

Taubaté, 06/09/14 a 28/11/14

TTEM 012/14

INFLUÊNCIA DA CONFIABILIDADE DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA DETERMINAÇÃO DOS INTERVALOS DE INSPEÇÃO EM FUSELAGENS PRESSURIZADAS MODIFICADAS

TESTING OF RELIABILITY OF THE INFLUENCE ON THE DETERMINATION OF NON-DESTRUCTIVE INSPECTION INTERVALS IN MODIFIED PRESSURIZED FUSELAGES

Signatários:

- **Paulo Roberto Pereira Manzoli¹**
- Prof. Dr. José Rubens de Camargo – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Giorgio Eugenio Ocare Giacaglia – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Francisco José Grandinetti – Universidade de Taubaté/FEG-UNESP
- Prof. Dr. José Rui de Camargo – Universidade de Taubaté

Finalidade: Apresentar uma visão de pesquisa e aplicação para uma metodologia de localização, monitoramento de trincas e aplicação de métodos avançados estatísticos para garantir a confiabilidade das aeronaves.

Duração: 3 meses

1 – Aluno do curso de Especialização em Engenharia Aeronáutica da Universidade de Taubaté (UNITAU/SP) - Rua Daniel Danelli, S/N, CEP 12060-440, Taubaté, SP - paulo.manzoli@gmail.com

Palavras chave: Confiabilidade de inspeções, Estruturas aeronáuticas, Inspeção não destrutiva, Propagação de trincas e Tolerância ao dano.

Resumo. A aplicação do conceito de estruturas tolerantes ao dano em aeronaves exige a aplicação de confiáveis métodos de inspeção não destrutiva, o que afeta diretamente a garantia da aeronavegabilidade. A taxa de propagação de trinca, a inspeção de campo e a qualidade do material estão sujeitas a incertezas que torna difícil um estudo de confiabilidade puramente determinístico. Muitos dos parâmetros e variáveis utilizados no controle de propagação de trincas têm um fator de dispersão que deve ser considerado na previsão da vida em fadiga. Existe uma probabilidade não nula de que uma trinca possa provocar uma falha, apesar da aplicação de sofisticados métodos de inspeção que são utilizados para que se encontre uma trinca antes que ela venha a provocar uma falha catastrófica. A capacidade de detecção de trincas também é regida por conceitos estatísticos. Embora a curva de probabilidade de detecção seja tradicionalmente dada em termos de tamanho do dano, na realidade essa probabilidade depende também de outras variáveis. A singularidade dos projetos customizados de instalação de antenas em fuselagens pressurizadas exigem precisos cálculos determinísticos para o levantamento da taxa de progressão de trinca e consequente determinação do intervalo para a realização das requeridas inspeções não destrutivas, uma vez que modelos estatísticos podem não refletir a realidade devido à ausência de suficientes amostras específicas e apropriadas. Um exemplo de estrutura de liga de alumínio apresentado mostra que em conjunto com adequados intervalos de inspeção, a garantia da manutenção da aeronavegabilidade resulta da confiabilidade das inspeções de monitoramento que também se submete aos imprevistos do processo. A precisão do método de inspeção empregado e a competência do inspetor tem um peso muito grande na aleatoriedade do processo de detecção de trincas e são importantes fatores na garantia da integridade da fuselagem modificada.

1. INTRODUÇÃO

O perigo de uma falha catastrófica por fadiga na estrutura de uma aeronave pode ser completamente eliminado ou pode tornar-se extremamente remoto se a estrutura for projetada para ter uma vida segura ou para ser à prova de falhas. Em uma primeira abordagem, a estrutura é concebida para ter uma vida segura mínima durante a qual se saiba que nenhum dano catastrófico possa ocorrer. No fim da vida, a estrutura deve ser substituída, mesmo que não haja sinais de fadiga (MEGSON, 2007). Se um componente estrutural não for economicamente substituível quando seu limite de vida segura tenha sido atingido, a estrutura completa deve ser descartada.

A abordagem de falha segura, conhecida como estrutura tolerante ao dano, se baseia no fato de que a falha de um membro de uma estrutura redundante não necessariamente conduz ao colapso da estrutura completa, desde que os membros restantes sejam capazes de suportar, de maneira repetida, a carga antes também suportada pelo membro que falhou, até que a presença da falha seja descoberta e devidamente reparada (NIU, 1999).

A aplicação do conceito de estruturas tolerantes ao dano em aeronaves exige a aplicação de confiáveis métodos de inspeção não destrutiva, tanto durante a fabricação de componentes como durante a vida em serviço, afetando diretamente a garantia da aeronavegabilidade. Os requisitos de certificação aeronáutica exigem que as estruturas das aeronaves sejam monitoradas antes e depois de sua utilização em serviço. Mesmo com altas qualidades de materiais e de mão de obra, a ocorrência de algum tipo de imperfeição durante a fabricação é inevitável, havendo uma distribuição típica de defeitos associados a um determinado processo de fabricação e de controle de qualidade.

A origem dos defeitos de um material pode ter lugar durante um estágio de fabricação ou durante processos de montagem, instalação ou em serviço. No cenário de pré-serviço, os defeitos podem estar presentes na matéria-prima ou podem ser introduzidos durante processos de usinagem, conformação, tratamento térmico, montagem, acabamento e transporte.

A qualidade na fase pré-serviço pode ser obtida essencialmente pela boa prática da engenharia, ou seja, por meio da seleção adequada das matérias-primas e garantindo que defeitos prejudiciais não são produzidos durante as fases de fabricação e montagem, antes de colocar o componente em serviço.

Durante a fase de serviço, um dos mecanismos importantes de deterioração é o efeito da fadiga em componentes mecânicos submetidos às cargas cíclicas. Os defeitos são gerados devido à deterioração do componente como o resultado da combinação de condições adversas de operação como temperatura elevada, pressão, carregamentos mecânicos e ambientes hostis. Desta forma, os ensaios não destrutivos são necessários em intervalos regulares e os resultados podem ser utilizados para a mitigação dos riscos da fadiga (SCHUELLER; KUNTIYAWICHAI, 2006). No entanto, as inspeções não destrutivas são passíveis de falhas, adicionando outras incertezas na determinação da vida em fadiga e no monitoramento de trincas. As inspeções não destrutivas normalmente dependem de muitos fatores incertos, tais como a condição da estrutura, o seu ambiente em serviço para inspeção e competência do inspetor.

