

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS – UFGD
FLAVIO APARECIDO PAGANI DE CASTRO FILHO

ANÁLISE DE CORROSÃO EM UM COMPONENTE
AERONÁUTICO AO FINAL DE SUA VIDA ÚTIL

DOURADOS – MS
2017

FLAVIO APARECIDO PAGANI DE CASTRO FILHO

ANÁLISE DE CORROSÃO EM UM COMPONENTE AERONÁUTICO AO FINAL DE SUA VIDA ÚTIL

Trabalho de Graduação apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Me. Wagner da Silveira.

Dourados – MS
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C355a Castro Filho, Flavio Aparecido Pagani De
Análise de corrosão em um componente aeronáutico ao final de sua
vida útil / Flavio Aparecido Pagani De Castro Filho -- Dourados: UFGD,
2017.
50f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Wagner da Silveira

TCC (Graduação em Engenharia de Produção) - Faculdade de
Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados.
Inclui bibliografia

1. Manutenção. 2. Corrosão. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

FLAVIO APARECIDO PAGANI DE CASTRO FILHO

**ANÁLISE DE CORROSÃO EM UM COMPONENTE AERONÁUTICO AO FINAL DE
SUA VIDA ÚTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande
Dourados, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção, pela
Banca Examinadora, formada por:

Dourados, 13 de dezembro de 2017.

Presidente: Prof. Wagner da Silveira, Me. – Orientador, UFGD

Membro: Prof. Márcio Rogério Silva, Dr., UFGD

Membro: Prof. Rogério da Silva Santos, Dr., UFGD

RESUMO

Após um acidente envolvendo um avião da companhia *Aloha Airlines* em 1988, ocasionado por uma falha estrutural de um componente que sofreu corrosão, a aviação se deu conta que era necessário adotar ações preventivas no sentido de controlar a corrosão. Manutenção e prevenção de acidentes estão intimamente ligados, por isso é de importância estudos que visam evidenciar o que a negligência na manutenção acarreta. No presente trabalho o alvo de estudo é um cilindro de motor a pistão aeronáutico que foi substituído por apresentar corrosão em sua parede interna. Os conceitos utilizados são, portanto, em relação a manutenção, corrosão e funcionamento de motores empregados na aviação. Buscou-se, através da realização de ensaios de corrosão e de revisão da literatura, obter dados que auxiliem no entendimento dos processos corrosivos, bem como os fatores contribuintes e agravantes. Por fim o presente trabalho visa tentar entender as possíveis causas que atuaram a favor do processo corrosivo presente no material de estudo, relacionando a importância da manutenção no prolongamento da vida útil de máquinas e equipamentos, e promovendo a segurança no trabalho dos operadores.

Palavras-chave: Manutenção. Corrosão. Ensaios de corrosão. Motores aeronáuticos.

ABSTRACT

After an accident involving an airplane from Aloha Airlines in 1988, caused by a structural failure of a corroded component, the aviation realized that it was necessary to take preventive actions in the direction of controlling corrosion. Maintenance and prevention of accidents are closely connected, so studies that aim to show up what the negligence in the maintenance brings are very important. In the present study the cylinder of an airplane engine, what was changed because it had corrosion sign inside it, is the focus of the research. The concepts used in this study are preventive maintenance, corrosion and engines employed in aviation. The case study seeks, through the realization of tests of corrosion and of revision of the literature, to obtain information that could help to understand the corrosive processes, as well as contributory factors and aggravating circumstances. Finally, the present study try to understand the possible causes that acted on behalf of the corrosive process in the object of study, showing the importance of maintenance in the extension to promote the lifetime of machines and equipment, and promoting the labor safety for the operators.

Keywords: Maintence. Corrosion. Corrosion test. Aircraft engine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Boeing 737 da Aloha Airlines acidentado.	8
Figura 2. Acidentes nos últimos dez anos.	9
Figura 3. Incidentes graves nos últimos dez anos.	9
Figura 4. Percentual de acidentes por tipo de ocorrência nos últimos dez anos.	10
Figura 5. Percentual de incidentes graves por tipo de ocorrência nos últimos dez anos.	10
Figura 6. Incidência de fatores contribuintes em acidentes nos últimos dez anos. ..	11
Figura 7. Fatores contribuintes em incidentes graves nos últimos dez anos.	11
Figura 8. Estudo da fadiga, Tensão vs. Tempo.	18
Figura 9. Célula eletroquímica.	21
Figura 10. Curva de polarização de um metal passivo.	25
Figura 11. Componentes do motor a pistão.	32
Figura 12. Primeiro tempo do motor.	32
Figura 13. Segundo tempo do motor.	33
Figura 14. Terceiro tempo do motor.	34
Figura 15. Quarto tempo do motor.	34
Figura 16. Motor Lycoming O-235-C2A.	36
Figura 17. Cilindro utilizado na realização dos testes.	37
Figura 18. Cilindro apresentando corrosão, vista do interior.	37
Figura 19. Amostras, vista superior.	38
Figura 20. Amostras, vista lateral.	38
Figura 21. Amostras, vista inferior.	39
Figura 22. Corpo de prova embutido.	40
Figura 23. Corpo de prova embutido.	40
Figura 24. Computador conectado ao potenciostato.	41
Figura 25. Célula eletrolítica montada.	41
Figura 26. Gráfico do potencial ao longo do tempo.	42
Figura 27. Gráfico obtido através do ensaio de polarização linear.	43
Figura 28. Corpo de prova 1 corroído.	44
Figura 29. Figura 28.– Corpo de prova 2 corroído.	45
Figura 30. Corpo de prova 3 corroído.	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 FUNDAMENTAÇÃO	8
3 PROBLEMÁTICA	12
4 OBJETIVOS	12
4.1 Objetivo Geral	12
4.2 Objetivo Específico	12
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
5.1 Manutenção	13
5.2 Manutenção Preventiva	13
5.3 Manutenção Corretiva	14
5.4 Manutenção na aeronáutica	14
5.5 Inspeção	15
5.5.1 Inspeção Pré-Voo	15
5.5.2 Inspeção Periódica	16
5.5.3 Revisão Geral	16
5.6 Falhas	17
5.7 Fadiga	17
5.8 Corrosão	18
5.9 Oxidação-Redução	19
5.10 Potencial de Eletrodo	20
5.11 Corrosão Eletroquímica	20
5.11.1 Pares Galvânicos	22
5.11.2 Corrosão Química	23
5.11.3 Polarização	23
5.11.4 Passivação	24
5.12 Tipos de corrosão	25
5.12.1 Ataque uniforme	25
5.12.2 Corrosão Galvânica	26
5.12.3 Corrosão em frestas	26
5.12.4 Corrosão por <i>pite</i>	27
5.12.5 Corrosão intergranular	27

5.12.6 Lixívia seletiva	27
5.12.7 Erosão-Corrosão	27
5.12.8 Corrosão sob tensão	28
5.13 Velocidade de corrosão	28
5.14 Fatores colaborativos a corrosão	29
5.15 Ensaio de corrosão	29
5.16 Motores aeronáuticos	31
5.17 Motores a pistão	31
5.18 Componentes do motor a pistão	35
5.19 Motor Lycoming O-235-C2A	35
6 MATERIAIS E MÉTODOS	36
6.1 Materiais	36
6.2 Métodos	39
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

A história da aviação na humanidade se dá há muito tempo, tendo início apenas com lendas e histórias, como a lenda de Dédalo e Ícaro, e a história bíblica da Torre de Babel – uma tentativa do homem de chegar ao céu -, dentre outros contos de homens, semi-deuses e deuses alados.

Em torno de 200 a.C. Arquimedes, cientista grego, descobriu que objetos poderiam se apoiar em líquidos, flutuar. Mais tarde, no ano de 1290, Roger Bacon, um frade inglês conhecido por unir matemática à natureza, escreveu que o ar continha características de fluídos, como a água, e com base nos estudos de Arquimedes chegou à conclusão de que se as pessoas tivessem a capacidade de construir uma máquina adequada, o ar suportaria seu peso, assim como a água suporta um barco.

Em 1452 nasce na Itália Leonardo da Vinci, inventor o qual dedicou boa parte da sua vida a desenhar máquinas que fossem capazes de voar, eram elas o planador, e o ornitópteros. Da Vinci nunca chegou a construir tais máquinas, porém esses esboços foram de vital importância para pesquisadores no futuro.

Têm-se, então, os balões de ar quente, os planadores até que surge o avião, inventado no início da década de 1900. A invenção do primeiro avião ainda gera muita polêmica, onde alguns estudiosos defendem que os pioneiros teriam sido os irmãos Wright, nascidos nos Estados Unidos, ao inventar o primeiro avião, chamado *Flyer*, porém sempre se recusaram a fazer demonstrações públicas de seus voos, e seu avião era catapultado ao ar. Outros defendem Alberto Santos Dumont, brasileiro e grande inventor, que em 23 de outubro de 1906 realizou um voo público em Paris, no seu avião batizado de 14-Bis, aeronave que por sua vez, não necessitava de qualquer máquina auxiliar para decolar, tal como uma catapulta. O 14-Bis foi o primeiro avião a ser homologado por seu voo, pelo Aeroclube da França e reconhecido mundialmente como o primeiro avião a voar e decolar por meios próprios.

Do primeiro voo até hoje, os aviões passaram por inúmeros avanços tecnológicos: são maiores, mais rápidos, voam por mais tempo, por maiores distâncias e com cargas cada vez mais pesadas, com todos esses avanços mudou-se também a tolerância a falhas. Deixaram de ser protótipos, para ser o segundo meio de transporte mais seguro mundo, atrás apenas do elevador. Falhas mecânicas devem

ser evitadas ao máximo, e para isso é necessário que a aeronave mantenha-se em bom estado.

Tem-se o papel da manutenção, que pode ser caracterizada como o processo que visa prolongar a vida útil do equipamento ou sistema. A manutenção pode ser feita antes da falha acontecer, chamada de manutenção preventiva, ou posterior a falha, a manutenção corretiva (outros tipos de manutenção serão abordados mais à frente). Dentro da aviação é extremamente desejável que a falha não aconteça.

Na aviação geral o processo de manutenção é baseado no manual de manutenção que cada aeronave possui, e também através das normas da ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil, através do RBAC 43, e recomendações e normas da OACI, Organização Internacional da Aviação Civil.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência a corrosão, utilizando-se de ensaios de corrosão de um componente presente em motores a pistão, amplamente utilizados em aeronaves monomotoras.

“A falha de materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejável por várias razões, que incluem a colocação de vidas humanas em risco, perdas econômicas e a interferência na disponibilidade de produtos e serviços.” (CALLISTER, 2008, p.264)

2 FUNDAMENTAÇÃO

Em 28 de abril de 1988 um Boeing 737 da *Aloha Airlines* perdeu parte de sua fuselagem em voo a 24.000 pés de altitude (Figura 1), fato que resultou na morte de um tripulante, os pilotos conseguiram pousar antes de maiores danos. Após investigação foi constatado que falha foi ocasionada pelos rebites que uniam os painéis da fuselagem, deteriorados pela corrosão. Este evento definiu a conscientização dos órgãos aeronáuticos, fabricantes, engenheiros, projetistas e todos os envolvidos com aviação sobre os perigos da degradação ambiental.

