

## A MANUTENIBILIDADE NO PROJETO DE AERONAVES: APORTES À SEGURANÇA DE AVIAÇÃO

Andrés Serrano <sup>1</sup>

Artigo submetido em 01/06/2010.

Aceito para publicação em 02/07/2010.

**RESUMO:** A aceleração do progresso tecnológico normalmente começa com uma maior ênfase na investigação, projeto e desenvolvimento para gerar produtos mais competitivos. É assim que o presente trabalho identifica a importância de conceituar ao projetista, na predição da manutenibilidade de um produto aeronáutico, indicando pontos vulneráveis no projeto que afetem às facilidades de manutenção. A área de manutenção vem ocupando cada vez mais uma posição estratégica em que a manutenibilidade permite, a partir de métricas, estabelecer padrões a serem considerados nas fases do projeto. O trabalho também aborda a manutenibilidade dos materiais compósitos. O intuito deste trabalho é fazer uma revisão conceitual da manutenibilidade e contribuir com a segurança aérea e aeronavegabilidade continuada das aeronaves.

**PALAVRAS CHAVE:** Aeronavegabilidade continuada. Manutenção. Manutenibilidade.

### 1 INTRODUÇÃO

A realização de qualquer trabalho de manutenção está associada a um risco, tanto em termos da realização incorreta de uma tarefa de manutenção específica, como em termos de impacto que a realização de uma tarefa possa produzir em outro componente do sistema ou ainda induzir uma falha no produto durante a manutenção.

Por essa razão foi criada a Engenharia de Manutenibilidade, para estudar a complexidade de fatores e recursos relacionados com as atividades de manutenção a serem realizadas pelo usuário para manter a funcionalidade de um produto e desenvolver métodos de quantificação, avaliação, previsão e melhora do mesmo.

Atualmente a segurança, funcionalidade e manutenibilidade são altas

---

<sup>1</sup>Mestrando em Segurança de Voo e Aeronavegabilidade Continuada pelo ITA. Especialista em Administração Aeronáutica, Engenheiro Aeronáutico, experiência na manutenção de aeronaves e engenharia de estruturas aeronáuticas, experiência na coordenação da Especialização em Segurança Aérea da Força Aérea Colombiana. easerrano7@gmail.com

prioridades para os projetistas durante a integração de componentes desenvolvidos em materiais compósitos e nos novos conceitos de projeto de aeronaves são cada vez mais aplicadas as vantagens desses materiais. Desse modo, estes têm encontrado crescente aplicação nas estruturas da aviação comercial devido ao alto desempenho, resistência, rigidez, melhor vida em fadiga, resistência à corrosão, e baixo peso entre outras características.

O presente trabalho está organizado em cinco itens. Seguindo a presente introdução é apresentado um breve histórico conceitual da engenharia de manutenibilidade e engenharia de manutenção. No terceiro item é abordado o fator humano na manutenibilidade, no quarto item é descrita a manutenibilidade dos materiais compósitos e finalmente as conclusões.

## **2 A ENGENHARIA DE MANUTENIBILIDADE E A ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO**

Knezevic (1993) define a manutenibilidade como a característica intrínseca de um produto, associado à sua capacidade de recuperar-se para o serviço ao realizar-se a manutenção necessária, conforme ao especificado pelo fabricante.

Na abordagem de Blanchard (1986) a manutenibilidade pode ser expressa em termos de frequência, tempo gasto e custos de manutenção. Estes termos podem ser apresentados como características diferentes, portanto, a manutenibilidade pode ser definida como uma combinação de fatores incluindo:

- A probabilidade que um produto seja mantido ou recuperado à configuração especificada pelo fabricante, ao longo de um determinado período de tempo gasto em manutenção e feita de acordo com procedimentos e recursos necessários;
- A probabilidade que haverá necessidade de manutenção  $x$  vezes em um determinado período, quando o produto opera em conformidade com os procedimentos prescritos pelo fabricante;

- A probabilidade que o custo da manutenção de um produto não exceda uma determinada quantia de dinheiro quando opera em conformidade com os procedimentos prescritos pelo fabricante.

Embora estas sejam três formas de quantificar teoricamente a manutenibilidade, a abordagem baseada no tempo gasto na manutenção é de longe o mais utilizado na prática, pela complexidade tecnológica do projeto e a importância de capacitação permanente dos profissionais de manutenção.

