

**JOSÉ FARIAS DOS SANTOS JUNIOR**

MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE UM SISTEMA  
PROPULSOR AERONÁUTICO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE  
PARTÍCULAS EM ÓLEOS LUBRIFICANTES

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

Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

Guaratinguetá

2006

Santos Júnior, José Farias dos

S237m      Monitoramento e avaliação da condição de um sistema propulsor aeronáutico através de técnicas de análise de partículas em óleos lubrificantes / José Farias dos Santos Júnior . – Guaratinguetá : [s.n.], 2006  
95f. : il.

Bibliografia: f. 90-92

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2006

Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

1. Manutenção preditiva 2. Óleos lubrificantes I. Título

CDU 62-7

**“MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE UM SISTEMA  
PROPULSOR AERONÁUTICO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE  
PARTÍCULAS EM ÓLEOS LUBRIFICANTES ”**

**JOSÉ FARIAS DOS SANTOS JÚNIOR**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: PROJETOS E MATERIAIS**

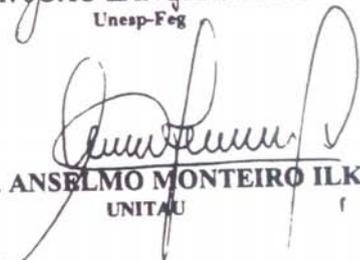
**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior**  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
**Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS**  
Orientador / Unesp-Feg

  
**Prof. Dr. JOÃO ZANGRANDI FILHO**  
Unesp-Feg

  
**Prof. Dr. ANSELMO MONTEIRO ILKIU**  
UNITAU

Agosto de 2006

**DADOS CURRICULARES**  
**JOSÉ FARIAS DOS SANTOS JUNIOR**

NASCIMENTO	30.08.1958 – RIO DE JANEIRO / RJ
FILIAÇÃO	José Farias dos Santos Marlene Alves dos Santos
1979 / 1984	Curso de Graduação Engenharia Mecânica Plena UNITAU – Taubaté / SP
2003 / 2005	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na área de Projetos, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP

(Aos 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. Divide conosco os méritos dessa conquista, porque ela nos pertence; ela é tão vossa quanto nossa.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e aos meus filhos que sempre me incentivaram em meus estudos e na concretização de metas estabelecidas.

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 Tenente Coronel Engenheiro Leonardo Magalhães Nunes da Silva, Major Engenheiro Luiz Tadeu Salazar Queiroz e aos Engenheiros Jolan Eduardo Berquó e Ademir Rodrigues Trindade pelo especial apoio e incentivo nas diversas fases da realização deste trabalho.

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

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

À Desenhista Lúcia Helena de Paula Coelho, pela preciosa colaboração ao aluno que necessita de orientação.

- Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

Instituto de Fomento e Coordenação Industrial - IFI do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial – CTA / Comando da Aeronáutica / Ministério da Defesa, pela compreensão da importância deste trabalho para as áreas de Certificação e de Investigação de Acidentes Aeronáuticos.

Grupo Especial de Ensaio em Vôo, do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial – CTA / Comando da Aeronáutica / Ministério da Defesa, pelo grande auxílio na permissão da utilização dos motores aeronáuticos, coleta dos materiais necessários e informações complementares.

Parque de Material Aeronáutico de São Paulo (COMAER) pela concessão dos laboratórios, equipamentos e recursos didáticos necessários.

Aparências não são verdades.

É preciso tirar a pele da suposta ovelha para que vejamos o lobo.

SANTOS JUNIOR, J. F. **Monitoramento e Avaliação da Condição de um Sistema Propulsor Aeronáutico através de Técnicas de Análise de Partículas em Óleos Lubrificantes**. 2006. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

## **RESUMO**

O procedimento de análise de óleos e graxas vem sendo implementado em diferentes setores, tais como indústria de papel e celulose, usinas de álcool, empresas marítimas e empresas aéreas comerciais. As técnicas de análise de óleos lubrificantes permitem o aumento da vida útil de equipamentos, a economia de custos de manutenção. Na área militar esta abordagem é usual desde a década de quarenta. No entanto os países desenvolvidos que vêm participando de grandes conflitos bélicos têm explorado muito este recurso com o objetivo de minimizar os custos operacionais e aperfeiçoar o cumprimento de missões. Assim, esta tecnologia envolvida é estratégica, cabendo aos países em desenvolvimento a implementação de programas mais eficazes de forma a ter maior grau de independência, aumento da disponibilidade e confiabilidade de equipamentos de modo a economizar recursos.

A proposta da pesquisa em desenvolvimento é complementar o programa de manutenção baseado em análise de óleos e graxas no sentido de explorar e aplicar o potencial destas técnicas, visando as atividades de dificuldades em serviço (problemas operacionais) e investigação de incidentes/acidentes aeronáuticos. O estudo de viabilidade deste tipo de programa poderá gerar um programa de Garantia da Qualidade que permita detectar os modos de falha nos sistemas das aeronaves de defesa.

Por todas as considerações acima mencionadas, um programa de análise de óleo é imperativo numa empresa aérea comercial ou mesmo numa Força Aérea de Defesa.

As possíveis desvantagens na implementação de um programa de análise de óleo são o seu custo (logística, recursos humanos, instalações, equipamentos, etc.) e o tempo que o citado programa leva para ser consolidado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Técnicas de análise de óleo, monitoramento de máquinas, confiabilidade, manutenção preditiva.

SANTOS JUNIOR, J. F. **Monitoring and Evaluation of Conditions of an Aircraft Engine analyzing the Oil Contamination.** 2006. 95f. Dissertation ( Master in Mechanical Engineering) – College of Engineering of the Guaratinguetá, São Paulo State University, Guaratinguetá.

## **ABSTRACT**

The procedure of oil and grease analysis has been implemented in different sectors, such as industry of paper and cellulose, maritime, alcohol plants, companies and commercial airlines. The techniques of lubricate oil analysis allow the increase of the useful equipment life, the economy in maintenance costs. In the military field this boarding are usual since the decade of forty, however the developed countries that has been participated in World War II have explored much of this resource with the objective to minimize the operational costs and to optimize the missions fulfillment. Thus this involved technology is strategic, fitting to the developing countries the implementation of more efficient programs of form to have greater degree of independence, increase of the availability and equipment reliability in order to save resources. The proposal of the research carried on is to complement the program of maintenance based on oil and grease analysis and greases in order to explore and to apply the potential of these techniques, aiming at to the activities of difficulties in service (operational problems) and inquiry of aeronautical incidents/accidents. The feasibility study of this type of program will be able to generate a program of Quality Assurance that allows detecting the failure modes in the systems of the defense aircraft. For all the considerations mentioned above, a program of oil analysis is imperative in a commercial airline or even in an Air Force of Defense.

The possible disadvantages to the implementation of oil analysis program are the their cost (logistic, human resources, physical place, equipments and so on) and the time

to consolidate such kind of program.

**KEYWORDS:** Oil analysis techniques, machines monitoring, reliability, predictive maintenance.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	20
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS DO TRABALHO</b> .....	21
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
<b>4</b>	<b>TÉCNICAS DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTES E PARTÍCULAS DE DESGASTE PARA A AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE MÁQUINAS</b> .....	28
4.1	TÉCNICA DE DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS ATRAVÉS DE ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA .....	28
4.2	TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS ATRAVÉS DA FERROGRAFIA .....	29
4.3	CROMATOGRAFIA GASOSA.....	31
4.4	ANÁLISE DE GRAXA .....	32
4.5	ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA.....	33
<b>5</b>	<b>ASPECTOS DA TÉCNICA DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA</b> .....	34
5.1	A INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PARTÍCULA .....	35
5.2	UNIDADES DE MEDIDA .....	36
5.3	A ANATOMIA DE UM ESPECTRÔMETRO DE EMISSÃO ATÔMICA .....	37

<b>6</b>	<b>ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA DE ENSAIO/MONITORAMENTO EM PROPULSORES AERONÁUTICOS, ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE PARTÍCULAS EM ÓLEOS LUBRIFICANTES .....</b>	<b>39</b>
6.1	ESPÉCIME DE ENSAIO .....	39
<b>6.1.1</b>	<b>Informações sobre motores à combustão interna .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Informações sobre motor a pistão .....</b>	<b>40</b>
6.2	COLETA DE AMOSTRA .....	42
<b>6.2.1</b>	<b>Técnicas de coleta de amostra.....</b>	<b>42</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Intervalo de coleta de amostra.....</b>	<b>42</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Especificação do óleo lubrificante usado nos espécimes de monitoramento .....</b>	<b>43</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Procedimento de coleta de amostra.....</b>	<b>46</b>
6.3	PROCEDIMENTO DE ANÁLISE.....	46
<b>6.3.1</b>	<b>Metodologia aplicada.....</b>	<b>48</b>
6.3.1.1	Introdução .....	48
6.3.1.2	Fontes de excitação .....	48
6.3.1.3	Verificação diária de padronização.....	50
6.3.1.4	Padrões militares para desgaste do metal .....	51
6.3.1.5	Eletrodos de grafite (disco e barra).....	52
6.3.1.6	Recipiente descartável de amostra .....	53
6.3.1.7	Recipiente reutilizável de amostra .....	54
6.3.1.8	Tampa do recipiente da amostra .....	54
6.3.1.9	Limpeza após cada operação .....	55
6.3.1.10	Tecidos e toalhas para operação de limpeza.....	55
6.3.1.11	Procedimento de “Warm-up” .....	55
6.3.1.12	Rotina de análise da amostra.....	55
<b>6.3.2</b>	<b>Resultados obtidos .....</b>	<b>60</b>
6.3.2.1	Motor número de série: RL 25085-48A (aeronave matrícula número 1944 da FAB).....	60

6.3.2.2	Motor número de série: RL 24826-48A (aeronave matrícula número 1956 da FAB).....	61
<b>7</b>	<b>TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>62</b>
7.1	METODOLOGIA ANALÍTICA DAS PARTÍCULAS DE DESGASTE DE UM EQUIPAMENTO AERONÁUTICO .....	62
<b>7.1.1</b>	<b>Resultados da avaliação de amostras</b> .....	<b>65</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Determinação da recomendação apropriada, usando o guia de tomada de decisões</b> .....	<b>67</b>
7.2	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO PRÁTICO .....	71
<b>7.2.1</b>	<b>Motor número de série: RL 25085-48A (aeronave matrícula número 1944 da FAB)</b> .....	<b>72</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Motor número de série: RL 24826-48A (aeronave matrícula número 1956 da FAB)</b> .....	<b>75</b>
7.2.2.1	Condição dos motores monitorados.....	78
7.3	PROPOSIÇÃO DE UM PROGRAMA DE INSPEÇÃO DA CONDIÇÃO DE DESGASTE DE MOTORES AERONÁUTICOS, NO ÂMBITO DA FAB .....	78
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>88</b>
	REFERÊNCIAS .....	90
	APÊNDICE 1 - Características do Espectrômetro Spectroil M .....	93
	APÊNDICE 2 - Layout do espectrômetro SPECTROIL M .....	94
	APÊNDICE 3 - Critérios de aceitação de concentrações para motores IO/O-470.....	95

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Lycoming IO –540K 1D5 (vista lateral e vista superior) .....	41
FIGURA 2	– Aeronave T-25 disponibilizada para inspeção .....	43
FIGURA 3	– Ponto superior de coleta de amostra de óleo lubrificante .....	44
FIGURA 4	– Ponto inferior de coleta de amostra de óleo lubrificante .....	44
FIGURA 5	– Amostra coletada, armazenada em frasco apropriado .....	45
FIGURA 6	– Amostra com identificação requerida .....	45
FIGURA 7	– Espectrômetro “Spectroil M” .....	47
FIGURA 8	– Espectrômetro “Spectroil M” com seus padrões de calibração .....	47
FIGURA 9	– Eletrodo de barra e disco criando e sustentando a descarga do arco, que resulta na criação do plasma.....	49
FIGURA 10	– Ilustra a seqüência de preparação de análises .....	56
FIGURA 11	– Padrões de calibração espectrômetro .....	58
FIGURA 12	– Padrões de calibração espectrômetro .....	59

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Característica do motor (Fornecidas pela empresa Lycoming).....	41
TABELA 2	– Faixa de índices aceitáveis para checagem diária de padronização .....	51
TABELA 3	– Padrões de óleo para a área militar .....	52
TABELA 4	– Características do eletrodo de grafite.....	53
TABELA 5	– Composição do kit de óleo padrão do equipamento .....	59
TABELA 6	– Concentrações dos elementos encontrados após análise 1 .....	60
TABELA 7	– Concentrações dos elementos encontrados após análise 2 .....	61
TABELA 8	– Guia de tomada de decisão.....	68
TABELA 9	– Recomendações gerais de laboratório.....	69
TABELA 10	– Recomendação de laboratório para códigos aeronáuticos padrão para análise espectrométricas.....	70
TABELA 11	– Recomendação de laboratório para códigos aeronáuticos padrão para análises espectrométricas .....	70
TABELA 12	– Recomendação de laboratório para códigos aeronáuticos padrão para análises espectrométricas .....	71
TABELA 13	– Proposição de um Programa de Inspeção/Monitoramento da Condição de Desgaste de Motores Aeronáuticos Convencionais da FAB .....	79

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AER	- Atomic Emission Rotrode.
AES	- Atomic Emission Spectrometry.
AFA	- Academia da Força Aérea
CGL	- Cromatografia Gás-líquido.
CGS	- Cromatografia Gás-sólido.
CTA	- Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial.
FAA	- Federal Aviation Administration.
FAB	- Força Aérea Brasileira.
GEEV	- Grupo Especial de Ensaio em Voo.
ICP	- Inductively Coupled Plasma.
JOAP	- Joint Oil Analysis Program.
p.p.m.	- Partes por milhão
PAMASP	- Parque de Material Aeronáutico de São Paulo.
RDE	- Rotrode Disc Emission
SOAP	- Spectrometric Oil Analysis Program.
T.O.	- Technical Order.
TBO	- Time Between Overhaul.

## LISTAS DE SÍMBOLOS

- $\mu\text{m}$  - Microns
- $^{\circ}$  - Ângulo

# 1 INTRODUÇÃO

A análise do lubrificante nos permite identificar, quantificar, traçar um perfil de desgaste do equipamento e componentes. Ou seja, avaliar a sua degradação.

As partículas de contaminação e as partículas de desgaste são identificadas através de análises específicas, as quais permitem traçar um perfil de desgaste dos equipamentos e seus componentes.

O monitoramento das partículas de desgaste baseia -se nos seguintes fatos:

- As peças móveis são continuamente “lavadas” pelo lubrificante e as partículas de desgaste são arrastadas por este lubrificante.
- A velocidade de geração destas partículas é maior com o aumento do desgaste.
- Exames freqüentes das partículas no lubrificante, permitem a detecção de falhas incipientes e a implementação de um programa de monitoramento.

## **2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

- Buscar ferramentas que estabeleçam diagnósticos da condição de sistemas aeronáuticos.
- Minimizar custos operacionais.
- Desenvolver um programa de monitoramento que:
  1. Seja eficaz e proporcione maior independência.
  2. Aumente a disponibilidade.
  3. Melhore a confiabilidade dos equipamentos (cumprimento de missões).
  4. Economize recursos.
- Assessorar as área de Dificuldades em Serviço (problemas operacionais) e de investigação de incidentes/acidentes aeronáuticos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O início da manutenção vem desde os primórdios da humanidade, pois, o homem, ao descobrir a pedra lascada, teve que periodicamente agir, para deixá-la sempre afiada. Dali em diante, a manutenção passou a estar presente em todas as atividades.

Na Primeira Revolução Industrial (1750), ocorreu a introdução de máquinas motrizes movimentadas a vapor, na mecanização da indústria têxtil. A manutenção começa, então, a se estruturar como uma atividade permanente e feita na produção, pelos próprios operários.

Era uma manutenção improvisada, não organizada e do tipo conserta quando quebra. Em 1914, com a Primeira Guerra Mundial e com o início da indústria automobilística e dos conceitos de produção em série, algumas indústrias começaram a programar as suas produções em metas a serem atingidas.

A necessidade de ter qualidade para cumprir ou aperfeiçoar as metas estabelecidas, levou a criação de grupos de manutenção. Iniciou-se aí, a manutenção corretiva, ainda que com baixo nível de organização e gerenciamento, subordinada à produção e com planejamento e controles rudimentares.

É a forma mais onerosa de manutenção, produzindo baixa utilização dos equipamentos e sistemas, redução de vida útil e paralisações inoportunas, que levam à redução de confiabilidade.

Este tipo de manutenção permanece está ainda hoje presente em um número muito grande de atividades produtivas industriais, por exemplo.

