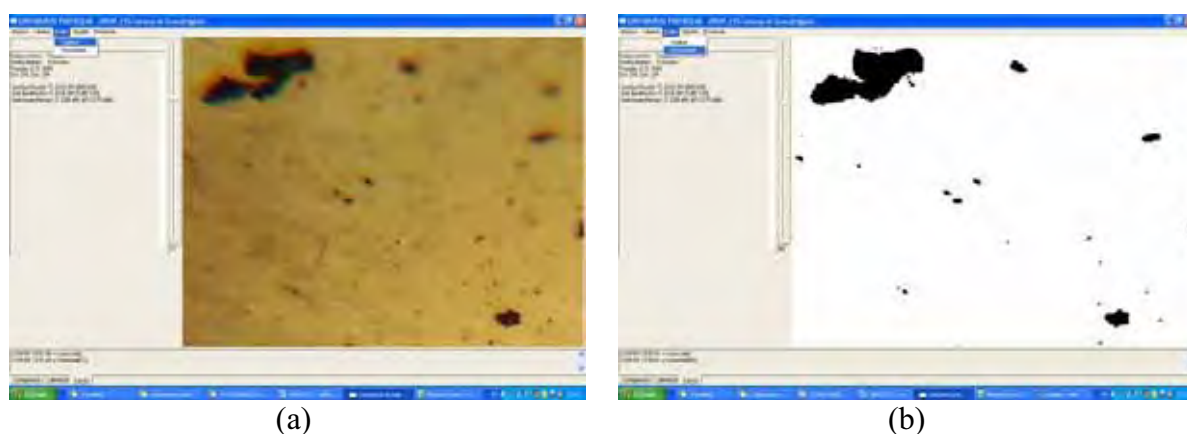


Figura 40 – Limiarização: (a) imagem original; (b) imagem binarizada

Segmentação de Imagens

Uma etapa importante dos sistemas de análise de imagens é a segmentação. Ela pode ser utilizada para a otimização do tempo de processamento.

Segmentação é o processo onde se divide uma imagem digital em múltiplas regiões (conjunto de pixels), com o objetivo de simplificar ou mudar a representação de uma imagem para facilitar a sua análise. Ela é utilizada para localizar objetos, formas, um conjunto de regiões ou um conjunto de contornos extraídos da imagem. Esse processo simplifica a representação de uma imagem permitindo uma análise mais eficiente. O resultado da segmentação de imagens é que cada um dos pixels em uma mesma região é similar a alguma característica ou propriedade, tais como cor,

intensidade, textura. Regiões adjacentes devem possuir diferenças significativas com respeito à mesma característica.

Um dos processos mais simples da segmentação é a limiarização (SONKA et al., 2008).

APÊNDICE B – Quantificação das partículas com microscópio óptico

A contagem direta das partículas pelo microscópio pode ser realizada examinando-se diretamente o filtro por meio de luz incidente quando for utilizado o filtro opaco na análise.

As partículas dentro do campo de visão são contadas e classificadas em diversos tamanhos. Por meio dessa contagem, determina-se o tamanho e a distribuição das partículas. Pode ser detectada facilmente a partícula proveniente da contaminação por fibras, e de partículas de específicas fontes de contaminação. O procedimento deve ser focado nos objetivos de análise da amostra específica. Para a análise de partículas maiores que 150 μm , pode-se ser menos cuidadoso com relação aos cuidados da limpeza e qualidade do ambiente em que se está realizando a filtragem. Porém, para a análise de todas as partículas, é importante uma iluminação adequada sobre a superfície do filtro da amostra analisada. No microscópio, deve ser feito o alinhamento óptico por um operador cuidadoso e habilitado. Deve ser realizada a calibração da escala de medição do microscópio por meio de uma lamínula calibrada em três estágios. A Figura 41 ilustra a lamínula de calibração.

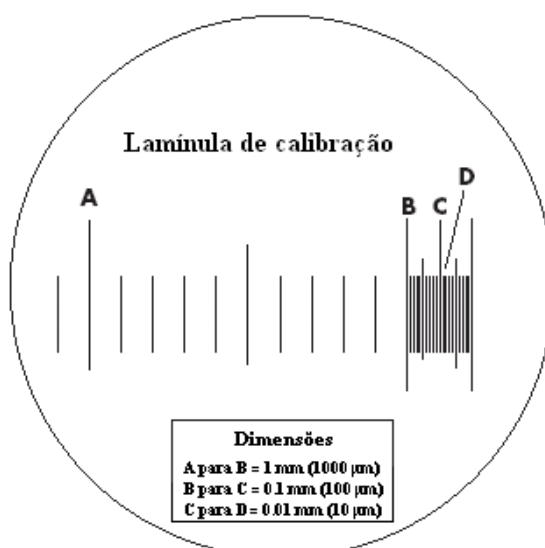


Figura 41 – Lamínula de calibração

Após a calibração da escala ocorre o processo de contagem de partículas. Esse processo depende do tipo específico de equipamento usado. O procedimento utilizado deve ter uma repetibilidade comprovada.

O tamanho da partícula será avaliado por sua maior dimensão. Deve-se focalizar a partícula com o microscópio de forma a obter a maior definição desta. Se o total de partículas contidas no filtro for de 1 a 50, conta-se toda a área do filtro. Se o total de partículas estiver entre 50 e 1000, conta-se o número de partículas em 20 quadrados do filtro, Figura 42. Se o número total de partículas estiver entre 1000 e 5000, conte-se o número de partículas de 10 quadrados escolhidos aleatoriamente. Após obter o resultado, multiplica-se esse número por 10 para se obter a estatística total de partículas contadas. Se o número total de partículas for maior que 5000, deve-se contar pelo menos 10 áreas quadradas.

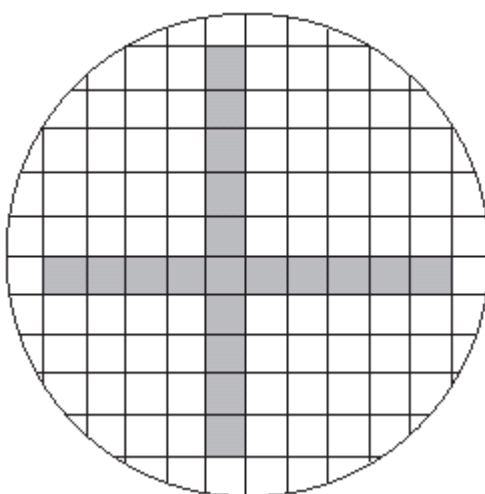


Figura 42 – Filtro com 20 quadrados selecionados

O total de partículas contadas para cada variação deve ser calculado utilizando-se a equação (10):

$$Total_contado = \frac{A}{Fn \times Fa} \times Pt \quad (10)$$

Em que: $A = d^2 \times \pi \frac{1}{4}$ = área da membrana em mm²

Fn = Número de campos ou unidades de área contados.

Fa = Área de cada campo (unidade de área) em mm².

Pt = Número de partículas em Fn campos ou unidades de área.

O resultado das partículas filtradas deve ser equivalente a 100ml. Se o volume filtrado for de valor diferente o resultado deverá ser específico para esse volume.

APÊNDICE C – Complementos do Programa computacional IASS e Macros desenvolvidas

O programa IASS utiliza-se da aplicação do código SDK para acessar a câmera e gravar a imagem obtida em formato JPEG, para isso são necessárias três etapas descritas a seguir.

Inicialização da câmera

O arquivo INI é usado como padrão de parâmetros para a câmera, ele é necessário para iniciar o sistema do *hardware*. Cada câmera digital Canon possui a descrição do INI em seu manual.

Controle e pré-seleção dos parâmetros da câmera

Os parâmetros podem ser lidos ou escritos com as funções preestabelecidas e de nomes definidos para a configuração e controle da câmera.

Iniciando e finalizando a aquisição da imagem

Este processo ajusta a câmera dentro do modo mais eficiente de captura de imagem. Quando o início da aquisição é chamado pelo programa, a câmera irá guardar as imagens o mais rápido possível até que o sistema seja solicitado para parar a aquisição e assim a operação termina.

O Visual Studio C++ gerencia o software criado por meio de soluções; cada solução possui um ou mais projetos, que formam o software ou o conjunto de *softwares* que está sendo criado.

A estrutura é dividida nos arquivos *Header Files*, *Resources Files* e *Sources Files*. O *Header Files* declara as funções principais do cabeçalho de arquivos, ele contém sub-rotinas, variáveis e identificadores. O *Resources Files* é a parte do

programa que possui as funções de auxílio, eles definem as caixas de diálogo da parte visual do programa. O *Sources Files* são os arquivos que contém o código fonte.

A Figura 43 ilustra a estrutura do programa CD-SDK.

