

Manual de Frangibilidade

*Superintendência de
Infraestrutura Aeroportuária – SIA*



MANUAL DE FRANGIBILIDADE

SUPERINTENDÊNCIA DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA – SIA

Setembro / **2018**

SUPERINTENDENTE

Rafael José Botelho Faria

GERENTE DE CERTIFICAÇÃO E SEGURANÇA OPERACIONAL

Giovano Palma

GERENTE TÉCNICO DE ENGENHARIA E MANUTENÇÃO AEROPORTUÁRIA

Virgílio de Matos Santos Castelo Branco

EQUIPE TÉCNICA RESPONSÁVEL

Lucas Bernardino Travagin

EDIÇÃO, PROJETO GRÁFICO-VISUAL E DIAGRAMAÇÃO

Assessoria de Comunicação Social (ASCOM)

DÚVIDAS, SUGESTÕES E CRÍTICAS PODEM SER ENVIADAS PARA O E-MAIL

gtem.sia@anac.gov.br

CONTROLE DE VERSÕES

| VERSÃO | DATA | APROVADO POR | RESUMO DE MODIFICAÇÃO |
|---------------|-------------|--|------------------------------|
| 00 | 03/09/2018 | Rafael José Botelho Faria - Superintendente de Infraestrutura Aeroportuária | N/A |

SÚMARIO

| | |
|---|-----------|
| 1 - INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 - OBJETIVO | 4 |
| 3 - PROJETO DE ESTRUTURAS FRANGÍVEIS | 4 |
| 3.1 - REQUISITOS OPERACIONAIS | 4 |
| 3.2 - PREMISSAS DE PROJETO | 4 |
| 3.3 - MODO DE FALHA | 5 |
| 3.4 - TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA | 6 |
| 3.5 - CONEXÕES FRANGÍVEIS | 6 |
| 3.5.1. Parafuso “fusível” | 6 |
| 3.5.2. Parafusos de material especial | 7 |
| 3.5.3. Acoplamentos frangíveis | 8 |
| 3.5.4. Elementos de fixação especialmente projetados | 8 |
| 3.5.5. Chapas de fixação com seções removíveis | 9 |
| 3.6 - MECANISMOS FRANGÍVEIS | 9 |
| 3.7 - SELEÇÃO DE MATERIAIS | 9 |
| 3.8 - COMPONENTES ELÉTRICOS | 10 |
| 3.9 - CRITÉRIOS DE PROJETO | 10 |
| 3.9.1. Luzes elevadas de borda de pista de pouso e decolagem e de pista de táxi | 10 |
| 3.9.2. Sinalização vertical | 10 |
| 3.9.3. Indicador de trajetória de aproximação de precisão | 11 |
| 3.9.4. Sistema de luzes de aproximação (ALS) | 11 |
| 3.9.5. Sistema de pouso por instrumentos (ILS) | 14 |
| 4 - AVALIAÇÃO DE FRANGIBILIDADE | 14 |
| 4.1 - ENSAIOS | 14 |
| 4.1.1. Luzes elevadas de borda de pista de pouso e decolagem e de pista de táxi | 15 |
| 4.1.2. Sinalização vertical | 15 |
| 4.1.3. Indicador de trajetória de aproximação de precisão | 16 |
| 4.1.4. Sistemas de luzes de aproximação (ALS) | 16 |
| 4.2 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS | 18 |
| 4.2.1. Análise estática | 18 |
| 4.2.2. Análise dinâmica | 19 |
| REFERÊNCIAS | 20 |

1 - INTRODUÇÃO

Em seu conceito mais genérico, frangibilidade é a qualidade do que é frangível, frágil. Um objeto frangível, por sua vez, pode ser entendido no contexto da aviação como um objeto de pouca massa, projetado para quebrar, deformar ou ceder sob impacto de modo a minimizar o perigo às aeronaves.

Em aeroportos, diversos dispositivos de auxílio visual e não-visual – como por exemplo sistema de luzes de aproximação, sinalização luminosa, sinalização vertical, equipamentos meteorológicos e dispositivos de auxílio à navegação aérea – localizam-se nas proximidades de pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios de aeronaves, representando um risco às aeronaves em caso de impacto acidental durante as operações.