Neste estágio de evolução, a manutenção absorveu técnicas de planejamento às suas atividades, mas, a atividade não dedicava grande atenção ao controle. Este tipo de conceito de manutenção apenas reduziu a ocorrência de falhas que exigiam manutenção do tipo corretiva. A atividade de manutenção começa a se equiparar à produção, apesar de ainda estar normalmente a ela subordinada.

Durante a Segunda Guerra, no final da década de 30, os setores produtivos sentiram a necessidade não só de corrigir os defeitos dos equipamentos, mas também de evitar a ocorrência de falhas capazes de interferir com a produção. Desta

preocupação para evitar falhas nasceu a manutenção preventiva (HORTA SANTOS, 1999).

As Ferrovias após o término do conflito mundial, foram as atividades pioneiras, onde a “moderna” técnica de análise de óleo foi usada para detecção de falhas.

Neste período, também, as Forças Armadas Norte-americanas adotaram largamente estas técnicas inicialmente para detecção de falhas em turbinas aeronáuticas.

A experiência obtida pelos militares no monitoramento do lubrificante das turbinas aeronáuticas e de outros sistemas lubrificados, foi transferida posteriormente para monitoramento de usinas elétricas modernas.

Os militares utilizaram também dessas técnicas para desenvolver instrumentos melhores e mais precisos. Os avanços recentes obtidos na instrumentação e na informatização alcançaram um nível tão elevado, que muitas vezes não se dispõe de laboratórios adequados e pessoas treinadas para executarem tais técnicas de análise (MALTE LUKAS AND DANIEL P. ANDERSON, 1996).

Nos anos 50, a indústria aeronáutica para obter maior confiabilidade de seus produtos, sentiu a necessidade de utilizar métodos mais sofisticados para diagnosticar as falhas e para analisar as causas e os efeitos das avarias de componentes e de equipamentos. Desenvolveu-se o conceito de engenharia de manutenção e criaram-se, subordinados à produção, setores especializados em planejar e controlar a manutenção preventiva e estudar as causas e os efeitos das falhas.

A partir da segunda metade da década de 60, com o aprimoramento de instrumentos e técnicas de medição cada vez mais sofisticadas, possibilitou a detecção de falhas numa fase inicial, suficiente para a previsão da ocorrência de futuras falhas através de análises estatísticas. Com o advento da informática, os procedimentos de planejamento e controle da manutenção tornaram mais sistemáticos e úteis esses recursos.

A Manutenção é definida (TEÓFILO, 1989), como “toda e qualquer intervenção efetuada num determinado sistema, ao longo de sua vida útil, com o objetivo de recompor as suas condições normais de atuação, de forma tal a atingir os mais altos níveis de desempenho”.

Historicamente os departamentos de manutenção de equipamentos utilizam uma das três estratégias: operar até a falha, manutenção preventiva ou manutenção preditiva. A estratégia de operar até falhar é baseada em consertar ou trocar o equipamento “quando requerido”. Esta estratégia não tem planejamento de manutenção periódica, e os reparos são iniciados somente quando o equipamento falha (quebra). Isto se aplica a todos os sistemas, os quais, o reparo ou a troca de componente, é menos oneroso do que implantar um programa de manutenção preditiva ou preventiva. A referida estratégia, de “operar até falhar” ou “consertar quando falhar” foi efetivo antes da Segunda Guerra Mundial, quando o equipamento era simples, fácil de reparar e, relativamente, sem custos pelos padrões de hoje. Isto é raramente aplicado com as técnicas de usinagem atuais.

Uma estratégia de manutenção preventiva é baseada no desempenho das paradas de manutenções periódicas, inspeções e trocas de peças. Ações de manutenção são baseadas nas recomendações do fabricante e experiências oriundas das falhas anteriores do equipamento. Peças, óleos lubrificantes, fluidos hidráulicos e filtros são trocados baseados em horas de operação ou distâncias percorridas. Este ponto de vista foi primeiro introduzido na indústria aeronáutica após a Segunda Guerra Mundial. Antes desta abordagem, eram comuns os componentes serem trocados em conjuntos de intervalo de tempo, sem observar as suas reais condições. Embora esta estratégia apresentasse desempenho muito efetivo, o custo era demasiadamente elevado. Frequentemente um equipamento em perfeitas condições de uso é removido e retrabalhado ou os componentes principais são trocados, baseado somente no fato que um ciclo de serviço específico é completado. Óleos lubrificantes e fluidos hidráulicos são também descartados sem se observar a possível existência de um remanescente de vida útil em serviço.

O conjunto das técnicas e critérios da previsão de falhas, tendo em vista a redução do número e tempos dos reparos, e, portanto, a otimização da função manutenção, é conhecida como manutenção preditiva ou previsiva ou de diagnóstico (HORTA SANTOS, 1999).

As estratégias de manutenção preditiva têm se tornado a base de modernos programas de manutenção. Um programa efetivo faz uso de ensaios periódicos

baseado na análise de óleo, monitoramento de vibração e monitoramento de desempenho. A condição do sistema, baseado em ensaios, permite que a manutenção seja direcionada para as necessidades especiais de cada parte do equipamento. A falha pode até ser detectada e reparada em seus estágios iniciais e o equipamento pode ter a sua manutenção postergada sem uma parada não prevista. Óleos lubrificantes e filtros são trocados somente quando estão saturados e sem mais vida efetiva. Um programa de manutenção preditiva efetiva faz uso da condição do monitoramento da máquina baseado em análises de óleo, monitoramento da vibração e desempenho.

Este trabalho trata do estudo das técnicas de análise de óleos e graxas visando a busca de ferramentas que estabeleçam um diagnóstico da condição de sistemas aeronáuticos. Ressalta-se que o tipo de programa de manutenção preditiva implementado e o tipo de monitoramento necessário, são dependentes da aplicação e dos modos de falha possíveis. Muitos programas de manutenção preditiva industriais usam o monitoramento de vibração em equipamentos fixos estacionários. Em alguns casos um espectro de vibração anormal será a primeira indicação de um problema em uma parte do equipamento. Em outros casos a análise de óleo dará uma indicação inicial de anormalidade. Por exemplo: Um desbalanceamento rotacional seria observado primeiro por análise de vibração. Somente depois de um período de operação, faria com que o processo de tensão atuante sobre os rolamentos, resultasse em uma maior quantidade de partículas de desgaste presentes no óleo lubrificante. De outra maneira, uma situação de desgaste abrasivo, na qual partículas abrasivas de contaminação entram no óleo lubrificante, seriam detectadas, primeiramente, por uma análise de óleo. Somente após um montante significativo de desgaste ter ocorrido, o problema poderá ser detectado pela análise de vibração.

Monitoramento de desempenho refere-se na observação e quantificação de um número de diferentes parâmetros de operação, os quais, em muitos casos, são relativamente fáceis e não tão caros de se obter, tais como: temperatura, pressões, taxas de fluxo, consumo de óleo, etc. Num simples rolamento a temperatura pode ser o único parâmetro a ser medido. Entretanto, em uma máquina complexa, tal como turbinas aeronáuticas, uns bons números de medidas e de parâmetros são possíveis, os quais incluem consumo de combustível, temperatura interna e externa de refrigeração,

temperatura do óleo, pressão de entrada de ar, pressão de exaustão e temperatura de exaustão (MALTE LUKAS AND DANIEL P. ANDERSON, 1996).

Hoje em dia a manutenção é constituída pelo conjunto de atividades executadas aos níveis de corretiva, preventiva e preditiva e está no mesmo nível organizacional da produção.

Os índices utilizados para avaliar o desempenho da manutenção vêm assumindo importâncias relativas diferenciadas segundo o estágio de evolução tecnológica e de gerenciamento atingido pela organização. Cada um deles poderá assumir, condicionalmente, papel de destaque em comparação aos demais.

Existem algumas divergências entre os autores pesquisados, no que diz respeito à definição do que seja manutenção. Mas, há consenso no princípio de que todas elas baseiam-se no fato de que todos os materiais têm desgaste.

Conforme (ARCURI FILHO, 1995), todo dispositivo mostra sinais de alteração, sob a forma de energia, que é dissipada de modo que pode ser medida e transformada em um valor numérico. A variação deste valor numérico é que serve de base ao processo de medida e acompanhamento do estado do componente, equipamento ou sistema.

Para determinação do ponto preditivo, utiliza-se de técnicas fornecidas pela ciência para monitorar equipamentos e sistemas. As técnicas de monitoração mais utilizadas pela manutenção preditiva são:

- Análise de óleos lubrificantes;
- Análise de vibrações;
- Análise de temperaturas;
- Ensaio não destrutivo;
- Monitoração de parâmetros operacionais.

Os resultados obtidos por estes processos de monitoração, ajudarão na estimativa do período de tempo que o equipamento levará para falhar.

A implementação de uma ou mais das atividades de manutenção vistas anteriormente (corretiva, preventiva ou preditiva) expressa a política empregada para manter um sistema ou equipamento.

A filosofia de manutenção determina a maneira e volume de serviços a serem efetuados, quando e como estes devem ser realizados, indicando sua localização, duração e o nível de precisão que será atingido. É o instrumento que definirá o montante de recursos necessários e dos custos envolvidos.

## **4 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTES E PARTÍCULAS DE DESGASTE PARA A AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE MÁQUINAS**

### **4.1 TÉCNICA DE DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS ATRAVÉS DA ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA**

A análise espectrométrica do óleo (“Spectrometric Oil Analysis Program” ou “SOAP”), mais comumente designada por Análise SOAP, tem por objetivo avaliar a taxa de desgaste das superfícies dos componentes e a taxa de contaminação da amostra recolhida. Assim, quanto maior for a taxa de contaminação das amostras de óleo, recolhidas sucessivamente, maior será o risco de falha de algum componente.

Através destas análises, mede - se a concentração dos diferentes elementos químicos, num determinado momento, e a taxa de contaminação com esses elementos.

A concentração de um dado elemento químico é expressa em “ppm” (partes por milhão) onde um ppm equivale a um miligrama de um determinado elemento por cada quilograma de óleo (o que implica a pesagem da amostra recolhida). A taxa de contaminação é expressa em miligramas por hora (o que implica em cronometrar-se os instantes de recolhimento das amostras).

Nesta metodologia de ensaio, a amostra é atomizada em uma chama sobre a qual incide uma determinada radiação característica dos elementos a serem analisados. Esta radiação tem como fontes “lâmpadas” específicas para cada elemento. Os átomos do elemento dispersos na chama absorvem parte da radiação incidente, ocasionando a diminuição de intensidade da mesma, que é medida por um detector.

Quanto maior a concentração do elemento, maior será a absorção da radiação incidente. Esta determinação quantitativa é feita através de comparação com padrões conhecidos dos elementos, produzida pela diluição de compostos organometálicos de pureza analítica.

A técnica da Espectrofotometria nos permite identificar qualitativamente e quantitativamente o tipo de material de desgaste, ou seja, o tipo e a quantidade de

elementos dispersos no óleo. É também de grande utilidade na quantificação de aditivos metálicos incorporados aos lubrificantes novos. Em virtude da limitação da capacidade de detecção, por via direta, de partículas de até no máximo 2  $\mu\text{m}$  e por ser muito trabalhosa e demorada a execução do teste por via indireta, fica inviável, na maioria das vezes, a utilização desta técnica para identificar desgaste em equipamentos industriais onde as partículas se apresentam na faixa de  $> 1 < 50 \mu\text{m}$ . Entretanto, para se detectar partículas em óleos lubrificantes de motores de combustão interna e de fluídos de sistemas hidráulicos, ela se apresenta ideal, pois, as partículas se apresentam em 2  $\mu\text{m}$  (MALTE LUKAS AND DANIEL P. ANDERSON, 1998).

#### 4.2 TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS ATRAVÉS DA FERROGRAFIA

A Ferrografia foi criada em 1971 por *Vermon C. Westcott*, nos EUA e consiste na contagem e na observação visual das partículas existentes em uma amostra de lubrificante. Baseia-se nos seguintes princípios:

- A maior parte dos sistemas mecânicos desgasta-se antes de falhar.
- O desgaste gera partículas.
- A natureza e a quantidade de partículas dependem da causa e da severidade do desgaste.
- Analisar partículas é o mesmo que analisar as superfícies que se desgastam.
- Existem dois níveis de análise Ferrográfica. A primeira, quantitativa fornece uma indicação de severidade do desgaste. A segunda, analítica, leva ao conhecimento das causas do desgaste.

Descobriu-se que, durante o funcionamento normal de um elemento de máquina corretamente lubrificado, são produzidas partículas metálicas, principalmente ferrosas, de tamanho inferior a 15  $\mu\text{m}$ , e que em condições de sobrecarga e má lubrificação, cresce a quantidade e o tamanho das mesmas. Criou-se, então, um método eficaz de coletar, separar, contar e identificar as partículas suspensas no lubrificante. Fazendo -

se fluir o óleo ou graxa, através de um tubo capilar ou lâmina de vidro. Cercada por forte campo magnético, as partículas ferrosas de maior tamanho precipitam-se primeiro na entrada do substrato, aglomerando-se em local bem definido. É a posição em que são encontradas as partículas maiores, consideradas de desgaste severo. Cinco a seis milímetros adiante, precipitam-se as partículas menores, resultantes do desgaste considerado normal. As partículas não ferrosas precipitam-se em qualquer local, pela ação da gravidade e do fraco magnetismo adquirido no contato com as partículas ferrosas. Após a lavagem do depósito obtido, utilizando-se um solvente especial que elimina todo o óleo, permanecem apenas as partículas retidas pelas forças eletromagnéticas, prontas para a contagem e observação visual.

Para a contagem são utilizadas fontes de luz e detectores apropriados, ligados a um dispositivo eletrônico que mede as intensidades da luz transmitida através de duas áreas, uma na entrada e outra a 6 mm adiante.

A relação entre elas, correspondente à relação entre as partículas grandes e pequenas, indica a severidade do desgaste. Este é o princípio da Ferrografia Quantitativa, que pode ser efetuada periódica ou continuamente e possibilita o traçado de um gráfico de tendência e o estabelecimento de um nível de alarme.

A Ferrografia Analítica requer a utilização de um microscópio de pesquisa, além de outros instrumentos auxiliares para observação visual da amostra. A natureza das partículas fornece uma indicação precisa das causas do desgaste. A amostra levada ao microscópio em lâminas de vidro é análoga a um espectro, pois, decompõem o “sinal” ordenadamente, segundo suas características, que têm relação com as causas. A análise da forma, tamanho e cor das partículas, permite inferir as causas, tais como: sobrecarga, má lubrificação, fadiga, abrasão e outras. A identificação da composição química dos elementos que compõe as partículas é viabilizada pela distribuição das mesmas no Ferrograma (lâmina de vidro), pela cor, aquecimento e ataques químicos. Raramente é necessária a utilização de outros métodos de identificação da composição química dos elementos.

Com a Ferrografia pode-se efetuar o monitoramento periódico, monitoramento de “start up”, análise de falhas e desenvolvimento de lubrificantes apropriados para condições específicas.

A Ferrografia Quantitativa é realizada com um instrumento denominado Ferrógrafo de Leitura Direta.

A Ferrografia Analítica requer um microscópio de pesquisas, um ferrógrafo preparador de lâminas e outros instrumentos auxiliares.

Exemplos de alguns materiais identificáveis pela Ferrografia:

aços carbonos, ligas de cobre- bronze, polímeros de fricção (degradação de lubrificantes), óxidos (produtos de corrosão), sílica (contaminação), flocos de carbono (selos, juntas), etc. O laudo de uma análise ferrográfica oferece resultados quantitativos e qualitativos. A análise determina o total de partículas presentes no óleo, dividindo-as entre maiores e menores de 5 $\mu$ m, classificando-as como “L” (large) e “S” (small), respectivamente. A unidade usada é DR/ml, específica para a técnica ferrográfica. Esses dados permitem identificar as tendências do agravamento do desgaste (PAULO LACERDA, 1994).

### 4.3 CROMATOGRAFIA GASOSA

A cromatografia gasosa é um processo no qual se divide uma mistura nos seus constituintes graças a passagem de uma fase gasosa móvel sobre um solvente estacionário. Esta técnica está dividida em duas categorias principais: cromatografia gás-líquido (CGL), na qual ocorre a partição de uma amostra entre uma fase gasosa móvel e uma delgada camada de líquido não-volátil que recobre um suporte inerte, e a cromatografia gás-sólido (CGS), que emprega um sólido com grande área superficial como a fase estacionária.