Dhillon (1999) destaca a preocupação com a facilidade da prática de manutenção na fase de elaboração do projeto, visando diminuir riscos potenciais que possam impactar na qualidade dos produtos e facilitando a tarefa do operador.

Anderson e Neri (1990) apontam a manutenção como: “... *procedimentos específicos, tarefas, instruções, pessoal qualificado, equipamento e recursos necessários para satisfazer a exigência de manutenção do sistema dentro de um ambiente real de utilização...*”.

No caso específico do setor aéreo, as práticas de manutenção atuam no desenvolvimento e implementação de soluções que garantam a aeronavegabilidade continuada do produto e de padrões de segurança de nível mundial.

De acordo com a ABNT NBR 5462 (1994), manutenibilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar as funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.

### **3 MANUTENIBILIDADE VS. MANUTENÇÃO**

A manutenibilidade é uma característica do projeto. Esta característica é a medida da capacidade de um item ser restabelecido à condição especificada pelo fabricante, quando a manutenção é feita por pessoal com as habilidades específicas usando os procedimentos prescritos e recursos previstos em cada nível de reparação, Hoff (1988) estabelece que a manutenibilidade é uma consideração do projeto e a manutenção é uma consequência do projeto.

Os requerimentos de manutenibilidade de um produto durante as fases do projeto são apresentadas na Figura 1.

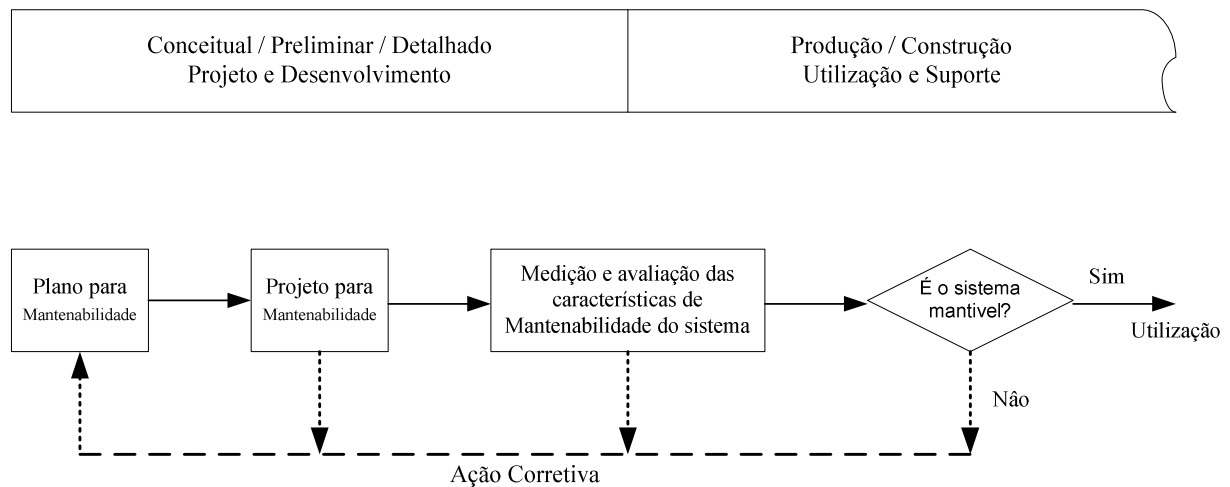


FIGURA 1 – Requerimentos de manutenibilidade (adaptado de BLANCHARD 1995).

Já a manutenção é essencialmente a resposta ao programa de manutenibilidade, ou seja, a série de ações necessárias para restabelecer ou manter o produto em condição de disponibilidade.

Nos primórdios da aviação segundo Kinnison (2004) a manutenção era realizada conforme a necessidade e muitas vezes as aeronaves precisavam de várias horas de manutenção para cada hora de voo. As principais atividades de manutenção consistiram em realizar o recondicionamento (*overhaul*) de quase toda a aeronave. Mesmo que os aviões e os seus sistemas eram bastante simples, a manutenção realizada desta forma tornou-se bastante caro. Com a crescente complexidade das aeronaves e seus sistemas, nos anos seguintes, esse gasto subiu notavelmente.