Assim, tais dispositivos de auxílio e seus suportes devem ser frangíveis e devem ser instalados o mais baixo possível para minimizar os efeitos de uma colisão.

Dentre os principais equipamentos e instalações que, por conta da função que prestam à navegação aérea, devem ficar na área operacional e, por consequência, devem ter estrutura frangível, podem-se citar:

- Luzes elevadas de pista de pouso e decolagem, pista de táxi e stopway;
- Sistema de luzes de aproximação;
- Sistema indicador de trajetória de aproximação de precisão (VASIS, PAPI, etc.);
- Sinalização vertical;
- Equipamentos do sistema de pouso por instrumentos (ILS).

O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) nº 154 – Projeto de Aeródromos – delimita, em suas Subpartes C e D, as áreas e superfícies que devem estar livres de obstáculos, à exceção dos dispositivos de auxílio que devem ser frangíveis, bem como especifica requisitos de frangibilidade para os principais equipamentos.

Este material tem como objetivo complementar a regulamentação brasileira, disponibilizando material de orientação específico para projeto e avaliação dos requisitos de frangibilidade. Buscando alinhar-se com a regulação internacional sobre o tema, este manual tem como referência o DOC 9157 – Parte 6 (Frangibility) da Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) e a Advisory Circular N° 150/5220-23 (Frangible Connections) da Federal Aviation Administration, autoridade de aviação civil dos Estados Unidos da América.

2 - OBJETIVO

O objetivo principal deste manual é prover um material de orientação para projeto e avaliação de estruturas frangíveis em aeródromos, sem apreciar o mérito das condições sob as quais uma estrutura deve ser frangível. Tais condições são encontradas em regulação específica de projeto de aeródromos (RBAC nº154).

A ANAC recomenda a implementação das práticas previstas neste Manual, mas esclarece que o seu conteúdo não possui natureza normativa e não é de cumprimento obrigatório pelo operador do aeródromo e demais interessados. Além disso, as práticas recomendadas devem ser adaptadas às peculiaridades de cada aeródromo.

Destaca-se também que o cumprimento do disposto neste Manual não isenta o operador do aeródromo de cumprir os requisitos estabelecidos nos regulamentos editados pela Agência.

3 - PROJETO DE ESTRUTURAS FRANGÍVEIS

3.1 - Requisitos operacionais

Estruturas frangíveis defletem quando sob a ação de forças do ambiente. É importante que essa deflexão permaneça dentro de limites aceitáveis de modo a não afetar a sua funcionalidade.

Dessa forma, as principais referências internacionais vigentes dizem que uma estrutura frangível deve ser projetada para resistir a vento estático e ao *jet blast* provocado pelas aeronaves que operem no aeródromo com o apropriado fator de segurança, devendo quebrar, deformar ou ceder quando sob esforços de uma colisão repentina de uma aeronave de 3.000 kg voando a 140 km/h (75 nós) ou em movimentação de solo a 50 km/h (27 nós).

O cumprimento de tais requisitos pode ser comprovado por meio de testes em escala real, análises computacionais ou por similaridade com estruturas de frangibilidade já comprovada.

3.2 - Premissas de projeto

Uma estrutura frangível deve ser projetada de modo a minimizar o perigo associado a impactos acidentais de aeronaves em voo ou em movimentação de solo. Conceitualmente, uma aeronave em movimento que atinja um objeto pode:

1. Perder significativa quantidade de movimento;
2. Mudar de direção; e
3. Sofrer danos estruturais.

Matematicamente, a quantidade de movimento é dada pela integral da força sobre o tempo. Assim, tanto a magnitude da carga de impacto quanto a sua duração devem ser as menores possíveis.

Os danos estruturais estão associados à energia necessária para superar o obstáculo, o que pode ocorrer de três maneiras: pela ativação de mecanismos de falha, pela deformação – elástica ou plástica – do obstáculo ou pela aceleração do obstáculo, ou parte dele, até a velocidade da própria aeronave.