A taxa de propagação de trincas, a inspeção de campo e a qualidade do material estão sujeitas a incertezas que torna difícil um estudo de confiabilidade puramente determinístico (PROVAN, 2006). Muitos dos parâmetros e variáveis utilizados no controle de propagação de trincas têm um fator de dispersão que deve ser considerado na previsão da vida em fadiga, dependendo da aplicação. Todas as propriedades dos materiais têm variações especificadas e aceitas, e, em boa parte dos casos as cargas estruturais também são variáveis estatísticas.

Existe uma probabilidade não nula de que uma trinca possa provocar uma falha, apesar da aplicação de sofisticados métodos de inspeção que são utilizados para que se encontre uma trinca antes que ela venha a provocar uma falha catastrófica. Por esta razão, numa curva de crescimento de trinca (Figura 1), um fator de dispersão tem sempre de ser considerado para determinar os intervalos de inspeção. O fator de dispersão depende da precisão dos dados utilizados, bem como da especificação que deve ser satisfeita.

A capacidade de detecção de trincas também é regida por conceitos estatísticos, onde a probabilidade de detecção de trincas para inspeções não destrutivas é uma importante variável para a análise de tolerância a danos e determinação de intervalos e métodos de inspeção. Adicionalmente, as curvas de probabilidade de detecção de trincas não são precisas para trincas menores que 12,7 mm (WHITTAKER; SAUNDERS, 1973), que é uma dimensão nada desprezível para uma fuselagem pressurizada construída em liga de alumínio.

Não havendo amostras suficientes para um levantamento estatístico preciso, como na elaboração de projetos customizados para a instalação de antenas ou de reparos estruturais em fuselagens, onde a análise de propagação de trincas é requerida, um estudo das condições para execução das inspeções não destrutivas especificadas no projeto deve ser efetuado para que haja uma confiabilidade suficiente para a detecção de trincas na região modificada da fuselagem. A Figura 2 representa qualitativamente o conceito de tolerância ao dano, onde a possibilidade de detecção de danos é representada durante o período em que a trinca cresce a partir do nível detectável até atingir o nível de ruptura. A quantificação da capacidade do método de inspeção não destrutivo e da probabilidade de detecção são importantes para se obter a estimativa realista para o monitoramento das falhas.

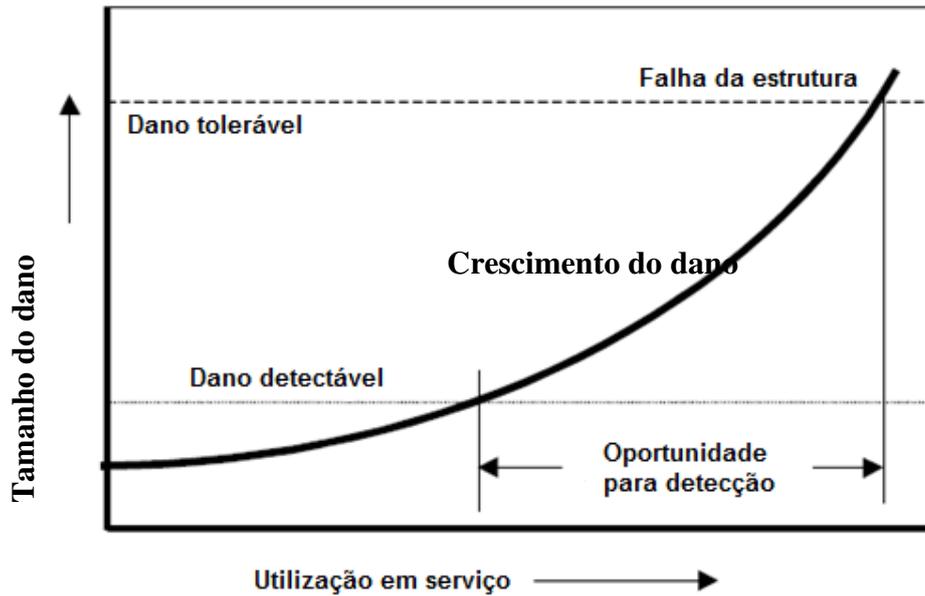


Figura 1 - Crescimento de trinca em função da operação (SINGH, 2000)

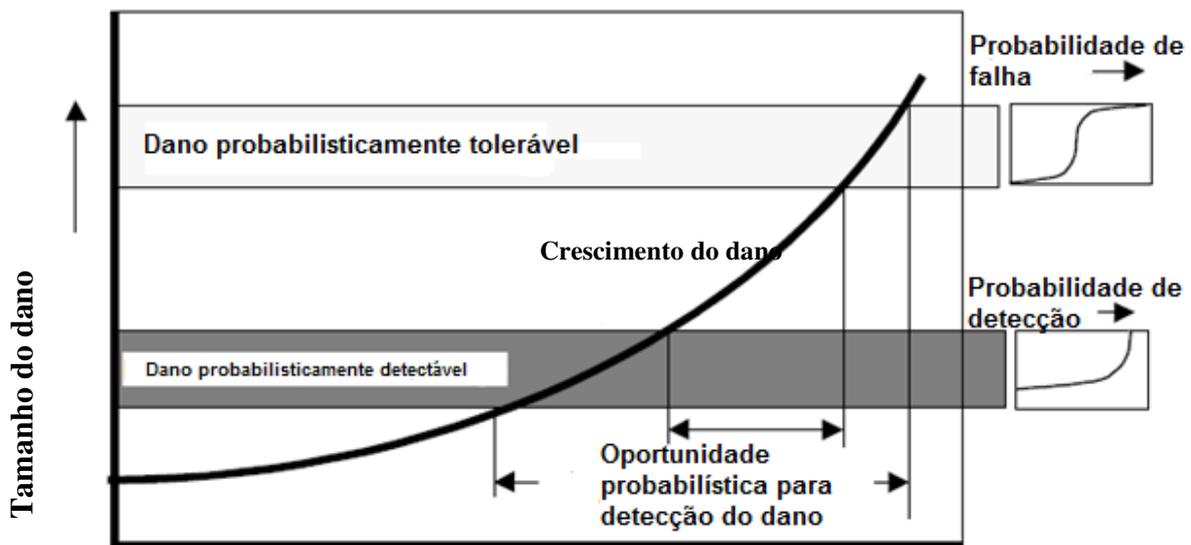


Figura 2 - Tolerância ao dano (SINGH, 2000)