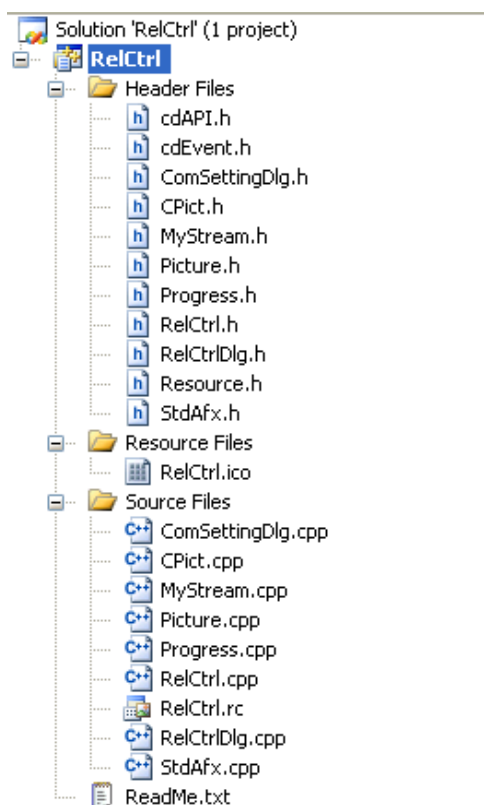


Figura 43 – Estrutura do programa CD-SDK

Desenvolvimento de uma macro para a classificação e contagem das partículas no Excel

Neste tópico será detalhada uma macro desenvolvida para realizar a contagem e classificação das partículas de desgaste a partir de dados obtidos com a aplicação do IASS e do ImageJ em amostras de óleo contidas em membranas de filtro. Esta macro tem a função de realizar a contagem dos dados obtidos do diâmetro de Feret de cada partícula e efetuar a contagem e disponibilizar a classificação conforme norma ISO 4406:1999 em um relatório de uma planilha Excel.

A Figura 44 ilustra um relatório em que o valor de classificação obtido foi de ISO 18/19/20 para a amostra em estudo; a seguir, é apresentado o código do programa, escrito em *Visual Basic*, para a classificação das partículas.

Normal Level [E]		=< R		
Up Alarm [F]		> R		
Recommended[R]		19	15	17
Até...	ISO			
10.000.000	30			
5.000.000	29			
2.500.000	28			
1.300.000	27			
640.000	26			
320.000	25			
160.000	24			
80.000	23			
40.000	22			
20.000	21			
10.000	20			F
5.000	19	R	F	
2.500	18	E		
1.300	17			R
640	16			
320	15		R	
160	14			
80	13			
40	12			
20	11			
10	10			
5	9			
2,5	8			
1,3	7			
0,6	6			
		>=4µm	>=6µm	>=14µm

Sample Data			
Diameter standart	35000 µm		962112750,2 área (µm²)
Sample diameter	1500 µm		1767145,9 área (µm²)
Standart volume	1 ml		
Filtrate volume	25 ml		
Optic increase	100x		
			21,8 Factor

Classification ISO 4406:1999			
Sample particles	109 /	161 /	250
Particles x Factor	2.374 /	3.506 /	5.444
Classification	18 /	19 /	20

Figure	Ampliation factor	100x
--------	-------------------	------

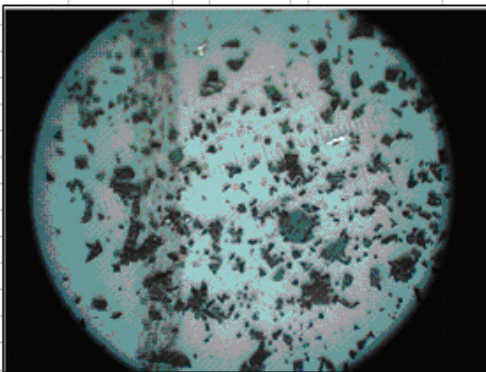


Figura 44 – Relatório de classificação das partículas

Código do programa, escrito em Visual Basic, para a classificação das partículas.

```
'Valores de referência Global R4 As Integer, R6 As Integer, R14 As Integer
Sub Ordenar()
' Ordenar Macro
Columns("A:B").Select
Selection.Sort Key1:=Range("B2"), Order1:=xlAscending, Header:=xlGuess, _
OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-18
End Sub
```

'Calcula o valor ISO 4406:1999, baseado no número de amostras encontradas

```

Function ISO_4406(Quantidade As Single, Categoria As String) As Integer
If Quantidade >= 5000000 And Quantidade < 10000000 Then
ISO_4406 = 30
ElseIf Quantidade >= 2500000 And Quantidade < 5000000 Then ISO_4406 = 29
ElseIf Quantidade >= 1300000 And Quantidade < 2500000 ThenISO_4406 = 28
ElseIf Quantidade >= 640000 And Quantidade < 1300000 Then ISO_4406 = 27
ElseIf Quantidade >= 320000 And Quantidade < 640000 Then ISO_4406 = 26
ElseIf Quantidade >= 160000 And Quantidade < 320000 Then ISO_4406 = 25
ElseIf Quantidade >= 80000 And Quantidade < 160000 Then ISO_4406 = 24
ElseIf Quantidade >= 40000 And Quantidade < 80000 Then ISO_4406 = 23
ElseIf Quantidade >= 20000 And Quantidade < 40000 Then ISO_4406 = 22
ElseIf Quantidade >= 10000 And Quantidade < 20000 Then ISO_4406 = 21
ElseIf Quantidade >= 5000 And Quantidade < 10000 Then ISO_4406 = 20
ElseIf Quantidade >= 2500 And Quantidade < 5000 Then ISO_4406 = 19
ElseIf Quantidade >= 1300 And Quantidade < 2500 Then ISO_4406 = 18
ElseIf Quantidade >= 640 And Quantidade < 1300 Then ISO_4406 = 17
ElseIf Quantidade >= 320 And Quantidade < 640 Then ISO_4406 = 16
ElseIf Quantidade >= 160 And Quantidade < 320 Then ISO_4406 = 15
ElseIf Quantidade >= 80 And Quantidade < 160 Then ISO_4406 = 14
ElseIf Quantidade >= 40.1 And Quantidade < 80 Then ISO_4406 = 13
ElseIf Quantidade >= 20 And Quantidade < 40 Then ISO_4406 = 12
ElseIf Quantidade >= 10 And Quantidade < 20 Then ISO_4406 = 11
ElseIf Quantidade >= 5 And Quantidade < 10 Then ISO_4406 = 10
ElseIf Quantidade >= 2.5 And Quantidade < 5 Then ISO_4406 = 9
ElseIf Quantidade >= 1.3 And Quantidade < 2.5 Then ISO_4406 = 8
ElseIf Quantidade >= 0.6 And Quantidade < 1.3 Then ISO_4406 = 7
ElseIf Quantidade >= 0.3 And Quantidade < 0.6 Then ISO_4406 = 6
Else ISO_4406 = 0
End If
End Function
'Ajusta os valores de referência

```

' Categoria tem que ser um valor entre: [Cat4, Cat6, Cat14]

Function AjustaRef(Valor As Integer, Categoria As String) As String

ValidaDados Categoria

If Categoria = "Cat4" Then

R4 = Valor

ElseIf Categoria = "Cat6" Then

R6 = Valor

ElseIf Categoria = "Cat14" Then

R14 = Valor

End If

AjustaRef = ""

End Function

'Determina se o valor está dentro dos limites

Function DentroDoLimite(Valor As Integer, Categoria As String) As Boolean

ValidaDados Categoria

If Categoria = "Cat4" Then

If Valor <= R4 Then

DentroDoLimite = True

Else

DentroDooLimite = False

End If

ElseIf Categoria = "Cat6" Then

If Valor <= R6 Then

DentroDoLimite = True

Else

DentroDooLimite = False

End If

ElseIf Categoria = "Cat14" Then

If Valor <= R14 Then

DentroDoLimite = True

```

Else
DentroDooLimite = False
End If
End If
End Function

```

'Verifica se todos os dados necessários são válidos

```
Sub ValidaDados(Categoria As String)
```

```
'Valida a categoria
```

```
If Categoria <> "Cat4" And Categoria <> "Cat6" And Categoria <> "Cat14" Then
```

```
MsgBox "Categoria [" + Categoria + "] inválida! Use valores entre  
[Cat4,Cat6,Cat14]"
```

```
End If
```

```
'Valida os valores encontrados
```

```
If E4 = 0 Or E6 = 0 Or E14 = 0 Then
```

```
MsgBox "Valor zero!!"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

'Classifica 'Valor' e determina se a saída vai ser um 'R' (valor de referência),

'um 'E' (valor encontrado), um 'R,E' (ambos), um 'F' (fora do limite) ou ' ' (nada, vazio)

```
Function ClassificaTabela(Valor As Integer, Enc As Integer, Ref As Integer) As String
```

