



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
COORDENADORIA ACADÊMICA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2020

DANIEL **FERREIRA** VIEIRA DE MATTOS, Cap Eng

**RASTREIO INDIVIDUALIZADO POR AERONAVE: VOO SEGURO E  
GESTÃO EFICAZ DA FROTA DA FORÇA AÉREA BRASILEIRA**

Rio de Janeiro

2020

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
COORDENADORIA ACADÊMICA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2020

DANIEL **FERREIRA** VIEIRA DE MATTOS, Cap Eng

**RASTREIO INDIVIDUALIZADO POR AERONAVE: VOO SEGURO E  
GESTÃO EFICAZ DA FROTA DA FORÇA AÉREA BRASILEIRA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de MBA em Gestão Pública com Ênfase em Gestão de Projetos e Processos.

Área de Concentração: Emprego da Força Aérea.

Orientador: Carlos Eduardo José da Silva,  
Maj Esp Av

Rio de Janeiro  
2020

DANIEL **FERREIRA** VIEIRA DE MATTOS, Cap Eng

**RASTREIO INDIVIDUALIZADO POR AERONAVE: VOO SEGURO E  
GESTÃO EFICAZ DA FROTA DA FORÇA AÉREA BRASILEIRA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da  
Aeronáutica.

Aprovado por:

---

Wellington Azevedo dos Santos, Maj Inf  
EAOAR

---

Carlos Eduardo José da Silva, Maj Esp Av  
EAOAR

---

Professor MSc. André da Costa Gonçalves  
EAOAR

Rio de Janeiro

Julho de 2020

## RESUMO

Na Força Aérea Brasileira (FAB), a metodologia análise de tolerância ao dano (do inglês, *Damage Tolerance Analysis* - DTA) é a empregada para o cálculo da vida em fadiga das estruturas de suas aeronaves. Todavia, desde sua adoção tem sido utilizado o perfil de voo médio voado pela frota como base de cálculo. Estudos realizados com dados de voo coletados das aeronaves F-5 modernizadas mostraram que individualizando a análise por aeronave temos casos de emprego abaixo da média e outros de uso muito mais severo. No primeiro caso, a aeronave é enviada ao mantenedor precocemente, diminuindo-se a disponibilidade operacional. No outro, aumenta-se o risco de acidentes. Portanto, o rastreo individualizado por aeronave (do inglês, *Individual Aircraft Tracking* - IAT) deve ser adotado para o cálculo da vida em fadiga das aeronaves da FAB. Isso é explicado por termos aeronaves somente sendo operadas em épocas do ano em que se voam missões mais ou menos impactantes em termos de consumo da vida em fadiga. Há ainda o efeito do uso de cada esquadrão considerando nuances no emprego de cada tipo de missão específica, não obstante também, relevo e clima, dado as dimensões continentais do Brasil. Outros trabalhos mostraram resultados semelhantes e corroboram esses argumentos. Dessa forma, com a adoção do IAT temos uma gestão eficaz da frota, ao elevar-se a disponibilidade operacional de todas as aviações e mitigar o desperdício de recursos com manutenções desnecessárias, tem-se ainda a garantia da segurança de voo através da aplicação de metodologia baseada no uso real de cada aeronave.

**Palavras-chave:** Disponibilidade operacional. Força Aérea Brasileira. Gestão eficaz. Integridade estrutural. Rastreo individualizado por aeronave.

## 1 INTRODUÇÃO

Em 2008, com a modernização das aeronaves F-5E/F, iniciou-se o projeto de atualização do plano de inspeção da frota (SINGAPORE, 2002). O trabalho foi conduzido através da aplicação da metodologia de análise de tolerância ao dano (do inglês *Damage Tolerance Analysis* - DTA) fundamentado no perfil de voo médio correspondente a um ano de operação.