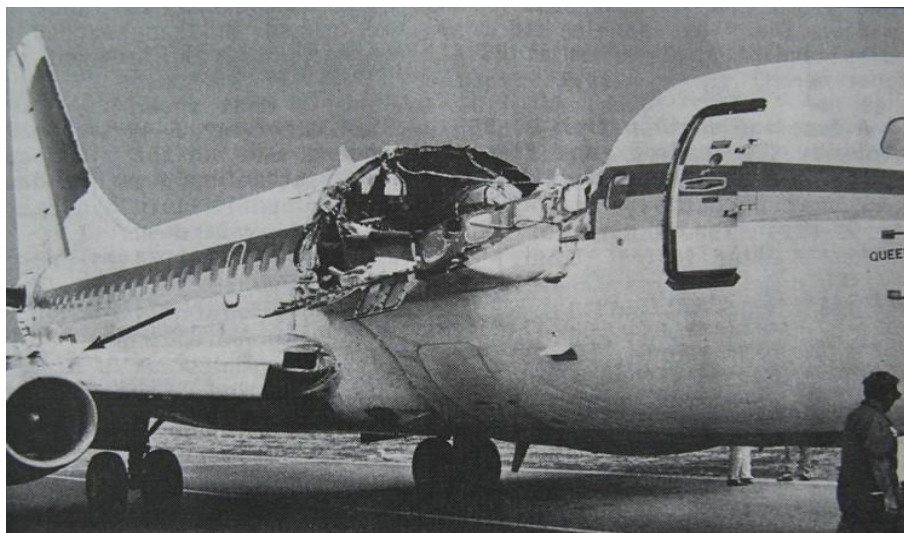


Figura 1. Boeing 737 da *Aloha Airlines* acidentado.
Fonte: NTSB (1988)

No ano de 2016 o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) completou 45 anos, e durante esse período o órgão investigou ocorrências no setor aeronáutico brasileiro.

O Panorama Estatístico da Aviação Brasileira, emitido em 2016, apresenta os relatórios de acidentes e incidentes graves ocorridos nos últimos dez anos.

São classificados como acidentes as ocorrências que causam dano estrutural a aeronave, causando perda de sua aeronavegabilidade, ou em que haja mortes ou ferimentos graves em decorrência do voo. Os incidentes graves, por sua vez, são ocorrências em que houve elevado risco ao acidente e suas consequências.

A Figura 2 mostra o número de acidentes ocorridos na aviação entre o ano de 2006 e 2015, sendo que durante esse período foram registrados 1294 acidentes com uma média aproximada de 130 por ano.

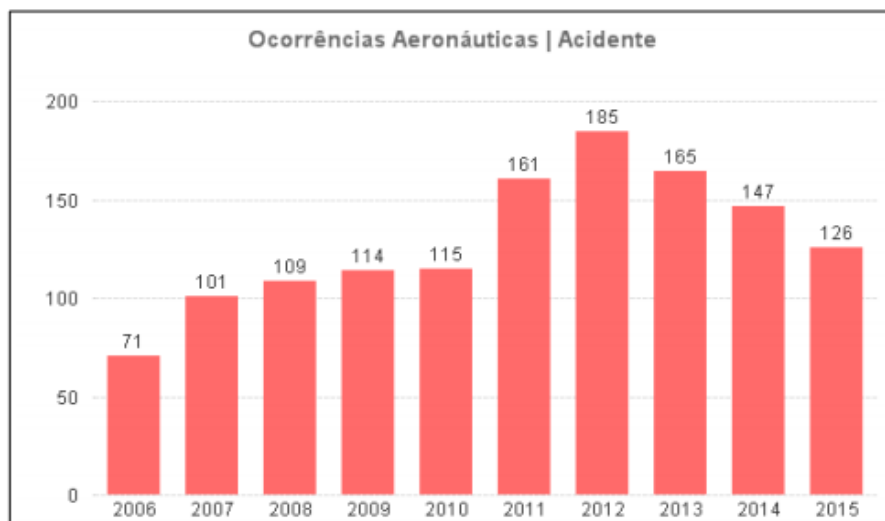


Figura 2. Acidentes nos últimos dez anos.
Fonte: CENIPA (2016).

A Figura 3 apresenta o número de incidentes graves no mesmo período, onde ocorreram 526 incidentes graves com média aproximada de 53 por ano.



Figura 3. Incidentes graves nos últimos dez anos.
Fonte: CENIPA (2016).

Ressalta-se que o número de voos e aviões em operação também cresceu durante esses dez anos, e mesmo com o gráfico indicando um aumento dos números de acidentes e incidentes graves, houve uma diminuição em relação ao percentual.

O CENIPA investiga os acidentes e incidentes aeronáuticos e busca neles o principal fator que motivou a ocorrência, nesse sentido a Figura 4 mostra as ocorrências que incidiram nos acidentes e suas porcentagens, a falha do motor em voo lidera o ranking com 20,63%.

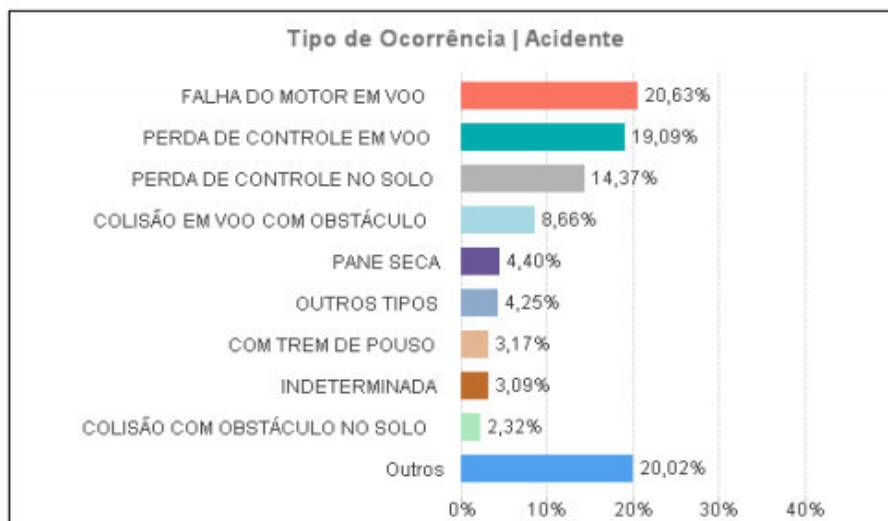


Figura 4. Percentual de acidentes por tipo de ocorrência nos últimos dez anos.
Fonte: CENIPA (2016).

Em relação os incidentes graves, é possível visualizar na Figura 5 que a falha do motor em voo está em terceiro no ranking com 13,88%.

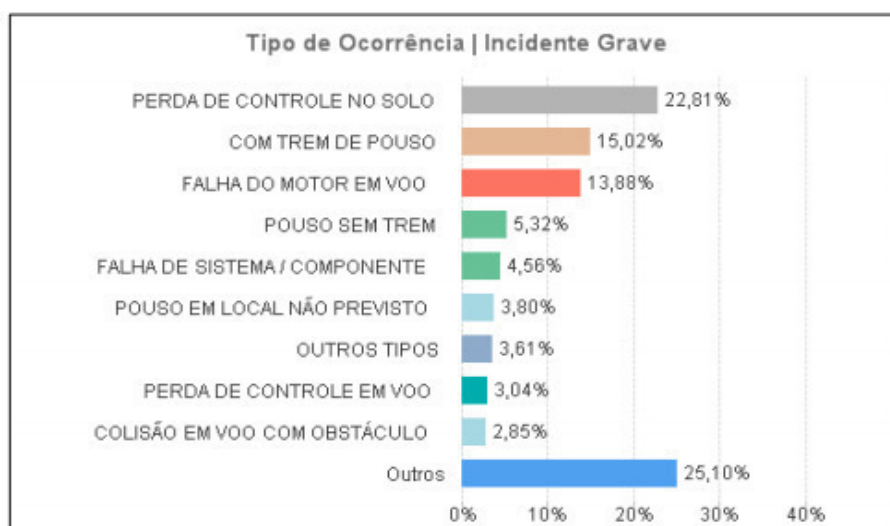


Figura 5. Percentual de incidentes graves por tipo de ocorrência nos últimos dez anos.
Fonte: CENIPA (2016).

O CENIPA também identificou os maiores fatores contribuintes para a ocorrência de acidentes e incidentes graves. O fator Manutenção de Aeronave está presente para ambos os casos.

A figura 6 mostra os fatores contribuintes para ocorrências de acidentes, a Manutenção de aeronave está presente em sexto no ranking, com 167 ocorrências.

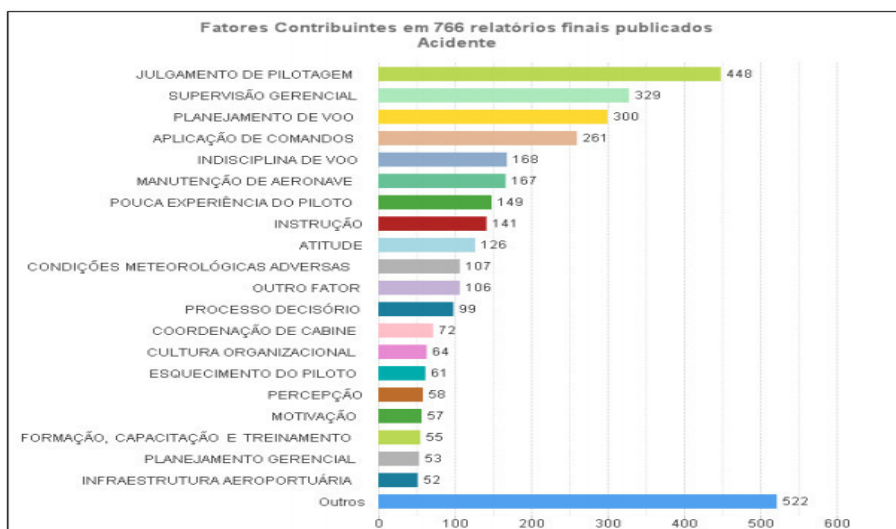


Figura 6. Incidência de fatores contribuintes em acidentes nos últimos dez anos.
Fonte: CENIPA (2016).

A figura 7 mostra os fatores contribuintes para as incidências graves, onde a manutenção de aeronave está em terceiro lugar, aparecendo num total de 80 relatórios.

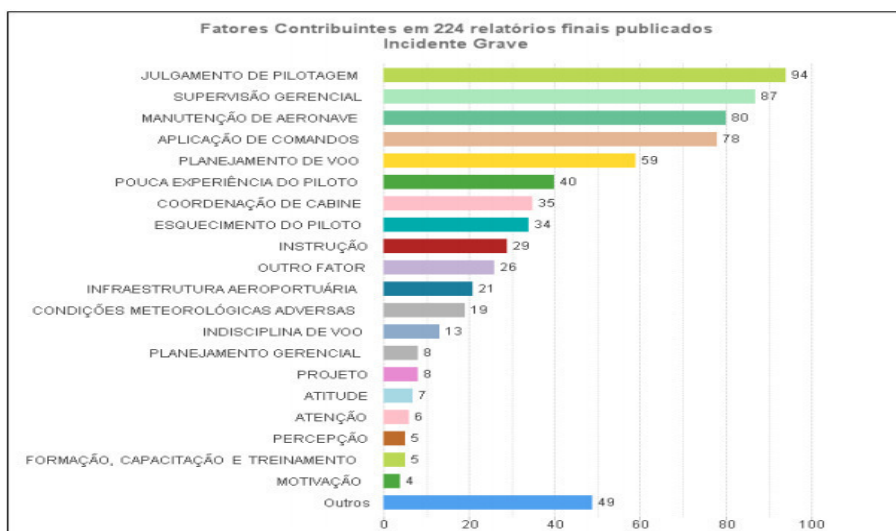


Figura 7. Fatores contribuintes em incidentes graves nos últimos dez anos.
Fonte: CENIPA (2016).