```
If Valor = Enc And Valor = Ref Then
```

```
ClassificaTabela = "R,E"
```

```
ElseIf Valor = Ref Then
```

```
ClassificaTabela = "R"
```

```
ElseIf Valor = Enc And Valor <= Ref Then
```

```
ClassificaTabela = "E" 'Dentro dos limites
```

```
ElseIf Valor = Enc And Valor > Ref Then
```

```
ClassificaTabela = "F" 'Fora dos limites
```

```
Else
```

```
ClassificaTabela = ""  
End If  
End Function
```

ANEXO

Cópias de artigos publicados pelo autor em revistas internacionais, nacionais e congresso internacional.

TRIBOLOGIA: Finnish Journal of Tribology (Finland)

ABENDI: Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção
(Observação: nome anterior ABENDE)

ECOTRIB 2009: 2nd European Conference on Tribology. Pisa, Italy

Este artigo foi aceito para publicação no *Journal of Mechanical Engineering* na Eslovênia, Europa.

TRIBOLOGIA

FINNISH JOURNAL OF TRIBOLOGY

Volume 27/2008

4



SUOMEN TRIBOLOGIAYHDISTYS
THE FINNISH SOCIETY FOR TRIBOLOGY

TRIBOLOGIA

FINNISH JOURNAL OF TRIBOLOGY

Julkaisija:

Suomen Tribologiayhdistys ry - The Finnish Society for Tribology

Suomen tiedekustantajien liitto ry:n jäsen
Member of the Finnish Association for Scholarly Publishers

Published by:

Päätoimittaja
(Editor-in-Chief)

Jyrki Tervo
Tel. +358 20 722 5360
Fax +358 20 722 7077
E-mail: Jyrki.Tervo@vtt.fi

Toimitussihteeri
(Editorial Assistant)

Erja Mörsky
Tel. +358 20 722 5366
Fax +358 20 722 7077
E-mail: Erja.Morsky@vtt.fi

Postiosoite

TRIBOLOGIA - Finnish Journal of Tribology
c/o VTT, PL 1000, 02044 VTT

Postal address

TRIBOLOGIA - Finnish Journal of Tribology
c/o VTT, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, FINLAND

Tilaushinnat

Vuosikerta 45 €, Irtonumerot 10,10 €, sis. postimaksut

Subscription prices

Annual rate 45 €, Single copies 10,10 €, incl. postage

Suomen Tribologiayhdistys ry:n tilinumero: Sampo 800013-1486636

The Account number of the Finnish Society for Tribology:

Sampo Bank Finland 800013-1486636

© COPYRIGHT, Suomen tribologiayhdistys ry/The Finnish Society for Tribology. All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher, The Finnish Society for Tribology, VTT, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, FINLAND.

A MECHATRONIC SYSTEM APPLIED TO WEAR PARTICLE ANALYSIS

V. D. GONÇALVES, M. H. MATHIAS.

Sao Paulo State University (UNESP) – Campus Guaratinguetá,

São Paulo, Brazil.

ABSTRACT

This paper describes the development of a mechatronic system for a predictive maintenance grounded on wear particle analysis. The reckoning of wear particles containing in lubricating industrial oils brings the image acquisition system into being. The ISO 4406:1999 standard is a guide to establish the counting and evaluation processes of particles. The system applied to the acquisition and analysis of the data consists of a digital camera, a monocular microscope and an oil filtering system. A computational program was developed with the application of Visual Microsoft C++ in a way to detain the oil sample image from the microscope slide to the computer screen. Quantitative analyses of the wear debris particles bulk are exploited applying a graphical interface that was developed to render the image processing of the sample test. The implemented system has a reachable cost thus it can be applied for schooling goals and for bolstering laboratories of minor industries and medium size companies.

Keywords: Wear particles; mechatronic system; Graphical interface; Computational program.

INTRODUCTION

Wear debris analysis is an eminently usable technique for monitoring the condition of machinery components, for instance those found in engines, transmissions and other machineries. The term 'wear' is associated to the field of tribology, which is an area that trades the study of wear, friction and lubrication [1]. Particles contained in the lubricating oil can be separated for examination and analysis by using different methods. Visual inspection of microscopic wear particles in lubricating oil is an important stage of the wear debris analysis. Particles images are distinguished by their size, quantity, shape, edge detail, edge curvature or surface texture [2]. Particles quantity enables the extent and rate of wear to be monitored. Wear particle size distribution analysis is quantifiable by an automatic-particle-counting procedures usage or by

devised image analysis [3-4]. Automatic image analysis offers the potential to collect statistical information associated to a huge number of particles and the formation of a reference database against, which particles of unknown type and origin can be typified.

There are three methods employed to particle counting: optical particle counting, pore-blockage particle counting and microscopic evaluation. The optical particle method is deemed as a sophisticated automatic method, which can be used with very clear or dusky oils alike. The foremost drawback of it is the cost. The microscopic assessment processes, which this matter considers, are implemented to conditions where exceedingly dirty oils are the pattern. Under the microscope process, a solvent-weakened ratio of specimen is used to prepare a patch, where contamination is refined onto a patch for microscope examination. The patch makers range from

the portable, manual vacuum pump-type to the more advanced bench-mount setup with an electric vacuum pump. The ISO 4406:1999 Standard grounds the preparation of the sample test [5]. The sample filtration is constituted by the oil sample, and after the purification, the membrane filter is transferred to *petri* dish being ready for a microscopic inspection. In order to become aware of the particles count, it is necessary to seize the image of the field that will be investigated. The image will be analyzed to a computer vision process that locates and recognizes objects in digital images with the use of image processing techniques.

EXPERIMENTAL SETUP

Description of the system

The developed apparatus system applied into this work consists of two modules, named patch bench-mounted setup and computer image processing system. The apparatus system shown in Figure 1 includes a filter holder, a vacuum pump, a Canon A-520 digital camera connected to a 'Quimis Q-705M1' monocular microscope and a microcomputer connected to the digital camera via USB port.



Figure 1. System apparatus.

A program denominated "Image Acquisition System Software (IASS)", which was developed to counting automatically particles of a patch test, controls the computer image processing system.

System operation

The description of system operation is summarized in the flowchart showed in Figure 2.

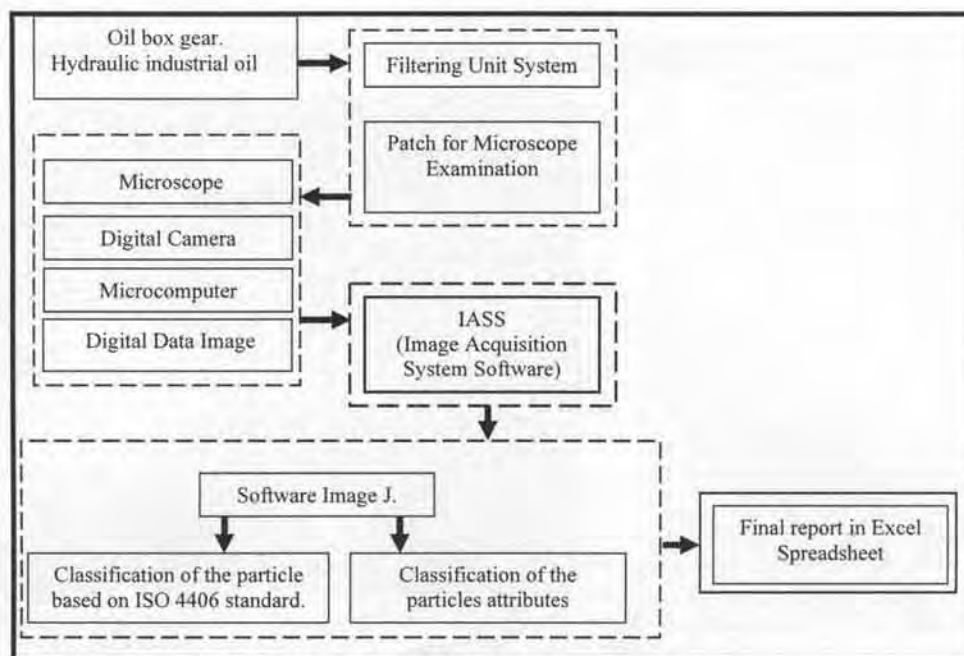


Figure 2. System operation flowchart.

Following the flowchart, the process starts with monitored equipment as an oil box gear or hydraulic industrial oil. The oil sample is obtained in 100ml in which the quantity of 50ml is input in a filtering unit system. A membrane of a 47mm of diameter and having a pore size of 1.2 μm is used to make the filtration. After the filtration, the filter patch is removed from the filtering unit and then placed a monocular microscope for examination using magnification factor of hundredfold. The patch filter brings the particles of contamination contained in the oil sample. A digital data image of patch is obtained through the digital camera and transferred to the computer and then is processed with the Image Acquisition System