2. CONFIABILIDADE DAS INSPEÇÕES

Embora haja um esforço considerável gasto em análises e testes, ainda existem sérias preocupações sobre a capacidade de quantificar adequadamente a confiabilidade das inspeções não destrutivas (LINCOLN, 1998). A confiabilidade de uma inspeção é basicamente o grau que um processo ou sistema de ensaio é capaz de atingir seu propósito, como a capacidade de identificar falhas maiores que uma dada dimensão específica. A eficácia de várias técnicas de inspeção é tipicamente caracterizada pela probabilidade de detecção através de curvas que relacionam o tamanho da trinca à probabilidade de detecção, sendo que a expectativa de encontrar um dano aumenta seguindo o incremento do tamanho do próprio dano. O grau de probabilidade de detecção

pode ser utilizado para diversos fins, incluindo o diagnóstico e prognóstico estrutural (ZHENG; ELLINGWOOD, 1998). Embora a curva de probabilidade de detecção seja tradicionalmente dada em termos de tamanho do dano, na realidade essa probabilidade depende também de outras variáveis. Danos em locais de difícil acesso tem uma probabilidade reduzida de ser encontrada, devido à dificuldade de se acessar o local. A competência do inspetor ou método de inspeção também são fatores importantes para determinar as curvas de probabilidade de detecção. O desenvolvimento de um modelo preciso de detecção de danos que podem levar em conta os efeitos da localização do dano e a competência do inspetor é uma tarefa importante, mas não está disponível na literatura.

A utilização da probabilidade de detecção de falhas como métrica na localização de trincas tem um papel crescente na quantificação das inspeções não destrutivas em estruturas. Em um cenário onde um componente é inspecionado após atingir uma fração de sua vida útil esperada, se defeitos não forem encontrados o componente pode continuar a ser utilizado durante o tempo adicional que levaria para as trincas atingirem o tamanho limite. Mais uma vez, os estudos de probabilidade de detecção são utilizados para quantificar esse limite de inspeção, não sendo necessariamente igual ao intervalo de inspeção determinado por métodos determinísticos. De outro modo, problemas imprevistos de durabilidade associados à operação podem exigir novas inspeções. Mais uma vez, os estudos de probabilidade de detecção são necessários para quantificar a sua eficácia e segurança no intervalo entre tais inspeções. Na Figura 3, a linha em negrito representa a variação da probabilidade de detecção em relação ao tamanho da trinca. A linha fina representa o limite de confiabilidade de 95%. A métrica para a qualificação refere-se a uma trinca com 90% de probabilidade de detecção com 95% de confiança (LINCOLN, 1998).

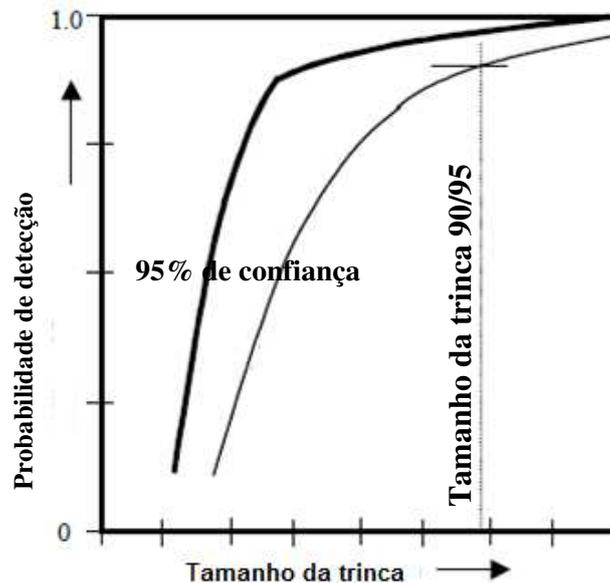


Figura 3 - Probabilidade de detecção de trincas (LINCOLN, 1998)

Num último exemplo, pode-se desejar determinar a probabilidade de detecção em componentes que são demasiadamente caros para se produzir nas quantidades necessárias para estudos de probabilidade de detecção. Assim, é necessária uma alternativa de abordagem empírica.

Como as técnicas de dimensionamento de estruturas tolerantes ao dano se tornaram mais amplamente utilizadas, as estruturas de aeronaves já são atualmente projetadas utilizando essa metodologia. Como consequência, o estudo da probabilidade de detecção de falhas se tornou mais necessário. Contudo, os estudos determinísticos para estimativa de crescimento de trincas e probabilísticos para detecção dessas mesmas falhas devem ser validados através de ensaios em corpos de prova de tamanho real ou através do monitoramento de uma frota de aeronaves de mesmo

modelo durante um período apropriado, pois grande parte da preocupação com a confiabilidade de inspeção é associada com a falta de compreensão da diferença entre o ambiente de laboratório e do ambiente de campo. Outra preocupação é o nível de competência necessária para o inspetor para refletir a probabilidade de detecção desenvolvida para o instrumento utilizado na inspeção (LINCOLN, 1998).

No estudo de probabilidade de detecção de falhas o objetivo principal é captar os efeitos de diversas variáveis que influenciam os resultados da inspeção, e, portanto, a probabilidade de detecção de um dado procedimento. O custo relacionado pode ser grande, sendo necessário o estabelecimento de um procedimento mais eficaz.

No mesmo período de tempo em que os métodos determinísticos e probabilísticos se tornaram uma métrica para a gestão da integridade estrutural, a capacidade de modelos computacionais para simular os resultados de inspeções aumentou significativamente (THOMPSON, 2005). Esses modelos podem ser utilizados para quantificar os efeitos de uma série de variáveis sobre uma inspeção. A capacidade de prever teoricamente os efeitos das variáveis sobre o resultado de uma inspeção reduz potencialmente a necessidade de captar esses efeitos empiricamente, reduzindo o tempo e o custo de estudos para levantamento de dados.