Após a conclusão da DTA, foram realizados estudos complementares, tendo sido verificada a severidade relativa entre diferentes missões para um mesmo operador, do mesmo tipo de missão em operadores distintos e o consumo da vida em fadiga real para cada aeronave. Os resultados mostraram que ao ser utilizado o perfil de voo individualizado para o cálculo da vida em fadiga, algumas aeronaves apresentavam consumo da vida bem abaixo da determinada pela DTA que se valeu do perfil de voo médio em seus cálculos. Assim havendo um desperdício de recursos e uma diminuição da disponibilidade promovidos pelo envio de tais aeronaves mais cedo do que necessário para a inspeção estrutural. De maneira análoga, algumas aeronaves estiveram submetidas a perfil de voo mais severo do que a média voada, o que aumenta de forma significativa os riscos de falha estrutural associados a fadiga.

A aplicação da metodologia de forma individualizada permitiria uma gestão preconizada pela economicidade do envio das aeronaves para manutenção no tempo correto e produzindo um efeito positivo no aumento da disponibilidade. Adiciona-se sua importância para a garantia da integridade estrutural das aeronaves. Portanto, o rastreamento individualizado por aeronave (do inglês, *Individual Aircraft Tracking* - IAT) deve ser adotado como ferramenta para cálculo da vida em fadiga das aeronaves da FAB.

A disponibilidade é um dos responsáveis por vultuosas discrepâncias entre os resultados obtidos pela aplicação da DTA numa abordagem baseada na média voada e no obtido através do rastreamento individualizado. Algumas aeronaves estiveram aptas ao voo nos esquadrões em períodos onde foram voadas missões sensivelmente mais ou menos severas que a média em termos de consumo de vida em fadiga. Outros fatores advêm das diferenças observadas na distribuição percentual de missões voadas e, de forma ainda mais contundente, diferenças obtidas nos perfis de voo de uma mesma missão nominal entre os diferentes operadores. Todos esses fatos advogam a favor da adoção, de forma disruptiva, do IAT como ferramenta de gestão eficaz e melhoria da segurança de voo da frota.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Em 1969, uma aeronave F-111 da USAF (Força Aérea do Estados Unidos), certificada para voar 4000 horas, sofreu falha estrutural catastrófica em voo com apenas 100 horas. A metodologia de projeto adotada era a chamada falha segura (do inglês *safe-life*), significando que o F-111 havia sido ensaiado até 16000 horas em laboratório (coeficiente de segurança de 4). Todavia, isso foi insuficiente para garantir sua integridade estrutural. A investigação do acidente determinou que a falha havia ocorrido por fadiga de um componente da asa, isto é, uma trinca cresceu até atingir um tamanho crítico em sua estrutura (SCHÜTZ,1996).

A USAF determinou então o início de estudos de uma nova sistemática de garantia da integridade estrutural. A norma MIL-A-83444 (USAF,1974) definiu a DTA como mandatória para todas as aeronaves operadas pela USAF. Em 1978, os requisitos foram também adotados pela aviação comercial (FAA, 1978).

Em 1988, na Base Aérea de Williams, EUA, ocorreu um acidente com uma aeronave F-5F vitimando instrutor e aluno. A aeronave acidentada havia voado mais severamente que o perfil de voo médio adotado pela análise de tolerância ao dano. Em 1991, foi proposto pela USAF que todos os operadores realizassem uma revisão da DTA baseada em seu uso da frota. Em 1992, a FAB participou desse programa que teve como foco as pequenas modificações sofridas pelas aeronaves desde o projeto original e, principalmente, as diferenças entre os perfis de voo real e o padrão teórico adotado pela fabricante.

Em 1996, foi criado no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) um núcleo de integridade estrutural, constituído de engenheiros aeronáuticos e mecânicos com especialização na área por meio de cursos de extensão e pós-graduação nível mestrado e doutorado. Em 1998, a FAB adotou a DTA oficialmente como metodologia para definição de vida em fadiga e garantia da integridade estrutural de suas aeronaves.