3 PROBLEMÁTICA

O objeto de estudo do trabalho, um cilindro aeronáutico, foi alvo de um debate entre o proprietário da aeronave e o mecânico que detectou a corrosão, onde o mecânico defendia que a corrosão não afetaria a segurança de voo e a operação da aeronave, não sendo necessário a troca dos cilindros, contudo o proprietário optou por adquirir novos cilindros.

Após a análise dos dados apresentados na fundamentação, e o impasse apresentado pelo mecânico e o proprietário, o presente trabalho busca responder se a manutenção, que é um fator contribuinte presente, em um motor de aeronave, que é a ocorrência com maior percentual de participação em acidentes e terceiro maior em incidentes graves, está conforme e se não apresenta risco a aeronavegabilidade e segurança de voo.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da corrosão em um cilindro de motor aeronáutico.

4.2 Objetivo Específico

Realizar um ensaio de corrosão em amostras extraídas da parede interna de um cilindro afetado por corrosão, e com bases nos dados obtidos identificar possíveis causas e falhas futuras passíveis de ocorrer em caso de negligência da manutenção.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Manutenção

“Podemos não perceber, mas a manutenção, palavra derivada do latim *manus tenere*, que significa manter o que se tem, está presente na história humana há eras” (VIANA, 2014, p.1). Segundo a AFNOR NF 60-010 (apud. PEREIRA, 2011, p.101) manutenção pode ser definida como um “conjunto de ações que permitem restabelecer um bem para seu estado específico ou medidas para garantir um serviço determinado”. Pode-se ainda complementar, segundo Aurélio (apud. PEREIRA, 2011, p.101), “medidas necessárias para a conservação ou permanência de alguma coisa ou de uma situação; os cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de motores e máquinas”.

Dentro da aviação a manutenção anda em conjunto com a inspeção, segundo Homa (2016, p.134) os serviços de inspeção e manutenção têm como objetivo manter o avião em plenas condições de funcionamento, garantindo a segurança das operações e o desempenho adequado.

A manutenção é essencial para a longevidade e preservação do bem, assim como seu perfeito funcionamento, garantindo a segurança do usuário que o detém e o utiliza.

5.2 Manutenção Preventiva

“A origem da manutenção preventiva foi por volta de 1930, na indústria aeronáutica ou de aviação.” (PEREIRA, 2011, p. 110).

“Podemos classificar como manutenção preventiva todo serviço de manutenção realizado em máquinas que não estejam em falha, estando com isto em condições operacionais ou em estado de zero defeito.” (VIANA, 2014, p.10).

A ABNT, de acordo com a NBR-5462-1994 (apud. PEREIRA, 2014, p.110), define a manutenção preventiva como: “A manutenção efetuada em intervalos

predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento do item. ”.

A manutenção preventiva é efetuada periodicamente com a finalidade de evitar que haja um deterioramento além do esperado das funções do bem. É realizada antes da falha se apresentar.

5.3 Manutenção Corretiva

“Manutenção Corretiva: manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p.7).

Pereira (2014, p.102) diz que a manutenção corretiva tem como característica o conserto que se inicia após a ocorrência da falha, dependendo da disponibilidade de mão-de-obra e material necessário para o reparo.

Essa manutenção tem como característica ser efetuada somente após a falha, como o próprio nome diz, ela corrige o bem para voltar a seu funcionamento, exigindo maior disponibilidade da equipe de manutenção, uma vez que a falha não tem hora determinada para ocorrer.

5.4 Manutenção na aeronáutica

Dentro da aeronáutica, Vilela et al. (2010) diz que o estado de confiabilidade e segurança estabelecidos no projeto inicial de cada aeronave deve ser mantido, sendo este o objetivo da manutenção, para tanto deve ser usado intervenções preventivas e corretivas, através de manutenções periódicas, correções de falhas reportadas e modificações do projeto.

O autor ainda complementa dizendo que os critérios para execução da manutenção são regidos pela RBAC 43 (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil) e que, por meio da manutenção, a aeronavegabilidade de uma aeronave é restaurada, voltando à condição segura para a qual foi certificada.

A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) (apud. VILELA, 2010) diz ainda que quando a manutenção não é bem gerida e/ou executada, é criado um ambiente onde condições que podem enfraquecer a segurança do sistema e desencadear falhas ativas podem se desenvolver, o que pode promover a ocorrência de acidentes e/ou incidentes aeronáuticos.

A manutenção em uma aeronave ocorre em períodos determinados pelo fabricante de cada componente, o motor por exemplo, segue um plano de manutenção especificado pelo fabricante, baseando-se em horas de voo.

A manutenção sem o devido cuidado em aeronaves pode ocasionar a falha de uma ou mais peças e componentes em voo, o que gera riscos, por vezes criando situações de perigo para a tripulação

5.5 Inspeção

No meio aeronáutico as manutenções andam juntamente com as inspeções, cujo o objetivo é detectar falhas. Segundo Homa (2016, p.134) “as inspeções são verificações visuais ou por outros meios simples, destinadas a detectar anormalidades. Uma vez constatada, toda anormalidade requer um serviço de manutenção corretiva.”

“A manutenção preventiva é realizada através de Inspeções Periódicas e Revisões Gerais.” (HOMA, 2016, p.135).

Dentro deste contexto tem-se então as inspeções pré-voo, as inspeções periódicas e as revisões gerais.

5.5.1 Inspeção Pré-Voo

Este tipo de inspeção é realizada previamente ao voo, e é de responsabilidade do piloto em comando.

“Consiste em examinar as diversas partes do avião, de acordo com uma lista de verificações (*“check-list”*) estabelecida pelo fabricante do avião. Qualquer

anormalidade constatada deve ser examinada por um mecânico habilitado. ” (HOMA, 2016, p.134)

Pode-se citar como exemplo de inspeção pré-voo a verificação do nível de óleo e combustível, inspeção das superfícies de comando e averiguação dos pneus.

5.5.2 Inspeção Periódica

A inspeção periódica é realizada após o avião atingir determinado número de horas voadas, esse número varia de aeronave para aeronave, e é determinada pelo fabricante.

Segundo Homa (2016, p.135) na inspeção periódica ocorre a pesquisa quanto anormalidades e serviços de rotina são realizados. A periodicidade da inspeção é determinada pelo fabricante do avião e de cada componente, e pode ser baseada em horas voadas, tempo cronológico, entre outros.

5.5.3 Revisão Geral

Homa (2016, p.135) define revisão geral de uma aeronave como todo o processo de desmontagem do interior, remoção de painéis de acessórios, inspeção da fuselagem e estrutura, instrumentos de voo, tanque de combustível, dentre outros.

O autor ainda diz que a periodicidade das revisões gerais são as TBO (“*Time Between Overhauls*”), de cada componente, que estão especificadas no manual e são controladas separadamente.

Sendo assim é possível verificar que as aeronaves já contém um plano de manutenção sólido, que deve ser executado de forma correta, e ao prosseguir dessa forma espera-se a manifestação de nenhum defeito ou falha.

5.6 Falhas

Apesar da manutenção ser consolidada e muito estudada no setor aeronáutico, falhas podem acontecer e devem ser investigadas, sempre com o intuito de prevenir acidentes e incidentes futuros do mesmo gênero.

“As estruturas das aeronaves sofrem uma gama variada de esforços quando estão em operação [...]. Um grande desafio no campo de estudo das fraturas e da aplicação de materiais e suas resistências sempre foi à fadiga dos materiais.” (SERRANO, 2014, p.15).

“Uma aeronave sofre muitos tipos de esforços quando está em operação: pousos, turbulências, acelerações (fator carga), pressurização e despressurização, manobras e outros.” (LIASCH, 2011).

Liasch (2011) completa dizendo que a estrutura de uma aeronave durante seu uso sofre diversos danos que podem comprometer o desempenho e segurança. Dentre os principais fatores que atuam sobre as estruturas, duas merecem destaque, a fadiga de material e a corrosão.

5.7 Fadiga

“A fadiga é o fenômeno geral de falha de material após vários ciclos de carregamento a um nível de tensão abaixo do limite de resistência a tração.” (SHACKELFORD, 2008, p.180).

A definição de fadiga, feita por Liasch (2011), diz que é um processo físico, que ocorre por meio de esforços repetitivos no material. O autor dá como exemplo um pedaço de arame de aço que se dobrado repetidamente vai se romper, o mesmo efeito pode ocorrer nas peças metálicas e algumas não metálicas de aviões.

Callister (2008, p.285) explica que o termo fadiga é utilizado porque essa falha ocorre geralmente depois de diversos ciclos repetidos de tensões e deformações. O autor classifica a fadiga como o maior causador individual de falhas nos metais e diz que a falha por fadiga é “catastrófica e traiçoeira”, uma vez que não dá sinal prévio e ocorre de uma vez.

A Figura 8 mostra as repetidas aplicações de tensão ao longo do tempo, que segundo Shackelford (2008, p.180) pode criar uma deformação plástica na superfície do metal, manifestadas por extrusões e intrusões. As intrusões, após formadas, crescem e tornam-se trincas, que reduzem a capacidade do material de transportar carga e concentram as tensões.

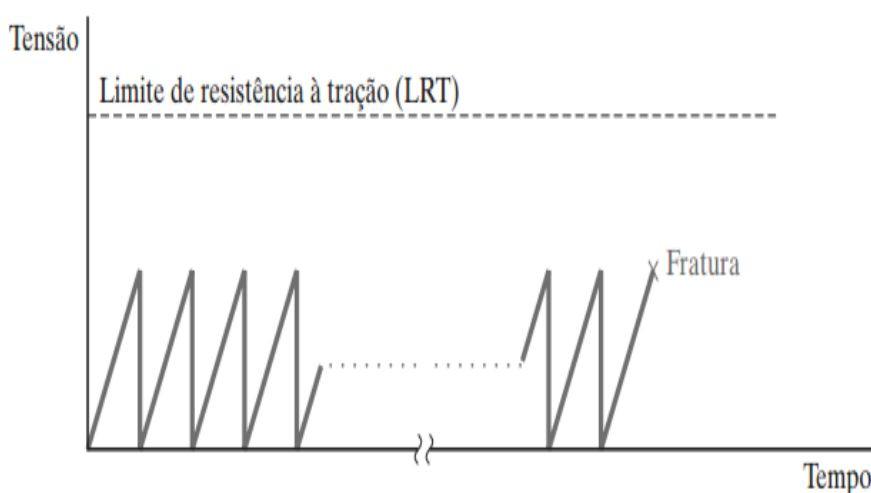


Figura 8. Estudo da fadiga, Tensão vs. Tempo.
Fonte: SHACKELFORD, 2008.