Um Cromatógrafo de gás é constituído essencialmente das seguintes partes: o gás de arraste usado é o hélio, nitrogênio, o hidrogênio ou o argônio. O fluxo de gás com a amostra vaporizada, passa por um tubo contendo a fase estacionária FE (coluna cromatográfica), onde ocorre a separação da mistura. A FE pode ser um sólido absorvente (Cromatografia Gás-Sólido) ou, mais comumente, um filme de um líquido pouco volátil, suportado sobre um sólido inerte (Cromatografia Gás-Líquido com

Coluna Empacotada ou Recheada) ou sobre a própria parede do tubo (Cromatografia Gasosa de Alta Resolução).

Na cromatografia gás-líquido (CGL), os dois fatores que governam a separação dos constituintes de uma amostra são: - **a solubilidade na FE:** quanto maior a solubilidade de um constituinte na FE, mais lentamente ele caminha pela coluna. - **a volatilidade:** quanto mais volátil a substância (ou, em outros termos, quanto maior a pressão de vapor), maior a sua tendência de permanecer vaporizada e mais rapidamente caminha pelo sistema.

As substâncias separadas saem da coluna, dissolvidas no gás de arraste e passam por um detector; dispositivo que gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de material diluído. O registro deste sinal em função do tempo é o cromatograma, sendo que as substâncias aparecem nele como picos com área proporcional à sua massa, o que possibilita a análise quantitativa (BONATO, 1995).

#### 4.4 ANÁLISE DE GRAXA

A análise de graxa lubrificante em estágio de uso (usada), colabora na obtenção de uma maior confiabilidade de um equipamento mecânico. Pois, simplesmente usar um sistema de monitoração geral do lubrificante, em certos casos, não é suficiente. No caso de rolamentos a análise de graxa usada é uma solução muito adequada.

Análise de graxa oferece a solução muito eficaz no monitoramento de condição de máquinas. Para tal conclusão, foram estudadas também, as modalidades de falha, a probabilidade de ocorrência de falhas e o custo de se executar uma monitoração.

O ponto crucial de uma análise de graxa usada é a integridade da amostra. Ela deve ser tão representativa quanto possível. Uma característica deste tipo de análise, ao contrário da análise de óleo, é que os contaminantes e as partículas de desgaste não estão distribuídos uniformemente por todo o lubrificante. Isto pode conduzir a amostras com variações enormes, no índice de partículas (HERGUTH, B., 2002).

#### 4.5 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA

Método usado para identificar e quantificar os elementos químicos presentes nas partículas metálicas em suspensão nos óleos lubrificantes e que foram geradas pelo desgaste das partes móveis.

É uma técnica de manutenção preditiva utilizada para monitorar o desgaste interno de motores a explosão, turbinas, compressores, caixas de engrenagens e outros equipamentos que utilizam óleos lubrificantes. A determinação dos metais e outros elementos produzidos por desgaste e as suas concentrações são os principais aspectos a serem considerados neste tipo de técnica.

Parte do princípio que um equipamento é constituído por peças de diferentes materiais (aços, aços-ligas, bronze, alumínio e outros), que, quando começam a se desgastar, produzem partículas que contaminam o óleo lubrificante.

Uma análise da morfologia, tipo e concentração dessas partículas permite identificar qual a peça móvel dos equipamentos que se está desgastando, o tipo de desgaste que está ocorrendo, bem como problemas de mau funcionamento. Análises sucessivas permitirão avaliar a severidade, tendência e a causa do desgaste, estimando-se o momento da ocorrência da falha dentro de critérios de precisão estabelecidos, o que permitirá ações preditivas para se evitar tal falha.

A análise espectrométrica é capaz de detectar partículas de até 7 - 9  $\mu\text{m}$ . Partículas maiores somente podem ser detectadas utilizando-se de outras técnicas (COMMANDER, NAVAL AIR SYSTEMS COMMAND, 2001).

## 5 ASPECTOS DA TÉCNICA DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA

Um espectrômetro por emissão é um instrumento óptico usado para determinar a concentração de partículas metálicas de desgaste, em um fluido lubrificante. A análise é realizada sujeitando a amostra a uma faísca ou a um plasma de alta tensão, que energizam a estrutura atômica dos elementos metálicos, causando a emissão de luz. Há dois tipos geralmente usados, de espectrômetros por emissão: O “Atomic Emission Rotrode (AER) e o Inductively Coupled Plasma (ICP)”. Laboratórios certificados pelo “Joint Oil Analysis Program (JOAP)” utilizam o espectrômetro do tipo “AER”. A luz emissora é depois, focalizada no trajeto óptico do espectrômetro e separada por comprimento de onda, convertida em energia elétrica e medida. A intensidade da luz emissora para todo elemento é proporcional à concentração do metal de desgaste, suspensa no fluido lubrificante.

Os padrões de óleo do “JOAP” consistem em um óleo básico que contém quantidades precisamente controladas de metal dissolvido - elementos orgânicos e que estabiliza agentes, com viscosidade controlada e ponto de “flash”, para calibração/padronização de espectrômetros de emissão atômica e de absorção atômica.

Os padrões do óleo de “JOAP” estão disponíveis em kits de oito frascos de fontes normais de estoque, como artigos numerados.

A análise elemental é provavelmente a ferramenta mais fundamental no teste da análise do óleo. Sua historia remonta aos anos 40 e aos 50, em que foi usado na indústria das ferrovias para determinar a presença de metais de desgaste em óleos de motor diesel. Entretanto, a análise elemental, referida às vezes como à espectroscopia elemental, espectroscopia de emissão atômica (AES) ou simplesmente análise do metal de desgaste, é mais do que apenas a medição das concentrações de metais de desgaste tais como o ferro, as ligas e o cobre. Em sua forma atual, a análise elemental é usada para determinar as concentrações de 15 a 25 diferentes elementos que variam dos metais e dos contaminantes aos aditivos do óleo. A análise elemental trabalha com o princípio da espectroscopia de emissão atômica (AES). Na (AES), os átomos dentro

da amostra, por exemplo, átomos oriundos das partículas de desgaste do ferro, átomos do zinco de uma molécula aditiva de ZDDP, ou silício, da contaminação da sílica (sujeira), são excitados usando uma fonte de alta energia. Os átomos absorvem a energia da fonte da excitação e são transformados a um estado eletrônico de alta energia.

Devido às leis da física do Quantum, átomos não gostam de estar nestes estados de excitação e perdem rapidamente a energia que ganharam, principalmente emitindo a energia luminosa. A energia da luz emitida, é inversamente proporcional ao comprimento de onda, é dependente da estrutura eletrônica do átomo, e é diferente para cada tipo de átomo. Assim, medindo a quantidade de luz emitida no comprimento de onda característico da emissão para átomos, tais como: o ferro, o cobre, o zinco e o sódio, a concentração de cada átomo pode ser determinada.

## 5.1 A INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE PARTÍCULA

A principal limitação do AES é que o método requer a excitação de átomos individuais, a amostra deve ser inteiramente vaporizada para permitir que todos os átomos presentes sejam medidos. Isto não é um problema para partículas pequenas e metais dissolvidos. A probabilidade de que uma partícula possa ser vaporizada e analisada, usando AES diminui muito rapidamente, acima de 5  $\mu\text{m}$ . De fato todo espectrômetro de AES é ineficaz para as partículas maiores do que 10  $\mu\text{m}$ . Infelizmente, dependendo do mecanismo de desgaste e da severidade do problema, o desgaste ativo da máquina pode gerar as partículas maiores do que 10  $\mu\text{m}$  em tamanho, e será assim invisível ao instrumento de AES. Por esta razão, é importante em todo o programa de análise de óleo que não se confie unicamente em dados de AES para determinar o desgaste ativo, mas, incluir testes tais como a contagem de partículas, a análise ferrográfica e a microscopia para medir partículas maiores.

## 5.2 UNIDADES DE MEDIDA

Definição de do que seja 1 ppm: Em um relatório da análise do óleo, nos números tipicamente vistos, dependendo do tipo componente, do tipo do óleo, da aplicação, etc., pode variar de poucas partes por milhão (ppm) ou muitas centenas de partes por milhão (ppm) para partículas metálicas de desgaste e contaminantes, a até muitos milhares de ppm, para determinados elementos aditivos. Como o nome diz, 1 ppm é simplesmente o número de partes do elemento em questão, por milhão de partes da amostra. De uma outra maneira, a leitura de 1 ppm de um elemento particular é equivalente a 1  $\mu\text{g}$  do elemento por g da amostra, que é a mesma coisa que 1 mg por quilograma de óleo.

Um laboratório consegue medir com exatidão a intensidade de luz de uma concentração em ppm. Para fazer isso, cada instrumento de AES é calibrado usando soluções padrão de calibração. Estas soluções contêm concentrações sabidas de determinados elementos de interesse. Os sulfetos do metal são geralmente usados para esta finalidade. Analisando os padrões de calibração, a quantidade de luz em um comprimento de onda específico pode ser determinada para os elementos em questão, os quais podem, então, serem relacionados à concentração conhecida na solução padrão. Desta maneira, uma curva de calibração pode ser gerada a qual permite que a concentração desconhecida do mesmo elemento em uma amostra para teste seja determinada medindo a quantidade de luz emitida em um específico comprimento de onda, e usando a curva de calibração para converter esta intensidade de luz em uma concentração ou ppm.

Ao analisar dados da análise elemental, é importante olhar não o valor absoluto de cada elemento, mas na linha da tendência, isto é, a mudança na concentração elemental das amostras consecutivas. Isto é importante porque as taxas de desgaste serão diferentes para máquinas diferentes, dependendo dos tipos de componentes, fabricante e modelo, tipo do óleo, idade, uso, etc. Este tipo de análise por taxa de mudança pode ser inválido se encontrar problemas relacionados a sinais adiantados de desgaste e de contaminação.

Ao analisar dados de AES, é importante saber a metalurgia da máquina e a composição química dos contaminantes comuns que possam estar presentes, assim que os dados sejam relacionados ao desgaste ativo de um componente específico, ou ao ingresso de contaminantes específicos.

Para fazer este estudo, os óleos novos devem ser catalogados em uma base anual, ou sempre que uma mudança no tipo ou na formulação do óleo for suspeita. Comparando os traços da nova linha de base para o óleo usado como amostra.

### 5.3 A ANATOMIA DE UM ESPECTRÔMETRO DE EMISSÃO ATÔMICA

Quase todos os laboratórios de análise de óleo, usam um de dois tipos de espectrômetro de emissão atômica: plasma indutivo acoplado (ICP), ou eletrodo de disco rotativo (RDE). A diferença básica entre as duas é principalmente, na maneira em que a amostra é vaporizada e os átomos excitados pela fonte de alta energia. Em um instrumento por (ICP), o óleo é injetado em um plasma de argônio em alta temperatura, onde os átomos são vaporizados, excitados e subsequentemente emitem luz. Em um espectrômetro por (RDE), também às vezes o instrumento é referido como "Arco de Centelha", o óleo é vaporizado e excitado usando uma descarga de alta tensão entre um eletrodo e um disco de carbono giratório. O princípio do instrumento, seja um espectrômetro por (ICP) ou por (RDE), é basicamente o mesmo. A luz emitida pelos átomos excitados é coletada e focalizada nas "régua" do espectrômetro. O espectrômetro contém um gradiente de difração, que seja similar a um prisma, que divide a luz do comprimento de onda em diferentes cores no comprimento de onda discreto, baseado em seu ângulo de difração. A intensidade de luz em cada ângulo, tipicamente referida como a um canal, é medida usando um fotodiodo sensível à luz. E o sinal resultante da tensão, convertidos a uma concentração em ppm baseado em um procedimento simples da calibração. Na prática, desde que os dois instrumentos estejam calibrados corretamente, há uma diferença muito pequena entre a exatidão dos dados de ambos os tipos de instrumento.

Entretanto, há uma diferença muito importante entre instrumentos por (ICP) e por (RDE). Os instrumentos por (ICP) e por (RDE) sofrem dos efeitos da limitação do tamanho. Este efeito limita o tamanho da partícula que pode ser medida usando AES convencional. Para o (ICP), somente as partículas menores do que aproximadamente 3  $\mu\text{m}$  podem ser medidas. Para instrumentos por (RDE), o limite é ligeiramente mais elevado, ao redor 8 a 10  $\mu\text{m}$ . A implicação é que se uma amostra do óleo for analisada primeiramente por (ICP), e depois então por RDE, as concentrações dos elementos, tais quais partículas e contaminantes, que podem estar presentes às partículas de 3 a 10  $\mu\text{m}$ , serão potencialmente diferentes. Quando isto for de pouco interesse ao tender dados das amostras diferentes analisadas pelos mesmos instrumentos, dados das amostras analisadas por instrumentos (RDE) e (ICP) tipicamente não correlacionarão.

## **6 ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA DE ENSAIO EM PROPULSORES AERONÁUTICOS, ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE PARTÍCULAS EM ÓLEOS LUBRIFICANTES**

### **6.1 ESPÉCIME DE ENSAIO**

#### **6.1.1 Informações sobre motores à combustão interna**

Os motores de combustão interna têm por objetivo transformar energia térmica em energia mecânica, diretamente utilizável. Após a mistura combustível/ar ser comprimida na câmara de combustão de cada cilindro, inicia-se uma queima, a qual libera força contra a cabeça do pistão, forçando este a se deslocar na direção do virabrequim (eixo de manivelas).

A biela, elemento de ligação entre o pistão e o virabrequim, transmite a força atuante na cabeça do mesmo (resultado da expansão dos gases) ao moente (virabrequim), fazendo com que ele gire, convertendo assim o movimento retilíneo alternado do pistão, em movimento rotativo do virabrequim.

A combustão é a inflamação rápida da combinação do oxigênio com qualquer material combustível.

Os motores aeronáuticos convencionais (a pistão) podem ser classificados de diferentes modos. Um deles é quanto ao ciclo de funcionamento, que pode ser de dois grandes grupos: ciclo Otto e Diesel.

No motor de ciclo OTTO a gasolina, a mistura combustível/ar é inflamada através de uma centelha elétrica, ocasionando a queima da mistura e a expansão dos gases. É um motor alternativo, por causa do tipo de movimento obtido (vai-vem).

### 6.1.2 Informações sobre motor a pistão

Como o espécime a ser utilizado é um motor a pistão, segue uma explanação sobre este tipo de propulsor.

O motor a pistão é similar ao de automóveis, mas é projetado e fabricado dentro de padrões aeronáuticos de confiabilidade, leveza, alta eficiência, etc. É econômico e eficiente em baixas velocidades e altitudes. A maior vantagem é o baixo custo de operação e de manutenção. Por isso, é mais utilizado em aeronaves de pequeno porte.

O motor a pistão aproveita a energia da queima de combustível de aviação no interior de um cilindro, onde os gases da queima impulsionam um pistão. O movimento do pistão é transformado em movimento de rotação através da biela acoplada ao eixo de manivelas.

O motor trabalha por meio de impulsos cíclicos sobre o pistão.

À medida que uma aeronave de motor convencional ganha altitude, a potência do propulsor diminui, devido à redução da densidade do ar. Nas grandes altitudes essa diminuição é muito significativa.

Para contornar este efeito indesejável, foram desenvolvidos os turbo-compressores que comprimem e enviam o ar atmosférico sob pressão para os cilindros.

O motor com cilindros horizontais opostos é o tipo que mais predomina atualmente, no mercado mundial. Nele, todos os cilindros ficam na posição horizontal, permanecendo limpos, sem acúmulo de óleo na câmara de combustão e nas velas.

Os ensaios foram desenvolvidos com motores Lycoming da série 540 que são motores de ciclo Otto, a pistão, do tipo *boxer*, aspirados, equipados com injetores de combustível, e, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do motor (Fornecidas pela empresa Lycoming).

Modelo	Lycoming IO-540 K 1D5
Número de cilindros	6 horizontais opostos
Cilindrada	8875 cm <sup>3</sup>
Taxa de compressão	8,7: 1
Potência nominal	300 HP
Rotação nominal	2700 rpm
Peso (seco)	215 Kgf
Capacidade de óleo	11,4 litros
Pressão do óleo normal	60 a 90 libras/pol <sup>2</sup>
Refrigeração	A ar

Os motores da empresa norte-americana Lycoming vêm equipando as aeronaves T-25 Universal, que são utilizadas na instrução primária e básica dos Cadetes da Academia da Força Aérea - AFA (FAB/Brasil), com grande sucesso. Paralelamente, são utilizadas em inúmeras unidades aéreas e bases como aeronaves padrão para adestramento dos pilotos. A Figura 1 ilustra um dos motores monitorados.



Figura 1 – Lycoming IO-540 K 1D5 (vista lateral e vista superior).