Os critérios de inspeção são essenciais para a mensuração do desempenho do procedimento. O conhecimento do comportamento real da trinca é de grande importância, até mesmo suposições secundárias equivocadas podem influenciar os resultados significativamente. De maneira separada à determinação do comportamento da trinca desenvolvido por modelos matemáticos, o conhecimento obtido através da desmontagem da estrutura é também muito importante.

Projetos customizados de reparos ou de modificações em fuselagens que são aplicados em poucas aeronaves, podendo ser até mesmo exclusivos de uma única aeronave, tornam inviáveis os controles estatísticos de monitoramento de crescimento de trincas bem como também o estudo da probabilidade de detecção das mesmas e modelagens computacionais sofisticadas. Em consequência, a confiabilidade das inspeções não destrutivas efetuadas deve ser mensurada considerando os fatores que podem influenciar na execução dessas inspeções.

3. TIPOS DE INSPEÇÃO

Em áreas modificadas ou reparadas de fuselagens construídas com chapas de alumínio rebatadas, as inspeções não destrutivas recomendadas são as por métodos visuais detalhados, líquidos penetrantes e correntes parasitas, sendo abaixo explicadas:

1. Inspeção visual detalhada é uma inspeção visual aprofundada de um componente específico, instalação ou conjunto para a detecção de danos, falhas ou quaisquer discrepâncias. A desmontagem de subcomponentes, limpeza e a utilização de ferramentas (lanterna, espelho, boroscópio, lente de aumento, câmera, etc.) podem ser necessárias para este tipo de inspeção.
2. Inspeções por correntes parasitas são utilizadas para detectar fissuras na superfície ou próximo da superfície de materiais metálicos e para detectar desgastes de metais devido à corrosão. Técnicas de correntes parasitas de alta frequência podem ser aplicadas em componentes ou conjuntos, onde a área defeituosa é acessível para contato direto com a sonda. As técnicas de baixa frequência são utilizadas para detectar trincas ou corrosão em camadas internas de estruturas. A inspeção é realizada através da indução de correntes parasitas na área inspecionada e as variações do campo induzido são observadas eletronicamente.
3. A inspeção por líquido penetrante é usada para detectar pequenas fissuras ou descontinuidades abertas em superfícies que não são visualizadas por uma inspeção visual normal. Pode ser usada na maioria dos componentes e conjuntos acessíveis para a sua

aplicação. A inspeção é realizada através da aplicação de um líquido que penetra através dos defeitos da superfície. O excesso desse líquido é então removido da superfície e reveladores adequados são aplicados para destacar os locais onde o penetrante remanescente assentou. Indicações visuais na superfície são obtidas pela utilização de corantes fluorescentes.

Para trincas previstas com dimensões maiores que 1,27 mm de comprimento em chapas com espessuras menores que 1,905 mm pode-se utilizar o método de correntes parasitas. Em chapas com espessuras menores que 2,54 mm pode-se utilizar o método de líquidos penetrantes. Em trincas com comprimento acima de 25,4 mm pode-se utilizar inspeções visuais detalhadas, com uso de lentes de aumento (RUMMEL; MATZKANIN, 1997; LINCOLN, 1998).

O comprimento inspecionável da trinca no momento da inspeção pode ser significativamente diferente do comprimento total da trinca obtido através de cálculos da mecânica da fratura, pois há diversos fatores de influência, como a localização e a direção da trinca e o método de inspeção. Se inspecionada visualmente, a trinca pode ser detectável quando atingir 25,4 mm, dependendo do lado inspecionado (WHITTAKER; SAUNDERS, 1973). Para tamanhos inferiores a 25,4 mm os métodos de correntes parasitas e de líquidos penetrantes são os mais utilizados para esse tipo de inspeção. A figura 4 mostra as curvas de detecção de trincas para os métodos de inspeção citados.

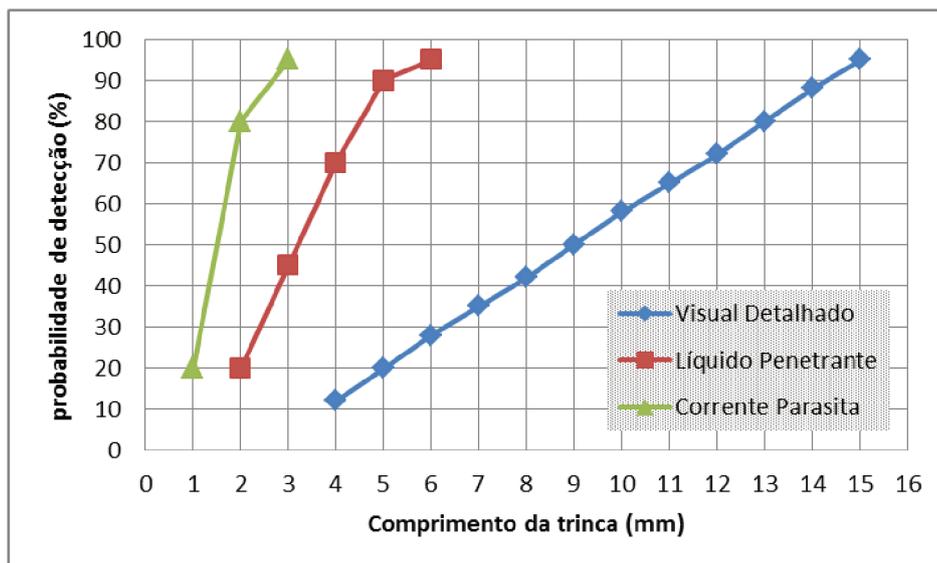


Figura 4 – Probabilidade de detecção de trincas (por método de inspeção) – adaptado de Ratwani (1996)

4. FATORES DE INFLUÊNCIA

Com a aplicação do conceito de estrutura tolerante ao dano, o objetivo da inspeção não é detectar a menor trinca possível, mas se o tamanho da trinca encontrada está dentro do máximo tolerável com a certeza do método de controle que o procedimento permite. O projetista do reparo ou da modificação deve fornecer os dados necessários para o acesso à área que deve ser inspecionada, os métodos de inspeção permitidos e os limites de danos que podem ser encontrados.