5.8 Corrosão

“Corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, resultado de ataque químico proveniente do ambiente.” (SMITH & HASHEMI, 2010, p.494). Ao falar sobre corrosão, geralmente há referência a ataque eletroquímico ou químico em materiais, em especial para este estudo, os metais. A corrosão pode ou não estar associada a esforços mecânicos.

Para Callister (2008, p. 456), a corrosão é definida como o ataque destrutivo e não intencional de um metal, esse ataque é eletroquímico e começa normalmente na superfície do material.

“Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam.” (GENTIL, 1996, p.1)

Gentil (1996, p.2) ressalta os perigos da corrosão localizada, que muitas vezes resultam em fraturas repentinas de partes críticas de aviões, causando desastres que podem envolver perda de vidas humanas.

A importância do estudo da corrosão abrange diversos aspectos, tais como as perdas econômicas, que podem ser divididas em diretas e indiretas. Como diretas têm-se os custos de substituição de equipamentos e/ou componentes e os custos de manutenção das máquinas e seus processos de proteção a corrosão. Como custos indiretos tem-se a perda de eficiência de equipamentos, no caso do motor onde há uma continua corrosão no cilindro e nos anéis de segmentação do pistão, existe a perda de dimensão desses e em decorrência um aumento no consumo de combustível e óleo.

Gentil (1996, p. 2) também cita as questões de segurança, em que a corrosão localizada por vezes resulta em fraturas repentinas em itens críticos de máquinas, como aviões, automóveis e pontes.

“A indústria aeronáutica tem grande preocupação com a manutenção de aviões e helicópteros para evitar, ou minimizar, processos de deterioração que poderiam causar custos diretos elevados e a perda de vidas humanas.” (GENTIL, 1996, p.2)

5.9 Oxidação-Redução

“Os metais, no estado elementar, têm, mais frequentemente, de um a três elétrons no ultimo nível energético, e quando reagem tem tendência a perder esses elétrons, oxidando-se e, portanto, agem como substancia redutora”. (GENTIL, 1996, p.10)

Na oxidação ocorre a perda de elétrons, e na redução o ganho de elétrons, sendo assim o agente redutor contém o íon ou elemento redutor e o agente oxidante contém o elemento oxidante.

5.10 Potencial de Eletrodo

Um metal imerso em uma solução eletrolítica estabelece uma diferença de potencial entre o sólido, no caso metal, e o meio líquido, ou a solução. Essa diferença de potencial é elétrica e química, podendo ser chamada de diferença de potencial eletroquímico.

“De maneira mais específica, o eletrodo é o sistema formado pelo metal e pela solução eletrolítica vizinha ao metal.” (GENTIL, 1996, p.14)

O potencial de eletrodo mostra a facilidade com que átomos do eletrodo perdem elétrons, logo, é a tendência com que uma reação ocorre no eletrodo. O potencial desenvolvido por um metal imerso em uma solução de 1M de seus íons recebe o nome de potencial normal ou padrão, e é medido em Volts (V). Dá-se o nome de eletrodo padrão a um eletrodo em contato com uma solução de 1M de seus íons.

Ao se ligar dois eletrodos em circuito externo obtém-se uma pilha eletroquímica, ou eletrolítica. Essa pilha é usada na transformação da energia elétrica, fornecida por uma fonte externa, em energia química, o que gera uma reação de redox nos eletrodos.

Nas pilhas sempre haverá um eletrodo chamado de ânodo e um chamado de cátodo, sendo que no primeiro ocorre uma reação de oxidação e no segundo uma reação de redução. O ânodo é o eletrodo com tendência a corrosão, ou seja, perda de massa.

5.11 Corrosão Eletroquímica

Esse processo é o mais comum na natureza, têm como características:

- Presença de água no estado líquido.
- Temperaturas abaixo do ponto de orvalho.
- Formação de uma pilha ou célula de corrosão, havendo circulação de elétrons.

“Nos processos de corrosão, os metais reagem com substâncias não metálicas presentes no meio [...] produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos.” (ABRACO, [20??], p. 1)

Na célula eletroquímica (figura 9) tem-se a corrosão do ferro acompanhado por uma corrente elétrica. Esse tipo de célula é chamada de célula de concentração, uma vez que a diferença na concentração iônica gera a corrosão e corrente elétrica associada.

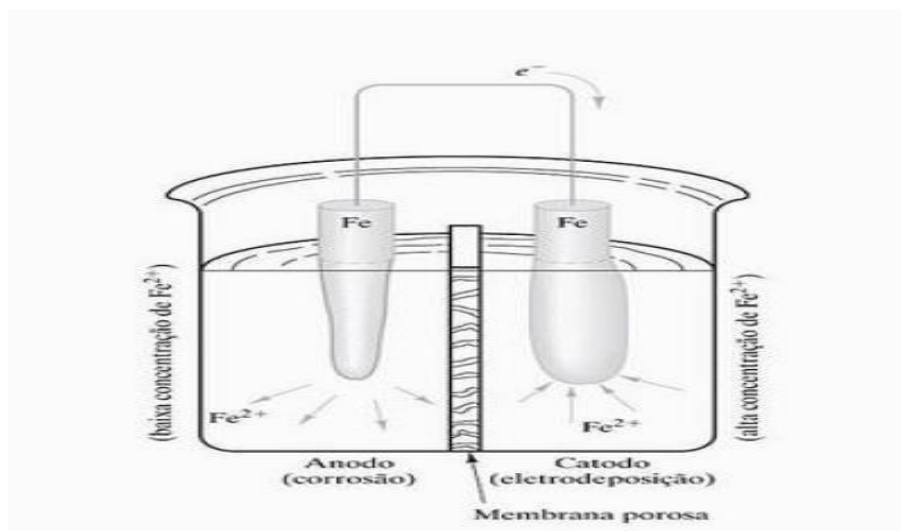


Figura 9. Célula eletroquímica.
Fonte: SHACKELFORD, 2008.

Do lado esquerdo da célula tem-se o ânodo, material que é corroído, ou doa elétrons ao circuito. Do lado direito o cátodo, material que absorve os elétrons do circuito, neutralizando os íons.

Onde há o ânodo ocorre a reação anódica, ou oxidação, controlada pela tendência ao equilíbrio das concentrações iônicas entre os dois lados da célula.

A reação catódica, ou redução, ocorre no lado do cátodo, onde o metal se acumula.

O transportes de íons de Fe^{2+} para os dois lados da célula ocorre através da membrana porosa que, apesar de permitir esse transporte, mantém as concentrações em níveis significativamente diferentes.

“Um conceito importante aplicável às pilhas de corrosão é o da reação de oxidação e redução. As reações da corrosão eletroquímica envolvem sempre reações de oxiredução.” (ABRACO [20??], p.2).

“Todos os elétrons gerados através das reações de oxidação devem ser consumidos pelas reações de redução.” (Callister, 2008, p.457).

As pilhas eletroquímicas apresentam alguns componentes básicos, são eles o ânodo, eletrodo onde ocorre a corrosão e a entrada da corrente elétrica; o cátodo, onde há a redução e a saída da corrente do circuito; o eletrólito, um líquido condutor que contém íons que transportam a corrente; e o circuito metálico, que faz a ligação entre o ânodo e o cátodo por onde passam os elétrons.

5.11.1 Pares Galvânicos

“A corrosão, como encontrada normalmente, envolve eletrodos em condições diferentes, um par galvânico.” (VLACK, 1984, p.326).

“Uma pilha galvânica macroscópica pode ser construída com dois eletrodos metálicos diferentes imersos em uma solução de seus próprios íons.” (Smith & Hashemi, 2010).

Em um par galvânico dois metais diferentes são imersos em diferentes soluções com a mesma concentração, e separados por uma membrana que limita a mistura das duas soluções, com os dois metais (eletrodos) conectados eletricamente. Quando a corrente passa no circuito externo, os elétrons gerados pela oxidação do ânodo escoam para o cátodo, ocorrendo a redução, há o movimento líquido dos íons através da membrana, de um pilha para outra.

“Isto é chamado de um par galvânico, isto é, dois metais que estão conectados eletricamente em um eletrólito líquido, onde um metal se torna um ânodo e sofre corrosão, enquanto o outro atua como um cátodo.” (CALLISTER, 2008, p.458).

Um potencial elétrico aparecerá entre as duas semi pilhas, essa tensão poderá ser mensurada através de um voltímetro. Segundo Smith & Hashemi (2010), a potência eletroquímica total da pilha, a força eletromotriz (FEM), é obtida somando os potenciais de oxidação e a redução das meias-pilhas.

5.11.2 Corrosão Química

Também chamada de corrosão ou oxidação em altas temperaturas, a corrosão química dificilmente acontece em ambientes normais, do dia-a-dia, são comumente encontradas em ambientes industriais, em condições adversas. Segundo a ABRACO, esse processo tem por característica:

- Ausência de água no estado líquido;
- Temperaturas geralmente elevadas;
- Interação direta entre o metal e o meio corrosivo.

Por não necessitar de água no estado líquido, a corrosão química também é denominada de corrosão seca ou meio não aquoso.

5.11.3 Polarização

“Quando um metal é corroído por um curto-circuito pela ação da pilha-galvânica microscópica, as reações de oxidação e redução da rede ocorrem na superfície do metal.” (SMITH & HASHEMI, 2010).

Quando a pilha é colocada em curto-circuito os potenciais das regiões do ânodo e do cátodo não encontram-se mais em equilíbrio. Callister (2008, p. 463), completa dizendo que “o deslocamento de cada potencial de eletrodo do seu valor em condições de equilíbrio é chamado de polarização, e a magnitude desse deslocamento é a sobrevoltagem”.

A polarização da reação eletroquímica pode ser dividida em dois tipos, polarização por ativação e polarização por concentração.

“A polarização por ativação se refere à condição em que a taxa de reação é controlada por aquela etapa na série que se processa à taxa mais lenta.” (CALLISTER, 2008, p.463). A palavra “ativação” se refere a essa polarização pois a etapa mais lenta, que rege a taxa de reação, é associada a uma barreira de energia de ativação. Smith & Hashemi (2010) ainda completam dizendo que o mais lento desses passos controlará a reação anódica da meia-pilha.

Quando a taxa de reação é limitada pela difusão no interior da solução, ter-se-á a polarização por concentração. Segundo Callister (2008, p.465) a polarização por concentração ocorre geralmente somente para as reações de redução, pois no caso das reações de oxidação existe virtualmente um suprimento ilimitado de átomos dos metais na interface do eletrodo que está sendo corroído.

“A polarização total no eletrodo em uma reação eletroquímica é igual à soma dos efeitos da polarização por ativação e por concentração.” (SMITH & HASHEMI, 2010). Para pequenas taxas de reação o fator limitante é a polarização por ativação, e em taxas maiores de reação o fator é a polarização por concentração.

5.11.4 Passivação

Passivação é o fenômeno o qual o material se torna totalmente inerte, perdendo sua reatividade química. Segundo Smith & Hashemi (2010) a passivação de um metal como uma parte da corrosão, se refere a formação de uma camada de superfície protetiva oriunda de um produto de reação que inibe algumas futuras reações.

“A passivação é um processo que depende do material e do meio. Alguns metais e ligas, por exemplo, cromo, níquel, molibdênio, titânio, zircônio, aços inoxidáveis, monel (70% Ni – 30% Cu), se passivam ao ar.” (GENTIL, 1996, p. 113)

A passivação dos materiais metálicos pode ser ilustrada, em termos de corrosão, através da curva de polarização de um metal passivo (Figura 10), onde é mostrado como o potencial eletroquímico (E) de um material varia com a densidade da corrente.