## 6.2 COLETA DE AMOSTRA

Antes de estabelecer o procedimento de coleta das amostras de óleo, foi definida a técnica a ser utilizada. O critério de escolha recaiu sobre duas técnicas consideradas a princípio, que foram a ferrografia (“wear debris”) e espectrometria. Por razões logísticas a técnica escolhida foi a da espectrometria, em vista da disponibilidade de um espectrômetro de emissão atômica, no laboratório do Parque de Material Aeronáutico de São Paulo - PAMASP do Comando da Aeronáutica.

### 6.2.1 Técnicas de coleta de amostra

Existem, basicamente, três técnicas para se realizar a coleta das amostras: drenagem, imersão (de um tubo plástico descartável) e por bombeamento. No caso do experimento, desta dissertação, foram efetuadas coletas pelas duas primeiras técnicas citadas.

### 6.2.2 Intervalo de coleta de amostra

Estabelecida a abordagem de ensaio, a etapa seguinte consistiu no estabelecimento dos intervalos de coleta. A princípio os procedimentos recomendados pelo manual do fabricante estabelecem o intervalo de coleta de amostras óleos a cada 125 horas de voo, no entanto em face das aeronaves em análise apresentarem uma vida operacional longa, os procedimentos adotados foram realizados em paralelo com as inspeções de célula e motor, a cada 50 horas de voo (conforme o *Service Instruction nº 1492C of July 14, 2000* da empresa *Lycoming/Textron*”, fabricante do propulsor aeronáutico). Na Figura 2 é ilustrado detalhe da aeronave disponibilizada para inspeção de célula e motor.

### 6.2.3 Especificação do óleo lubrificante usado nos espécimes de monitoramento

O óleo especificado para os motores aeronáuticos Lycoming, que são utilizados nas aeronaves T-25 é o *Aeroshell OIL W 15W-50*, da empresa Norte-americana Shell. Este óleo atende ao Boletim de Serviço n.º446C emitido pelo fabricante do propulsor, a Diretiva de Aeronavegabilidade n.º80-04-03 do FAA (*Federal Aviation Administration*) e homologado sob as especificações SAE J-1899 e a MIL-L-22851D.

Este produto é especialmente formulado para reduzir o desgaste do motor, corrosão oriunda da combustão e diminuir o consumo de óleo e de combustível.



Figura 2 – Aeronave T-25 disponibilizada para inspeção.

Os primeiros conjuntos de amostras para a pesquisa em questão foram coletados em 2003. Tanto para a aeronave matrícula FAB n.º1956, quanto para a de n.º 1944. Novas coletas estão previstas, para um período de um ano em intervalos de 50 horas de voo.

Os pontos definidos para coleta das amostras de óleo de lubrificante são localizados na parte superior e inferior do motor e são aqueles projetados pelo próprio fabricante.

Nas Figuras 3 e 4 são ilustrados, em detalhe, os pontos de coleta.

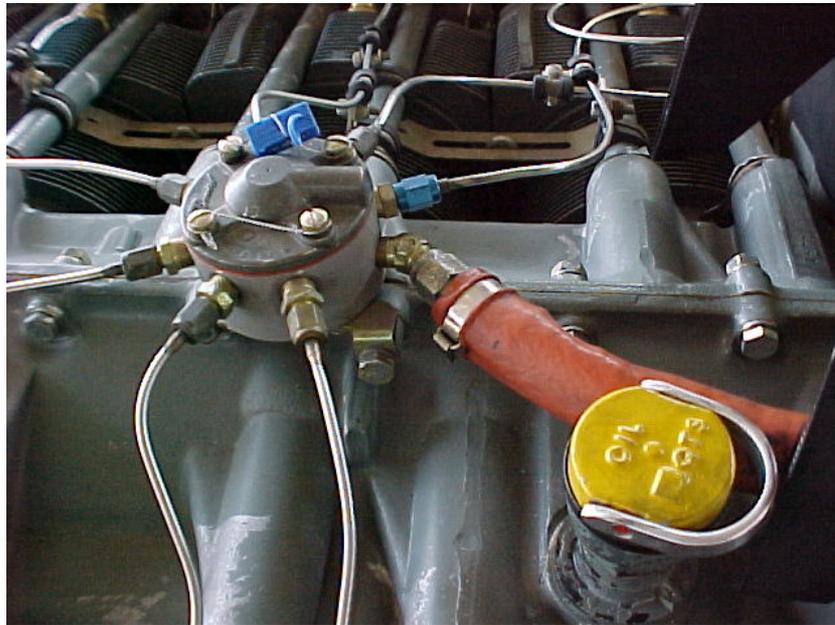


Figura 3 – Ponto superior de coleta de amostra de óleo lubrificante.



Figura 4 – Ponto inferior de coleta de amostra de óleo lubrificante.

O critério de definição destes pontos é baseado em aspectos operacional e de manutenção, de forma a assegurar condições turbulentas que venham a garantir uma concentração representativa de contaminantes, contidos no óleo circulante do sistema.

Antes do início da coleta o motor foi colocado em operação (“giro”) de modo que o óleo circule pelo sistema e atinja as condições e temperaturas adequadas de operação. As amostras foram coletadas nos pontos definidos, em recipiente perfeitamente limpo e livre de contaminantes externos, conforme pode ser visto nas fotos das figuras 5 e 6:



Figura 5 – Amostra coletada, armazenada em frasco apropriado



Figura 6 – Amostra com identificação requerida.

#### 6.2.4 Procedimento de coleta de amostra

O sucesso e efetividade do programa de análise de óleo dependem principalmente da confiabilidade das amostras. Uma amostra confiável é aquela, a qual é verdadeiramente representativa do fluído circulante no equipamento que está sendo avaliado.

Para tanto, devem ser seguidas as seguintes observações para prevenir a contaminação da amostra de óleo coletada:

- Armazenar os recipientes de coleta das amostras, em fechado e sem nenhum tipo de sujeira.
- Evitar o contato do tubo plástico com qualquer superfície que possa contaminá-lo.
- Os frascos de coleta só devem ser abertos no momento da coleta. Após, devem ser fechados imediatamente.
- O tubo de plástico, por ser descartável, deve ser utilizado uma única vez.
- Os frascos de coleta devem ser isentos de vazamentos do fluído coletado.
- Após ser efetuado o “giro de motor” (ou seja, quando do “corte do motor”), as amostras devem ser coletadas imediatamente (de 5 a 15 minutos) e antes de qualquer fluído ser adicionado ao sistema de lubrificação.
- Após coletar a amostra, a mesma deve ser imediatamente identificada com a colocação de um rótulo no recipiente de coleta.
- Não usar de sucção pela boca para encher o tubo de coleta de amostra. Muitos fluídos são altamente tóxicos e podem causar paralisia e ou a morte.

### 6.3 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

As amostras foram enviadas para o laboratório de análise químicas do setor do PAMASP e foram agendadas para análise dentro de uma escala de prioridades, tendo em vista que estas amostras específicas, não são partes da rotina operacional.

As análises foram processadas através de espectrômetro *Spectroil M/F Fuel and Oil Analysis da SPECTRO INC. Industrial Tribology Systems*. Este aparelho é um espectrômetro de emissão atômica baseada na técnica de um disco eletrodo rotativo, conforme é mostrado nas Figuras 7 e 8 abaixo:



Figura 7 – Espectrômetro “Spectroil M”.



Figura 8 – Espectrômetro “Spectroil M” com seus padrões de calibração.

O equipamento permite a análise por espectrografia simultânea de quantidades e tipos de elementos metálicos em uma amostra de óleo e contaminantes e aditivos em lubrificantes e fluídos hidráulicos.

Os dados de análise foram processados com o objetivo de constatar a condição do motor a partir de uma amostra definida como padrão. Esta amostra foi tomada com base nos procedimentos estabelecidos pela COMAER baseados em normas consagradas. Os procedimentos ora adotados não exploram os aspectos de acompanhamento comparativo visando a manutenção preditiva, pró-ativo, ou seja, ocorre somente uma avaliação instantânea com base critérios quantitativos ou qualitativos. Nesta pesquisa o que foi proposto é o acompanhamento regular dos dados de coleta de forma comparativa, visando estabelecer um programa pró-ativo de forma a avaliar a possibilidade de extensão do ciclo de vida do equipamento em questão, bem como obter o diagnóstico dos mecanismos de falha que podem prevenir acidentes, e aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

As características do equipamento do equipamento são apresentadas no apêndice 1.

### **6.3.1 Metodologia Aplicada**

#### 6.3.1.1 Introdução

O **Spectroil M** é composto de vários de subsistemas diferentes, cada um tem seu próprio papel na análise.

#### 6.3.1.2 Fontes de excitação

O conjunto da fonte da excitação consiste em muitos componentes que são montados em um compartimento retangular, situado atrás do conjunto do carrinho de excitação da amostra. Seus painéis são bloqueados para a proteção do operador e

removidos facilmente para manutenção rotineira e prevenção de falhas. Foi projetado para ser simples e de confiança. Durante a análise, a fonte de excitação gera uma diferença de potencial entre o eletrodo de disco e o eletrodo de barra para criar e sustentar a descarga do arco, que resulta na criação do plasma. As características da fonte de excitação, tais como sua capacidade, nível de tensão, frequência, etc., podem ser variáveis para atender as exigências da análise.



Figura 9 – Eletrodo de barra e disco criando e sustentando a descarga do arco, que resulta na criação do plasma (fonte: Practicing Oil Analysis Magazine).

O **Spectroil M** é um instrumento que compara a intensidade do espectro de luz de uma amostra de óleo ou de combustível desconhecido, contra uma intensidade de um padrão conhecido e calibrado, de óleo. A precisão do instrumento é diretamente dependente da qualidade dos padrões de calibração usados para produzir as curvas iniciais de calibração e executar a recalibração diária. Se os padrões de calibração forem fornecidos com o instrumento, é mais provável que estes padrões sejam usados para gerar as curvas iniciais de calibração. A qualidade da análise do **Spectroil M**

dependerá sobre maneira do operador que controla a qualidade dos padrões de óleo usados na padronização diária do instrumento.

**NOTA 1:** Os padrões de óleo degradam com tempo. Os padrões de óleo são etiquetados com datas de fabricação e podem também incluir uma data de validade. A data de validade pode variar entre fabricantes e suas recomendações devem ser seguidas.

**NOTA 2:** Os padrões do óleo devem ser vigorosamente agitados, pelo menos 2 horas antes do uso.

#### 6.3.1.3 Verificação diária de padronização

A verificação da padronização é executada para verificar se o instrumento permanece calibrado. É um método rápido para verificar se o instrumento fornece resultados exatos, sem ter que ser conduzido a uma padronização completa.

Este procedimento requer que o operador analise pelo menos três níveis diferentes de padrão de calibração. Um dos padrões deve ser abaixo do ppm do óleo ou de 0 ppm, o padrão seguinte deve estar na extremidade mais elevada da escala da concentração esperada para amostras desconhecidas e o terceiro padrão deve ser alguma concentração entre a de 0 ppm e o padrão mais elevado. Por exemplo, se as amostras a serem analisadas forem de óleos usados, que normalmente têm concentrações de ferro tão elevadas quanto 100 ppm. E de prata, tão baixas quanto 1.0 ppm ou menos, os padrões recomendados para a verificação diária da padronização de óleo, devem ser o **ÓLEO DE BASE (0 ppm)** e o **PADRÃO DE 100 ppm**.

Para aplicações em aviões militares, os padrões de 0, 5, 10 e 30 ppm cobrem geralmente a escala completa de concentrações previstas. Se for uma amostra do combustível com contaminação muito baixa, os padrões recomendados são os de **Óleo Base e o Óleo Padrão de 10 ppm**.

Compare os resultados de queima de padronização, com os da tabela 2:

Tabela 2 – Faixas de índices aceitáveis para checagem diária de padronização.

<b>Concentração (ppm)</b>	<b>Mínimo (ppm)</b>	<b>Máximo (ppm)</b>
0	0,0	1,0*
5	3,8	6,2
10	8,5	11,5
30	27,0	33,0
50	45,0	55,0
100	90,0	110,0
300	255,0	345,0

\* Esta faixa aplica-se para todos os elementos exceto Ag, Al, Mg e Sn. A faixa para estes elementos é de 0 até 0,5.

Talvez a repetibilidade seja uma das mais importantes características técnicas de um espectrômetro, que atesta a sua habilidade de executar repetidamente a mesma medida e com o mesmo resultado. Esta característica é conhecida como sendo a repetibilidade, reproducibilidade, sigma, desvio padrão ou a precisão. A repetibilidade é determinada pelo desvio padrão de uma série das medidas feitas na mesma amostra.

#### 6.3.1.4 Padrões militares para desgaste de metal

O programa militar de análise de óleo é estritamente controlado pelo *Joint Oil Analysis Program Technical Support Center (JOAP-TSC)* em Pensacola, Florida. Esta organização é responsável por fornecer e monitorar a qualidade de padrões de óleo para a atividade diária, dentro da comunidade militar, na atividade de análise de óleo.

Tabela 3 – Padrões de óleo para a área militar.

<b>Padrão</b>	<b>Código</b>
D3 - 100	1RM 6650-01-283-0249SX
D12 - 5	1RM 6650-01-307-3343SX
D12 - 10	1RM 6650-00-179-5145SX
D12 - 30	1RM 6650-00-179-5144SX
D12 - 50	1RM 6650-00-179-5143SX
D12 - 100	1RM 6650-00-179-5142SX
D12 - 300	1RM 6650-00-179-5141SX
D19 - 0	1RM 6650-01-179-5137SX

#### 6.3.1.5 Eletrodos de grafite (disco e barra)

O **Spectroil M** é um espectrômetro de emissão de arco, que incorpora a técnica do eletrodo de grafite, de disco rotativo. O eletrodo de grafite, de disco rotativo, fornece os meios pelo qual, na amostra, é introduzida uma descarga em arco, para criar um plasma para a análise e o eletrodo de grafite em forma de barra, estabelece a abertura analítica e o trajeto da descarga do arco. A forma do eletrodo de grafite em barra e a densidade específica do eletrodo de disco contribuem significativamente para o desempenho do **Spectroil M**.

Desde que os eletrodos de grafite (de disco e de barra), contribuem significativamente para a qualidade dos dados analíticos, seguem algumas recomendações a respeito do manuseio, da preparação e do controle dos eletrodos. Os eletrodos de disco e de barra são fabricados e purificados conforme severas especificações, para se assegurar de que não contenham níveis inaceitáveis de traço do elemento de contaminação e para o não comprometimento da observação dos elementos de interesse. Os eletrodos de disco podem facilmente se tornar contaminados se segurados impropriamente. A superfície do eletrodo que faz a abertura analítica nunca deve ser tocada com os dedos. O manuseio do eletrodo em forma de barra é igualmente tão importante quanto ao apropriado para o em forma de disco. A preparação correta da ponta do eletrodo de barra assegurará que os dados analíticos serão reproduzidos.

Todos os eletrodos de grafite (de disco e de barra), fornecidos com o *Spectroil M* são da classe da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), e podem ser obtidos no mercado mundial. Embora estes eletrodos sejam fabricados pelo mesmo processo de extrusão, a densidade dos eletrodos pode variar drasticamente, de fornecedor para fornecedor.

A densidade específica dos eletrodos de disco afeta as curvas de calibração. Além disso, recomenda-se que o usuário do instrumento evite misturar grupos de eletrodos, pois, a densidade específica pode variar de lote para lote, mesmo que seja do mesmo fornecedor.

Tabela 4 – Características do eletrodo de grafite.

<b>Nome</b>	<b>Dimensões</b>	<b>Proposta</b>
Eletrodo em barra	Grafite de carbono (15,24 cm) de comprimento, 0,617 cm de diâmetro, Spectro P/N OIL-00009 NSN 5977-00-464-8433	Apontado em uma extremidade com um ângulo de 160°, para dirigir a descarga do arco do eletrodo de disco
Eletrodo em disco	Grafite de carbono (1,25 cm) de diâmetro, 0,508 cm de espessura, Spectro P/N OIL-00008 NSN 5977-00-464-8496	Carrega a amostra na abertura analítica para a análise

#### 6.3.1.6 Recipiente descartável de amostra

Ao executar uma análise de fluido, uma importante consideração que tenha um efeito na repetibilidade da análise é a quantidade de amostra introduzida na abertura analítica. Este é um parâmetro que o instrumento não pode ajustar. O nível apropriado de óleo no suporte de amostra, é conseqüentemente, parte de toda a boa técnica do operador. Os padrões e as amostras são analisados em suportes plásticos descartáveis

de amostra ou em um suporte reutilizável de amostra. Em um ou outro caso, recomenda-se que o suporte de amostra esteja cheio.