A energia necessária para ativar mecanismos de falha está ligada à eficiência de projeto desses mecanismos e ao número de mecanismos que devem ser ativados para o colapso da estrutura.

Em caso de deformação elástica e/ou plástica da estrutura, a energia absorvida depende diretamente do tipo de material empregado. Quanto mais dúctil o material e maior a sua tensão de escoamento, maior será a energia absorvida pela aeronave no impacto.

Já para acelerar o obstáculo, ou parte dele, a energia cinética requerida é função da velocidade da aeronave e da massa a ser acelerada. Como a velocidade da aeronave não é uma variável de projeto, deve-se limitar a massa a ser movida empregando materiais leves ou limitando a porção da estrutura que deve ser acelerada para provocar o seu colapso.

3.3 - Modo de falha

Diferentes modos de falha podem ser utilizados para garantir a frangibilidade de estruturas. Podem-se utilizar estruturas modulares, por exemplo, que quando sob impacto perdem um de seus elementos, abrindo espaço para a passagem da aeronave. Ou ainda estruturas inteiriças, que devem ser defletidas pelo contato com a aeronave.

Estruturas modulares devem conter mecanismos de falha que, separadamente ou em conjunto, requeiram uma mínima quantidade de energia para serem ativados. Dessa forma, é mais fácil prever o encadeamento dos eventos, uma vez que a estrutura como um todo se comporta de maneira frágil. Este tipo de estrutura, no entanto, gera fragmentos que podem colidir com outras partes da aeronave.

A frangibilidade de estruturas inteiriças, por sua vez, é garantida por seu colapso completo, resultado de falha mecânica aleatória de uma porção do material e não de um mecanismo de falha pré-determinado. Isso implica o envolvimento de toda a estrutura no impacto, resultando em interações energéticas maiores. Logo, esse modo de falha é mais adequado para estruturas de equipamentos de pequena massa.

3.4 - Transferência de energia

Como enunciado anteriormente, em caso de impacto acidental entre uma aeronave e um obstáculo, o dano resultante é proporcional à energia transferida da aeronave para o obstáculo. Deve-se, então, minimizar a transferência de energia, que pode ser estimada de diversas formas:

1. A energia necessária para ativar um mecanismo de falha é determinada em ensaios em escala reduzida e deve ser multiplicada pelo número de mecanismos a serem ativados;
2. A energia necessária para causar deformação elástica e/ou plástica é determinada por testes simples de tração e deformação. Caso seja empregada uma estrutura modular com material frágil, essa energia é desprezível;
3. A energia cinética necessária para acelerar um obstáculo, ou parte dele, é determinada pela massa do obstáculo e a velocidade estabelecida para a aeronave.

As estimativas devem ser feitas para todos os diferentes cenários de uma aeronave colidindo com uma estrutura.

3.5 - Conexões frangíveis

No projeto de conexões frangíveis, a frangibilidade é associada ao elemento conector, que deve suportar as cargas de projeto da estrutura ao passo que deve falhar sob impacto. O elemento estrutural em si não é projetado para falhar, mas para ser capaz de transferir os esforços do impacto para a conexão.

A conexão, por sua vez, deve ceder a baixas quantidades de energia de impacto. Os principais tipos de conexões frangíveis são: parafusos "fusível", parafusos de material especial, acoplamentos frangíveis, elementos de fixação especialmente projetados e chapas de fixação com seções removíveis.

3.5.1. Parafuso "fusível"

A falha deste elemento é induzida pelo provimento de um concentrador de tensão. Usualmente, usina-se um sulco para reduzir o diâmetro do parafuso em um determinado ponto ou um rebaixo em um determinado lado, tornando-o mais frágil em uma direção específica.

A resistência ao cisalhamento é mantida enquanto a resistência à tração pode ser reduzida com um furo ao longo do diâmetro do parafuso que esteja fora do plano de cisalhamento. O tipo de concentrador de tensão a ser empregado depende do tipo de falha preferencial para uma determinada situação.

Este tipo de elemento deve ser cuidadosamente instalado para garantir que ele não seja danificado ou excessivamente tensionado quando do seu aperto. Uma desvantagem clara é que os concentradores de tensão podem reduzir a resistência à fadiga ou podem falhar prematuramente sob cargas normais de operação. A Figura 1 apresenta um exemplo de uma aplicação deste tipo de parafuso.