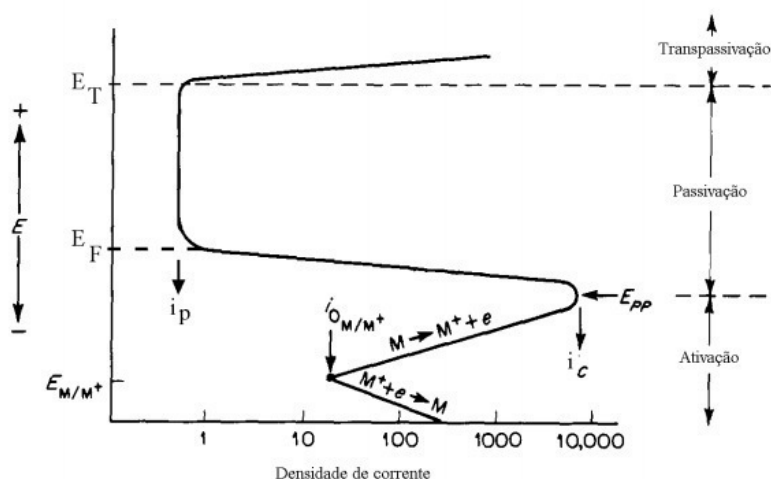


Figura 10. Curva de polarização de um metal passivo.
Fonte: ROBIN, 2011-.

Ao considerar a curva para um metal M , no ponto indicado pela seta inferior, temos o equilíbrio do metal com equilíbrio potencial M e corrente i_o . Conforme ocorre o crescimento do potencial, o metal tem o comportamento ativo e sua densidade de corrente aumenta exponencialmente até atingir o E_{pp} , onde é criada a camada protetiva na superfície, responsável pela queda da reatividade.

Quando atinge-se o E_{pp} o potencial primário, juntamente com a densidade da corrente e a taxa da corrente decrescem até o valor indicado como i_p . Um maior aumento no potencial, a linha do gráfico entra na região transpassiva.

5.12 Tipos de corrosão

A corrosão pode ser dividida em oito formas, de acordo com a aparência do metal corroído e da maneira como ela se manifesta.

5.12.1 Ataque uniforme

Segundo a Associação Brasileira de Corrosão ([20??], p. 8), o ataque ou corrosão uniforme pode ser definido quando a corrosão se processa de modo

aproximadamente uniforme em toda a superfície atacada. Callister (2008 p.470) completa dizendo que em um “ponto de vista microscópico, as reações de oxidação e redução ocorrem aleatoriamente ao longo da superfície.”

5.12.2 Corrosão Galvânica

“A corrosão galvânica ocorre quando dois metais ou ligas que possuem composições diferentes são acoplados eletricamente ao mesmo tempo expostos a um eletrólito.” (CALLISTER, 2008, p.470)

A corrosão irá ocorrer no metal menos nobre ou mais reativo. A relação entre as áreas do cátodo e do ânodo que estão em contato com o eletrólito é o fator que gera a taxa de ataque galvânico. Além disso um ânodo de área menor que um de grande área irá ser corroído mais rapidamente, uma vez que a taxa de corrosão também é dependente da densidade da corrente, ou seja corrente por unidade de área.

5.12.3 Corrosão em frestas

“A corrosão por frestas é uma forma localizada de corrosão eletroquímica que pode ocorrer em frestas e em superfícies protegidas, onde soluções estagnadas podem existir.” (SMITH & HASHEMI, 2010)

“A fresta deve ser ampla o suficiente para que a solução penetre, porém deve ser também estreita o suficiente para que haja a estagnação do fluido; geralmente, a largura é de vários milésimos de um centímetro.” (CALLISTER, 2008, p.471).

5.12.4 Corrosão por *pite*

Esse tipo de corrosão ocorre de forma localizada, quando pequenos pites ou buracos se formam no material, penetrando no interior do mesmo, a partir do topo da superfície. É de difícil detecção, sendo geralmente detectado somente após ocorrer a falha.

5.12. 5 Corrosão intergranular

“A corrosão intergranular é um ataque de corrosão localizada e/ou adjacente aos contornos de grão de uma liga.” (SMITH & HASHEMI, 2010)

De maneira geral os materiais se corroem uniformemente, e os contornos de grão são pouco mais reativos que a matriz. Porém em condições adversas, a região de contorno de grão pode tornar-se mais reativa, fazendo com que ocorra a corrosão intergranular, causa da perda de resistência e podendo desintegrar a região do contorno de grão.

5.12.6 Lixívia seletiva

“A lixívia seletiva é encontrada em ligas de solução sólida e ocorre quando um elemento ou constituinte é removido preferencialmente como consequência de processos de corrosão.” (CALLISTER, 2008, p.472).

5.12.7 Erosão-Corrosão

Quando um ataque químico é combinado com a ação abrasiva do movimento do fluido, ter-se-á a erosão-corrosão. Pode ser caracterizada pelo aparecimento de

estrias na superfície do material, bem como pites, vales, furos, que causam danos superficiais e geralmente encontram-se na direção do escoamento do fluido corrosivo. A taxa de corrosão é proporcional a velocidade do fluido.

A erosão-corrosão pode causar danos ao filme superficial protetor de ligas passivadas, deixando assim a superfície do material vulnerável caso o revestimento não conter alta taxa de regeneração.

“Geralmente, esse tipo de ataque pode ser identificado pela presença de ranhuras e de ondulações na superfície, que possuem contornos característicos do escoamento de um fluido.” (CALLISTER, 2008, p.473)

5.12.8 Corrosão sob tensão

A corrosão sob tensão é resultado da ação combinada de um ambiente corrosivo com uma força de tração aplicada.

“Durante a fratura por corrosão por tensão, a superfície do metal é geralmente atacada de forma branda, enquanto trincas altamente localizadas se propagam por entre a seção transversal do metal.” (SMITH & HASHEMI, 2010)

“A tensão que produz o trincamento devido à corrosão sob tensão não precisa ser aplicada externamente, ela pode ser uma tensão residual que resulte de rápidas mudanças de temperatura e de uma contração desigual.” (CALLISTER, 2008, p.474).

5.13 Velocidade de corrosão

A velocidade de corrosão pode ser dividida em velocidade média de corrosão e velocidade instantânea de corrosão. Com base na velocidade média, o tempo de vida útil do material observado pode ser estimado.

“A velocidade média de corrosão pode ser obtida pela medida da diferença de peso apresentada pelo material metálico ou pela determinação da concentração de íons metálicos em solução durante intervalos de tempo de exposição ao meio corrosivo.” (GENTIL, 1996, p.102)

Na corrosão eletroquímica a velocidade da corrosão depende diretamente da forma das curvas de polarização anódica e catódica.

5.14 Fatores colaborativos a corrosão

Alguns fatores, ainda não citados, afetam a corrosão de forma indireta ou direta, acelerando ou facilitando o processo de oxidação do metal, como é o caso das altas temperaturas a que o material de estudo é exposto em seu funcionamento. Quando expostos a agentes oxidantes, os metais sofrem reações exotérmicas, o que possibilita a ocorrência em temperaturas elevadas onde, segundo Gentil (1996, p.117), “o decréscimo de energia livre é menor, a reação é mais favorecida cineticamente e a velocidade de oxidação é consideravelmente maior.”

Outro fator que pode acelerar o processo corrosivo são as solicitações mecânicas o qual o material é exposto durante sua vida útil, essas cargas mecânicas podem acelerar a corrosão mesmo sem a perda de massa, que pode acarretar em fraturas e então a súbita parada de operação do equipamento, trazendo riscos à segurança dos operadores.

5.15 Ensaio de corrosão

A fim de se estudar a agressividade de determinado meio corrosivo e obter dados relativos para o controle da corrosão são feitos ensaios de corrosão. Esses ensaios podem ser realizados tanto em laboratório quanto em campo, dependendo do objetivo do estudo. Cada ensaio tem suas vantagens e desvantagem, o ensaio em laboratório geralmente é empregado para a análise de pequenos corpos de prova, e os resultados são mais rápidos. Nos ensaios de campos o material a ser testado encontra-se nas condições naturais de sua utilização, com todas as variáveis, entretanto o tempo da obtenção de resultados é bem maior.

Ensaio em laboratório podem ser uteis nas diversas fases de elaboração de um novo equipamento a fim de se determinar qual é o melhor material a ser

empregado, como é a interação do meio com o material, como ocorre o processo de corrosão, determinar se o material satisfaz as especificações, e determinar se os processos empregados na fabricação do produto correspondem ao meio corrosivo ao qual serão expostos.

Os ensaios de campo por sua vez, têm uma tendência a apresentarem resultados mais reais, uma vez que os ensaios em laboratórios não conseguem reproduzir com total fidelidade as condições do meio.

De acordo com Gentil (1996, p.109)

Entre os numerosos métodos de estudo da corrosão eletroquímica, a polarização é fundamental. Esse método consiste em realizar uma eletrolise, onde se utilizam, como eletrodo e eletrólito, respectivamente, o metal e o meio cuja interação deseja-se estudar.

O ensaio proveem, graficamente, uma curva, chamada de curva de polarização. Nessa curva o potencial controlado pode ser de dois tipos, potenciocinética e potencioestática. No primeiro tipo mensura-se variação contínua do potencial de eletrodo em função do tempo. Na segunda mede-se a variação descontínua do potencial de eletrodo, que se modifica ponto a ponto e, simultaneamente, mede-se a corrente em cada ponto.

Os ensaios eletroquímicos, quando realizados em laboratório, utilizam-se de equipamentos eletrônicos específicos para a medição e controle das variáveis, como a corrente e o tempo. Para o ensaio é elaborado células de polarização, onde o corpo de prova do material em estudo é emergido na solução eletrolítica (eletrólito).

A montagem clássica da célula de polarização é composta por três eletrodos, um eletrodo com o material a ser estudado, chamado de eletrodo de trabalho, um eletrodo de referência e um contra eletrodo.

Para a realização dos ensaios geralmente são empregados potencioestatos/galvanostatos para, no caso do potencioestatos, o controle do potencial e leitura da corrente, e controle da corrente e leitura do potencial para o galvanostatos. Esses equipamentos são basicamente fontes de tensão ou corrente que são ligadas a amperímetros e voltímetros.

A importância do monitoramento da corrosão é definido por Gentil (1996, p.293) quando diz que o monitoramento é uma “forma sistêmica de medição da corrosão [...], com o objetivo de auxiliar a compreensão do processo corrosivo e/ou obter informações úteis para o controle da corrosão e das suas consequências.”

5.16 Motores aeronáuticos

Motores são máquinas capazes de transformar tipos de energia em energia mecânica. Dentro da indústria aeronáutica os motores são, em sua grande maioria, motores térmicos que utilizam energia térmica na geração de energia mecânica.

Dentro desses termos têm-se dois tipos de propulsão de aeronaves, propulsão a hélice e propulsão a reação. Na primeira a hélice empurra o avião para frente enquanto desloca o ar para trás, gerando a tração. Na segunda há os gases da combustão sendo expelidos para trás, deslocando o avião para frente.