Uma vez que uma trinca é detectada durante uma inspeção, ela é reparada, ou, caso seja permitido, permanece em serviço, sendo reparada posteriormente durante um evento de manutenção. Em ambos os casos o reparo deve ser feito, mais cedo ou mais tarde para evitar que a trinca atinja sua dimensão crítica e cause uma falha catastrófica. Um reparo sem falhas é praticamente impossível de se alcançar. O reparo remove a extremidade da trinca por onde ela se propaga, mas muitas vezes

deixa para trás potenciais pontos de iniciação de outras trincas que podem se desenvolver em futuras operações. Por esta razão, a hipótese de uma estrutura perfeita após um reparo/modificação e inspeção não seria conservativo. Embora o efeito da distribuição de pequenos danos no reparo de trincas não ser imediato, pode ter um grande efeito sobre a probabilidade de falha da estrutura e o número de trincas detectadas nas inspeções posteriores da aeronave (TONG, 2001).

A probabilidade de detecção é definida como a probabilidade de encontrar uma falha de um tamanho específico, utilizando um determinado procedimento de inspeção executado por um inspetor treinado. Há alguns fatores que influenciam na probabilidade de detecção. Normalmente, esses fatores tendem a degradar o desempenho das inspeções abaixo dos níveis teóricos determinados. Consequentemente, devem ser adotados procedimentos rígidos para minimizar a influência desses fatores:

1. Fatores humanos e inspetores qualificados;
2. Acesso à área de inspeção;
3. Procedimento específico validado e escrito;
4. Precisão do equipamento;
5. Repetitividade de medida;
6. Tamanho detectável de trinca;
7. Ruídos e interferências;
8. Padrões de referência;

Todos esses fatores devem ser considerados para a execução de uma inspeção confiável. A causa mais frequente para um desempenho não confiável de uma inspeção é a utilização de métodos impróprios na engenharia (RUMMEL; MATZKANIN, 1997). O processo para se chegar a inspeções confiáveis consiste nas seguintes etapas:

1. Análise de tolerância ao dano da área;
2. Desenho de engenharia mostrando a localização e a orientação das prováveis trincas e suas respectivas curvas de crescimento;
3. Especificação dos materiais envolvidos e suas espessuras;
4. Métodos de inspeção selecionados com base no acesso e no tamanho detectável da trinca;
5. Concepção e fabricação da estrutura simulada;
6. Fabricação de padrões de referência de vários tamanhos;
7. Determinação de procedimento preliminar e do tamanho detectável de trinca;
8. Finalização de procedimento e verificação em aeronaves operacionais;
9. Procedimento revisado pelo fabricante, operador e órgão regulador antes da liberação para aplicação;
10. Aplicação do procedimento e revisão, se necessário;

O ponto mais importante no processo é a determinação do tamanho mínimo detectável para a trinca e o estabelecimento do limiar para a inspeção, o que fornece duas ou mais inspeções antes que a trinca atinja o seu tamanho crítico. Em projetos customizados de reparos ou de modificações em fuselagens que são exclusivos de poucas aeronaves, as ausências de dados estatísticos e de padrões de referência corroboram a necessidade da confiabilidade baseada em fatores que podem influenciar a execução das inspeções.

5. A INFLUÊNCIA DOS FATORES HUMANOS

A influência do fator humano é reconhecida em todos os trabalhos de manutenção. É difícil defini-los e quantificá-los, mas isso não significa que não seja possível reduzir as deficiências relacionadas a eles. Várias características são discutidas em diversos trabalhos, podendo ser divididas em três grupos:

1. Experiência e conhecimento do inspetor;
2. Aspectos psicológicos;
3. Aspectos fisiológicos;

É reconhecido que os inspetores devem ter uma formação profissional completa em técnicas de inspeções não destrutivas e experiência prática em serviço durante um período substancial. A formação pode ser feita em diferentes níveis e ser dirigida para técnicas específicas, e até mesmo para um determinado tipo de aeronave, conforme discutido por Beverly (1998). A indústria aeronáutica também requer que os inspetores sejam qualificados (HAGEMAIER, 1998; LARIVIERE; THOMPSON, 1998). Os fabricantes de aeronaves desenvolvem processos de inspeção para casos específicos, de tal forma que um inspetor pouco experiente possa ser capaz de fazer a inspeção sem maiores problemas. De acordo com Hagemaiier (1998), os erros humanos devem ser superados através de uma formação adequada e da aplicação de procedimentos de inspeção normatizados. De acordo com Spencer (1998), o desenvolvimento de um procedimento de inspeção deve ser feito em cooperação entre o laboratório e as equipes de inspeção de campo.

O psicológico e a situação fisiológica do inspetor em seu ambiente de inspeção podem influenciar na execução do trabalho e na interpretação dos resultados (HAGEMAIER, 1998). Há situações onde as inspeções são realizadas em condições muito difíceis. No entanto, mesmo em boas condições, devido à natureza repetitiva do trabalho, não se deve esquecer que as inspeções para identificação de fissuras provocadas por fadiga podem levar a distração do inspetor, pois o executante está à procura de trincas, que na grande maioria dos casos não estão presentes (HAGEMAIER, 1998; BEVERLY, 1998). O fator humano pode ser eliminado através do desenvolvimento de técnicas automatizadas de inspeção. Porém, a execução automática de inspeções de trincas provocadas por fadiga em complexas estruturas de aeronaves não são realizadas facilmente.

6. EXEMPLO DE CENÁRIO PARA DETECÇÃO DE TRINCA

O exemplo aqui mostrado é baseado numa fuselagem pressurizada, construída em liga de alumínio e modificada pela instalação de uma antena, sendo o reforço (doubler) e a trinca proposta mostrados na Figura 5. A comparação da curva de crescimento da trinca mostrada na Figura 6 com a curva de probabilidade de detecção mostrada na Figura 7, permite que o intervalo entre as inspeções necessárias seja definido. O comprimento crítico da trinca determinado neste exemplo é de 29,87 mm. A trinca inicial adotada é de 9,87 mm e o comprimento inspecionável da trinca baseia-se numa probabilidade de 0,90 de detecção a 2,54 mm (ponto D da curva de probabilidade de detecção na Figura 7). O limite de segurança é o tempo para que a trinca inicial (ou trinca cujo tamanho seja detectável pela inspeção não destrutiva) cresça até atingir o comprimento crítico. Conforme a simulação numérica, o comprimento adicional à trinca detectável ocorre com 7.360 ciclos, resultante da falha do segundo rebite da linha de propagação da trinca. O limite de segurança foi dividido por três

na adoção do programa de inspeção de tolerância a danos. Por conseguinte, a primeira inspeção foi delimitada com 20.373 ciclos de voo.