Figura 1 – Aplicação de parafuso "fusível" (Fonte: DOC 9157 – Part 6)

3.5.2. Parafusos de material especial

A utilização de parafusos com materiais específicos elimina a necessidade de processos de fabricação adicionais. Eles devem ser dimensionados para suportar as cargas de projeto, mas devem ser feitos de materiais com baixa resistência ao impacto. Materiais como aço, alumínio e plástico devem ser selecionados com base nas suas propriedades mecânicas para garantir o fim desejado. Como a frangibilidade é garantida pelas características do material, é muito importante adquirir elementos que estejam em pleno acordo com as propriedades físicas anunciadas.

3.5.3. Acoplamentos frangíveis

A frangibilidade de estruturas cilíndricas ou tubulares geralmente é obtida por meio do uso de acoplamentos frangíveis. Esses acoplamentos contam com concentradores de tensão como, por exemplo, furos em determinados pontos da peça ou trechos com diâmetro reduzido pela retirada de material.

A Figura 2 mostra acoplamentos frangíveis utilizados em postes de luz e outras instalações elétricas de pistas de pouso e decolagem e pistas de táxi.



Figura 2 – Acoplamentos frangíveis (Fonte: AC 150/5220-23)

3.5.4. Elementos de fixação especialmente projetados

Alguns elementos de fixação, como por exemplo rebites com cabeça escareada chata, podem ser utilizados para resistir a esforços cisalhantes normais, mas também para romperem através do material da base se experimentarem esforços de compressão, como mostrado na Figura 3. O furo no material da base deve ser precisamente usinado de modo a causar aderência à menor área possível na parte inferior da cabeça do elemento de fixação. Este tipo de projeto de frangibilidade se baseia fortemente no processo de fabricação e requer alto controle de qualidade.

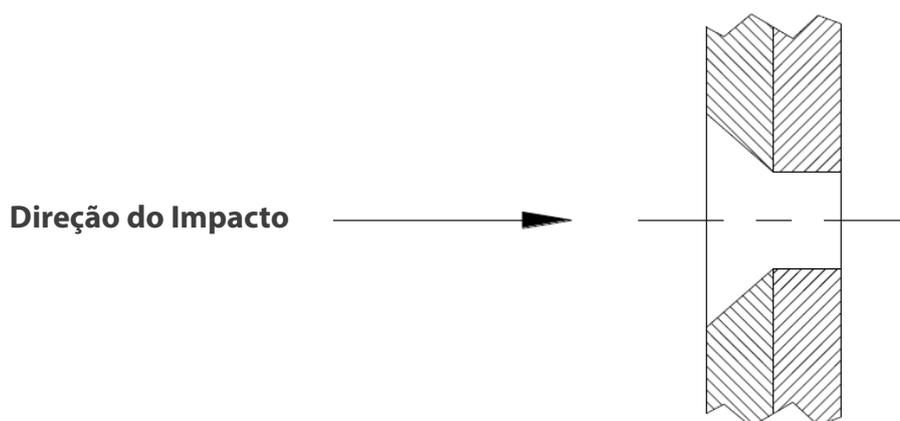


Figura 3 – Ensaio de frangibilidade de elemento de fixação com uso rebite (Fonte: AC 150/5220-23)

3.5.5. Chapas de fixação com seções removíveis

Chapas de fixação podem ser projetadas com concentradores de tensão – como chanfros ou entalhes – que farão com que, sob impacto, seções inteiras da placa se rompam. Neste tipo de conexão, o elemento de fixação em si não quebra, mas sim uma porção da chapa à qual ele está acoplado. As propriedades de vida em fadiga e a qualidade da produção destes dispositivos são variáveis de projeto cruciais para a garantia da frangibilidade.