Para o presente trabalho é de maior importância a explicação dos componentes e do funcionamento dos motores a hélice, mais especificamente os motores a pistão.

5.17 Motores a pistão

Os motores a pistão são amplamente utilizados na indústria aeronáutica, principalmente a de pequeno porte, por conta de suas características, sendo elas a boa potência para propulsão, flexibilidade para operar em diversos regimes e custo reduzido.

Patenteado em 1861 por Alphonse Beau de Rochas, o primeiro motor a pistão de quatro tempos foi construído pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto, que deu nome ao ciclo de Otto. Esse motor é alimentado por combustível, como gasolina, etanol e diesel, que é queimado em seu interior, a queima desse combustível faz com que seus gases se expandam e através de mecanismos gerem energia mecânica. Tem-se uma energia química, o combustível, transformada em energia térmica através da queima, e novamente transformada em energia mecânica através da expansão dos gases queimados.

O motor a pistão tem vários componentes para sua operação, sendo os principais cilindro, cabeça do cilindro, válvulas, velas, pistão, biela, eixo de manivelas, mancais e o cárter, podendo ser vistos na ilustração abaixo (Figura 11).

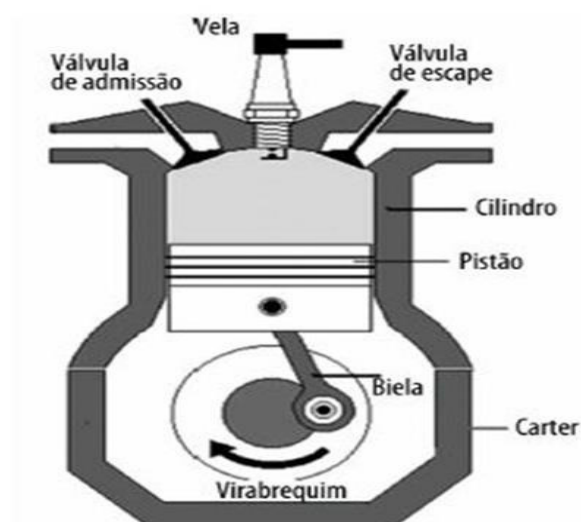


Figura 11. Componentes do motor a pistão
 Fonte: Blog Hangar 33, 2015.

O funcionamento do motor é dividido em quatro tempos, marcados pelo movimento do pistão, ascendente ou descendente.

1º tempo (Figura 12) – Há o movimento descendente do pistão, abertura da válvula de admissão e a mistura de ar combustível é ingerida para dentro do cilindro.

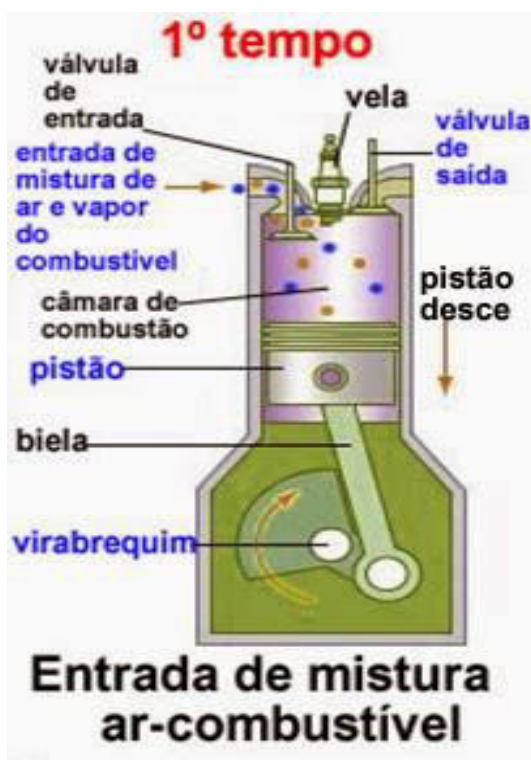


Figura 12. Primeiro tempo do motor
 Fonte: Blog Manutenção Aeronáutica, 2015.

2º tempo (Figura 13) – Com o movimento ascendente do pistão a mistura é comprimida, concentrando-se na cabeça do cilindro, geralmente curva.



Figura 13. Segundo tempo do motor
Fonte: Blog Manutenção Aeronáutica, 2015.

3º tempo (Figura 14) – Há o centelhamento da vela, causando a ignição e queima do combustível que expande através de seus gases, empurrando o pistão pra baixo, nesse momento há a transformação da energia térmica em energia mecânica, o pistão transfere as forças que sofre para a biela, que por sua vez faz o virabrequim, ou eixo de manivelas, rotacionar.

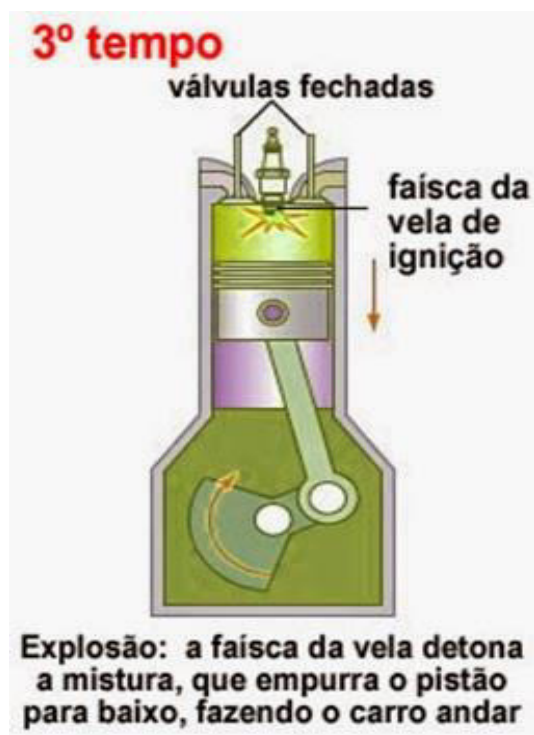


Figura 14. Terceiro tempo do motor
 Fonte: Blog Manutenção Aeronáutica, 2015.

4º tempo (Figura 15) – A válvula de escape é aberta e os gases são expelidos para fora do motor através do fluxo ascendente do pistão.

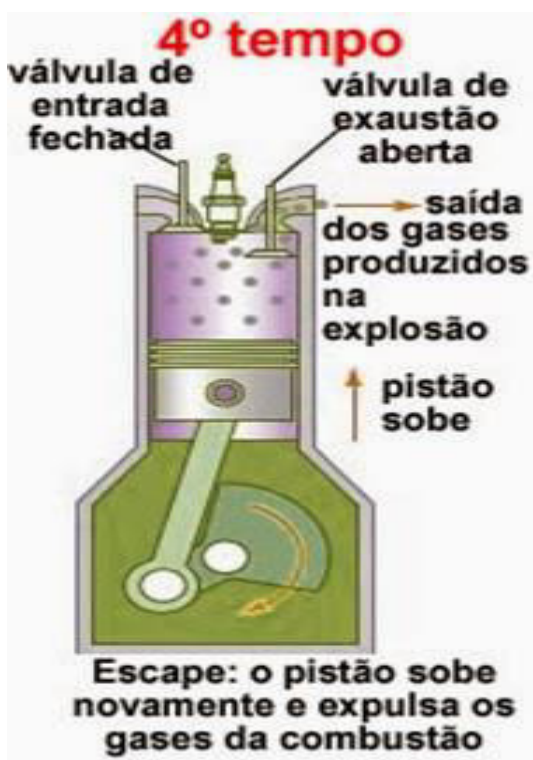


Figura 15. Quarto tempo do motor
 Fonte: Blog Manutenção Aeronáutica, 2015.

5.18 Componentes do motor a pistão

Como já citado, os motores a pistão têm diversos componentes que funcionam em conjunto. O cilindro é a câmara onde ocorre a combustão da mistura ar combustível, é dividido em corpo do cilindro e cabeça do cilindro. O corpo é o componente onde, em seu interior, ocorre os cursos do pistão, e na cabeça são montadas as velas e as válvulas de abertura e fechamento dos gases.

O pistão é o componente responsável por comprimir a mistura ar combustível e transmitir a força gerada pela expansão dos gases à biela. Entre o pistão e o cilindro há uma folga, para que os cursos ascendentes e descendentes sejam livres, e para vedar essa folga há anéis de segmento sendo eles os anéis de compressão que são responsáveis pela vedação da folga e os anéis de lubrificação, responsável por retirar o excesso de óleo das paredes do cilindro.

A biela é uma peça de metal, conectada ao pistão e ao eixo de manivelas, responsável por transmitir a força expansiva dos gases de um para outro. O eixo de manivelas é o componente giratório que recebe a forças dos gases e transforma em energia mecânica usada para rotacionar a hélice.

5.19 Motor *Lycoming* O-235-C2A

O *Lycoming* O-235-C2A (Figura 16) de 115 HP a 2.800 RPM é um motor a pistão de quatro tempos produzido pela *AVCO Lycoming*, refrigerado a ar, com 4 cilindros opostos horizontalmente, com 235 polegadas cúbicas de deslocamento. Utiliza um carburador e dois magnetos, com sistema de lubrificação do tipo cárter molhado.

O TBO do motor é de 2400 horas, ou seja, a cada 2400 horas de voo é necessário desmontar todo o motor e checar todos os componentes.



Figura 16. Motor *Lycoming* O-235-C2A
Fonte: *Lycoming*, 2017.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Materiais

O presente trabalho visa observar a ação da corrosão em um componente de motor aeronáutico, como já apresentado o motor é um *Lycoming* da família O-235. Este componente é um cilindro (Figura 17) concedido para experimentos por uma empresa prestadora de manutenção aeronáutica. A peça já apresentava indícios de corrosão (Figura 18), e por esse fato o proprietário da aeronave decidiu por substituí-lo. Segundo o site do fabricante o cilindro é usinado com uma liga de cromo, níquel, molibdênio e aço.



Figura 17. Cilindro utilizado na realização dos testes.
Fonte: O Autor, 2017.



Figura 18. Cilindro apresentando corrosão, vista do interior.
Fonte: O Autor, 2017.

Do cilindro foram cortados, com o uso de uma lixadeira, três amostras (Figuras 19, 20 e 21) de dimensões aproximadas, variando entre 130 e 140 mm de comprimento, 150 mm de largura e 120 mm de altura.



Figura 19. Amostras, vista superior
Fonte: O Autor, 2017



Figura 20. Amostras, vista lateral
Fonte: O Autor, 2017



Figura 21. Amostras, vista inferior
Fonte: O Autor, 2017

Os testes foram realizados com o uso do equipamento PGSTAT204 fabricado pela *Metrohm Autolab B.V.*, um potenciostato, controlado por um computador através do *software* NOVA 2.1. Os ensaios foram realizados no laboratório de físico-química da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal da Grande Dourados.

Para a preparação das amostras foi necessário cola epóxi para o embutimento, fio de cobre para o contato elétrico e solda de estanho.

A montagem da célula eletrolítica foi feita utilizando-se de um béquer com uma tampa apropriada para a posição dos três eletrodos, sendo eles o corpo de prova, o contra eletrodo de platina e o eletrodo de referência. Foi utilizado como solução eletrolítica uma solução de cloreto de sódio (NaCl).