Software (IASS) which makes the counting particles process guidance; calling other programs used in this process as Microsoft Excel spreadsheet and Image J.

IMAGE ACQUISITION SYSTEM SOFTWARE

The IAAS works under "Microsoft Windows" environment to capture the images of the patch tests. The main window of IASS is shown in Figure 3 with a wear image been displayed. There are five top-level menu items with their pop-up menus for the users to control and access the system.

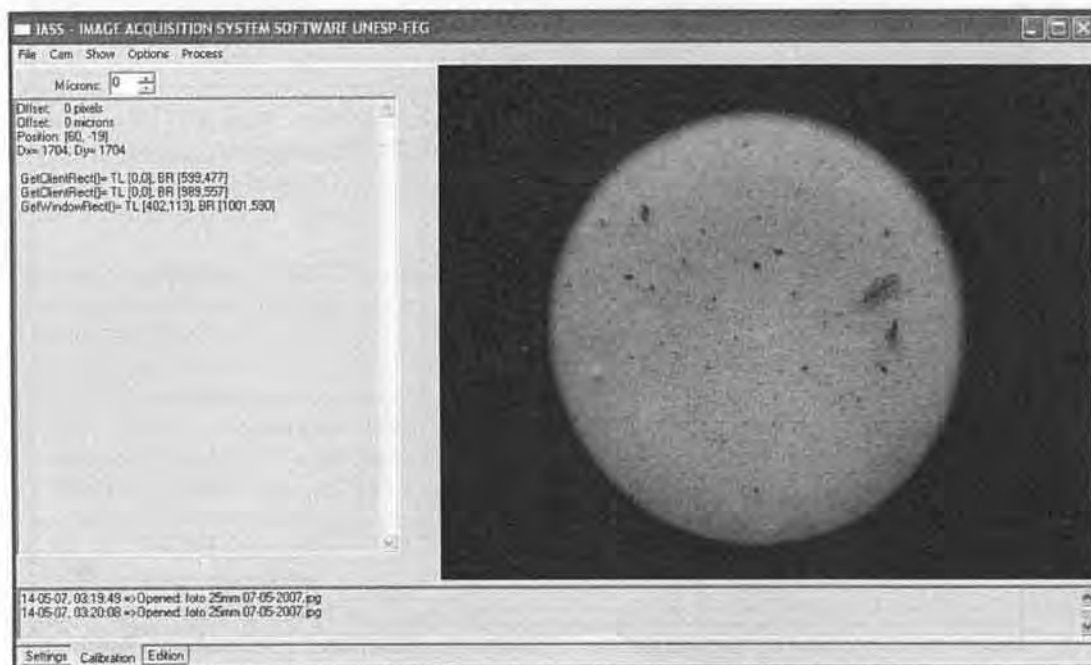


Figure 3. Digital image of the patch test.

The image capturing from the microscope is saved in joint photographic experts group format (JPEG) under the “Camera” menu item. The program has also a link to ImageJ under “Options” menu item. ImageJ [6] is a public domain image analysis program, which has been used to count the wear particles detected within specific ranges of sizes. The criterion adopted to estimate the particles on this article is based on ISO 4406:1999 standard, which is a process that evinces the category and sharpness of the wear-taking place. The results of particle counter are presented on an Excel spreadsheet under the associated pop-up menu “Start Report” from “Options” menu.

Calibration process

The first step under ImageJ environment is the calibration process of visual field of the microscope. The idea under this process is to evaluate the dimension of the wear particles. The calibration is processed using a standard stage micrometer, which is a glass slide with etched graduations divided into 0.01 mm. The calibration is performed as shown in Figure 4. A straight line is created using the line tools from ImageJ toolbar. This line is overlapped with the graduated scale. Then in the menu of ImageJ under the item “analyse” select the pop-up “set scale” in a way to determine the calibration factor between metric scale and the size of the pixel ($\mu\text{m}/\text{pixel}$).

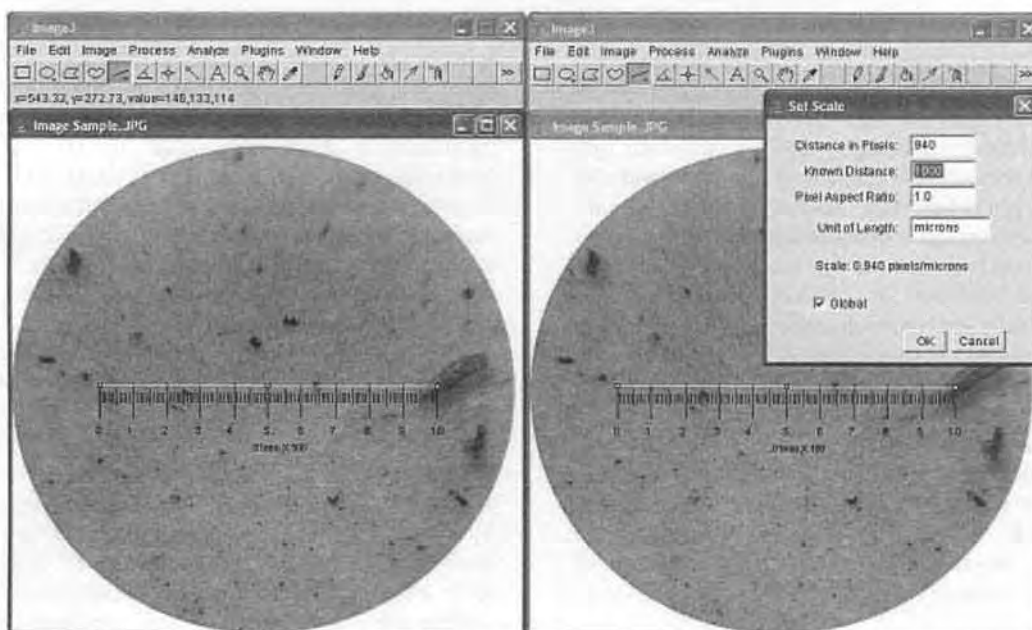


Figure 4. Process of calibration.

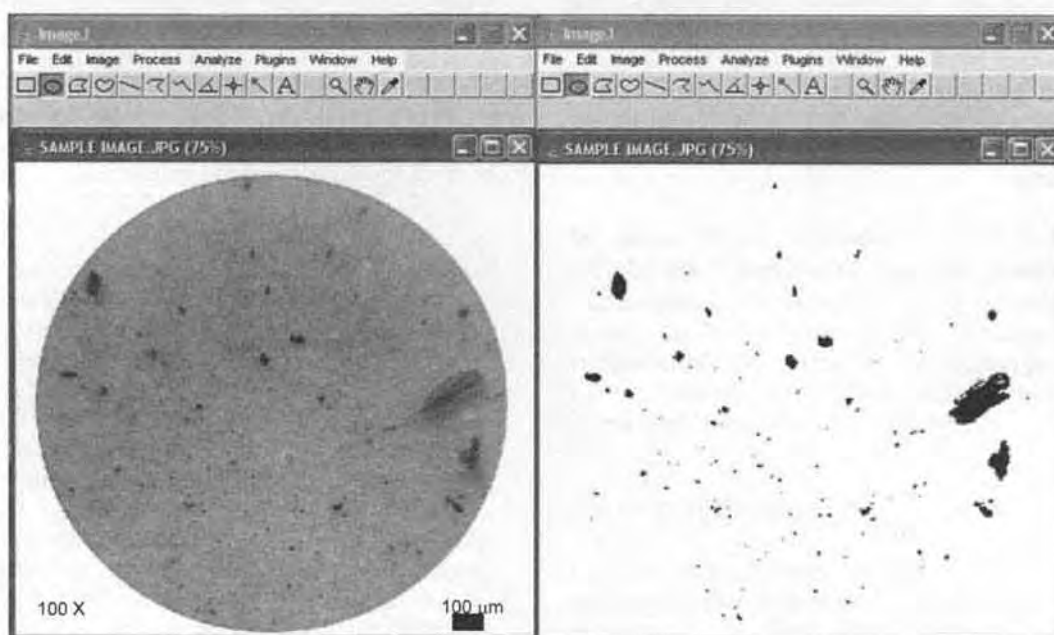


Figure 5. Thresholding of the grabbed image.

Particle size distribution

For the particle size distribution the grabbed image, has to be thresholded first. This process consists of image segmentation that divides the field of view into background and foreground intensity levels [7]. The threshold value can be selected either automatically, or manually. After the thresholding, all detected wear particles are globally classified. The globally analysis consists of particle counting, size and classification of shape features. Figure 5 shows the thresholding method of the grabbed image processed under ImageJ environment.

The system can count particles according to their size distributions following the measurements of size and distributions according to ISO 4406:1999 standard.

PARTICLES SHAPE CLASSIFICATION

After size distributions shape features are important factors applied in the recognition of wears particles [3], since they have a close relationship within wear modes and condition of machines. Shape features on this article are classified using roundness, aspect ratio and area.

Roundness is expressed as the radius of average radius of the edges or corners to the

radius of curvature of the maximum inscribed sphere. The roundness factor is defined as the ratio of perimeter squared to the area contained within the outline shape [7]. This parameter is normally scaled to give a minimum value of unity for a circle, and larger values for irregular boundary shape. Another technique used to identify the shape of wear particles is aspect ratio, which is a dimensionless factor defined as the ratio of its longer dimension to its shorter dimension.

REPORT OF THE OIL SAMPLE ANALYSIS

A report of oil sample is presented in Excel Spreadsheet shows the image of the patch, the classification of oil sampled in accord with ISO 4406:1999 and it also provides the distribution of particles based on shapes features applied in this work for recognition of wear pattern.

Figure 6 shows the result of report with details of the sample test.

The classification of particles shape features is shown in Table 1. This classification provides the distribution of particles for 1 ml of oil in accord with the shape features.

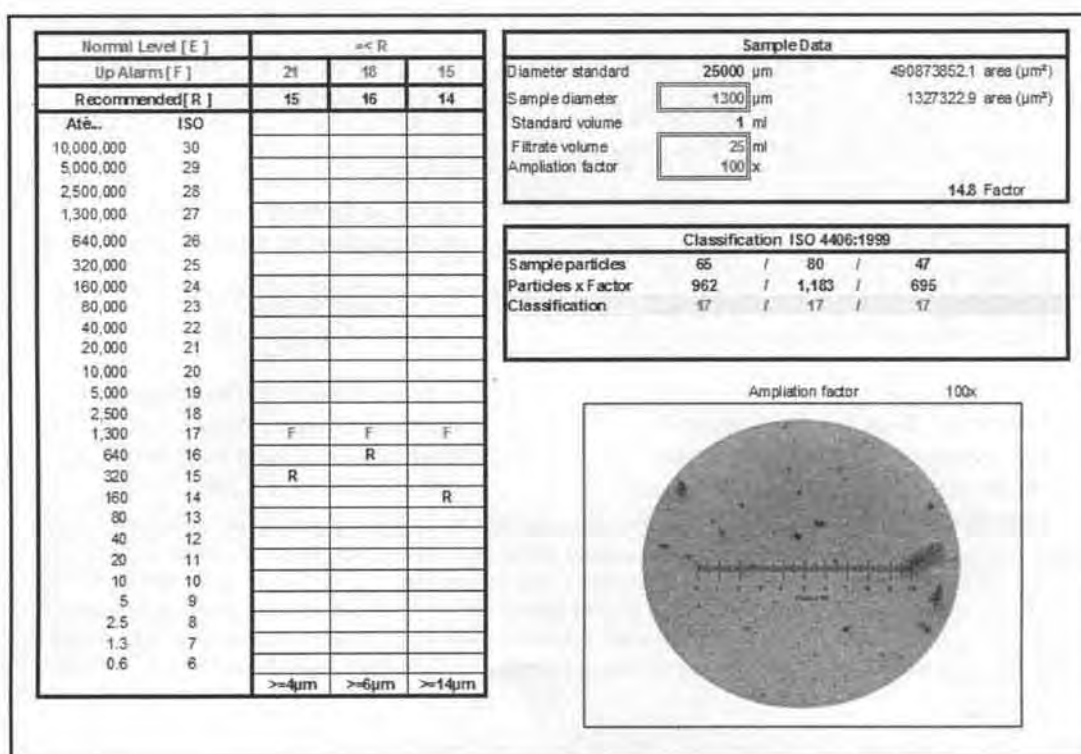


Figure 6. Result of report of oil sample.

Table 1. Classification of particles as shape features.

ISO 4406	Area µm²		Roundness		Aspect Ratio		Number particles in filter patch
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
>4 and <6 microns	4,58	14,87	1,00	1,75	1,04	4,00	962
>6 and <14 microns	6,86	77,78	1,00	3,00	1,06	5,49	1183
>14 microns	33,17	13125,91	1,24	4,05	1,04	6,09	695

CONCLUSIONS

Computer vision and image processing techniques are applied to extract important information from wear particles images. This article presents a low cost integrated image view system for use in wear debris analysis. This system that is based on image processing techniques has been used to evaluate particles size measurements and distributions. It is

expected promising results for helping the maintenance of industry environment personnel and it structures with affordable resources an oil-analysis program laboratory into the university. Future improvements have been done to the system, like the uses of neural networks for image recognition of wear particles and improvements in the hardware system. It is also intended to build database of wear particles.

REFERENCES

- [1] M. S. Laghari, Q. A. Memon and G.A. Khuwaja, Knowledge Based Wear Particle Analysis, *Enformatika*, Vol. 3 (2004) 112-116.
- [2] K. XU, A.R. Luxmore, F. Deravi, Comparison of Shape Features for the Classification of Wear Particles, *Eng. Applic. Art. Intell.* Vol. 10, n. 5 (1997) 485-493.
- [3] S. Raadnui, Wear Particle Analysis – Utilization of Quantitative Computer Image Analysis: A Review, *Tribology International*, Vol. 380, (2005) 871-878.
- [4] K. XU, A.R. Luxmore, An Integrated System for Automatic Wear Particle Analysis, *Wear* Vol. 208, (1997) 184-193.
- [5] ISO 4406, Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles, 1999.
- [6] W. Rasband, Image J 1.34s, National Institute of Health, U.S.A.
- [7] A. D. H. Thomas, T. Davies and A. R. Luxmore, Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles, *Wear*, Vol. 142 (1991) 213-226.

revista *abende*

Publicação da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção | Ano V | Nº 23 | Abril 2008

END no Setor de Autopeças



Guia de END no Setor Siderúrgico

Conheça as principais técnicas de END utilizadas no dia-a-dia do Setor Siderúrgico

Artigo Técnico

Sistema de processamento de imagens para análise de partículas de desgaste

A Empresa Fala

Veja os produtos e serviços que serão apresentados na Exposição Técnica de Equipamentos, Produtos e Serviços de END (16ª ExpoEND), paralela ao CONAEND&IEV2008

www.abende.org.br

Expediente

Publicado por:
Associação Brasileira de Ensaios
Não Destrutivos e Inspeção - ABENDE