3.6 - Mecanismos frangíveis

Pode-se garantir a frangibilidade de uma estrutura pelo emprego de um mecanismo que se desloque, quebre ou se deforme sob impacto. Um mecanismo frangível pode ser projetado para suportar altos esforços naturais, como ventos, e ainda assim ser bastante sensível a impactos. Assim, mecanismos frangíveis não devem ter elevada resistência em todas as direções, ou seja, eles devem resistir bem à tração e a esforços de flexão, mas devem ser vulneráveis ao cisalhamento.

Juntas soldadas por fricção apresentam alta resistência na direção normal à superfície soldada, mas sucumbem facilmente quando sofrem esforços paralelos ao plano de solda, sendo aplicadas como mecanismos frangíveis. O impacto provocado por uma aeronave nas estruturas em questão ocorre geralmente na horizontal. Dessa forma, as juntas soldadas por fricção devem ser projetadas com as faces soldadas na horizontal, possibilitando o colapso da estrutura pelo escorregamento entre elas.

A utilização de mecanismos frangíveis deve garantir que não haja deslocamentos ou deformações resultantes de esforços cotidianos – como vento ou *jet blast* – de modo a preservar a funcionalidade da estrutura.

3.7 - Seleção de materiais

Estruturas frangíveis podem ser fabricadas em materiais metálicos ou não metálicos que não tenham suas propriedades mecânicas deterioradas pela exposição às condições climáticas da região. Esses materiais devem ser apropriados para o uso previsto da estrutura e devem propiciar a maior leveza possível.

Para cumprir com os requisitos de frangibilidade, os materiais devem ter resistência mecânica apropriada, massa específica reduzida e baixa tenacidade. A massa específica reduzida visa a garantir que uma mínima quantidade de energia seja despendida pela aeronave para acelerar a estrutura em caso de impacto.

3.8 - Componentes elétricos

Em um aeroporto, a maior parte das estruturas que devem ser frangíveis possuem ou suportam componentes elétricos. Naturalmente, elas possuem cabos e conectores. Para não deteriorar a frangibilidade da estrutura, devem ser empregados conectores que possam ser separados por forças inferiores às necessárias para romper o próprio condutor, como por exemplo conectores do tipo engate rápido.

3.9 - Critérios de projeto

Esta seção apresenta os principais critérios adotados internacionalmente para o projeto de estruturas frangíveis em ambientes aeroportuários, não caracterizando, necessariamente, requisitos de infraestrutura.

3.9.1. Luzes elevadas de borda de pista de pouso e decolagem e de pista de táxi

As estruturas das luzes de borda de pista de pouso e decolagem e de borda de pista de táxi podem experimentar grandes esforços decorrentes de ventos e de *jet blast*, aos quais devem resistir sem perder a sua funcionalidade. Usualmente considera-se como critério de projeto velocidades de vento de 480 km/h (260 nós) para essas luzes.

As estruturas elevadas destas luzes devem ter um ponto de falha próximo da região na qual a estrutura do dispositivo é fixada na base. Tal ponto de falha não deve estar a mais de 38 mm da superfície na qual a luminária está fixada e deve ceder antes que qualquer outra parte seja danificada. O ponto de falha deve ser capaz de suportar um momento fletor de 204 N.m sem ceder, mas deve separar-se da base de montagem antes que o momento fletor na peça chegue a 678 N.m.

3.9.2. Sinalização vertical

A sinalização – e todos os seus componentes – devem ser projetados de acordo com os seguintes critérios:

- a)** Temperatura: A faixa de temperatura de trabalho considerada deve ser de -10°C a +55°C.
- b)** Vento: Deve-se considerar exposição eventual a ventos de até 480 km/h (260 nós) para aeródromos que operem aeronaves com motor a reação. A depender da localização da sinalização ou das condições de uso do aeroporto (aeronaves de pequeno porte), velocidades menores de vento podem ser utilizadas, como 320 km/h (172 nós) ou 240 km/h (130 nós). A velocidade do escoamento produzido pelos motores das aeronaves depende do empuxo requerido por cada aeronave para as operações de decolagem, início de movimentação (*breakaway*) e táxi.
- c)** Umidade: Deve-se considerar operação com umidade relativa do ar de 5% a 95%.