A DTA baseia-se no estudo da propagação de trincas por fadiga. A metodologia prevê o tempo necessário para que uma trinca hipotética cresça até seu tamanho crítico. Ao atingir esse comprimento, a estrutura é capaz de falhar mesmo estando abaixo do limite de carga previsto para seu material de fabricação. Essa abordagem permite o estabelecimento de um plano de inspeção e manutenção, sendo

baseada em um modelo matemático em que são considerados: propriedades mecânicas dos materiais, forma geométrica do componente e as cargas em serviço.

Na DTA da aeronave F-5E realizada em 1993 foi realizada a instalação de equipamento de aquisição e gravação de dados de voo em apenas cinco aeronaves da frota. Em 2008, a DTA das aeronaves F-5E/F modernizadas utilizou os dados gravados pelo computador de bordo integrado, contando inclusive com uma maior amostragem e um maior número de parâmetros registrados. Comparativamente, houve uma sensível evolução na abordagem tornando-a muito mais precisa. Além disso, em 2008, foi realizado a DTA para ambos os modelos E/F; e, por último, os resultados separaram o esforço para cada um dos dois esquadrões operadores das aeronaves F-5E/F modernizadas na época: o Primeiro Esquadrão do Décimo Quarto Grupo de Aviação (1º/14ºGAV), situado em Canoas, Rio Grande do Sul e o Primeiro Grupo de Aviação de Caça (1º GAvCa), em Santa Cruz, no Rio de Janeiro capital.

A DTA das aeronaves F-5 modernizadas foi concluída pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), em 2009, com o estabelecimento dos novos intervalos de inspeção a serem seguidos pelo mantenedor, Parque de Material Aeronáutico de São Paulo (PAMA-SP). Todavia, com toda a informação disponível realizou-se uma abordagem focada ainda na média do esforço sofrido pela frota, não executando o rastreo individualizado por aeronave.

Acrescenta-se que na época havia apenas dois operadores. Hoje, totalizam quatro, com a adição do 1º Esquadrão do 4º Grupo de Aviação (1º/4ºGAv), localizado em Manaus, Amazonas, e o 1º Grupo de Defesa Aérea (1º GDA), situado em Anápolis, Goiás. Isso posto, faz-se necessário a realização de nova análise de tolerância ao dano para garantir a integridade estrutural das aeronaves. A adoção do rastreo individualizado por aeronaves dispensaria esse processo cíclico de atualização.

## **2.1 A influência da disponibilidade**

É esperado que algumas missões possam ser mais ou menos severas que outras em termos de esforços e, por consequência, em consumo de vida em fadiga. Assim um conjunto de aeronaves de caça que estejam disponíveis para o voo dentro de um período do ano em que num determinado esquadrão esteja sendo realizado missões mais severas, apresentará um consumo de vida maior do que se estivessem sendo empregadas em um cenário de missões menos impactantes para o consumo

de vida em fadiga. Assim, teríamos no primeiro grupo um uso mais severo comparativo a média, tal que no segundo grupo um uso mais atenuado em comparação a esta.

## **2.2 O efeito do operador**

Diferentes operadores voam de maneira distinta quer seja considerado todo o possível espectro de missões de emprego de uma determinada aviação, quer seja ao ser comparado uma missão em específico. No primeiro caso, por exemplo, dentro do cenário da aviação de caça, um esquadrão pode realizar um maior número de missões de ataque aéreo que outro. Uma aeronave como o F-5 chega a desempenhar mais de dez tipos específicos de missão. Espera-se assim uma notória diferença na distribuição percentual de tipos de missões cumpridas, o perfil de missões, em diferentes esquadrões operadores de uma mesma aeronave. No segundo caso, as diferenças tornam-se ainda mais evidentes ao comparar-se uma mesma missão típica. Um tempo maior de deslocamento em cruzeiro em determinado operador já é capaz de reduzir significativamente a autonomia disponível para a execução da fase primária da missão. Acrescenta-se ainda a dimensão continental do território brasileiro, que traz nuances de relevo e de clima com impacto não somente no comportamento intrínseco das propriedades mecânicas dos materiais, mas também no emprego da frota. Todos esses fatos foram observados a partir da análise dos dados de voo coletados em 2008 na DTA das aeronaves F-5E/F modernizadas.