A abordagem moderna para a manutenção é mais sofisticada porque as aeronaves são projetadas para cumprir com níveis de segurança, aeronavegabilidade e manutenibilidade e um programa de manutenção detalhado é desenvolvido para cada novo modelo de aeronave. Este programa de manutenção pode ser adaptado por cada explorador para acomodá-lo à natureza de suas operações.

As ações de manutenção das aeronaves para Wu, et al. (2004) constituem um elemento essencial da aeronavegabilidade. São ações que permitem restaurar um item a uma condição operacional e consistem na inspeção, manutenção, reparação, modificação, *overhaul* e determinação da condição de operacionalidade do produto.

As ações de manutenção podem ser classificadas em três tipos:

**Manutenção preditiva** ou também conhecida por manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É definida por Kardec (2003) como a atuação realizada com base em modificação de parâmetros de Condição e Desempenho, cujo objetivo obedece a prevenir falhas no produto por meio do acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível.

As condições básicas para se adotar a manutenção preditiva são as seguintes:

- O produto deve permitir algum tipo de monitoramento/medição.
- O produto deve merecer esse tipo de ação, em função dos custos envolvidos.
  - As falhas devem ser oriundas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada.
  - Seja estabelecido um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico sistematizado.
  - Os fatores indicados para análise da adoção de política de manutenção preditiva são os seguintes.
    - Aspectos relacionados com a segurança pessoal e operacional.
    - Redução de custos pelo acompanhamento constante das condições dos equipamentos, evitando intervenções desnecessárias.
  - Manter os equipamentos operando de modo seguro por mais tempo.

- A redução de acidentes por falhas catastróficas em equipamentos é significativa. Também a ocorrência de falhas não esperadas fica extremamente reduzida, o que proporciona, além do aumento de segurança pessoal e do produto.

**Manutenção Preventiva.** Uma ação necessária para manter equipamentos, em uma condição operável por meio de serviços periódicos de manutenção e / ou substituição de componentes em intervalos especificados. A manutenção preventiva pode e deve ser convenientemente programada para evitar interferências com a operação.

O Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) 043 limita os seguintes trabalhos de manutenção preventiva, desde que não envolva operações complexas de montagem:

- Remoção, instalação e reparos de pneus.
- Substituição de amortecedores de trem de pouso constituídos por cordas elásticas.
- Colocação de ar e/ou óleo em amortecedores do trem de pouso.
- Limpeza e colocação de graxa nos rolamentos das rodas.
- Substituição de freios e contrachavetas defeituosas.
- Lubrificação que requeira apenas a desmontagem de itens não estruturais como tampas, capotas e carenagens.
- Entre outros trabalhos.

**Manutenção corretiva ou não programada.** É uma ação reativa, necessária quando o equipamento falha ou tem mal funcionamento não necessariamente afetando de forma crítica a segurança de voo, mas consequentemente diminui a disponibilidade e aumenta os custos operacionais.

A Figura 2 ilustra o ciclo da manutenção corretiva típico, o qual inclui um passo a passo geral: (1) detecção da falha, (2) isolamento da falha, (3) desmontagem para ganhar acesso, (4) reparação (ou remoção e reposição), (5) montagem e (6) verificação.

O processo de manutenção de aeronaves consiste no fluxo de tarefas destinadas a manter a segurança e aeronavegabilidade continuada das aeronaves em serviço, mas a execução de qualquer tarefa de manutenção implica a possibilidade de erro.