Com o indicador e o polegar, escolha o suporte de amostra e coloque-o no entalhe no alto da mesa de amostra. Empurre o suporte de amostra, para a parte traseira da até que o suporte de amostra chegue ao batente. Posicionar, agora, corretamente na mesa. Levante a mesa e posicione a alavanca, situada no fundo da mesa, até que a ela alcance o fim de seu curso. O eletrodo de disco deve agora ser imerso na amostra, até o fundo. A amostra está agora pronta para a análise. Feche a porta do carrinho de amostra e pressione o interruptor de início, situado no painel de controle de operação ou no *START* funcional da chave 9 (F9) no teclado.

**Cuidado:** O suporte de amostra pode estar muito quente, dependendo do tipo de suporte e do óleo/combustível que foi analisado.

#### 6.3.1.7 Recipiente reutilizável de amostra

O procedimento é idêntico ao procedimento acima para o suporte descartável a não ser aquele que um suporte reutilizável limpo, seja usado para colocar o óleo ou o combustível, para a análise.

O suporte da amostra deve ser limpo com um banho ultra-sônico e uma solução de limpeza, ambientalmente aceitável.

#### 6.3.1.8 Tampa do recipiente da amostra

Algumas amostras do combustível e/ou óleos hidráulicos podem incendiar durante a análise. Para tais amostras, uma tampa para o suporte de amostra deve ser usada, para retardar a chama e minimizar a fumaça, que atenuará o resultado da análise. A tampa trabalha somente com o suporte de amostra reutilizável.

#### 6.3.1.9 Limpeza após cada operação

Após 8 horas de operação, a área completa do carrinho de amostra deve ser limpa do acúmulo de óleo originado nos ciclos de “queima”. Se executado rotineiramente, o carrinho de amostra pode ser limpo, simplesmente, com as toalhas de papel.

#### 6.3.1.10 Tecidos de papel para operação e toalhas de papel para a limpeza

Os tecidos e as toalhas de papel descartáveis são recomendados para o uso na operação diária do *Spectroil M*. Se utilizá-los ao manusear o eletrodo de disco, estes elementos (se não forem apropriados), contaminarão os eletrodos e produzirão resultados erráticos, em especial para o elemento silício.

#### 6.3.1.11 Procedimento de *WARM-UP*

Se o *Spectroil M* ficar inativo por muitas horas, pode ser necessário conduzir uma série das queimas, para introduzir luz no sistema óptico e para permitir que os componentes eletrônicos fiquem aquecidos. Este exercício de *warm-up* pode ser conduzido com qualquer amostra ou padrão de óleo. E pode usar os eletrodos que tenham sido queimados antes. Recomenda-se que ao menos três queimas de *warm-up* sejam conduzidas.

#### 6.3.1.12 Rotina de análise da amostra

Este parágrafo dá as etapas a serem seguidas, para analisar ou "queimar" qualquer tipo de amostra, no caso de uma amostra de óleo usado, um padrão de óleo, ou uma amostra de combustível:

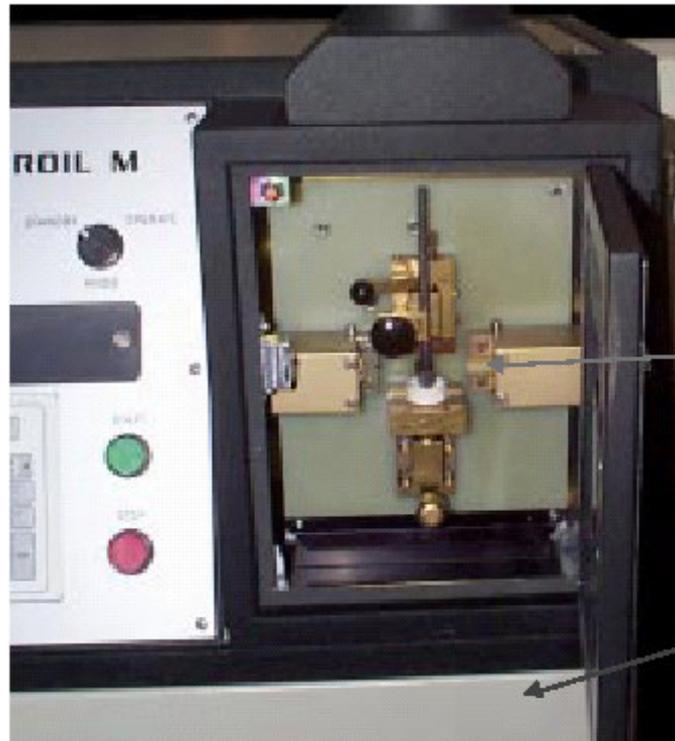


Figura 10 – Ilustra a seqüência de preparação de análises.

1. Verificar se o monitor de vídeo mostra na tela, o modo “programa da análise”. Para a operação de *refresh* no vídeo, pressione qualquer tecla.
2. Instalar um eletrodo de carbono em forma de disco, no eixo de montagem, usando um pano limpo e procurando evitar o contato com os dedos.
3. Pressionar o botão (preto) da mola do eletrodo de barra, para abrir as garras da braçadeira. Introduzir um eletrodo de grafite em barra, até que a ponta de carbono esteja em contato com o eletrodo de disco. Liberar o botão para fixar o eletrodo na braçadeira.
4. Ajustar a abertura do mecanismo de análise, levantando e abaixando a alavanca de ajuste. Isto ajustará a distância de abertura em 0.090 da polegada, entre o disco e o eletrodo de barra.
5. Encher um suporte com a amostra que será analisada. Encher sempre os suportes de amostra até a borda.

**Nota:** Quando as amostras do combustível são analisadas, os suportes de amostra e as tampas reutilizáveis do suporte de amostra devem ser usados para impedir a ignição da mesma.

6. Colocar o suporte de amostra cheio, na mesa e deslizá-lo para trás até a extremidade do sulco, no alto da mesa.
7. Levantar a mesa de amostra, usando o dispositivo que posiciona a alavanca (o fluído de amostra contatará com o fundo do disco de grafite).
8. Fechar a porta do carrinho de amostra e pressionar a chave 9 de *Start* do interruptor ou tecla de função (F9).
9. Depois da queima completa, os resultados aparecerão na tela de vídeo.
10. Depois da queima completa, abrir a porta do carrinho de amostra e remover o eletrodo de barra gasto. Ajustar a ponta novamente, antes de usar outra vez.
11. Abaixar a mesa de amostra, remover e descartar o suporte de amostra.
12. Com uma toalha de papel, proteger os dedos. Pois, o eletrodo de disco estará quente. Remover e descartar o eletrodo de disco.
13. Usando um tecido ou de toalha de papel limpar o excesso de líquido derramado ou pulverizado de amostra, no eixo da mesa de amostra e/ou no eletrodo de disco.

**NOTA:** A janela protetora de quartzo deve ser limpa a cada 5 queimas.

Desta maneira foi aplicada de maneira a mais conservativa possível, a metodologia citada, a qual possibilitou a obtenção dos resultados que são demonstrados nos tópicos seguintes, desta dissertação.



Figura 11 – Padrões de calibração do espectrômetro.

Óleos Padrões para calibração Espectrométrica. Os óleos padrões consistem em uma base de óleos contendo quantidades precisamente controladas de elementos orgânico-metálicos dissolvidos e de agentes estabilizantes, com viscosidade controlada e ponto de *flash* para calibração tanto do espectrômetro de absorção, quanto o por emissão atômica.

1. Os padrões de óleo são disponíveis em oito frascos numerados e através de fontes normais de suprimento.
2. O padrão D-3 tem um prazo de validade de 12 meses e com extensão não autorizada.

*Designation Elements Concentration Shelf Life*

\* A validade do padrão é determinada e extensão da mesma não é permitida. Padrões que atinjam o fim da validade devem ser segregados de acordo com as regras estabelecidas.

\*\* A concentração de 5 ppm não é aplicável para laboratórios AOAP.

Tabela 5 – Composição do *kit* de óleo padrão do equipamento.

Designação	Elementos	Concentração	Validade
<b>D-19</b>	N/A	0	N/A
<b>D-3</b>	B, Mo, Zn	100	*12 months
<b>D-12</b>	Fe, Al, Cr, Cu, Pb, Na, Mg, Ni, Si, Ag, Sn, Ti	** 5, 10, 30, 50, 100, 300	*30 months

Fontes típicas de desgaste encontradas em falhas detectáveis.

Motores de combustão interna: rolamentos desgastados, virabrequim, bucha de pino de pistão, engrenagens da bomba de óleo, varetas de válvula, balancim de válvula, guias de válvula e molas de válvula.

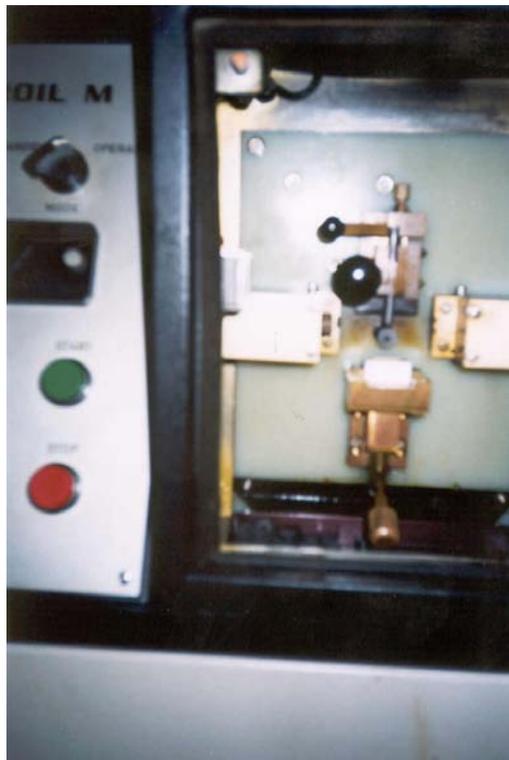


Figura 12 – Padrões de calibração do espectrômetro.

### 6.3.2 Resultados obtidos

Através da metodologia adotada com o padrão de calibração D-12, a qual é a apropriada para a avaliação da condição de motores aeronáuticos, foram obtidos os seguintes resultados para os motores IO-540 K 1D5.

#### 6.3.2.1 Motor número de série: RL 25085-48A (aeronave matrícula número 1944 da FAB)

Para este motor foram realizadas coletas em datas distintas conforme descrito abaixo:

A primeira amostra foi coletada em 26/08/2003 e analisada no dia 02/09/2003. A segunda amostra foi coletada em 20/11/2003 e analisada no dia 02/12/2003. A terceira amostra foi coletada em 09/06/2004 e analisada em 22/06/2004. As coletas foram feitas na base de operação da aeronave, em São José dos Campos – SP.

Na tabela 6 são apresentadas as concentrações dos elementos, expressas em ppm (partes por milhão) relativas às amostras analisadas.

Tabela 6 – Concentrações dos elementos (em ppm), encontrados após análise 1.

Al	Fe	Cr	Cu	Mg	Ti	Ni	Sn	Pb	Si	Zn	Na
19,2	28,5	3,6	24,5	0,0	0,0	1,0	0,4	1328	0,0	0,0	0,0
25,8	23,8	3,2	19,7	0,0	0,0	1,3	0,8	1230	0,0	0,0	0,0
16,0	15,8	1,6	5,3	0,0	0,0	0,9	0,0	1214	0,0	1,9	3,7
17,3	24,6	2,0	6,5	4,5	0,6	2,8	0,1	1235	0,0	0,0	0,0
9,6	14,3	0,0	5,2	3,4	0,2	1,0	0,0	1031	0,0	0,0	1,2

### 6.3.2.2 Motor número de série: RL 24826-48A (aeronave matrícula número 1956 da FAB)

Para este motor foram realizadas coletas em datas distintas conforme descrito abaixo:

A primeira amostra foi coletada em 03/02/2003 e analisada no dia 19/03/2003. A segunda amostra foi coletada em 24/07/2003 e analisada no dia 13/08/2003. A terceira amostra foi coletada em 29/09/2003 e analisada em 02/10/2003. A quarta amostra foi coletada em 16/04/2004 e analisada em 30/04/2004. As coletas foram feitas na base de operação da aeronave, no CTA/GEEV, em São José dos Campos – SP.

Na tabela 7 são apresentadas às concentrações dos elementos, expressas em ppm (partes por milhão) relativas às amostras analisadas.

Tabela 7 – Concentrações dos elementos (em ppm), encontrados após análise 2.

Al	Fe	Cr	Cu	Mg	Ti	Ni	Sn	Pb	Si	Zn	Na
1,3	45,8	1,5	14,8	0,0	0,4	2,4	0,6	1024	4,5	0,0	0,0
21,7	51,2	4,0	15,2	0,0	0,0	2,0	0,5	962	1,0	0,0	0,0
20,0	59,8	4,0	18,8	0,0	0,5	3,0	1,7	1400	0,0	0,0	0,0
28,0	65,3	2,5	14,8	0,0	0,0	2,6	0,3	1281	0,0	0,0	0,0
7,1	18,4	2,9	19,4	2,1	0,3	1,6	1,8	891	0,0	0,0	5,3

**Obs.:** O valor de Al quase atingiu os 30 ppm, que é o limite de concentração deste elemento para motores normalmente aspirados, conforme a recomendação do Departamento de Suporte ao Produto da empresa *Textron Lycoming (USA)*.

## 7 TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 7.1 METODOLOGIA ANALÍTICA DAS PARTÍCULAS DE DESGASTE DE UM EQUIPAMENTO AERONÁUTICO

A metodologia de análise das partículas de desgaste (*wear debris*), de itens aeronáuticos abrange a interpretação de resultados da análise de uma amostra de óleo usado, avaliação da condição do equipamento nos resultados da análise, diagnóstico da provável fonte de desgaste dos metais e a emissão de recomendações exatas e eficazes de manutenção e operação do equipamento.

Esta metodologia tem o potencial de padronizar as respostas do **Avaliador** e resultar em critérios de avaliação e em recomendações mais exatas do laboratório.

A metodologia analítica das partículas de desgaste de um equipamento aeronáutico usa três conjuntos distintos de tabelas, porém inter-relacionadas:

1. Tabelas dos Critérios de Avaliação das Partículas de Desgaste: Arranjadas pelo tipo de equipamento. Estas tabelas fornecem a escala e valores padrão de desgaste dos metais, os quais relacionam a concentração de partículas da amostra do óleo com a condição prevista para o equipamento e/ou do óleo lubrificante.
2. Tabelas Guia de Diagnósticos Suplementares: Estas tabelas fornecem a orientação adicional para diagnóstico do desgaste, para cada tipo de elemento que está sendo avaliado, para ajudar a identificar a peça/componente que mais precisamente poderá falhar (origem do metal de desgaste), quando partículas estão presentes, sozinhas ou em combinações em outras concentrações normais na amostra. Ou quando uma tendência anormal for evidente. “Caixas” são colocadas em torno dos elementos que serão os indicadores preliminares da falha de um componente, em particular.

3. Tabela Guia de Tomada de Decisão (Tabela 8): A qual fornece orientações para o **Avaliador** a respeito das recomendações apropriadas que devem ser emitidas depois que a amostra for analisada.

Normalmente, as tabelas de Critérios de Avaliação e Guia de Diagnóstico são fornecidas separadas para cada tipo de equipamento. Mas, algumas tabelas são combinadas para diferentes séries de motores, ou mesmo itens similares. Tabelas separadas são usualmente requeridas por causa dos diferentes intervalos normais de amostragem, nas características de operação do equipamento, nos perfis da missão a ser executada e nos tempos de operação requeridos para que as concentrações de partículas de desgaste passem da condição do nível normal, para a de anormal. Estas características foram combinadas para produzir os dados usados para estabelecer escalas e tendências do metal de desgaste (*debris*).

Quando possível, a informação compilada de análise de óleo detectou falhas e foi usada para estabelecer a concentração anormal das partículas de desgaste. Quando isto não era possível, a concentração anormal de partículas foi estabelecida usando métodos estatísticos aceitos. As escalas de concentração e os valores da tendência são continuamente analisados e ajustados como necessário, usando as informações, revisões de engenharia e resultados históricos da condição do equipamento.

Os intervalos de amostragem, os limites da escala de desgaste e os valores de tendência são estabelecidos para reduzir a possibilidade de que a concentração de desgaste possa ir de normal para anormal, sem que uma amostragem tenha sido examinada. O conceito é um *Surveillance* aumentado por amostragens mais freqüentes, tanto quanto as concentrações de desgaste aumentem. A informação é fornecida nos valores anormais da tendência, porque o rápido crescimento do desgaste do metal, mesmo em baixas concentrações e dentro dos limites aceitáveis da faixa, pode ser indicador de falhas.