ISSN: 1980-1599

Comitê Editorial

Amilton Carvalho - PASA
Elaine Bastos - ABENDE
Eugenio Solita - BE
Fábio Fraga Moreira - NDT
João Conte - ABENDE
Luiz Alberto Barros de Castro - Kosak Industrex
Livia Cristina F. de Castro - REM
Maria Izabel L. Gebraci - Metal-Check
Oswaldo Rossi Junior - Inter-Metro
Raimar Eckardt Schmidt - Raincheck

Comitê Científico

Isaem Nascimento - UNESP
Paulo Carlos Kaminski - USP
Protasio Ferreira e Castro - UFF
Raquel Gonçalves - UNICAMP
Ricardo Tadeu Lopes - UFRJ

Equipe

Responsável: Elaine Bastos
Jornalista: Alexandra Alves - MTR 26660
Revisor: Edmundo Conde
Edição: Hologem Comunicação
Editora: GT Editora

Sede ABENDE

Rua Guapiraçu, nº 5 - Vl. Clementino - 04024-020
Tel: (011) 5586-3199 / Fax: (011) 5581-1194
R. Setor de Certificação de Pessoal: (011) 5586-3181

Endereços Eletrônicos

Site: www.abende.org.br
Comunicação: comunicacao@abende.org.br
Cursos: cursos@abende.org.br
Eventos: eventos@abende.org.br
Informações Gerais: abende@abende.org.br
Normalização: normalizacao@abende.org.br
Qualificação: qualificacao@abende.org.br
Sócios: socios@abende.org.br

Público Leitor

Profissionais especializados (engenheiros, gerentes, administradores) de empresas de END e Inspeção e usuários dessa tecnologia.

•Técnicos (supervisores, inspetores e operadores) que estão diretamente envolvidos com o tema.
•Instituições de ensino

Para anunciar: comunicacao@abende.org.br
Para falar com a redação: jornalismo@abende.org.br

Para receber a revista:

Sócios ABENDE recebem gratuitamente.

Para tornar-se sócio acesse:

www.abende.org.br/socios

Para assinar a revista, acesse:

www.abende.org.br/revista

Assinatura anual: R\$ 189,00

Tiragem: 5.000 exemplares

A revista não se responsabiliza por ideias e conceitos
ditados em artigos ou matérias assinadas, que expressem
apenas o pensamento dos autores, não representando,
necessariamente, a opinião da revista.
publicação reserva-se o direito, por motivo de espaço e
clareza, de resumir cartas e artigos.



EDITORIAL

Prezados Amigos



João Rufino
Presidente da ABENDE

O avanço acelerado da indústria automobilística já deixou de ser novidade há muito tempo. E como consequência disso, o Setor de Autopeças segue o ritmo. Já que só em janeiro deste ano, a movimentação financeira do segmento aumentou 7,2% em igual período de 2007. Mostrar como, quando e em quais situações os Ensaios Não Destrutivos (END) contribuem com essa realidade é o objetivo da matéria de capa da edição 25 da Revista ABENDE.

Ouvimos os representantes das principais empresas da área para traçar um perfil realista e pontual sobre a posição dos ENDs nesse cenário.

Nesta edição, você também vai conhecer um novo caderno que iniciamos: o Guia de END Setorial. Na estréia desse espaço, vamos apresentar algumas dicas de equipamentos/produtos em que os ENDs são aplicados no dia-a-dia das indústrias siderúrgicas. É importante ressaltar que as informações foram extraídas de pesquisa realizada diretamente com profissionais do setor.

O caderno A Empresa Fala antecipa um pouco, aos participantes em geral do XXVI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção e 12ª Conferência Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales (CONAEND&IEV2008), informações sobre os produtos e serviços que as empresas vão expor no evento.

A parte técnica da revista reserva os seguintes títulos: Sistema de Processamento de Imagens para Análise de Partículas de Desgaste, como artigo técnico; e Modelagem de Dados de Ensaios Ultra-sônicos em Concreto Através de Redes Neurais Artificiais (RNAs), como suplemento científico.

A edição 25 também aborda o assunto normalização de forma bem didática. Você ainda vai entender melhor o conceito. Afinal, embora esse seja um tema comum à associação e toda a comunidade de END, o objetivo é esclarecer, de forma prática, um assunto de extrema importância para o sucesso das empresas.

No caderno Paineis, apresentamos os integrantes do Comitê Técnico da Revista ABENDE. Pessoas que contribuem com o nosso conteúdo editorial, sugerindo pautas e avaliando trabalhos técnicos para divulgação.

João Rufino Teles Filho
Boa leitura!

Sócios Patrocinadores

ALSTOM

Kodak Industrex
Products

COSIPA

GE Inspection
Technologies

METAL-CHK

OCEANEERING

SISTAC

TenarisConfab

TWI

USIMINAS

VIM

Sistema de processamento de imagens para análise de partículas de desgaste

Mauro H. Mathias¹, Valdecir D. Gonçalves², José Elias Tomazini³

Sinopse

O trabalho trata do desenvolvimento de um sistema mecatrônico para captura e processamento de imagens de partículas de desgaste em amostras de óleos lubrificantes. O sistema desenvolvido se aplica à contagem e avaliação do tamanho das partículas de desgaste em óleos lubrificantes de máquinas industriais. O ensaio não destrutivo implementado é realizado através do acompanhamento do aumento do tamanho e característica de distribuição das partículas de desgaste coletadas através de uma membrana de um elemento filtrante. O equipamento de coleta e análise desenvolvido consiste de uma câmera digital Canon A520, acoplada a um microscópio monocular. A câmera é conectada através da interface USB a um microcomputador. O sistema permite armazenar e processar as imagens capturadas da amostra de óleo. Uma interface gráfica foi desenvolvida em linguagem de programação Microsoft Visual C++TM, de forma a proporcionar a visualização e captura das imagens das amostras na tela do computa-

dor. Para o processamento das imagens, rotinas computacionais foram desenvolvidas para a análise quantitativa do tamanho das partículas de desgaste. O produto desenvolvido apresenta bom desempenho e baixo custo, se comparado aos equipamentos de mercado, podendo ser utilizado para fins educacionais e como apoio às empresas de pequeno e médio porte.

1. Introdução

O artigo trata do desenvolvimento de um sistema aplicado à contagem automatizada de partículas de desgaste em óleos lubrificantes. O processo de contagem é implementado a partir de imagens obtidas através de um sistema de coleta e filtragem de óleo. No sistema desenvolvido, as imagens das partículas de desgaste retidas em uma membrana de filtro (de poro de 1,2 micrômetros) são analisadas através de um sistema de processamento de imagem, que consiste de um microscópio, uma câmera digital, um computador e um programa de captura e processamento de imagens. O processo de contagem de partículas implementado atende aos critérios da norma ISO 4406:1999 [1]. O trabalho objetivou implementar um sistema de análise de óleos lubrificantes que utiliza técnicas de processamento de imagens [2]. O sistema desenvolvido poderá atender à demanda de manutenção de empresas industriais de pequeno e médio porte.

2. Análise de óleos lubrificantes