No entanto, como as inspeções visuais detalhadas são recomendadas para trincas com comprimento acima de 25,4 mm, o uso de técnicas de inspeção por líquidos penetrantes ou por correntes parasitas, se faz necessário para todas as inspeções programadas para a área modificada pela instalação aqui exemplificada, tendo em vista a pequena diferença (4,47 mm) entre o comprimento crítico da trinca (29,87 mm) e o comprimento detectável pelo método visual (25,4 mm). Essa distância de 4,47 mm é percorrida pela trinca em 4.340 ciclos de voo, calculado através da diferença entre o número de ciclos necessários para que a trinca atinja seu comprimento crítico e o número de ciclos necessários para que a trinca seja detectável através de uma inspeção visual detalhada.

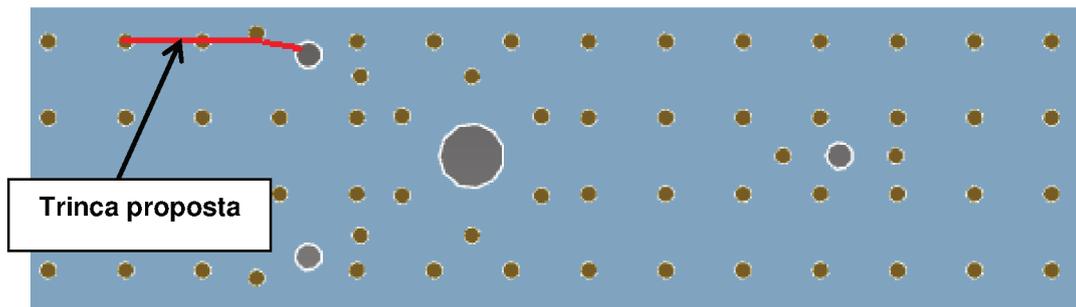


Figura 5 - Cenário de propagação de trinca

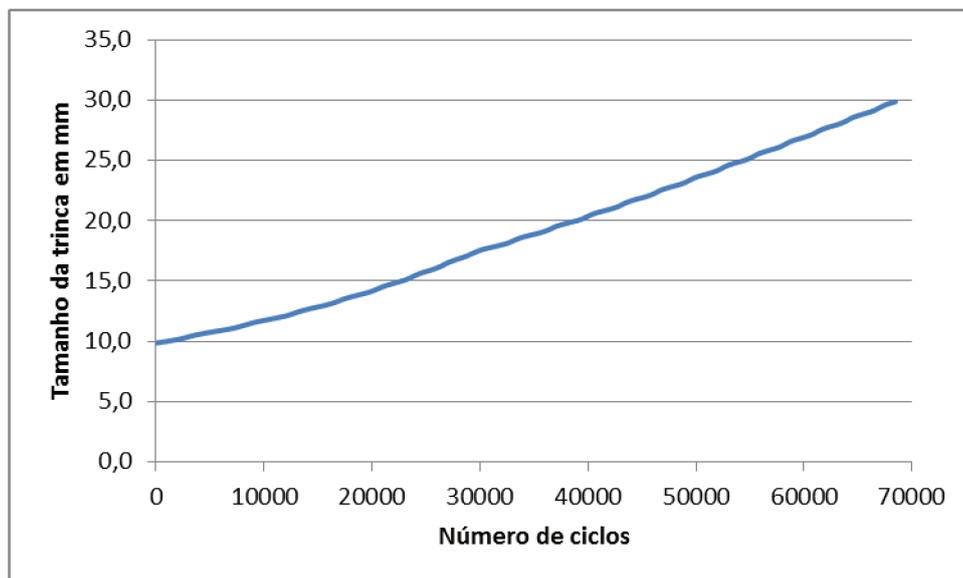


Figura 6 – Curva de crescimento da trinca (Tamanho da trinca × Número ciclos)

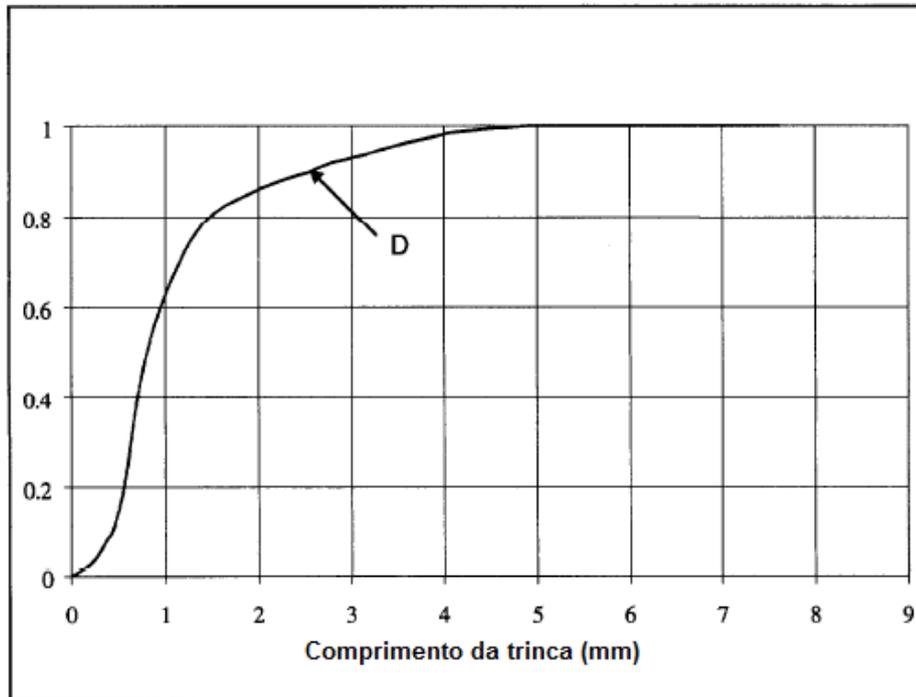


Figura 7 – Probabilidade de detecção da trinca

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma conservativa, adota-se o menor intervalo calculado (4.340 ciclos) por estar ligeiramente acima do intervalo de inspeção programado (4.000 ciclos) para inspeções detalhadas na fuselagem da aeronave cujo modelo foi adotado, não havendo a necessidade de alteração no intervalo de inspeção programado ou inclusão de uma tarefa de inspeção fora do intervalo normal determinado e exclusiva para esse fim.