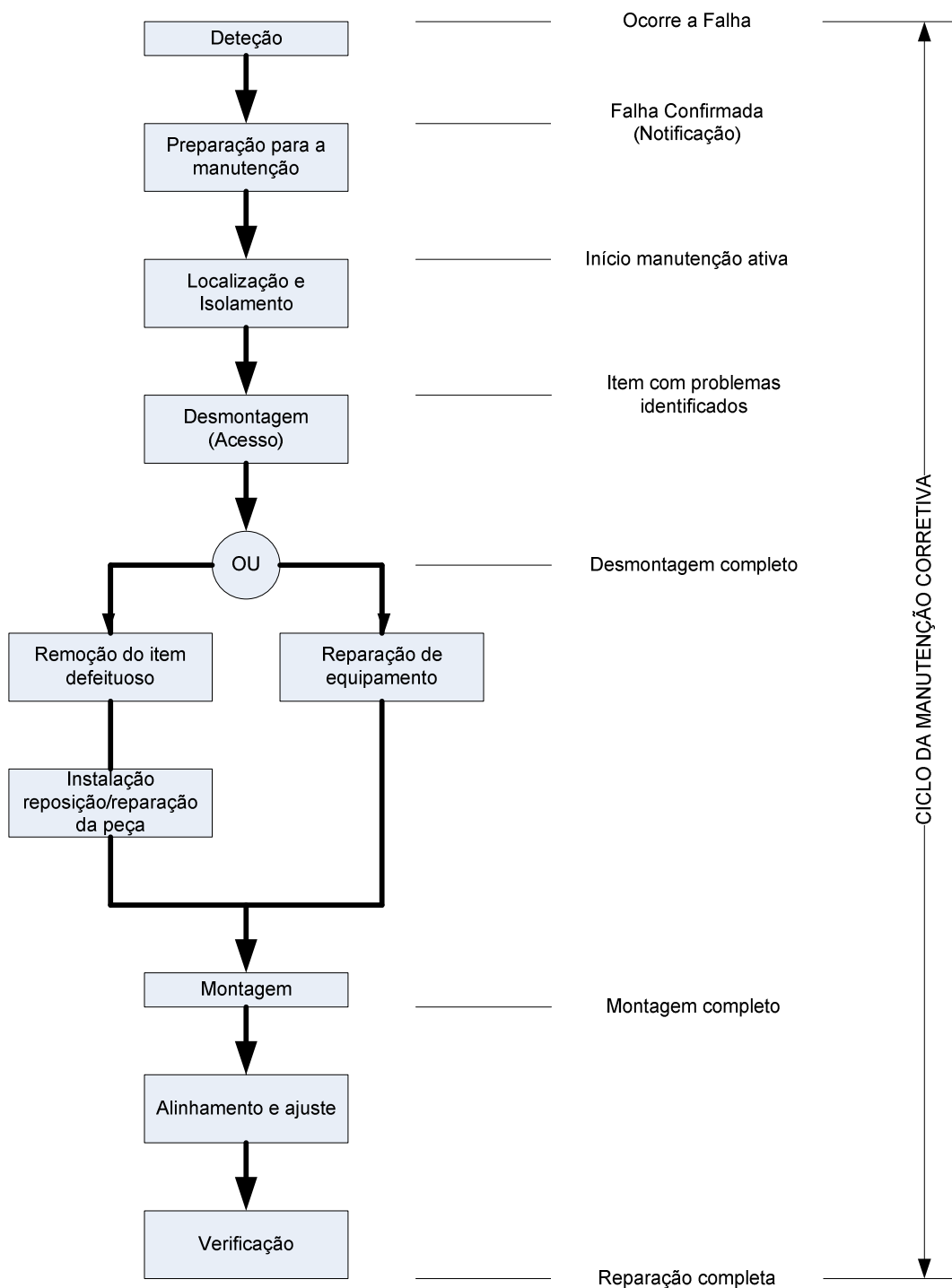


Figura 2 – Ciclo da manutenção corretiva (adaptado de BLANCHARD, 1995).

As tarefas específicas de manutenção são função da confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, e durabilidade (RAM-D pelas siglas em inglês) do equipamento e do ambiente operacional.

Entre mais fácil seja manter um produto, menor será a demanda sobre a habilidade e o número de pessoal de manutenção e em geral vai garantir uma redução do tempo de indisponibilidade (*downtime*) do produto. Assim, o tempo necessário para as ações de manutenção é uma função das características de manutenibilidade do equipamento, que podem afetar ou não a velocidade e a facilidade com que a manutenção pode ser realizada.

#### **4 O FATOR HUMANO NA MANUTENIBILIDADE**

Além de características físicas do projeto, o pessoal e as considerações do fator humano são de primordial importância. Estas considerações incluem a experiência do técnico, formação exigida, nível de qualificações, supervisão necessária, supervisão disponíveis, as técnicas utilizadas, a coordenação física e da força e do número de técnicos, e requisitos da equipe de trabalho.