6.2 Métodos

Para obter os dados necessários para a análise foram realizados dois testes seguidos e dependentes, primeiramente realizou-se a análise potenciométrica de redissolução (PSA – *Potentiometric stripping analysis*) a fim de determinar a OCP de cada corpo de prova, e posteriormente o ensaio de polarização linear.

Para a execução dos procedimentos necessitou-se fazer o preparo das amostras. Lixou-se cada amostra com a finalidade de se retirar os resíduos da

superfície que poderiam prejudicar o contato elétrico, e facilitar a soldagem. Após serem lixadas, soldarem-se as peças a um fio de cobre fino e encapado, com solda de estanho, testando-se cada solda para que fosse certificado a existência de contato elétrico.

Os testes foram executados tendo como área de contato a parte dos corpos de prova voltadas para o interior do cilindro, que é esférico e por esse motivo não foi possível utilizar as células eletroquímicas específicas do laboratório, sendo necessário a montagem dentro de um béquer com toda a amostra submersa, e devido a isso foi feito o embutimento das amostras em cola epóxi (Figura 22 e Figura 23), deixando livre apenas a área alvo do estudo.



Figura 22. Corpo de prova embutido.
Fonte: O Autor, 2017.



Figura 23. Corpo de prova embutido.
Fonte: O Autor, 2017.

Montou-se a célula eletrolítica em um béquer de 150 ml, anexando o eletrodo de trabalho, eletrodo de referência e o contra eletrodo a tampa do béquer com auxílio de fita adesiva, a fim de garantir que não haja contato entre si e quer não atinjam o fundo do béquer.

Conectou-se o potenciostato computador e o *software* NOVA inicializado (Figura 24). Os terminais do potenciostato foram ligados aos eletrodos, e só então despejou-se a solução no interior do béquer. Com a célula posicionada dentro da caixa de proteção (Figura 25) iniciou-se a análise potenciométrica, configurada para durar 60 minutos.

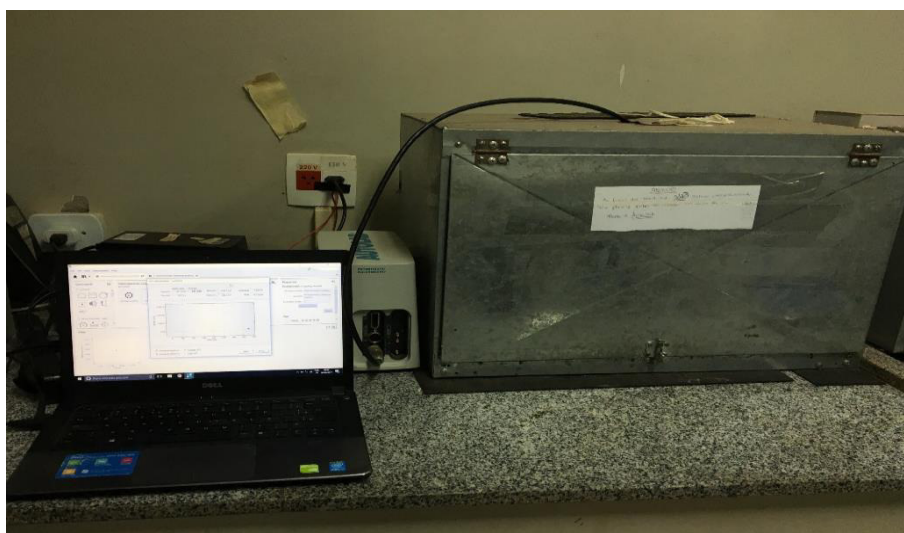


Figura 24. Computador conectado ao potenciostato.
Fonte: O Autor, 2017.

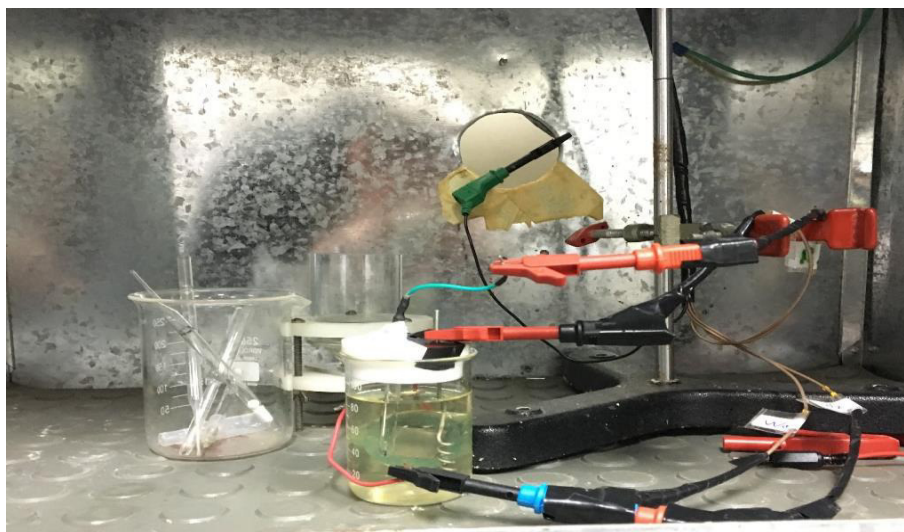


Figura 25. Célula eletrolítica montada.
Fonte: O Autor, 2017.

Ao termino da análise potenciométrica, inicializou-se a polarização linear, medindo-se o potencial de -0,3V até 0,6V em relação a OCP, com uma taxa de varredura de 0,001 V/s.

Realizou-se os ensaios nos três corpos de prova, com a obtenção de dados e gráficos separados para cada amostra.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O programa NOVA 2.1 da *Metrohm Autolab* além de configurar e operar os ensaios, também registra os dados obtidos e fornece gráficos e informações uteis para a análise dos resultados.

Ao final das análises potenciométricas, para cada amostra, gerou-se um gráfico do potencial, medido em Volts, ao longo do tempo, medido em segundos. A partir dos dados obtidos, confeccionou-se um gráfico comparativo entre as amostras (Figura 26).

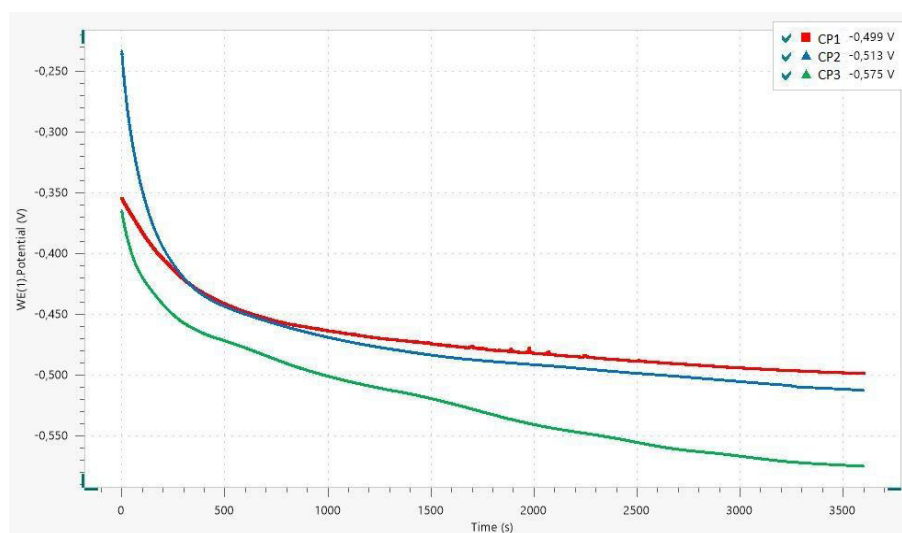


Figura 26. Gráfico do potencial ao longo do tempo.

Fonte: O Autor, 2017.

O gráfico (Figura 26), apresenta as plotagens das três amostras, sendo o corpo de prova 1 (CP1) a curva vermelha, o corpo de prova 2 (CP2) a curva azul, e o corpo de prova 3 (CP3) a curva verde.

Ao se observar o gráfico, pode-se notar alguns pontos a serem destacados, o primeiro deles é a tendência que as três amostras em nos primeiros 1000 segundos de apresentar uma curva acentuada, diminuindo sua inclinação ao atingir o potencial entre -0,450 V e -0,500V. Ao decorrer do tempo, nota-se a tendência de se chegar ao ponto de equilíbrio, onde as plotagens quase deixam de ser curvas para serem retas.

Ao final dos 3600 segundos obteve-se os seguintes valores de OCP para as amostras:

- Corpo de prova 1 (CP1): -0,49851V
- Corpo de prova 2 (CP2): -0,51253V
- Corpo de prova 3 (CP3): -0,57493V

Tem-se através do uso de média simples, uma OCP média de -0,529V, com uma variação máxima de 5,67% (0,030 V) para mais e 8,69% (0,046V) para menos.

Após o estabelecimento da OCP, passou-se para a polarização linear. Assim como na análise potenciométrica, o software armazena os dados obtidos e gera gráficos. Para a polarização linear elaborou-se gráficos do potencial (E), medido em volts, em função do $\log(i)$.

Plotou-se em um único gráfico os dados obtidos (Figura 27), a fim de facilitar a interpretação e fazer uma comparação entre os três corpos de prova. O corpo de prova 1 (CP1) apresenta a cor vermelha, o corpo de prova 2 (CP2) apresenta cor azul, e o terceiro corpo de prova (CP3) está representado através da cor verde.

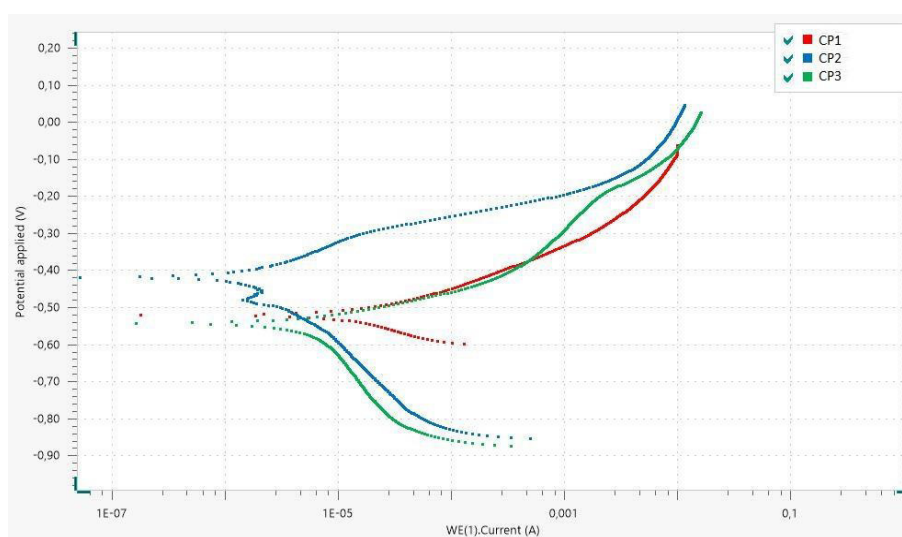


Figura 27. Gráfico obtido através do ensaio de polarização linear.

Fonte: O Autor, 2017.

Na observação dos gráficos é possível verificar a replicabilidade do ensaio, observa-se também as áreas catódicas dos CPs, até atingir a OCP, e então verifica-se a área anódica.