Seguindo o modelo probabilístico de ocorrência de falha por voo adotado por Lincoln (1998), a característica do comportamento da probabilidade de falha em voo para a estrutura com inspeções realizadas a cada 4.000 ciclos é mostrada na Figura 8. Seguindo o mesmo conceito de Lincoln (1998), a Figura 9 mostra a característica do comportamento de falha em voo para a estrutura inspecionada a cada 20.000 ciclos. Como pode ser observado há uma significativa degradação no risco de inspeções a cada 20.000 ciclos se comparado com as inspeções realizadas a cada 4.000 ciclos.

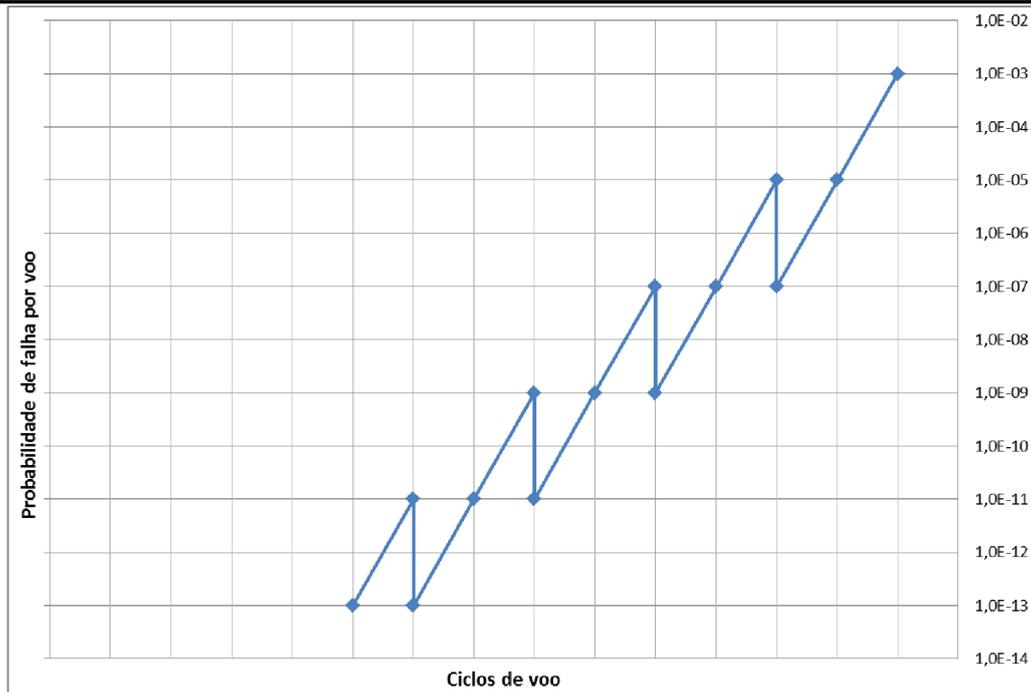


Figura 8 – Comportamento da probabilidade de falha em voo – inspeções efetuadas a cada 4000 ciclos

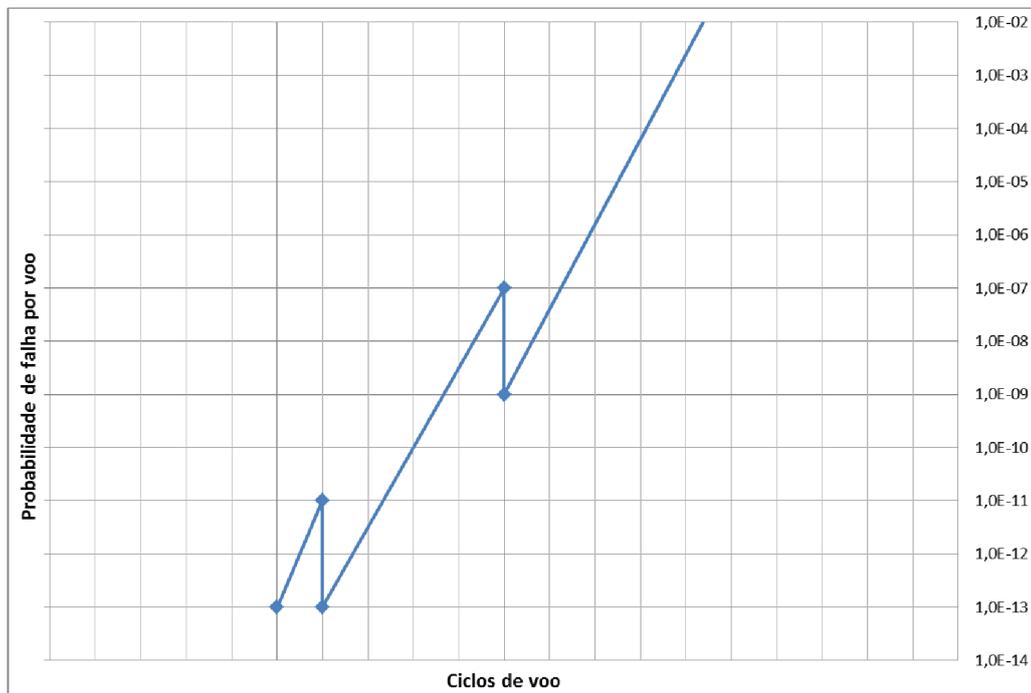


Figura 9 – Comportamento da probabilidade de falha em voo – inspeções efetuadas a cada 20000 ciclos

8. CONCLUSÃO

A aplicação do conceito de tolerância a danos em projetos de instalação de antenas em fuselagens de aeronaves pressurizadas tem implícita uma filosofia de segurança e exige inspeções com resultados que garantam a integridade estrutural. A singularidade dos projetos customizados exigem precisos cálculos determinísticos para o levantamento da taxa de progressão de trinca e consequente determinação do intervalo para a realização das requeridas inspeções não destrutivas, uma vez que modelos estatísticos podem não refletir a realidade devido à ausência de suficientes amostras específicas e adequadas. A garantia da manutenção da aeronavegabilidade fica dependente da confiabilidade das inspeções de monitoramento que também se submete aos imprevistos do processo. Considerando que a precisão do método de inspeção empregado e a competência do inspetor tem um peso muito grande na aleatoriedade do processo de detecção de trincas, o detalhamento documentado do processo de inspeção juntamente com a competência do inspetor são fatores preponderantes na garantia da execução de inspeções confiáveis e a consequente integridade da fuselagem modificada.