A Figura 3 apresenta a interface entre a engenharia de manutenibilidade e a engenharia humana com três áreas principais de atividade, o projeto para manutenibilidade, a formação do pessoal de manutenção capaz de assumir a responsabilidade pela manutenção do produto, e o fornecimento de ferramentas e/ou equipamentos necessárias para permitir ao pessoal de manutenção cumprir suas responsabilidades. A formação e experiência do pessoal de manutenção é um fator importante para o desempenho das atividades de manutenção.

Os projetistas na medida do possível devem minimizar a probabilidade do erro humano ou minimizar as consequências quando este ocorrer. Como soluções para este problema pode se reduzir o número de tarefas de manutenção, projetar o produto para ser facilmente mantido segundo o ambiente de trabalho e/ou projetar características no produto de maneira a tornar impossível a execução de tarefas de forma incorreta, como por exemplo na montagem de peças.



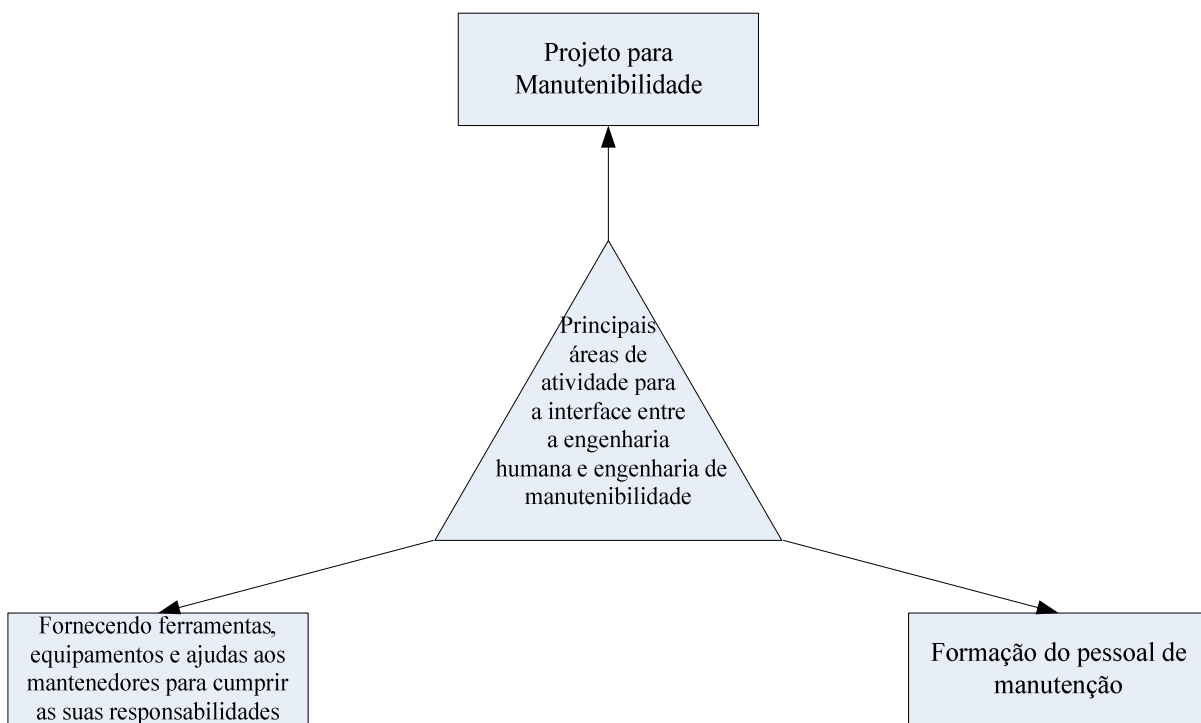


Figura 3 – Interface entre a engenharia humana e a engenharia de manutenibilidade (adaptado de DHILLON, 1986).

A Figura 4. apresenta um exemplo de um desenho pobre de acessibilidade onde para poder desmontar o motor da aeronave Gloster Javelin para manutenção ou substituição, era preciso desconectar o *jet pipe*. Para retirar esse tubo o pessoal de manutenção tinha que acessar por meio de uma escotilha e ser suspenso de cabeça para baixo e segurado pelos tornozelos por outro técnico para alcançar as braçadeiras e tubos que tiveram de ser desligados. O trabalho só poderia ser alcançado por meio do toque das peças e estas estavam fora do seu campo de visão.