Obteve-se através do ensaio os potenciais de corrosão e a taxa de corrosão, sendo eles:

- Corpo de prova 1 (CP1): E_{corr} : -0,51963 V, taxa de corrosão: 0,087821 mm/ano;
- Corpo de prova 2 (CP2): E_{corr} : -0,41738 V, taxa de corrosão: 0,0081249 mm/ano;
- Corpo de prova 3 (CP3): E_{corr} : -0,54324 V, taxa de corrosão: 0,026802 mm/ano;

Após os ensaios, pode-se visualizar a corrosão sofrida pelas amostras (Figura 28, Figura 29 e Figura 30).



Figura 28. Corpo de prova 1 corroído
Fonte: O Autor, 2017.

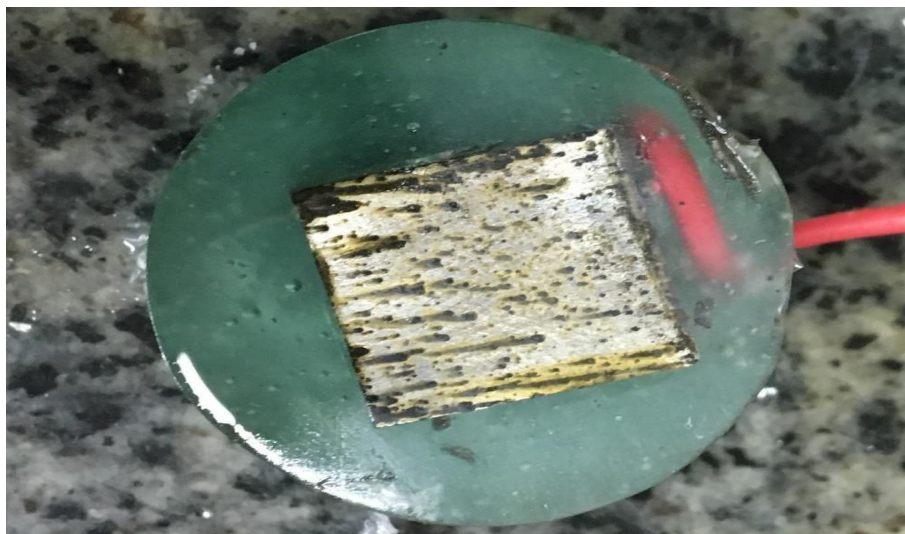


Figura 29. Figura 28. – Corpo de prova 2 corroído
Fonte: O Autor, 2017.

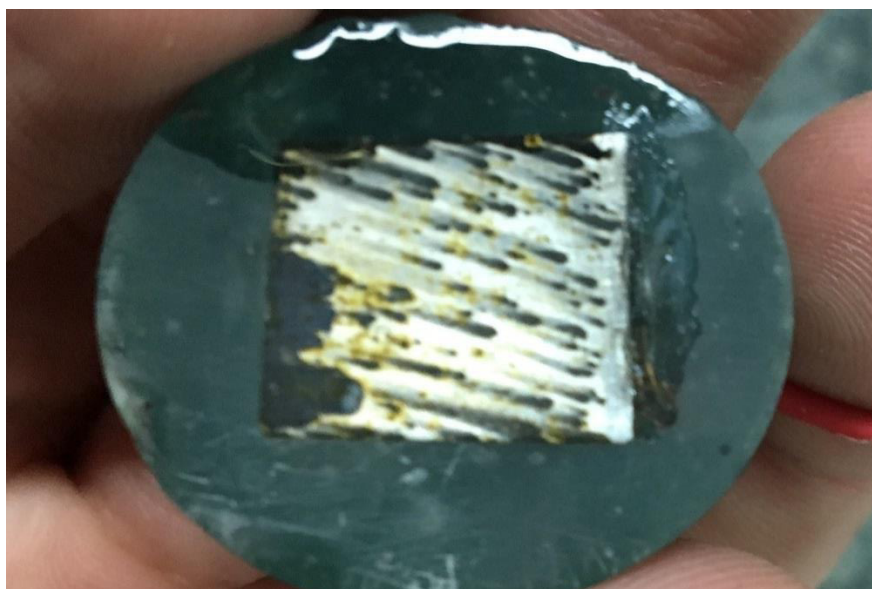


Figura 30. Corpo de prova 3 corroído
Fonte: O Autor, 2017.

Ao observar a olho nu, nota-se que os CPs 2 e 3 sofreram corrosão por pites, o CP 1 foi exposto a mais ensaios de forma experimental e por isso sofreu corrosão por completo.

CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados, observou-se o comportamento do material ao sofrer corrosão, verificou-se que a liga estudada possui um moderado potencial de corrosividade, entre 0,025 a 0,125 no geral.

O material sofreu corrosão por pites que posteriormente se espalhou por toda sua superfície. Pode-se notar a área anódica e catódica das curvas ao analisar o gráfico obtido com o ensaio de polarização linear.

Desenvolve-se as hipóteses para que o cilindro do motor tenha sofrido a corrosão durante sua vida útil.

- Negligencia durante manutenção, tendo o cilindro atingido sua vida útil e não sendo devidamente substituído antes da corrosão ser notada.
- Exposição a um meio corrosivo por vários períodos, como por exemplo, ao efetuar o corte do motor não ter queimado todo o combustível contido no cilindro, restando resquícios no seu interior ocasionando a corrosão;
- Não observância as recomendações do fabricante, como por exemplo deixar o motor fora de funcionamento por longos períodos, sendo necessário o funcionamento mínimo do motor para que não ocorra situações indesejáveis;
- Outras situações anormais não identificadas.

Verifica-se a importância da manutenção periódica e os cumprimentos de medidas preventivas a fim de prolongar a vida útil de equipamentos. A não observância desses fatores acarreta em perdas significativas para os operadores e proprietários das máquinas.

No caso do objeto em estudo as perdas foram apenas em questões de custo, sendo necessário a substituição de todos os cilindros do motor para a operação normal da aeronave.

Hipoteticamente, caso a corrosão continuasse a acontecer sem ser tomada ações corretivas, algumas situações poderiam se desenvolver, sendo elas:

- Perda de potência do motor, a corrosão aumentaria a folga entre o cilindro e o pistão, abrindo espaço para o vazamento de mistura ar-combustível.

- Aumento dos custos de operação, com a maior folga entre os componentes do motor o vazamento de combustível e a maior queima de óleo aumentariam o número de reabastecimentos.
- Parada do motor em voo, em uma possível falha estrutural derivada dos processos corrosivos.

Dos casos citados, o mais grave é a parada de motor em voo, configurando uma situação de emergência, que como dito, é uma das maiores causas de acidentes e incidentes aeronáuticos.

Métodos de ensaios laboratoriais são úteis na detecção das variáveis que afligem os objetos de estudos, são importantes tanto durante a elaboração de projetos quando durante e após o uso dos mesmos.

A manutenção visa não somente o prolongamento da vida útil de máquinas e equipamento, como também a segurança de funcionamento, do meio e das pessoas que o operam. Uma vez negligenciada ou não percebida a sua importância, situações anormais de operação podem ocorrer, trazendo consigo inúmeras ocorrências indesejáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRCRAFT ENGINES. **Operator`s Manual:** O-235 and O-290 series. Textron Lycoming, 4ª Edição, 1988.

BARROS, J. F. A. B. **Cuidados com o motor a pistão.** 2017. Disponível em: <http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/cuidados-com-o-motor-a-pistao_332.html>. Acesso em: 29 mar. 2017.

BENI, A. E. **Manutenção aeronáutica conforme:** Uma garantia para a segurança. Disponível em: <<http://www.pilotopolicial.com.br/manutencaoaeronauticaconformeumagarantiaparaaseguranca/>>. Acesso em: 07 ago. 2016.

CALLISTER, Jr, W. D. . **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais:** uma abordagem integrada. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 805 f.

SHACKELFORD, JAMES F, VIEIRA, DANIEL. **Ciência dos materiais.** 6.ed - São Paulo: Pearson, 2008. 556 f.

DAER, S. B. R. et al. **Metalógrafa colorida como instrumento de controle de qualidade de aços utilizados na construção civil.** Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/a-metalografia-no-controle-de-qualidade-de-acos-para-a-construcao-civil>>. Acesso em: 13 set. 2016.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. **Centro de investigação e prevenção de acidentes aeronáuticos.** Disponível em: <http://www.cenipa.aer.mil.br/cenipa/Anexos/panorama_2016.pdf> Acesso em: 15 jan. 2017.

FREITAS, D. S. **Técnicas para avaliação da corrosão.** Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Corrosao_Ensaio.pdf>. Acesso: 26 out. 2017.

HOMA, J. M., **Aeronaves e motores:** conhecimento técnico. 36ª edição. São Paulo: Asa. 2016. 189 f.

GENTIL, V., **Corrosão.** 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC. 1996. 345 f.

Hangar 33. **Motores a pistão em aeronaves monomotoras.** Disponível em: <<http://blog.hangar33.com.br/motores-a-pistao-em-aeronaves-monomotoras-parte-1/>> Acesso em: 29 mar. 2017.

OLIVEIRA, L. et al. **Processos de manutenção de aeronaves**. Fortaleza: CONTEC 2015. 2015.

PAIVA, G. T. N. F. **Alterações microestruturais decorrentes dos sucessivos reparos de solda tig aplicados ao longo da vida útil de uma estrutura aeronáutica crítica à segurança de voo**. 2011. 55 f.

QUEIROZ, A. K. et al. **Manutenção de aeronaves: uma abordagem mais que mecânica**. Campina Grande: 5º EnPAC. 2013. 4 f.

RASMA, E T. **Caracterização estrutural e mecânica do aço aisi/sae 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciência dos materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro. 2015.

REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL – **RBAC 43**: Manutenção, manutenção preventiva, reconstrução e alteração. Rio de Janeiro: ANAC, 2014.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras: uma abordagem prática**. Laboratório de ensaios mecânicos e materiais. 2010. 30 f.

SANTOS, F. R. S. **O uso do aço inox nas estruturas da fuselagem de aeronaves**. Ouro Preto. 2009. 73 f.

MAKE IT FROM. **SAE-AISI 4140 (SCM440, 1.7225, 42CrMo4, G41400) Cr-Mo Steel**. Disponível em: <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/SAE-AISI-4140-SCM440-1.7225-42CrMo4-G41400-Cr-Mo-Steel>>. Acesso em: 26 ago. 17.

SANTOS, F.J.N et al. **Avaliação da resistência à corrosão de eletrodepósitos de NI-FE em meio de NaCl**. Goiânia: 55º Congresso Brasileiro de Química. 2015. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2015/trabalhos/12/8204-21564.html>>. Acesso: 26 ago. 2017.

SERRANO, A. C. **Estudo da fadiga em liga de alumínio aeronáutico 7475-T761**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista. 2014. 100 f.

MANUTENÇÃO AERONÁUTICA. **Motores a pistão**. Disponível em: <<http://aeronaves2014.blogspot.com.br/p/motores-pistao.html>>. Acesso em: 29 mar. 2017.

VLACK, L. H. V.; MONTEIRO, E. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**, Rio de Janeiro: Elsevier. 2003. 567 f.

VILELA, J. A. B. M. et al. **Manutenção em aeronaves: fator contribuinte para a segurança de aviação**. R. Conex, SIPAER, v.1, n.2. p.85 – 99, mar. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. **Corrosão**: uma abordagem geral. ABRACO. 13 f.