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BEVERLY, S J. Royal Air Force in-service approach to airframe inspection reliability under field/depot conditions. In: AIRFRAME INSPECTION RELIABILITY UNDER FIELD/DEPOT CONDITIONS, 10., 1998, Brussels. **Proceedings of Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions**. Neuilly-sur-seine: NATO, 1998. p. 4.1 - 4.7.
- HAGEMAIER, D.. Factors influencing eddy current PoD in the field environment. In: AIRFRAME INSPECTION RELIABILITY UNDER FIELD/DEPOT CONDITIONS, 10., 1998, Brussels. **Proceedings of Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions**. Neuilly-sur-seine: NATO, 1998. p. 2.1 - 2.12.
- KALE A.; HAFTKA R., **Tradeoff of structural weight and inspection cost in reliability based optimization using multiple inspection types**, AIAA-2004-4404, 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Albany, New York, Aug. 30-1, 2004.
- LARIVIERE, S. G.; THOMPSON, J.. Development of Reliable NDI Procedures for Airframe Inspection. In: AIRFRAME INSPECTION RELIABILITY UNDER FIELD/DEPOT CONDITIONS, 10., 1998, Brussels. **Proceedings of Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions**. Neuilly-sur-seine: NATO, 1998. p. 7.1 - 7.5.
- LINCOLN, J. W.. Role of nondestructive inspections in airworthiness assurance. In: AIRFRAME INSPECTION RELIABILITY UNDER FIELD/DEPOT CONDITIONS, 10., 1998, Brussels. **Proceedings of Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions**. Neuilly-sur-seine: NATO, 1998. p. 1.1 - 1.13.
- MEGSON, T. H. G. **Aircraft Structures for Engineering Students**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. 638 p.

MELLO JR., A. W. S.; MATTOS, D. F. V.. Reliability prediction for structures under cyclic loads and recurring inspections. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos - SP, v. 1, n. 2, p.201-209, dez. 2009.

NIU, M. C.. **Airframe Stress Analysis and Sizing**. 2. ed. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press Co., 1999. 795 p.

PROVAN, J. W., **Fracture, fatigue and mechanical reliability**: An introduction to mechanical reliability, Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, Victoria, B.C., 2006

RATWANI, M. M.. Visual and non-destructive inspection technologies. In: AGARD SMP lecture series on aging combat aircraft fleets — long term applications 1., 1996, Madrid, Spain. **Agard Lecture Series 206 Aging Combat Aircraft Fleets — Long Term Applications**. Neuilly-sur-Seine: NATO, 1996. p. 9.1 - 9.15.

RUMMEL, W. D.; MATZKANIN, G. A.. **Nondestructive Evaluation (NDE) Capabilities Data Book**. 3. ed. Austin, Tx: Ntiac Texas Research Institute Austin, 1997. 598 p. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a286978.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2014.

SCHUELLER, G.; KUNTIYAWICHAI, K. Reliability Based optimization approach for nondestructive inspection planning. In: AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 47., 2006, Newport. **Proceedings of AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference**. Reston: AIAA, 2006. p. 1 - 13.

SINGH, R.. **Three Decades of NDI Reliability Assessment**. San Antonio: Karta Technologies, Inc., 2000. 137 f.

SPENCER, F. W.. Identifying Sources of Variation for Reliability Analysis of Field Inspections. In: AIRFRAME INSPECTION RELIABILITY UNDER FIELD/DEPOT CONDITIONS, 10., 1998, Brussels. **Proceedings of Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions**. Neuilly-sur-seine: Nato, 1998. p. 11.1 - 11.8.

THOMPSON, R. B. Simulation Models: Critical Tools in NDT Engineering. **Materials Evaluation**, Vol 63, pp 300-308, 2005.

TONG, Y. C.. **Literature review on aircraft structural risk and reliability analysis**. Melbourne, Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001. 48 p.

WHITTAKER, I. C.; SAUNDERS, S. C. **Application of reliability analysis to aircraft structures subject to fatigue crack growth and periodic structural inspection**. Dayton: USAF, 1973. 46 p.

ZHENG, R.; ELLINGWOOD, B., **Role of non-destructive evaluation in time-dependent reliability analysis**. Structural Safety 20 4 (1998), pp. 325–339.

10. Comunicado de responsabilidade

O autor é o único responsável pelo material pesquisado.

Abstract. The application of the concept of the damage tolerant structures on aircraft requires the application of reliable non-destructive inspection methods, which directly affects the guarantee of airworthiness. The crack propagation rate, the field inspection and material quality are subject to uncertainty making it difficult a study of purely deterministic reliability. Many of the parameters and variables used in crack propagation control have a scatter factor that should be considered in predicting fatigue life. There is a nonzero probability that a crack can cause a failure, despite the implementation of sophisticated inspection methods that are used to finding a set before it will cause a catastrophic failure. The crack detection capability is also governed by statistical concepts. Although the detection probability curve is traditionally given in terms of damage size in reality this probability depends on other variables. The uniqueness of the custom aerial installation projects in fuselages pressurized require precise calculations deterministic for the lifting of the crack growth rate and consequent determination of the interval to perform the required non-destructive inspections, since statistical models can not reflect reality because the absence of sufficient specific and appropriate samples. An example of introduced aluminum alloy structure shows that in conjunction with appropriate inspection intervals, ensuring airworthiness maintenance results of the reliability of the monitoring inspections that must also submit to the vagaries of the process. The accuracy of the inspection method used and the jurisdiction of the inspector has a very large weight in the randomness of cracks detection process and are important factors in ensuring the integrity of the modified fuselage.