Vários métodos de análise de óleo são aplicados ao monitoramento das condições de máquinas industriais. Dentre os métodos usuais se destacam: a ferrografia [3], cromatografia gasosa, espectrometria de emissão atômica e contagem de partículas [4]. A análise de óleo é uma ferramenta de diagnóstico de manutenção utilizada para detectar a quantidade e morfologia das partículas de desgaste de metais, e também para avaliação dos níveis de contaminantes em lubrificantes. O processo da análise de óleo consiste no acompanhamento periódico de amostras, visando à avaliação dos mecanismos de desgaste que são produzidos em máquinas onde ocorre o movimento das partes mecânicas em contato. Esta ferramenta encontra aplicação em sistemas de caixa de engrenagem, equipamentos robotizados, máquinas agrícolas e equipamentos mecânicos que utilizam óleos lubrificantes e graxas para reduzir o atrito provocado pela aderência das partes móveis. A análise de partículas de desgaste pode ser considerada uma das técnicas da manutenção preditiva [5]. A implementação das técnicas de análise de óleo é fundamentada em sistemas de inspeção visual com auxílio de microscópio [6]. Com a evolução dos sistemas mecatrônicos, a identificação e análise das partículas de óleo podem ser implementadas através de siste-

1 - Doutor, Engenheiro Mecânico - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá.

2 - Mestre, Engenheiro Eletricista - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá.

3 - Doutor, Engenheiro Mecânico - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá.

mas automatizados baseados em um processo de visão computacional [7]. Esta área, relativamente nova, envolve processamento e aquisição de imagens.

3. Sistema mecatrônico aplicado à análise de óleos

Nesta seção, é descrito um sistema mecatrônico aplicado à análise de óleos lubrificantes. O sistema projetado foi estruturado em três módulos. No primeiro módulo, é efetuada a preparação de amostras. No segundo módulo, as imagens das partículas de desgaste são capturadas em um microcomputador; e no terceiro módulo, é efetuado o processamento e análise das imagens.

3.1 Módulo de preparação de amostras

O módulo de preparação das amostras de óleo é composto de uma bomba de vácuo, de um suporte de filtro, de elemento filtrante (membrana de nitrocelulose), e de um dispositivo para armazenar as membranas após o processo de filtragem. As amostras utilizadas no processo de filtragem foram coletadas em ambiente industrial provenientes de motoredutores de trefilas industriais. As coletas das amostras foram efetuadas de acordo com os procedimentos recomendados na literatura [8,9].

3.2 Módulo de aquisição de imagens

O módulo de preparação e aquisição de imagens consiste de um microscópio monocular da marca Quimis Q-703M2, uma câmera digital Canon modelo A 520, que é acoplada ao microscópio, e um microcomputador. A imagem da câmera é capturada na tela do computador através de um programa desenvolvido em linguagem de programação visual C++. A Figura 1 ilustra o sistema de aquisição de imagens.



Figura 1. Sistema de aquisição de imagens.

3.2 Sistema de processamento e análise das imagens

No processamento das imagens, a contagem de partículas é iniciada com a limiarização, que consiste em transformar a imagem do formato RGB para o formato binarizado. A figura 2 ilustra uma imagem de uma amostra colorida e a respectiva imagem binarizada através do programa de tratamento desenvolvido.



Figura 2. Limiarização da amostra.

Para o tratamento das imagens e contagem de partículas foi utilizado o programa Image J (de domínio público) [10]. A Figura 3 ilustra o fluxograma do processo da contagem e classificação das partículas. No fluxograma, a imagem das partículas de desgaste da membrana é capturada através da câmera e transferida para o computador. Os dados de imagem gravados no computador são processados de modo a efetuar a contagem de acordo com o critério estabelecido na norma ISO 4406:1999, e são apresentados na forma de um relatório em planilha Microsoft Excel.

No critério da norma ISO 4406:1999, as partículas são agrupadas em três classes, caracterizando sua distribuição quantitativa. As classes são distribuídas para cada 1 ml de amostra em partículas de tamanhos de 4 a 6 micrometros, de 6 a 14 micrometros e acima de 14 micrometros.

4. Resultados

Nesta seção é apresentado relatório referente ao processamento de imagens de partículas de desgaste de uma amostra de óleo. O relatório representa um auxílio para as ações de manutenção, fornecendo informações fundamentais para que um técnico possa avaliar a condição de desgaste de um equipamento. Na Figura 4, é ilustrado um relatório elaborado no sistema, apresentando a classificação do nível de desgaste de acordo com a norma ISO 4406:1999.

O relatório apresentado ilustra a imagem de uma área da membrana



Figura 3. Fluxograma do processo da contagem e classificação das partículas.

ARTIGO TÉCNICO



Figura 4. Relatório da análise de contagem de partículas de desgaste.

de nitrocelulose com ampliação de 100 vezes. Com base na imagem capturada são realizadas a contagem e classificação do tamanho das partículas. Uma macro análise elaborada em planilha Excel fornece os dados de acompanhamento da amostra de acordo com a codificação da norma, e também indica se os níveis de contaminação do óleo estão na faixa recomendada. Para obter o tamanho das partículas, foi estabelecida uma calibração com o auxílio de uma lamínula graduada, cuja menor escala de graduação é de 10 micrometros. A calibração é um processo importante na classificação das partículas de desgaste, pois permite estabelecer a relação entre o pixel e a dimensão das partículas. Com a calibração é possível medir o diâmetro de Ferret, que é um dos atributos de dimensão da partícula [2, 11].

5. Conclusões

Neste trabalho, é apresentado um processo desenvolvido para a con-

tagem de partículas de desgaste em óleos lubrificantes. O projeto apresentado é parte de um sistema que deverá incorporar recursos para análise da morfologia e caracterização dos tipos de partículas de desgaste. No sistema desenvolvido, foram utilizados métodos de processamento de imagem, que utilizam visão computacional aplicada à análise automatizada para contagem e classificação das partículas. A característica principal do sistema é o seu baixo custo de desenvolvimento. O sistema desenvolvido poderá ser aplicado na área de treinamento e também auxiliar na manutenção preditiva de empresas de pequeno e médio porte. O processo permitirá aos usuários a criação de um banco de dados de amostras coletadas do equipamento com dados quantitativos, os quais possibilitarão o acompanhamento visual do desgaste gerado pelo aumento das partículas no equipamento.

Referências

- [1] ISO 4406, Hydraulic fluid power -- Fluids -- Method for coding the level of contamination by solid particles, 1999.
- [2] Thomas, A. D. H., Davies, T., Luxmoore, A. R. Computer image analysis for identification of wear particles. *Wear*, 142, pp. 213-226, 1999.
- [3] Fisher, G. C. Evaluation of various methods to detect metallic wear particles in lube-oil filter debris. *Tribotest Journal*, 4-3, pp. 261-274, 1998.
- [4] Mayer, A., Noria Corporation, What the tests really tell us. *Practicing Oil Analysis*, March, 2006.
- [5] Levitt, J., Complete guide to preventive and predictive maintenance. New York: Industrial Press, 2003.
- [6] Mayer, A., Noria Corporation Particle Counting – Peril or Prize? *Practicing Oil Analysis*, March, 2006.
- [7] Laghari, M.S; Boujarwah, A. Wear particle identification using image processing techniques. In: ISCA, 5th Int. Conf. Intelligent Systems, Reno, U.S.A., pp 22-30, 1996.