As atividades que identificam uma exigência em modificar estas tabelas para um equipamento específico, devem ser científicas para as autoridades de engenharia, daquele tipo de equipamento.

Se for necessário originar uma recomendação de manutenção. Uma tabela guia de diagnóstico suplementar pode então, ser usada para localizar áreas de possíveis problemas e ajudar a identificar uma recomendação específica. Em muitos casos é possível dar ao pessoal da manutenção, uma indicação de quais componentes no equipamento, estão tendo desgaste anormal, baseada nas partículas metálicas que estão sendo produzidas.

O guia de Tomada de Decisão (Tabela 8) provê uma seqüência lógica de ações para o **Avaliador** seguir uma determinada recomendação apropriada do laboratório, durante o processo de avaliação. Esta tabela é estruturada de maneira que uma recomendação do laboratório possa ser derivada de uma comparação entre a última análise de amostra de óleo e a da primeira amostra em consideração ao padrão, como um fator. A tabela 8 é para o uso, como um guia, para o **Avaliador**. Para fazer uma determinação definitiva de uma recomendação apropriada, o **Avaliador** tem que considerar todos os fatores envolvidos no processo de avaliação. Uma recomendação para uma ação de manutenção é considerada somente após uma amostragem especial, confirmando a análise anterior. Entretanto, o **Avaliador** pode desejar emitir uma recomendação do tipo “não voa, não opera” seguindo uma rotina de amostragem anormal, pendente de uma avaliação de amostra especial, se as circunstâncias permitirem tal recomendação.

Os códigos recomendados pelo laboratório na tabela 9 estão definidos na recomendação (Tabelas 9-10-11-12) e são padrões durante todo o processo de análise do equipamento/motor aeronáutico. Um código de recomendação que seja o mais apropriado para a situação vigente, será atribuído. Entretanto, o texto descritivo que acompanha o código de recomendação pode ser modificado para se adequar à situação, desde que a definição básica do mesmo permaneça inalterada.

A frequência de amostragem é diretamente relacionada à probabilidade de detecção da falha, que é relacionada por sua vez, à velocidade do modo de falha.

Embora a análise seja prevista para prover uma alta probabilidade de detecção da falha, uma reduzida probabilidade de detecção pode ser tolerada. Em alguns casos, para equipamento com instalação em redundância, tais como uma aeronave multi-

propulsor ou para sistemas com baixo risco à segurança, associados com mau funcionamento ou falha, tais quais as unidades de geradores de energia auxiliar.

Requisitos de frequência de amostragem normais, que são determinadas pela mais alta autoridade em cada área, são mandatórios e não estão sujeitas à modificação pelo laboratório ou atividades de operação, sem diretriz oficial. Os laboratórios podem recomendar o aumento da frequência de amostragem para amostras especiais, quando os resultados de análises indiquem a necessidade de um monitoramento minucioso do equipamento em um determinado intervalo de tempo.

### **7.1.1 Resultados da avaliação de amostras**

A experiência e o julgamento do **Avaliador** são fatores extremamente importantes em determinar uma recomendação eficaz, desde que o **Avaliador** possa usar todas as informações adicionais, a fim de chegar a uma decisão mais precisa para um conjunto particular de circunstâncias. O **Avaliador** seguirá os seguintes procedimentos para a sua análise de resultados de avaliação de uma amostra:

- Investigar registros desaparecidos ou incomuns sobre serviços com óleo (tais como: não adição de óleo ou excessiva adição), porque estes registros são partes importantes do processo de avaliação da amostra.
- Determinar a escala para cada concentração crítica de desgaste no resultado da amostra, vindo de uma tabela de critério de avaliação de desgaste (motor/componente). Metais desgastados de maneira crítica (elementos) os quais requerem monitoramento da análise de óleo para um equipamento em particular, têm critério numérico fornecido, na tabela aplicável, de critério de avaliação de desgaste.

Dados na concentração média de outros elementos constantes das análises, são fornecidos para a finalidade de informação. Entretanto, se as concentrações incomuns destes elementos não críticos forem encontradas, podem também, serem usados como uma base de recomendação de manutenção ou pedidos de re-amostragem.

- Comparar os níveis de concentração das partículas de desgaste da amostra atual, com os níveis da amostra precedente para determinar se as mudanças que estão ocorrendo indicam o surgimento de problemas no equipamento.

Há muitos outros fatores que devem ser avaliados para se determinar a real condição do equipamento e se as recomendações do laboratório ao cliente são necessárias. Geralmente, as tendências cairão em uma das seguintes categorias:

1. **Nível (Pequena ou nenhuma mudança):** Considerado normal.
2. **Aumento ou diminuição ligeiramente moderado:** Considerado normal por causa das tolerâncias do espectrômetro, diferenças entre as amostras e fatores do óleo (uso/adição).
3. **Aumento ou diminuição aguda dentro dos limites da tendência:** Geralmente, é indicativo de problemas. Um aumento repentino pode indicar o início de um problema no equipamento. Uma diminuição repentina pode indicar procedimentos de amostragem defeituosos, adição de óleo ou mudança sem documentação/registro, problemas com a identificação da amostra, etc.  
Recomenda-se a verificação das amostras e/ou a diminuição dos intervalos de coleta das amostras para repentinos aumentos. E, investigar os procedimentos de amostragem ou a não documentação da adição de óleo, para as repentinas diminuições nas concentrações dos elementos.
4. **Aumentos e diminuições erráticas do nível da tendência:** Indica geralmente, um problema no procedimento de amostragem (adição de óleo ou mudança sem documentação, identificação da amostra, etc.), e deve provocar um pedido de revisão de procedimentos de amostragem da atividade e submissão de uma amostra monitorada, para a verificação.
5. **Aumentos que excedam aos limites da tendência:** Geralmente indicativo de problemas no equipamento. Assim, deve-se consultar o Guia de Tomada de Decisões e revisar o histórico do equipamento. Disso, normalmente resulta numa nova análise de amostra e/ou numa recomendação de ação de manutenção.

Obs.:As categorias anteriormente mencionadas são subjetivas desde que nenhum valor do ponto de aumento ou decréscimo, entre os limites da tendência, seja atribuído.

A classificação da severidade dos aumentos ou diminuições tem que ser determinados por cada **Avaliador**, após ter considerado todos os fatores envolvidos. A lista não é considerada completa, mas, é fornecida para mostrar que as variações da tendência, são uniformes quando ainda dentro dos limites, tiverem que ser monitoradas para detectar os problemas, antes do aparecimento de falhas de componentes/sistemas se ações recomendadas para as atividades de operação são requeridas ou não.

### **7.1.2 Determinação da recomendação apropriada, usando o guia de tomada de decisões**

A maioria dos resultados das análises de amostras será normal, com a apropriada recomendação do código A. Se a recomendação para uma ação de manutenção for indicada pelo Guia de Tomada de Decisão, a tabela Guia de Diagnóstico Suplementar deve ser consultada.

Estas tabelas podem fornecer informação adicional a respeito da localização de prováveis problemas, que garantem a inclusão na recomendação do laboratório/nota de aviso de manutenção para a atividade de operação.

O procedimento acima pode servir como um guia operacional passo-a-passo para a pessoa do **Avaliador** com experiência limitada. E ao reter flexibilidade considerável para o uso por um **Avaliador** experiente, que possa prontamente levar em consideração vários fatores que influenciam avaliações e recomendações. **O julgamento e experiência do Avaliador são partes muito importantes do processo de avaliação** e não deveria ser subordinada por dados numéricos, quando as circunstâncias incomuns existirem. Em muitos casos, o Guia de Tomada de Decisão fornece as opções a respeito das recomendações específicas a serem emitidas pelo **Avaliador**, após ter considerado todas as informações, tempo decorrido desde a última

revisão, tempo decorrido desde a mudança de óleo, histórico do componente, elemento(s) crítico(s), etc.

Normalmente, os códigos opcionais de recomendação serão suficientes. Mas, em outros casos o **Avaliador** pode usar recomendações não listadas como aplicáveis, baseando-se em uma análise completa das circunstâncias.

Tabela 8 – Guia de tomada de decisão.

Faixa, Amostra atual	Faixa, Amostra anterior	Padrão	Código de recomendação	
			Categoria I	Categoria II
NORMAL	NORMAL	NORMAL	A	N/A
		ANORMAL	B ou C	N/A
	MARGINAL	N/A	A ou B	N/A
	ALTO	N/A	A ou B	N/A
MARGINAL	NORMAL	NORMAL	A ou B	N/A
		ANORMAL	B	C
	MARGINAL	NORMAL	A	N/A
		ANORMAL	B	C
ALTO	NORMAL	NORMAL	B	C
		ANORMAL	P	F.H.R.T
	MARGINAL	NORMAL	C	N/A
		ANORMAL	P	F.H.R.T
ALTO	NORMAL	C	N/A	
	ANORMAL	P	F.H.R.T	
ANORMAL	NORMAL	NORMAL	P	C
		ANORMAL	P	F.H.R.T
	MARGINAL	NORMAL	C	N/A
		ANORMAL	P	F.H.R.T
		NORMAL	C ou E	N/A
		ANORMAL	P	F.H.R.T
		NORMAL	P ou F	F.H.R.T
		ANORMAL	T	N/A

## NOTAS

1. Para todas as amostras de rotina, a recomendação na categoria I será usada. Para todas as solicitações do laboratório para amostras especiais ou verificação de amostras, as recomendações da Categoria II serão usadas.
2. Avisos com códigos "G", "J", "W" e "Z" são auto explicativos e serão usados pelo **Avaliador** como apropriado.
3. Somente um código pode ser usado para recomendação. Onde mais do que um código é listado na Categoria I ou Categoria II, use o código que mais se aproxima da situação encontrada.
4. Se as recomendações do Avaliador são ignoradas (por exemplo: O óleo é trocado mesmo que os códigos B, C, E, F ou P foram recomendados, com o Aviso “Não Troque o óleo”), então o **Avaliador** tem que usar de cautela, pois a Tabela de Tomada de Decisão pode tornar-se ineficaz ou difícil de ser usada.

Recomendação de laboratório para códigos aeronáuticos padrão para análises espectrométricas (Tabelas 9-10-11-12).

Tabela 9 – Recomendações gerais de laboratório.

<b>Código</b>	<b>Recomendações gerais de laboratório</b>
A	Resultado normal da amostra
X	Resultado da análise fornecida para o cliente, não requer recomendação.
Z	Aplicar a recomendação do código anterior.

Tabela 10 – Recomendação de laboratório para códigos aeronáuticos padrão para análises espectrométricas.

<b>Código</b>	<b>Recomendações de inspeção (requer realimentação de informação)</b>
H**	Inspeccione a unidade e informe ao laboratório, o que foi encontrado.
R**	Não voar nem operar o equipamento. Inspeccionar filtros, telas, sensores e reservatório de impurezas. Informe ao** laboratório, os resultados.
T**	Não voe nem opere. Procure por discrepâncias e informe ao laboratório dos resultados e disposições. Se encontrado e corrigido, continue a operar e submeta a nova amostragem após algumas horas de operação. Se a discrepância não é encontrada, recomenda-se a remoção do componente do serviço e o envie para manutenção.

Tabela 11 – Recomendação de laboratório para códigos aeronáuticos padrão para análises espectrométricas.

<b>Código</b>	<b>Recomendações de troca de óleo (requer nova amostra)</b>
J	Contaminação confirmada Troque o óleo, retire amostra depois do “giro” de motor e após algumas horas de operação.
W	Suspeita de contaminação. Troque o óleo, funcione o equipamento por algumas horas adicionais e tire amostras de hora em hora.

Tabela 12 – Recomendação de laboratório para códigos aeronáuticos padrão para análises espectrométricas.

<b>Código</b>	<b>Laboratório requisita nova amostragem (nova amostragem)</b>
B*	Retire nova amostra e não troque o óleo.
C*	Retire nova amostra, após algumas horas e não troque o óleo.
E*	Não troque o óleo. Restrinja as operações à vôos locais ou reduza a carga de operação, mantendo observações rigorosas e submetendo a inspeções de amostra, após cada vôo ou algumas horas de operação até novos avisos.
F*	Não troque o óleo. Faça nova amostragem após o pouso ou ensaio de motor. Não opere até receber do laboratório, resultados ou diretivas.
G*	Suspeita de contaminação. Faça nova amostragem na unidade e submeta amostra do novo óleo colocado na unidade.
P*	Suspeita de contaminação. Faça nova amostragem na unidade e submeta amostra do novo óleo colocado na unidade.

**NOTA:** \* Nova amostragem requerida (tampa vermelha).

\*\* Informações de manutenção requerida, avisar ao laboratório sobre as descobertas.

\*\*\* O laboratório irá especificar o tempo limite.

## 7.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO PRÁTICO

A seguir serão comentadas/analizadas cada uma das concentrações encontradas nos experimentos práticos realizados e registrados nas tabelas n.º6 e 7, das páginas n.º60 e 61:

### **7.2.1 Motor número de série: RL25085-48A (aeronave matrícula número 1944 da FAB)**

#### **a) ALUMÍNIO (Al)**

As concentrações encontradas do elemento **Al** podem ter origem no desgaste dos cabeçotes, mancal do eixo de came ou no virabrequim. As concentrações estão em níveis normais. Se a concentração houvesse ultrapassado os 30 p.p.m. (que é o limite de concentração recomendada pelo fabricante do motor, para os de tipo aspirado), seria **mandatório** entrar em contato com o **Departamento de Suporte ao Produto**, da empresa *Textron Lycoming*, para análise mais detalhada da tendência de existência de um problema.

#### **b) Ferro (Fe)**

As concentrações encontradas do elemento **Fe** podem ter origem no desgaste da camisa do cilindro, das válvulas, do conjunto de engrenagens, da bomba de óleo ou de ferrugem no sistema. As concentrações estão bem abaixo do limite (~ 0 – 85 p.p.m.), portanto, sendo consideradas normais.

#### **c) Cromo (Cr)**

As concentrações encontradas do elemento **Cr** podem ter origem no desgaste dos anéis dos pistões ou do virabrequim. Estão bem abaixo do limite (~ 0 – 21 p.p.m.), portanto, sendo consideradas normais.

#### **d) Cobre (Cu)**

As concentrações encontradas do elemento **Cu** podem ter origem no desgaste de rolamentos, buchas de bronze, guia da haste de válvulas, aditivos (óleos refrigerantes que também contribuem para o aparecimento de partículas de cobre). Só em motores novos aparecem altos níveis, por algumas centenas de horas voadas. Na primeira coleta, quase atingiu o limite da faixa normal (~ 0 – 25 p.p.m.). Mas, nas amostras seguintes houve um decréscimo dessas concentrações. Pode-se afirmar que neste caso, o agente do desgaste foi desaparecendo ou mesmo removido. Sendo assim, não haverá

mais o desgaste, e conseqüentemente, não haverá mais partículas oriundas dele. Mas, a superfície desgastada no processo, não irá mais se recompor.

Por isso, quando da abertura do motor, deverá se inspecionar e avaliar o grau de desgaste sofrido pelo componente, para futuro diagnóstico e prevenção. Como a combinação de desgaste Fe + Cu não cresceu, não há indicação de uma possível falha catastrófica.

#### **e) Magnésio (Mg)**

Não houve presença de concentração do elemento **Mg** em nenhuma das amostras coletadas. Se houvesse, seria pelo fato deste elemento químico ser componente na formulação de detergentes básicos (sulfatos ou salicilatos de magnésio), cuja função é a neutralização de ácidos e a prevenção na formação de gomas e lacas.

Para este elemento químico o resultado é considerado normal.

#### **a) Titânio (Ti)**

As concentrações encontradas do elemento **Ti** podem ter origem do desgaste de componentes de ligas metálicas. Dentre elas, é bem provável que tenha ocorrido desgaste de tratamento superficial, desgaste no corpo do cilindro ou no virabrequim, que são feitos de forjados de liga de aço níquel cromo molibdênio. Os níveis de desgaste encontrados estão bem baixos, indicando que os itens que contém o **Ti** estão em boas condições e não apresentam risco de falha significativo.

#### **b) Níquel (Ni)**

As concentrações encontradas do elemento **Ni** podem ter origem do desgaste de componentes de ligas metálicas. Dentre elas, é bem provável que tenha ocorrido desgaste nas válvulas, virabrequim ou corpo do cilindro. Estes itens contêm em sua constituição, este elemento químico. Os níveis de desgaste encontrados estão baixos, indicando que os itens que contém o **Ni** estão em boas condições e não oferecem risco de falha significativo.