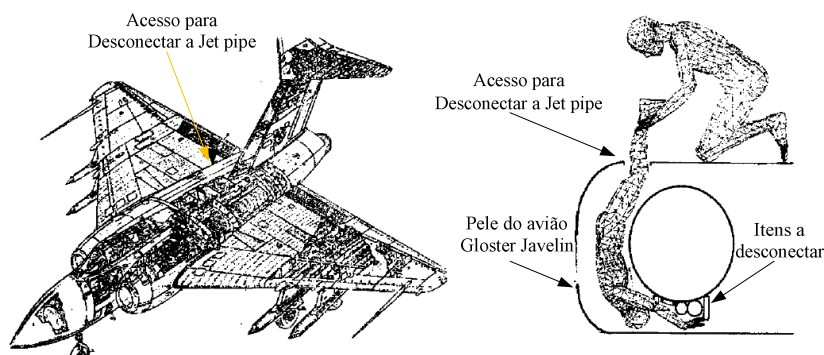


Figura 4 – Tarefas de manutenção no motor da aeronave Gloster Javelin. (adaptado de BLISCHKE; PRABHAKAR, 2003).

## 5 A MANUTENIBILIDADE DOS MATERIAS COMPÓSITOS

No começo as aplicações dos compósitos foram limitadas a estruturas secundárias, que não eram críticas para a segurança de voo, depois foram utilizados na fabricação de pás e rotores dos helicópteros e mais recentemente, têm sido usados no sistema de acionamento do rotor de alguns helicópteros. Como argumenta Ilcewicz (2005) a utilização de materiais compósitos em estruturas aeronáuticas comerciais e militares tem vindo a aumentar desde a década de 1970.

Para garantir a segurança aérea, a certificação de estruturas aeronáuticas fabricadas em compósitos tem sido documentada na AC 20-107A (*Composite Aircraft Structure*), que foi atualizada em 25 de Abril de 1984 (FAA, 1984). Atualmente, a expansão das aplicações no medio aeronáutico está dirigindo uma necessidade de mais orientação e política definitiva para apoio à certificação e manutenção.

Por outra parte os engenheiros e os inspetores envolvidos na certificação e avaliações de aeronavegabilidade continuada devem estar familiarizados com os princípios de tolerância ao dano dos materiais compósitos e as praticas relacionadas com a manutenção, incluindo inspeção e reparação. Desde a década de 1990, organizações como o CACRC e CMH-17 (anteriormente conhecida como MIL-HDBK-17) foram documentando material educativo, orientações de engenharia e normas. Já o CACRC (*Commercial Aircraft Composite Repair Committee*) é uma organização criada para desenvolver as normas internacionais, melhorar as praticas e reduzir os custos de manutenção, inspeção e reparação das estruturas compósitas.

Danos sub-superficiais tais como delaminação, porém, podem ficar sem ser detectados por longos períodos de tempo resultando em uma súbita falha catastrófica. É importante que os operadores de aeronaves estejam cientes dos corretos procedimentos de detecção e reparação das estruturas compósitas.

## **5.1 Falhas características dos materiais compósitos**

### **Delaminação**

Segundo Brimhall (2007) cada vez mais os materiais compósitos de matriz polimérica são utilizados em aplicações estruturais. Esses materiais são susceptíveis a delaminações nas camadas que os constituem o que podem debilitar consideravelmente as estruturas e torná-las particularmente perigosas. Isto ocorre quando cargas de cisalhamento são aplicadas entre lonas no laminado. Uma vez que as fibras são significativamente mais fortes a tensão do que a matriz, a matriz cria trinca e a delaminação ocorre.

### **Outros mecanismos de falha**

Defeitos na manufatura são uma das principais causas de falha prematura em estruturas compósitas. Isto é devido à dificuldade dos processos de manufatura das estruturas compósitas em comparação com estruturas metálicas, bem como o fato de a maioria das estruturas compósitas continuarem sendo manufaturadas com processos manuais e a produção automatizada utilizando autoclaves ainda é relativamente um novo processo e como resultado problemas de qualidade podem ocorrer.