- [8] Bannister, K. E. Lubrication for industry, 2nd ed. New York: Industrial Press Inc., 2007.
- [9] Jones, M. H, Swansea Tribology Services Ltd, U. K. Effective use of the patch test for simple on-site analysis, September, 2004.
- [10] Rasband, W., Image J 1.34s, National Institute of Health, U.S.A.
- [11] Laghari, M. S; Memon, Q. A., Khuwaja, G. A. Knowledge based wear particles analysis. In: Transactions on Engineering, Computing and Technology, v3, pp. 112-116. December 2004.

ECOTRIB⁰⁹

2nd European Conference on Tribology

Volume 1



Pisa, Italy
June 7-10, 2009

E. Ciulli, B. Piccigallo, R. Bassani
F. Franek, J. Vižintin, R. Crockett
(Editors)

Co-Organized by



Italy



Austria



Slovenia



Switzerland

Proceedings of the
 2nd European Conference on Tribology
ECOTRIB 2009
 Engineering Faculty, University of Pisa
 Pisa, Italy
 June 7 - 10, 2009

ORGANISING COMMITTEE

Enrico Ciulli, University of Pisa, and AIT, Italy (Conference Chairman)
 Bruno Piccigallo, Accademia Navale Livorno, and AIT, Italy
 Francesca Di Puccio, University of Pisa, Italy
 Enrica Cane, SKF Industrie S.p.A., and AIT, Italy
 Friedrich Franek, Vienna University of Technology, and ÖTG, Austria
 Andreas Pauschitz, AC²T research GmbH, and ÖTG, Austria
 Bojan Podgornik, CTD-University of Ljubljana, and SST, Slovenia
 Branko Kus, OLMA Lubricants, and SST, Slovenia
 Rowena Crockett, Empa, and Swisstrib, Switzerland
 Mousab Hadad, Empa, and Swisstrib, Switzerland

PROGRAM COMMITTEE

Roberto Bassani, University of Pisa, and AIT, Italy
 Maria Allegrini, INFM-CNR polyLAB, and AIT, Italy
 Luca Carmignani, Piaggio & C. S.p.A, and AIT, Italy
 Franz Novotny-Farkas, OMV Refining & Marketing GmbH, Austria
 Hubert Kötttritsch, SKF Österreich AG, Austria
 Martin Kirchgassner, Castolin GmbH, Austria
 Jože Vižintin, CTD- University of Ljubljana, and SST, Slovenia (Prog. Committee Chairman)
 Mitjan Kalin, CTD-University of Ljubljana, and SST, Slovenia
 Marjan Trstenjak, ACRONI d.o.o., and SST, Slovenia
 Nicholas D. Spencer, ETH Zurich, and Swisstrib, Switzerland
 Jan Fiala-Goldiger, VSS, and Swisstrib, Switzerland
 Götz Thorwarth, Empa, and Swisstrib, Switzerland

ECOTRIB 2009 - 2nd European Conference on Tribology, June 7-10, Pisa, Italy

WEAR PARTICLE CLASSIFIER SYSTEM BASED ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Valdeci Donizete Gonçalves¹, Luis Fernando de Almeida², Mauro Hugo Mathias³

¹UNESP – São Paulo State University, Guaratinguetá-SP, Brazil, valdecidgoncalves@gmail.com

² UNESP – São Paulo State University, Guaratinguetá-SP, Brazil,

²UNITAU – Taubaté University, Taubaté-SP, Brazil, luis.almeida@unitau.br

³UNESP – São Paulo State University, Guaratinguetá-SP, Brazil, mathias@feg.unesp.br

ABSTRACT

This paper describes a method to identify morphological attributes that classify wear particles in relation to the wear process from which they originate and permit the automatic identification without human expertise. The method is based on the use of Multi Layer Perceptron (MLP) for analysis of specific types of microscopic wear particles. The classification of the wear particles was performed according to their morphological attributes of size and aspect ratio, among others.

Keywords: artificial neural network, wear particles analysis, expert system

INTRODUCTION

Wear particles, contained in lubricating oil, carry with them important information related to the condition of the corresponding machinery. Microscopic analysis of the wear particles in lubricating oil provides a powerful tool for predicting potential machine failure. The development of advanced systems for wear particle analysis is an essential tool for proactive maintenance in industrial plants. This paper describes the use of a Multi Layer Perceptron (MLP) for analysis of the most common types of microscopic wear particles, i.e., Rubbing (R), Cutting (C), Severe Sliding (SS) and Fatigue (F). The MLP was trained and tested using a database, constructed with records related to the wear modes that are examined in this work. The wear particles classification was performed according to their morphological attributes of size and aspect ratio, among others. Oil monitoring, also known as wear particle analysis and physical analysis of lubricant properties, has been recognized as one of the most important approaches for condition monitoring and failure analysis [1]. Recent research efforts have been focused on the development of an automatic and efficient system to perform wear particle analysis, such as those using image processing, expert systems, knowledge-based systems and so on [2, 3].

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Artificial Neural Networks (ANN) are known for their application in classification problems,

including those related to the maintenance of machines [2, 3, 4, 5, and 6]. They are composed of many simple elements, called neurons, operating in parallel and connected to each other by multipliers, called weights. Basically, an ANN is composed of the following:

- Processing units or neurons (x_i , h_j , y_k) receiving input from neighbours or external sources and using this to compute an output signal which is propagated to other neurons.
- Weights determine the effect of one neuronal signal on another.
- The activation function (f), an element that determines the level of neuron activation, is based on the effective input Σ .

There are many types of ANN, and Multilayer Perceptron (MLP) stands out as one of the most widely used. Figure 1 illustrates a standard MLP with one hidden layer. The learning of a MLP is supervised; each input signal received from the environment is associated with a specific desired target pattern. Usually, the weights are synthesized gradually, and at each step of the learning process they are updated so that the error between the network output and corresponding desired target is reduced [7].

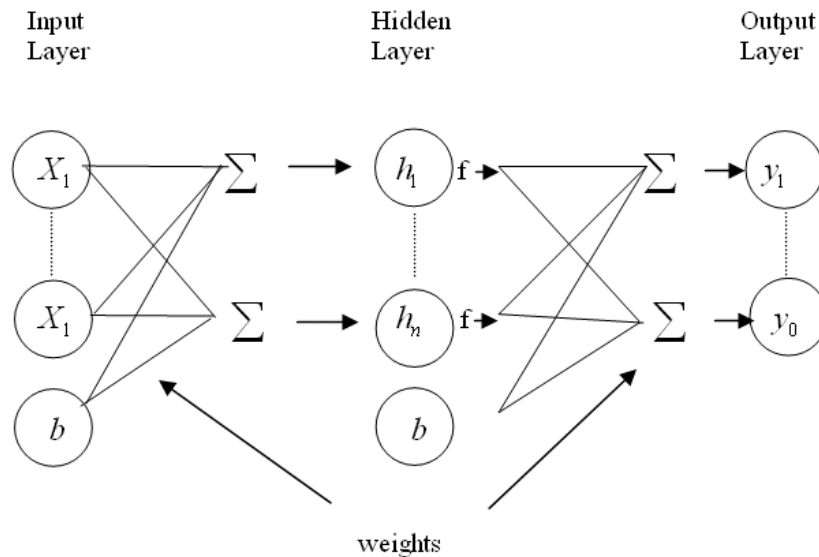


Fig. 1: Standard MLP with one hidden layer

PROCEDURE FOR DEVELOPMENT

The learning and classification procedures are described in figure 2. At the initial phase, pictures of four kinds of known wear particles are introduced into a system to extract their features, and they are then saved into a database. Rubbing wear, severe sliding, cutting wear and fatigue were the types of wear particles used in this study. Ten individual features of each type of wear particle were analyzed to structure the database, which is used for MLP training and testing. After that, the MLP can be applied to classify unknown data from its features.

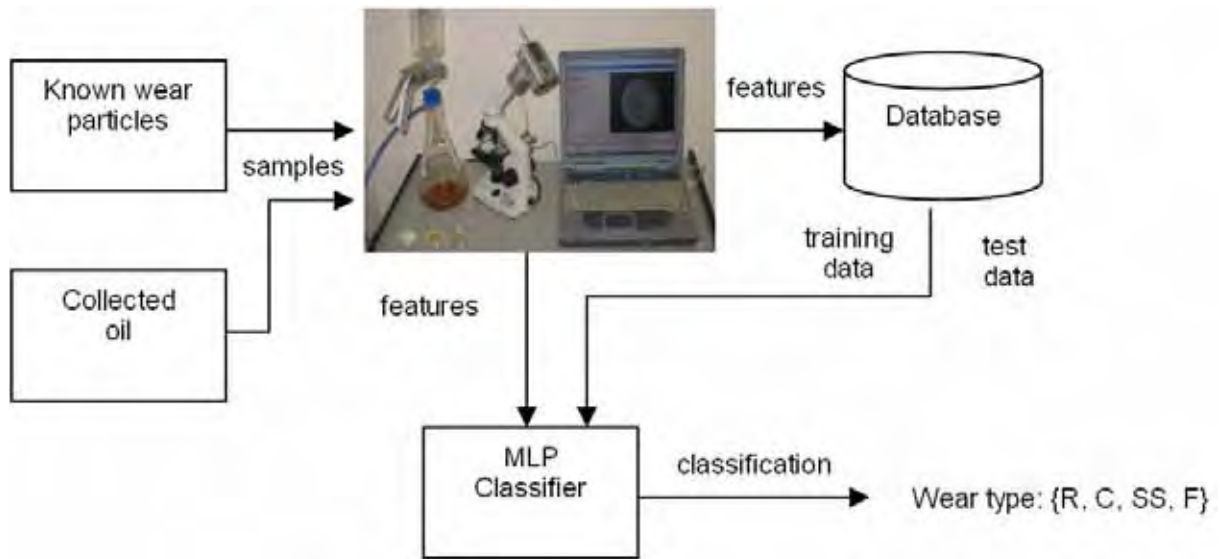


Fig. 2: Classification system architecture

Features extraction

The wear particle modelling proposed in this work is based on morphological attributes, which include area, width, height, circularity, elongation, Feret diameter, and major and minor aspect ratio [11]. The process applied to identify the particle types consists of matching features extracted from a given input particle with those of the wear particle type models. The system can be integrated with an automatic particle analyzer previously developed by the authors [10]. The first version of the system was developed using different stylized particles created from the set of wear mechanisms analyzed in this work. Ten stylized particles of each kind of wear mechanism were prepared, forming a sample of forty binarized particle images related to the wear mechanisms under study. Table 1 shows the features of ten stylized particles, related to cutting wear mechanisms. Such features were obtained using ImageJ software [12].