Os mesmos resultados foram obtidos por Newcamp, Verhagen and Curran (2017). Eles analisaram dados de voo coletados de três diferentes frotas de aeronaves: A-10 (bombardeiro), C-17 (cargueiro) e F-35A (caça), com o objetivo de verificar o impacto de operadores distintos no consumo da vida em fadiga. As diferenças devem-se não apenas ao perfil de missões, mas também ao voo típico associado a cada uma delas por esquadrão. Diferenças no uso eram esperadas, porém, foi encontrado disparidades da ordem de até 265%. Esse estudo mostrou a importância do IAT inclusive para a fase final do ciclo de vida da frota permitindo um melhor estabelecimento do plano de desativação. Fato também comprovado por Reymer et al. (2017) na gestão da frota polonesa de SU-22.

Evidentemente, o risco de falha estrutural é mitigado pela adoção de coeficientes de segurança. Todavia, uma abordagem mais precisa (individualizada) permitiria a redução de tais coeficientes frente o aumento da segurança e, por consequência, haveria uma natural economia de recursos. Registra-se aqui o alerta

que apesar da adoção de coeficientes ser uma forma de corrigir diferenças entre o consumo real de cada aeronave e a média voada, ela não impede que em situações extremas possa existir risco à integridade estrutural. É o caso, por exemplo, de utilizar-se uma ou mais aeronaves na missão de maior severidade em consumo da vida em fadiga por todo o tempo disponível em horas de voo entre inspeções.

### **2.3 O rastreo individualizado por aeronave (IAT)**

A norma MIL-STD-1530 (USAF, 1975) descreve o programa de integridade estrutural de aeronaves (do inglês, *Aircraft Structural Integrity Program - ASIP*) da USAF. O ASIP define os requisitos necessários para garantia da integridade estrutural ao mesmo tempo que gerencia custo e administra risco através de uma série de atividades, sendo aplicável a qualquer tipo de aeronave, a toda sua estrutura e ao seu ciclo de vida por completo. Ela estabelece o rastreo individualizado por aeronave como ferramenta para o gerenciamento da frota em termos de disponibilidade e segurança de voo, no que diz respeito à integridade estrutural.

Hongchul (2009) constatou que a metodologia baseada na individualização e no espectro voo-a-voo não apenas monitora o consumo real de vida em fadiga da aeronave promovendo inspeção no tempo adequado, mas também assegura a confiabilidade estrutural das aeronaves ao longo de sua vida em serviço. Hongchul (2012) revisou a metodologia aplicada ao programa IAT das aeronaves F-16 da República da Coréia constatando diferenças associadas ao tipo de missão e desvios no perfil de missões médio adotados – efeitos disponibilidade e operador. Os resultados mostram que a adoção da média prejudica a acuracidade da predição da vida em fadiga.

Iyyer et al. (2007) compararam à adoção da metodologia IAT com à adoção da média da frota para aeronaves P-3C das marinha norte-americana (USN) e força aérea britânica (RAAF). Os resultados do trabalho constataram um melhor aproveitamento e economia com manutenção como resultado da individualização, aproveitando-a inclusive como ferramenta de gestão da frota.

## **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A DTA tem sido utilizada como metodologia de cálculo da vida em fadiga das aeronaves da FAB desde 1996. Todavia, sua aplicação tem sido limitada ao uso da

média voada no período representativo de um ano de operação da frota. Estudos baseados em dados de voo oriundos da atualização da DTA das aeronaves F-5E/F modernizadas mostraram que aeronaves operadas em diferentes esquadrões estão submetidas a esforços distintos comparando-se um mesmo tipo de missão, fato explicado pelas nuances de doutrina de emprego, diferenças geográficas e climáticas. Os resultados também evidenciaram que é relevante o número de aeronaves disponíveis nos operadores apenas em períodos de realização de missões mais ou menos severas sob o aspecto de consumo da vida em fadiga, afastando-se assim significativamente da média de esforços adotada para aplicação da metodologia DTA.