## **6 CONCLUSÕES**

Os requisitos de Manutenibilidade para os produtos devem ser incorporados no início do projeto para este ser rentável; incluindo a manutenibilidade no projeto irão se reduzir consideravelmente o número de problemas operacionais relacionados com a manutenção, é as ações necessárias para manter ou restabelecer o produto a uma condição operacional na sequência de uma falha, melhorando a sua disponibilidade, e minimizando os custos do ciclo de vida.

A manutenibilidade deve estar intrinsecamente ligada aos fatores humanos para que o projetista tenha um entendimento das capacidades e limitações humanas

(visão, audição, percepção, memória, fadiga, etc), e as traduzca em projetos que otimizem o processo de manutenção, aumentem o desempenho e evitem danos ao equipamento, lesões pessoais ou o erro humano.

Segundo Clive (2007) o erro na manutenção é uma parte normal das operações de manutenção que podem ser abordados durante o processo de projeto para assegurar que o erro não vai levar ao comprometimento da segurança e da eficiência do produto.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica RBHA 043. **Manutenção, Manutenção Preventiva, Recondicionamento, Modificações e Reparos** Disponível em: <http://www.anac.gov.br/biblioteca/rbha/rbha043.pdf> Acesso em: 01 Dezembro, 2010.
- ANDERSON, R.T.; NERI, L. **Reliability centered maintenance**. London : Elsevier Applied Science, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-5462** : Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- BLANCHARD, B.S. VERMA, D.; PETERSON, E.L. **Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management**. New York : John Wiley & Sons, 1995.
- BLANCHARD, B.S. **Logistics engineering and management**. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey : Prentice Hall, 1986.
- BLISCHKE, W.R.; PRABHAKAR D.N. **Case studies in reliability and maintenance**. New Jersey : John Wiley & Sons, 2003.
- BRIMHALL, T. Composite automotive crush structures. **Composites Technology**. April, 2007. Disponível em: <<http://www.compositesworld.com/articles/composite-automotive-crush-structures.aspx>>. Acesso em: 11 março 2009.
- CLIVE, N. Maintainability design principles for aircraft maintenance error avoidance. **Communications in Dependability and Quality Management an International Journal**, v.10, n.4, p. 31-40, Dec. 2007.
- DHILLON, B.S. **Engineering maintainability**. Houston : Gulf Publishing Company, 1999.
- DHILLON, B.S. **Human reliability: with human factors**. Great Britain : Pergamon Press, 1986.
- ESTADOS UNIDOS. Federal Aviation Administration (FAA). **Composite Aircraft Structure**. Washington, DC, 1984.

HOFF, E.J. **Maintainability – A design parameter**. Technical Papers (A88-38701 15-05). Washington, DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), p. 463-468, 1988.

ILCEWICZ, L.B. **Safety & certification initiatives for composite airframe structure**. In: STRUCTURAL DYNAMICS AND MATERIALS (SDM) CONFERENCE, 2005, Austin, Texas. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, 2005.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro : Qualitymark, 2003.

KINNISON, H. **Aviation maintenance management**. New York : McGraw Hill, 2004.

KNEZEVIC, J. **Reliability, maintainability and supportability engineering - A probabilistic approach**. London : McGraw Hill, 1993.

STAPELBERG, R.F. **Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design**. Springer : London, 2009.

WU, H. et al. Methods to reduce direct maintenance cost for commercial aircraft. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**. v.76, n.1, p. 15-18, 2004.

## **THE MAINTAINABILITY OF THE AIRCRAFT PROJECT: CONTRIBUTIONS TO AVIATION SAFETY**

**ABSTRACT:** Acceleration of technological progress usually begins with greater emphasis on the research, design and development of more competitive products. That is how this paper identifies the importance of bringing concepts to the aircraft designer, in the prediction of the maintainability of an aeronautical product, indicating design vulnerabilities that may affect maintenance activities. The maintenance area has a strategic importance in that the maintainability allows, by means of metrics, the setting of standards that will be considered in the various stages of the project. This work also addresses the maintainability of composite materials. Its purpose is to do a conceptual review of maintainability, thus contributing to aviation safety and aircraft continued airworthiness.

**KEYWORDS:** Continued airworthiness. Maintenance. Maintainability.