Cut-ting	Area	Perime-ter	Width	Height	Major diameter	Minor diameter	Circu-larity	Feret	Elongation	Aspect ratio
1	1436,57	385,25	108,28	83,43	60,56	30,2	0,12	113,57	2,98945	1,2978
2	1408,21	469,78	120,12	98,82	55,24	32,46	0,08	123,7	3,8498	1,2155
3	1333,99	431,45	108,28	100,59	55,08	30,84	0,09	120,36	3,5445	1,0764
4	766,43	347,65	91,12	84,02	46,57	20,95	0,08	105,93	2,6354	1,0845
5	1533,91	491,82	120,71	108,28	56,21	34,74	0,08	128,62	4,2361	1,1147
6	1093,1	376,65	90,53	100	56,43	24,66	0,1	122,71	2,5524	0,9053
7	981,41	401,65	117,75	50,89	56,79	22	0,08	118,24	2,2647	2,3138
8	965,65	406,38	97,63	99,41	51,01	24,1	0,07	118,49	2,7911	0,9820
9	1325,58	554,81	129,59	95,27	60,74	27,79	0,05	150,86	2,6867	1,3602
10	1206,54	531,65	118,34	100	48,24	31,85	0,05	124,52	4,8865	1,1834

Table 1: Features extracts of cutting wear

The data obtained for all wear particles are used to feed the neural network system, which will process the data and classify the particles according to the kind of wear mechanism.

MLP classifier

In this paper, a MLP with one hidden layer is used for particle classification. In order to define the appropriate net architecture, a set of tests with varying numbers of neurons in the hidden layer from 3 to 15 were carried out. The database content was divided in two groups: training and test data. Both are represented by a PxF matrix, where P represents the total number of training particles and F is the number of features used. Due to the importance of input data pretreatment [8], both datasets have been normalized by using a simple linear scaling of the data, according to equation 1. The $\min_i$ and $\max_i$ variables represent the range of “i” normalized features, while $\text{data}_{\min}$ and $\text{data}_{\max}$ are the lower and upper values for that feature, respectively.

$$\text{nd}_{i,j} = \min_i + (\max_i - \min_i) * (d_{i,j} - d_{\min}) / (d_{\max} - d_{\min}) \quad (1)$$

In order to provide faster learning, weight initialization, developed by Nguyen and Widrow [9], was used. According to Fausett [7], this analysis is based on a hyperbolic tangent activation function, which is closely related to the bipolar sigmoid activation function described in equation 2.

$$f = -1 + 2 / (1 + \exp(-\Sigma)) \quad (2)$$

Neural Network for Wear Particle Classification

The first version of the program “Neural Network for Wear Particle Classification”, Neural_WPC, was used to perform the tests. This program was created to analyze appropriated ANN configurations to classify wear particle mechanisms. This tool was divided into two modules, *training network* and *particle classifier*. The training network executes the MLP training and presents a graphic of the set rate of the trained ANN, and also allows the analyzing of a specific architecture related to the training time. The *classification module* allows for a classification of set particles according to wear modes trained into the ANN. Such resources are illustrated by figure 3.



Fig. 3: ANN_WPC windows

TESTS AND RESULTS

The tests were carried out to determine the best set of features of the MLP to be used by the classifier. For this reason, all possible combinations between these features were considered. The MLP used has 5 neurons in the input layer, 10 in the hidden layer, and 4 in the output layer. Table 2 shows the results of the best configuration.

FEATURES (input layer)					RC(%)
area	height	minor	elongation	aspect ratio	96.0
area	height	minor	circularity	elongation	95.2
area	minor	circularity	elongation	aspect ratio	95.2
area	height	circularity	elongation	aspect ratio	95.2
area	height	minor	circularity	aspect ratio	94.1

Table 2: Best configuration for combinations between extracted features

From the best configuration, presented in Table 2, a test was conducted as a function of the performance, as measured by the number of epochs, i.e., learning time, varying from 100 to 2000. The final results are presented in figure 4, which shows the stability in training with 1000 epochs.

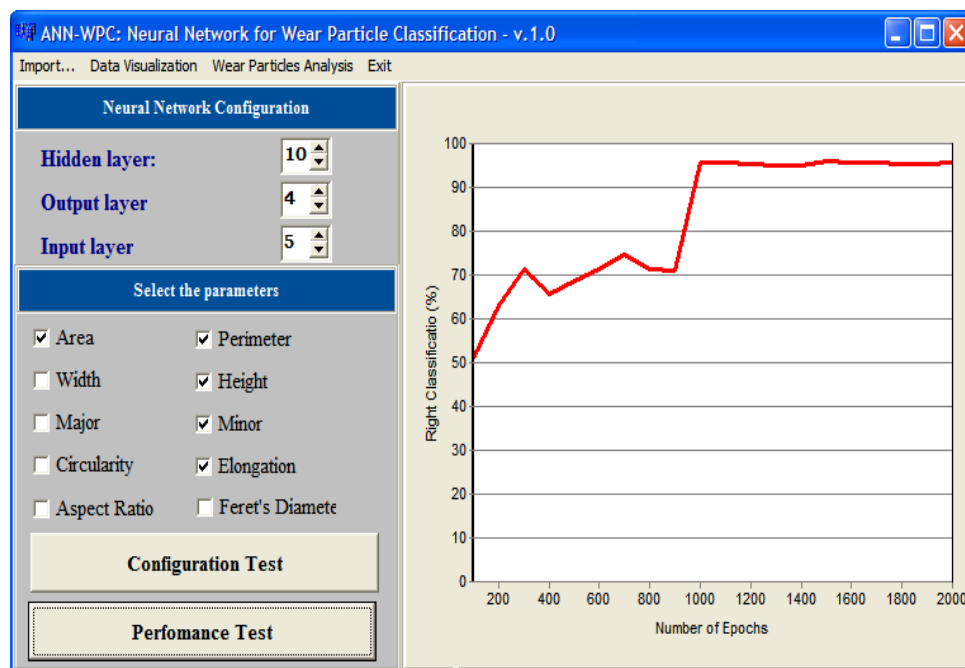


Fig. 4: Performance of the best configuration.

CONCLUSION

This article presents an important tool for the analysis of microscopic wear particles, found in the lubricating oil, by using Artificial Neural Networks. The results have demonstrated that the presented method, when executed through an ANN, may be successfully used for the

characterization of wear particle profile attributes.

However, it is also noted that the rate of accurate characterization can increase or decrease depending on the features chosen as inputs to the ANN. For the features used in these experiments, accurate classification was obtained at a maximum rate of 96%, with a standard deviation of 2%.

Finally, the input data normalization and weight initialization used in this work allowed for a reasonable training time -- about 1000 iterations.

In future works, other analysis methods, like those for edge detail and texture and other wear particles types, will be analyzed.

REFERENCES

- [1] Yan X.P., Zhao C.H., Lu Z.Y., Zou X.C., Xiao H.L., *A study of information technology used in oil monitoring*, Tribology International, 38 (2005), pp 879-886.
- [2] Laghari, M.S., Memon, Q.A., Khuwaja G.A., *Knowledge based wear particle analysis. Transactions on Engineering, Computing and Technology*, 3 (2004), pp.112-116.
- [3] Peng Z., *An integrated intelligence system for wear debris analysis*, Wear, 252 (2002), pp.730-743.
- [4] Rafieea J., Arvania F., Harifib A., Sadeghi M.H., *Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network*, Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007), pp. 1746–1754.
- [5] Samanta B., Al-Balushi K.R., *Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features*, Mechanical Systems and Signal Processing, 17 (2003), n.2, pp 317–328.
- [6] Laghari M.S., *Recognition of texture types of wear particles*, Neural Comput & Application, 12 (2003), pp 18–25.
- [7] Fausett L., *Fundamentals of neural networks; architecture; algorithms and applications*, Prentice Hall, Englewood Cliff, U.S.A, 1993.
- [8] Sola J., Sevilla J., *Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems*, Nuclear Science, IEEE Transactions, 44 (1997), pp 1464–1468.
- [9] Nguyen D., Widrow B. *Improving the Learning Speed of 2-Layer Neural Networks by Choosing Initial Values of the Adaptive Weights*, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, San Diego, USA, 1990, v.3, pp 21-26.
- [10] Gonçalves V. D., Mathias M.H., *A Mechatronic System Applied to wear Particle Analysis*, Slovenian Society for Tribology, ECOTRIB, Slovenia, 2007, v.2, pp 1065-1072
- [11] Xu K., Luxmoore A.R., Jones L.M., Deravi F., *Integration of neural networks and expert systems for microscopic wear particle analysis*, Knowledge-Based Systems 11 (1998), pp 213–227.
- [12] Rasband W., *Image J 1.34s*, National Institute of Health, USA, 2005.