Há situações em que uma ou mais aeronaves poderiam ser mantidas disponíveis nos esquadrões para o voo em vez de serem enviadas precocemente para inspeção no mantenedor. Por outro lado, há aeronaves sendo operadas no limite da segurança de voo por estarem voando de forma concentrada missões de grande severidade relativa de esforços, e, por consequência, alto consumo da vida em fadiga.

A análise complementar realizada a partir dos dados de voo obtidos na atualização da DTA das aeronaves F-5E/F modernizadas é aplicável a outros vetores. Podendo-se ter resultados ainda mais significativos dependendo do tipo de aviação, do número de operadores e sua localização geográfica, sendo assim necessário a adoção, de forma disruptiva, de uma abordagem individualizada de controle da vida em fadiga.

Assim, o rastreo individualizado por aeronave deve ser adotado para cálculo da vida em fadiga das aeronaves da FAB. O IAT possibilita gestão eficaz da frota, proporcionando redução de gastos com inspeções precoces e o consequente aumento da disponibilidade de aeronaves nos operadores, além de minimizar riscos a integridade estrutural.

O IAT tem relevância dado o impacto direto no melhor aproveitamento dos meios aéreos, ao reduzir-se gastos desnecessários com inspeções precoces e o consequente aumento do número de aeronaves disponíveis nos esquadrões; bem como, por outro lado, sua contribuição à segurança de voo. Cabe salientar que os procedimentos de análise podem ser estendidos a demais meios aéreos, podendo ter resultados ainda mais expressivos dependendo do número de operadores e tipo de aviação considerada.

## REFERÊNCIAS

- HONGCHUL, L. *Advanced aircraft service life monitoring method via flight-by-flight load spectra*. Tese (Doutorado em Engenharia) - State University of New York at Binghamton, Binghamton, 2009.
- HONGCHUL, L.; HWANJEONG, C.; SEUNGBAE, P. *Review of the F-16 Individual Aircraft Tracking Program*. *Journal of Aircraft*, v. 49, n. 5, p. 1398-1406, 2012.
- IYYER, N.; SARKAR, S.; MERRILL, R.; PHAN, N. *Aircraft life management using crack initiation and crack growth models - P-3C Aircraft experience*. *International Journal of Fatigue*, v. 29, n. 9, p. 1584-1607, 2007.
- NEWCAMP, J.M.; VERHAGEN, W.J.C.; CURRAN, R. *Fleet Management Decision Making with Individual Aircraft Tracking Data*. In: Proceedings of the 35th Conference and 29th ICAF Symposium, 2017, Nagoya. Proceedings..., 7-9 jun. 2017, p. 10.
- REYMER, P.; KURDELSKI, M.; LESKI, A.; LEŚNICZAK, A.; DZIENDZIKOWSKI, M. *Introduction of an Individual Aircraft Tracking Program for the Polish SU-22*. *Fatigue of Aircraft Structures*, v. 9, p. 101-108, 2017.
- SCHÜTZ, W. *A history of fatigue*. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 54, n. 2, p. 263-300, 1996.
- SINGAPORE TECHNOLOGIES AEROSPACE. **F-5 BR upgrade program**: Structural modification report. Singapore, 2002.
- FAA - FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Airworthiness Standards. Code of Federal Regulations*, 14 CFR §25.571 - Damage tolerance and fatigue evaluation of structure. Government Printing Office, 1978.
- USAF – UNITED STATES AIR FORCE. *Airplane Damage Tolerance Requirements. MIL-A-83444*. Wright-Patterson AFB, Ohio, 1974.
- USAF– UNITED STATES AIR FORCE. *Aircraft Structural Integrity Program. MIL-STD-1530*. Wright-Patterson AFB, Ohio, 1975.