**c) Estanho (Sn)**

As concentrações encontradas do elemento **Sn** podem ter origem do desgaste de buchas de bronze, rolamentos ou da guia da haste de válvulas.

Estes itens contêm em sua constituição, este elemento químico. Os níveis de desgaste encontrados são baixos, indicando que os componentes estão em boas condições e não apresentam risco iminente de falha.

**d) Chumbo (Pb)**

As concentrações encontradas do elemento **Pb** podem ter origem do desgaste de mancal, pela presença como aditivo antidesgastante (inibidor de oxidação e da corrosão). E pela presença de contaminação do óleo lubrificante, por diluição de combustível. No caso deste motor, há altas concentrações de **Pb**. Uma das razões para este alto índice é o tipo de combustível utilizado. O produto (gasolina de aviação) é a **Gasolina Aviação. 100 - LI**, cuja composição é de, principalmente, chumbo tetraetila com 0,46 mg/l e octanagem/motor de 110 octanas. Outra razão desta contaminação é o provável desgaste dos anéis dos pistões ou problemas no sistema de injeção de combustível. Isto não deve ocorrer nos níveis apresentados e torna-se necessário focar esta ocorrência. **Não é prevista e é indesejável.**

**e) Silício (Si)**

Não foram encontradas concentrações do elemento **Si**. Se houvesse a presença, seria original por ingestão de sujeiras, operação em ambiente marinho e/ou contaminação por pó. Este elemento químico, em grande quantidade, pode atuar como um abrasivo, causando um desgaste acentuado.

**f) Zinco (Zn)**

Encontradas baixas concentrações do elemento **Zn**. É mais provável que advenha de aditivos antidesgaste e como inibidor de oxidação e corrosão. Pode também, ser originado por desgaste de mancal. O nível encontrado está na faixa normal de contaminação.

**g) Sódio (Na)**

Foram encontradas baixas concentrações do elemento **Na**. É mais provável que seja oriundo de aditivos para refrigeração do motor, de aditivos de prevenção de oxidação e como detergente. Pode ser originado também, pelo desgaste de gaxetas e por contato com névoa salina (região marítima). O nível encontrado está na faixa normal de concentração.

**7.2.2 Motor número de série: RL24826-48A (aeronave matrícula número 1956 da FAB)****a) ALUMÍNIO (Al)**

As concentrações encontradas do elemento **Al** podem ter origem no desgaste dos cabeçotes, mancal do eixo de cames ou no virabrequim. As concentrações estão em níveis normais. Se a concentração houvesse ultrapassado os 30 p.p.m. (que é o limite de concentração recomendada pelo fabricante do motor, para os de tipo aspirado), seria **mandatório** entrar em contato com o **Departamento de Suporte ao Produto**, da empresa *Textron Lycoming*, para análise mais detalhada da tendência de existência de um problema.

**b) Ferro (Fe)**

As concentrações encontradas do elemento **Fe** podem ter origem no desgaste da camisa do cilindro, das válvulas, do conjunto de engrenagens, da bomba de óleo ou de ferrugem no sistema. As concentrações estão bem abaixo do limite (~ 0 – 85 p.p.m.), portanto, sendo consideradas normais.

**c) Cromo (Cr)**

As concentrações encontradas do elemento **Cr** podem ter origem no desgaste dos anéis dos pistões ou do virabrequim. Estão bem abaixo do limite (~ 0 – 21 p.p.m.), portanto, sendo consideradas normais.

#### **d) Cobre (Cu)**

As concentrações encontradas do elemento **Cr** podem ter origem no desgaste de rolamentos, buchas de bronze, guia da haste de válvulas, aditivos (óleos refrigerantes que também contribuem para o aparecimento de partículas de cobre). Só em motores novos aparecem altos níveis, por algumas centenas de horas voadas. Na primeira coleta, quase atingiu o limite da faixa normal (~ 0 – 25 p.p.m.). Mas, nas amostragens seguintes houve um decréscimo dessas concentrações. Pode-se afirmar que neste caso, o agente do desgaste foi desaparecendo ou mesmo removido. Sendo assim, não haverá mais o desgaste, e conseqüentemente, não haverá mais partículas oriundas dele. Mas, a superfície desgastada no processo, não irá mais se recompor.

Por isso, quando da abertura do motor, deverá se inspecionar e avaliar o grau de desgaste sofrido pelo componente, para futuro diagnóstico e prevenção. Como a combinação de desgaste Fe + Cu não cresceu, não há indicação de uma possível falha catastrófica.

#### **e) Magnésio (Mg)**

Não houve presença de concentração do elemento **Mg** em nenhuma das amostras coletadas. Se houvesse, seria pelo fato deste elemento químico ser componente na formulação de detergentes básicos (sulfatos ou salicilatos de magnésio), cuja função é a neutralização de ácidos e a prevenção na formação de gomas e lacas.

Para este elemento químico o resultado é considerado normal.

#### **h) Titânio (Ti)**

As concentrações encontradas do elemento **Ti** podem ter origem do desgaste de componentes de ligas metálicas. Dentre elas, é bem provável que tenha ocorrido desgaste de tratamento superficial, desgaste no corpo do cilindro ou no virabrequim, que são feitos de forjados de liga de aço níquel cromo molibdênio. Os níveis de desgaste encontrados estão bem baixos, indicando que os itens que contém o **Ti** estão em boas condições e não apresentam risco de falha significativo.

**i) Níquel (Ni)**

As concentrações encontradas do elemento **Ni** podem ter origem do desgaste de componentes de ligas metálicas. Dentre elas, é bem provável que tenha ocorrido desgaste nas válvulas, virabrequim ou corpo do cilindro. Estes itens contêm em sua constituição, este elemento químico. Os níveis de desgaste encontrados estão baixos, indicando que os itens que contêm o **Ni** estão em boas condições e não oferecem risco de falha significativo.

**j) Estanho (Sn)**

As concentrações encontradas do elemento **Sn** podem ter origem do desgaste de buchas de bronze, rolamentos ou da guia da haste de válvulas.

Estes itens contêm em sua constituição, este elemento químico. Os níveis de desgaste encontrados são baixos, indicando que os componentes estão em boas condições e não apresentam risco iminente de falha.

**k) Chumbo (Pb)**

As concentrações encontradas do elemento **Pb** podem ter origem do desgaste de mancal, pela presença como aditivo antidesgastante (inibidor de oxidação e da corrosão). E pela presença de contaminação do óleo lubrificante, por diluição de combustível. No caso deste motor, há altas concentrações de **Pb**. Uma das razões para este alto índice é o tipo de combustível utilizado. O produto (gasolina de aviação) é a **Gasolina Aviação. 100 - LI**, cuja composição é de, principalmente, chumbo tetraetila com 0,46 mg/l e octanagem/motor de 110 octanas. Outra razão desta contaminação é o provável desgaste dos anéis dos pistões ou problemas no sistema de injeção de combustível. Isto não deve ocorrer nos níveis apresentados e torna-se necessário focar esta ocorrência. **Não é prevista e é indesejável.**

**l) Silício (Si).**

Não foram encontradas concentrações do elemento **Si**. Se houvesse a presença, seria original por ingestão de sujeiras, operação em ambiente marinho e/ou

contaminação por pó. Este elemento químico, em grande quantidade, pode atuar como um abrasivo, causando um desgaste acentuado.

**m) Zinco (Zn).**

Encontradas baixas concentrações do elemento **Zn**. É mais provável que advenha de aditivos antidesgaste e como inibidor de oxidação e corrosão. Pode também, ser originado por desgaste de mancal. Está em faixa normal de contaminação.

**n) Sódio (Na).**

Foram encontradas baixas concentrações do elemento **Na**. É mais provável que seja oriundo de aditivos para refrigeração do motor, de aditivos de prevenção de oxidação e como detergente. Pode ser originado também, pelo desgaste de gaxetas e por contato com névoa salina (região marítima). Está na faixa normal de concentração.

#### 7.2.2.1 Condição dos motores monitorados

A partir de todas as informações obtidas e análise realizada, a condição destes motores é considerada satisfatória. Mas, os indícios encontrados revelam a necessidade de se fazer verificações mais detalhadas e práticas de manutenção preditivas mais eficientes, pois os desgastes apresentados já revelam situações limítrofes de degradação, que podem levar o sistema a falhar, até de maneira irreversível.

### 7.3 PROPOSIÇÃO DE UM PROGRAMA DE INSPEÇÃO DA CONDIÇÃO DE DESGASTE DE MOTORES AERONÁUTICOS, NO ÂMBITO DA FAB

Segue abaixo uma proposição de um programa de inspeção da condição de desgaste de motores aeronáuticos convencionais, no âmbito da FAB. Esta proposição levará em conta somente os meios que estejam ao alcance do COMAER. Programas de

inspeção para motores à reação (jatos) e *turbofan*, devem ser complementados com estudos de outras inúmeras variáveis, em função da complexidade dos mesmos.

A seqüência sugerida para a Inspeção/monitoramento dos motores é a que segue abaixo, em forma de matriz:

Tabela 13 – Proposição de um Programa de Inspeção/Monitoramento da Condição de Desgaste de Motores Aeronáuticos Convencionais da FAB.

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
01	Manter em local adequado e acessível, todos os originais dos Boletins de Serviço e Instruções referentes ao (s) motor (es) a ser (em) monitorado/inspecionado.	Operador / Parque Mantenedor da aeronave.	Documentos atualizados originados pelo fabricante da aeronave Manuais, <i>Cartas de Serviço, Boletins de Serviço, etc.</i>
02	Manter em local adequado e acessível, todos os originais dos registros de manutenção, executada no (s) motor (es) e as respectivas trocas de óleo, de cada aeronave de um mesmo grupo/tipo.	Operador / Parque Mantenedor da aeronave.	Cartões de histórico de manutenção e TBO de cada aeronave a ser monitorada, utilizados pelo Operador da aeronave.
03	Manter, em local adequado e acessível, documentos de um programa de manutenção, devidamente aprovado.	Operador/PAMA.	Todos os anteriormente citados.
04	Manter em local adequado e acessível, toda regulamentação do RBHA (original).	Operador/PAMA	Ex.: RBHA nº135.
05	Prover procedimentos para o registro e arquivo dos serviços executados nas aeronaves.	Operador.	-----
06	Manter procedimentos para o registro e arquivo das discrepâncias encontradas nos resultados das análises realizadas.	Operador.	-----
07	Manter procedimentos estatísticos que permitam assegurar a aeronavegabilidade da(s) aeronave(s) da frota.	Operador.	-----

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
08	Estipular períodos determinados para a revisão dos procedimentos existentes, visando à melhoria da eficiência do programa de monitoramento.	Operador.	-----
09	O Operador deve dispor de um grupo de profissionais envolvidos na elaboração, implantação e gerenciamento de um programa de monitoramento de motores aeronáuticos.	Operador/PAMA.	-----
10	Formar um grupo técnico, composto por um inspetor de manutenção, técnico de manutenção, mecânico, piloto e um AVALIADOR (engenheiro experiente, na área aeronáutica), que deverá ter independência e meios materiais para desempenhar a função.	Operador/PAMA.	Normas do COMAER. Procedimentos elaborados pelo Operador e aprovados pela Engenharia do Parque Mantenedor das aeronaves.
11	Proceder à capacitação/qualificação e a atualização adequada dos profissionais, naquele(s) modelo(s)/tipo(s) de aeronaves, alvo(s) do estudo.	Operador.	Fabricante do sistema. Escolas de Aviação. DAC.
12	O planejamento do monitoramento dos motores tomará como base a Tribologia (análise do óleo lubrificante do motor).	Operador/PAMA. Grupo de trabalho.	Normas aeronáuticas. Manuais de equipamentos de análise. Experiência do grupo de trabalho, em forma de procedimentos.
13	Todas as modificações que se façam necessárias, devem ser obrigatoriamente submetidas à apreciação e aprovação da Autoridade Aeronáutica competente.	Operador/PAMA.	RBHA.
14	Inicialmente seguir os intervalos de manutenção recomendados pelo fabricante do motor/propulsor. Depois, baseado em uma coletânea de dados consistentes, oriundos da operação das aeronaves, ter como meta aumentar estes intervalos.	Operador.	Documentos do Fabricante. Dados Estatísticos. Histórico de Operação.

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
15	Proceder às inspeções preventivas e monitoramento do comportamento dos componentes críticos dos motores, por exemplo. Documentar todas as informações obtidas.	Operador.	-----
16	Os intervalos de tempo a serem observados no monitoramento dos motores, serão em função do tempo cronológico (meses/anos) ou do tempo de atividade/funcionamento (horas de voo). Prevalecendo aquele que primeiro vier a ocorrer.	Operador/PAMA	-----
17	A execução do monitoramento, a ser feita pelo grupo de trabalho, será sob a luz da Espectrometria de Emissão Atômica.	Operador/PAMA. Grupo de Trabalho.	Normas aeronáuticas. Manuais de equipamentos de análise. Experiência do grupo de trabalho, em forma de procedimentos. Laboratório responsável pelas análises.
18	Periodicamente, fazer uma Revisão Crítica do Programa de Inspeção e Monitoramento (resultados, atingimento de metas, dimensionamento, custos, mão de obra empregada, etc.).	Operador.	-----
19	Definir, explicitamente, os responsáveis pela execução e controle das tarefas a serem realizadas.	AVALIADOR. Grupo de trabalho do Operador.	Documentação do Operador (procedimentos, normas, etc.), aprovados pela Autoridade Aeronáutica.
20	Supervisão (análise e controle, tomadas de decisão e de ações), será exercida pelo AVALIADOR.	AVALIADOR do Grupo de Trabalho (Operador).	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
21	Definir as funções e as responsabilidades individuais, dentro do programa de monitoramento.	AVALIADOR. Chefe da Oficina do Operador das aeronaves.	-----

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
22	Atualização do Programa de Inspeção/Condição de Desgaste, através da realimentação, derivada das análises executadas.	AVALIADOR e Grupo de Trabalho do Operador.	Documentação do Operador (procedimentos, normas, etc.), aprovados pela Autoridade Aeronáutica.
23	Destacar e fomentar no Programa de Monitoramento, que o elemento humano é a peça chave das atividades a serem desenvolvidas.	AVALIADOR. Grupo de trabalho do Operador.	Treinamento. Conscientização.
24	Elaborar um registro exato e controle das ações realizadas, vinculando as atividades de execução e controle, aos respectivos executores e controladores. Evitando ocorrência de falhas humanas.	AVALIADOR. Grupo de trabalho do Operador.	Documentação do Operador (procedimentos, normas, etc.), aprovados pela Autoridade Aeronáutica.
25	Supervisão constante da atividade a fim de garantir a aeronavegabilidade, disponibilidade e baixo custo, no monitoramento.	AVALIADOR.	Documentação do Operador (procedimentos, normas, etc.), aprovados pela Autoridade Aeronáutica.
26	Efetuar os recheques para todos os integrantes do Grupo de Trabalho e pessoal envolvido nas atividades.	Operador/PAMA. Laboratórios. Serviços de terceirizados.	Treinamento. Conscientização.
27	Todos os envolvidos devem estar receptivos à ocorrência/deteção de falhas e defeitos incipientes.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho.	-----
28	Manter estoques mínimos de materiais e kits básicos, dos itens utilizados nas atividades de monitoramento (coleta de amostragens, materiais diversos, etc.).	Operador/PAMA.	-----
29	Planejar, pesquisando junto às fichas de inspeção das aeronaves, quais as tarefas que necessitam de material para a sua execução e em que quantidades.	Operador/PAMA.	Registro de quantidades gasta de materiais e levantamento de custos.

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
30	Orientar pessoal e empresas que prestam serviços terceirizados, quanto ao nível de qualidade exigido, pela oficina de manutenção do operador das aeronaves.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho.	Treinamento. Conscientização.
31	No caso de fornecedores de itens e peças, os mesmos devem ter o foco voltado para o prazo de execução e qualidade dos fornecimentos.	Operador/PAMA.	-----
32	Fazer uso de ferramentas adequadas no planejamento das tarefas de manutenção, de monitoramento e registro das ditas tarefas (programas de computação).	Operador/PAMA. AVALIADOR. Grupo de Trabalho.	-----
33	Elaborar, para uso constante, um banco de dados com a finalidade de auxiliar nas checagens de tempo e verificações sobre os materiais utilizados nas tarefas de monitoramento.	AVALIADOR.	-----
34	Fazer verificações e registros (coleta de dados), das trocas completas de óleo lubrificante.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho.	Fornecedor do Lubrificante. Banco de dados.
35	Registrar todas as adições de óleo lubrificante, realizadas. Registrar também, dados tais quais, quantidade de horas voadas, tipo de óleo adicionado, quantidade adicionada, etc.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho.	-----
36	Registrar as informações de todas as inspeções no filtro de óleo e presença de material/elementos metálicos impregnados no elemento de papel, do filtro.	Grupo de Trabalho.	-----
37	Prever a realização de inúmeros ensaios Não Destrutivos, complementares à espectrometria, tal qual a ferrografia.	Operador/PAMA. AVALIADOR.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
38	Determinar os corretos roteiros de coleta das amostras, de maneira que não possam ser burladas, nem simplificadas.	Inspetores de Manutenção, téc. de manutenção e mecânicos.	Manuais, Ordens Técnicas e normas aplicáveis.
39	Do grupo de motores a serem monitorados, observar e proceder que os mesmos estejam no mesmo nível de revisões e reparos já realizados. Isto é, que as revisões executadas estejam em dia, para um mesmo momento.	Operador.	-----
40	Observar, rigorosamente, que a coleta de amostra seja feita sempre nos mesmos pontos já determinados pelo fabricante do sistema, sob pena de se obter leituras que resultarão em diagnósticos incorretos.	AVALIADOR. Inspetores de Manutenção, téc. de manutenção e mecânicos.	Documentos atualizados originados pelo fabricante da aeronave Manuais, cartas de serviço, Boletins de Serviço, etc.
41	Todas as atividades de monitoramento devem estar integradas e compatíveis com àquelas de manutenção, reparos, quebras, inspeção e armazenamento.	AVALIADOR. Inspetores de Manutenção, téc. de manutenção e mecânicos.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
42	Os limites/alarmes que representam condições anormais de operação têm que ter os parâmetros estabelecidos, para que sejam monitorados. Os mapeamentos têm que ser executados, os motores identificados, as amostragens e resultados devem estar correlacionados com os motores monitorados. Tudo isso deve ser entregue ao AVALIADOR.	Chefe da Oficina do Operador das aeronaves. Inspetores de Manutenção, téc. de manutenção e mecânicos.	-----
43	Defeitos encontrados e problemas na manutenção devem ser investigados e corrigidos, antes de um espécime ser incluído no Programa de Monitoramento.	Chefe da Oficina do Operador das aeronaves. Inspetores de Manutenção, téc. De manutenção e mecânicos.	Documentos atualizados originados pelo fabricante da aeronave Manuais, cartas de serviço, Boletins de Serviço, etc.

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
44	Manter todos os materiais a serem utilizados no monitoramento, calibrados, rastreados e em condições adequadas de embalagem e armazenamento.	Operador.	-----
45	Tornar o Programa de Monitoramento mais eficiente, fazendo com que as informações obtidas nas atividades de monitoramento sejam as mais confiáveis possíveis. Isto é alcançado, com a inserção rápida daquelas informações, na base de dados criada.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho.	-----
46	Conscientizar a todos que o Programa de Monitoramento não pode ter caráter imediatista. A experiência do grupo só será consolidada, após algum tempo de exercício das atividades.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador. PAMA.	-----
47	Agregar estudos de casos, sempre que possível. Pois, os mesmos, poderão ser úteis, quando se tratarem de sistemas semelhantes.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Todas as fontes possíveis (ex.: investigação de acidentes aeronáuticos, publicações, etc.).
48	Quando um motor for aberto para investigação de algum problema, fotos devem ser tiradas para posteriores confrontações com informações provenientes de outras fontes.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	-----
49	O AVALIADOR deve ter completo conhecimento do sistema e níveis em que o mesmo pode tolerar, antes que uma ação seja tomada. Deve ter acesso às informações de ambiente de trabalho, ciclos trabalhados, horas/tempo de uso, especificações e de novas instruções de manutenção.	AVALIADOR.	Documentos atualizados originados pelo fabricante da aeronave Manuais, cartas de serviço, Boletins de Serviço, etc.

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
50	O Grupo de Trabalho não deve permitir que testes/ensaios do Programa de Monitoramento sejam realizados tardiamente, sob pena do reparo se tornar mais caro para o Operador ou que apareçam danos em outros componentes do motor.	Chefe da Oficina do Operador das aeronaves. Inspetores de Manutenção, téc. de manutenção e mecânicos.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
51	Atentar para não se realizar ensaios inúteis. Os quais, não representam as verdadeiras condições nem do sistema e nem do lubrificante.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
52	Evitar realizar “ensaios confusos”, pois, os mesmos geram falsos alarmes, “defeitos” encontrados, por possível falta de experiência de um AVALIADOR.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
53	Evitar a deixar que o sistema seja levado à condição de falha irreversível, para então, realizar a análise de óleo.	Chefe da Oficina do Operador das aeronaves. Inspetores de Manutenção, téc. de manutenção e mecânicos.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
54	Não permitir a simplificação demasiada dos ensaios necessários, no Programa de Monitoramento, visando unicamente cortar custos.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
55	Nunca negligenciar as informações que são oriundas dos laboratórios que realizaram as análises práticas de óleo lubrificante já gasto (causa raiz). Uma equipe eficiente dá valor real à atividade de manutenção.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, estudo de casos, experiência, etc.
56	Manter o Grupo de Trabalho em contato com as companhias de petróleo, fornecedor do sistema/equipamento/ componente e serviço de suporte técnico a clientes, do fabricante da aeronave.	AVALIADOR Chefe da Oficina do Operador das aeronaves.	Treinamento. Conscientização.

	<b>Ação/Verificação</b>	<b>Responsabilidade</b>	<b>Documento de Referência</b>
57	Manter a disciplina quanto ao tempo médio de resposta em função de um relatório de ação.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Treinamento. Conscientização.
58	Tomar providências cabíveis quanto à porcentagem de repetibilidade (incidência) dos problemas encontrados nos motores monitorados.	AVALIADOR Chefe da Oficina do Operador das aeronaves.	Treinamento. Conscientização.
59	Tomar providências quanto aos tempos médios utilizados no encaminhamento das amostras coletadas, para o laboratório de análise, e também, para o da retirada dos resultados daquelas análises.	AVALIADOR Chefe da Oficina do Operador das aeronaves.	Treinamento. Conscientização.
60	Criar uma base de dados com as porcentagens de amostras normais, no limite, urgente ou crítica, visando à melhoria dos trabalhos de monitoramento.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Treinamento. Conscientização.
61	Realimentar rapidamente, com dados, os registros do laboratório que presta serviços de ensaios não destrutivos, dentre eles, o de análise de óleo.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Treinamento. Conscientização.
62	Fazer Auditorias da Qualidade, nos prestadores de serviço, laboratórios e fornecedores de material do Programa de Monitoramento.	AVALIADOR. Grupo de Trabalho. Operador.	Normas, manuais, relatórios de laboratórios, procedimentos internos, casos, experiência, etc.

## 8 CONCLUSÃO

O presente trabalho visa substanciar as atividades de manutenção de motores aeronáuticos no âmbito da FAB.

Abaixo são indicados os principais itens de contribuição deste trabalho:

- Realização de atividades de Monitoramento.
- Realização de avaliação da condição de desgaste.
- Proposição de um programa de inspeção e avaliação da condição de desgaste de motores aeronáuticos, na FAB.

Os objetivos deste trabalho foram devidamente concretizados. A seguir são detalhados os principais itens de contribuição deste trabalho:

- **Monitoramento**

Foram reestudados todos os métodos disponíveis para o estudo dos desgastes de componentes mecânicos (no caso, os itens de interesse foram motores alternativos de duas aeronaves da Força Aérea Brasileira) e normas sobre o assunto.

Foi avaliado qual o método é mais adequado para monitoramento e revisados/complementados os procedimentos a serem utilizados na atividade citada.

Foram estudados/otimizados a totalidade dos procedimentos de coleta de amostras, métodos de manuseio das amostras recolhidas, os cuidados na operação do(s) equipamento(s) utilizados na análise das amostras do óleo lubrificante recolhido, que contém as várias concentrações dos metais de desgaste diluídos e aos estudos de instalações físicas adequadas. A norma utilizada para o citado monitoramento foi a do *Laboratory Analytical Methodology and equipment criteria, Joint Oil Analysis Program Manual (aeronautical). Change 1, v.3*, de 15 março de 1999.

Isto agrega à atividade uma maior precisão, maior confiabilidade e rastreabilidade de resultados. A atividade, do modo que é realizada hoje (e por inúmeros motivos), é limitada e incompleta, pois, não possui a estrutura e nem a organização requerida. Com este estudo percebe-se que podem ser obtidos melhores

resultados (com as implementações necessárias), sem que haja um aumento significativo de custos.

- **Avaliação da Condição de Desgaste**

Neste prisma a contribuição oferecida por este estudo, é a de abstrair dos resultados de experimentos práticos, um panorama das concentrações dos elementos químicos representativos dos diversos tipos de desgaste, o qual pode ajudar a prever algum tipo de falha (da mais simples até a mais catastrófica).

- **Proposição de um Programa de Inspeção da Condição de Desgaste de Motores Aeronáuticos, no âmbito da FAB**

Foi proposto nesta Dissertação, um modelo de um programa de inspeção da condição de desgaste de motores aeronáuticos convencionais, no âmbito da FAB, que possa ser compatível com a logística do COMAER. E que não resulte em custos muito elevados.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M.T. Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade. Disponível em: <<http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>>. Acesso em: 10/03/2004.

ARCURI FILHO, F. *Manutenção mecânica e eletro-mecânica*. Rio de Janeiro: UFRJ, 1995. (Material apresentado no Curso de Especialização em Engenharia de Manutenção, UFRJ).

ASTRIDGE, D.G. Helicopter transmissions-design for safety and reliability. *J Aerosp. Eng.*, v.203, n.G2, p.123-138, 1989.

AVCO LYCOMING. General aspects of spectrometric oil analysis. *Service Letter*, Williamsport, PA, n.L171, 26 nov. 1971.

AVIATION SAFETY AND SECURITY PROGRAM, the Helicopter Accident Analysis Team: Final Report of the Helicopter Accident Analysis Team, July 1998.

BRANCO FILHO, G. *Fundamentos teóricos da manutenção*: Rio de Janeiro: UFRJ, 1995. (Curso de Especialização em Engenharia de Manutenção, UFRJ)

BONATO, P.S., Cromatografia Gasosa in COLLINS, C.H.; BONATO, P.S.; BRAGA, G.L., "Introdução a Métodos Cromatográficos". 6a edição, Editora da Unicamp, Campinas, 1995.

CAMPBELL, R.L.; BYINGTON, C.S.; LEBOLD, M.S. Generation of hums diagnostic estimates using transitional data. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC ENGINEERING MANAGEMENT, 13<sup>th</sup>, 2000, Houston. *Proceedings...* Houston, Texas, 2000.

CARVALHO, R.S.N., ALVES, J.E. Manutenção baseada em confiabilidade na PETROFLEX-RJ. *Revista Manutenção*, ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção - Rio de Janeiro - RJ - Brasil, n.47, mar./abr. 1994.

COMMANDER, NAVAL AIR SYSTEMS COMMAND. Laboratory Analytical Methodology and equipment criteria. In: Joint Oil Analysis Program Manual (aeronautical). Change 1, 15 March 1999. Pensacola, FL, 32508-5010 USA, dec. 2001. v.3.

DEMPSEY, P.J. *A comparison of vibration and oil debris gear damage detection methods applied to pitting damage*. In: NASA TM- 210671, Sep. 2000.

DEMPSEY, P.J.; AFJEH, A.A. *Integrating Oil Debris and Vibration Gear Damage Detection Technologies Using Fuzzy Logic*, Glenn Technical Reports Server- GLTRS, In: NASA TM- 2002-211126, jun. 2002.

DEMPSEY, P.J.; ZAKRAJSEK, J.J. *Minimizing load effects on NA4 gear vibration diagnostic parameter*. In: NASA TM- 210671, Feb. 2001.

\_\_\_\_\_ *Minimizing load effects on NA4 gear vibration diagnostic parameter*, Glenn Technical Reports Server- GLTRS, In: NASA TM- 210671, Feb. 2001.

FONSECA, L.A.N. Manutenção baseada em confiabilidade: a experiência aeronáutica a serviço da indústria em geral. ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção - *Revista Manutenção*, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, n. 55, nov./dez. 1995.

GALLEGOS, J. Manutenção baseada em confiabilidade. ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção - *Revista Manutenção*, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, n.44, set./out.1993.

HERGUTH, B; *Grease Analysis - Monitoring Grease Servicability and Bearing Condition*. Disponível em: <[http://practicingoilanalysis.com/article\\_detail.asp?articleid=296](http://practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=296)>. Acesso em: 10/03/2004.

HORTA SANTOS, J.J. *Manutenção preditiva*. Rio de Janeiro: UFRJ, 1996. (Curso de Especialização em Engenharia de Manutenção - UFRJ).

LACERDA, P.R.S.B. *Engenharia: manutenção, manutenção industrial*. Butantã São Paulo/SP: Tubocap Metalúrgica, 1994.

LUKAS, M.; ANDERSON, D.P. *Analytical tools to Detect and Quantify Large Particles*. Disponível em: <<http://www.spectroinc.com/applicationpapers.htm>>. Acesso em : 10/03/2004.

\_\_\_\_\_ *Machine and lubricant condition monitoring for extended equipment lifetimes and predictive maintenance at powerplants*, December 1996. Spectro Incorporated, Littleton, Massachusetts, USA, from: POWER-GEN'96 International Conference, december 4-6, 1996.

MARCUZZO, A.J., GIOVANI, E.F.T. *O planejamento da manutenção*. Disponível em: <<http://www.mantenimentomundial.com>>. Acesso em: 17/03/2004.

TEÓFILO, L.C. *Um modelo de avaliação da manutenção de um veículo ferroviário*. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - IME, Rio de Janeiro, 1989.

TRIVELIN, P.C.O. *Análise de  $^{15}\text{N}$  por espectrometria de emissão*. (Curso de Pós-Graduação em Energia Nuclear na Agricultura), CENA/USP, Piracicaba, abril de 2001.

## **APÊNDICE 1 - Características do espectrômetro SPECTROIL M**

### **Características do Equipamento.**

#### **Dimensões**

Comprimento: 775 mm.

Largura: 635 mm.

Altura: 700 mm.

Peso: 114 Kg.

#### **Fonte de alimentação.**

85~265 V AC, 50/60 Hz.

Circuito: 15 A.

Consumo: 400W (durante a análise) e 275W(em “standby”).

#### **Processamento.**

CPU: 486 DX2

Software: SPECTRO Incorporated, Industrial Tribology Systems, Spectroil M (Version 2.30). O software que o equipamento utiliza é escrito na linguagem C e não pode ser modificado em nível de operador.

#### **Configuração padrão.**

A configuração padrão para o equipamento, que consiste de 15 elementos, 20 canais analíticos e 02 canais de referência é mostrada na tabela n.º1 abaixo:

Os elementos e as faixas de concentração são baseados em requisitos analíticos ditados pela organização “Joint Oil Analysis Program”, no Centro de Suporte Técnico – JOAP, em Pensacola/Florida (USA). O equipamento sai de fábrica calibrado com o padrão denominado por D-19.

## APÊNDICE 2 - Layout do espectrômetro SPECTROIL M

Tabela 1 – “Layout” Analítico (adaptada do manual de operação e manutenção do Spectroil M) .

	<b>Elemento</b>	<b>Faixa, PPM</b>	<b>Canais</b>
1	Ferro	0 – 1.000	1
2	Prata	0 – 300	2
3	Alumínio	0 – 500	1
4	Cromo	0 – 500	1
5	Cobre	0 – 1.000	2
6	Magnésio	0 – 1.000	2
7	Sódio	0 – 1.000	2
8	Níquel	0 – 500	1
9	Lead	0 – 1.000	1
10	Silício	0 – 500	1
11	Tin	0 – 500	1
12	Titânio	0 – 500	1
13	Boro	0 – 1.000	1
14	Molibidênio	0 – 300	1
15	Zinco	0 – 1.000	2

**APÊNDICE 3 - Critérios de aceitação de concentrações para motores IO/O-470.**

Tabela 2 – Análise de concentração (AER) para motores IO/O-470 (todas as séries).

	<b>Fe</b>	<b>Ag</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mg</b>
Padrão anormal (ppm aumenta em 10 horas)	26	2	11	6	7	4
Faixa normal	0-85	0-3	0-36	0-21	0-25	0-13
Faixa marginal	86-105	N/A	37-44	22-26	26-31	14-16
Faixa alta	106-129	4	45-54	27-32	32-38	17-19
Anormal	130+	5+	55+*	33+**	39+	20+