As placas de sinalização vertical devem ser construídas em materiais leves e não-ferrosos e devem ser projetadas para serem instaladas sobre uma base de concreto ou com estacas. Todos os elementos requeridos para a montagem e o suporte da sinalização devem ser considerados como parte dela para todos os efeitos de frangibilidade.

A densidade linear de uma sinalização vertical, incluindo os dispositivos de montagem, não deve ultrapassar 24,5 kg/m e o comprimento total não deve ultrapassar 3 m. Caso a informação requeira mais do que 3 m, devem ser utilizadas duas sinalizações separadas montadas lado a lado. Sinalizações próximas às pistas de pouso e decolagem e de táxi devem ficar baixas o suficiente para não interferir na trajetória das pás e das naceles das aeronaves.

As hastes de uma sinalização vertical devem ter pontos frangíveis a no máximo 50 mm da superfície de fixação, devendo resistir às condições de vento apresentadas acima.

3.9.3. Indicador de trajetória de aproximação de precisão

As estruturas dos sistemas indicadores de trajetória de aproximação de precisão (PAPI/APAPI e T-VASIS/AT-VASIS) devem ser projetadas para resistir às mesmas condições de vento das sinalizações verticais, isto é, 480 km/h (260 nós) para aeródromos que operem aeronaves com motor a reação e 240 km/h (130 nós) para os demais.

A estrutura de montagem dos elementos destes sistemas deve seguir os mesmos critérios apresentados para a sinalização vertical. Elas devem, no entanto, possuir altura ajustável, para permitir o correto nivelamento. Além disso, a estrutura deve ser projetada de modo a não permitir qualquer deslocamento do sistema ótico devido às vibrações causadas pelas operações de pouso e decolagem.

3.9.4. Sistema de luzes de aproximação (ALS)

O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) n°. 154, em seu requisito 154.305(a)(2) (i), especifica os seguintes critérios de frangibilidade para as estruturas de suporte das luzes do sistema de luzes de aproximação (ALS):

- "**(A)** Quando a altura de uma estrutura de suporte exceder 12 m, a exigência de frangibilidade deve se aplicar somente aos 12 m superiores; e
- "**(B)** Quando uma estrutura de suporte for envolvida por objetos não frangíveis, somente a parte da estrutura que se prolongar acima dos objetos ao redor deverá ser frangível."

A Figura 4 apresenta um exemplo de estrutura treliçada, que usualmente é feita em alumínio ou fibra de vidro, ao passo que a Figura 5 mostra uma estrutura tubular.



Figura 4 – Torres do ALS com estrutura treliçada (Fonte: DOC 9157 – Part 6)



Figura 5 – Torres do ALS com estrutura tubular (Fonte: DOC 9157 – Part 6)

Já a Figura 6 apresenta torres de ALS com mais de 12 metros de altura com a porção inferior rígida.



Figura 6 – Torres do ALS com mais de 12 metros de altura (Fonte: DOC 9157 – Part 6)

O ALS merece atenção especial durante a fase de projeto para que a frangibilidade de suas estruturas seja garantida, sendo o mais crítico dos auxílios à navegação, dadas as suas dimensões e o conseqüente risco às aeronaves.

A pressão exercida pelo vento gerado pelos motores das aeronaves, cujos valores de projeto foram citados anteriormente, pode ser estimada pela Equação a seguir:

$$P=0,0000475 \cdot V^2$$

Sendo:

- P - pressão em kPa; e
- V - velocidade do vento em km/h.

O esforço total exercido pelo vento sobre a estrutura deve ser ajustado de acordo com a sua forma por meio da aplicação de um fator de forma apropriado para cada situação.

Estas estruturas, por serem grandes e esbeltas, defletem quando da aplicação de uma força. Essa deflexão, porém, não pode deteriorar a funcionalidade do feixe de luz. Portanto, deve-se dimensionar a estrutura para sofrer uma deflexão máxima de ± 2 graus no eixo vertical e ± 5 graus no eixo horizontal quando sob efeito de um vento de 100 km/h (54 nós).

Devendo ruir sob as cargas de impacto preconizadas no item 3.1, a estrutura não deve impor a uma aeronave uma força maior do que 45 kN e a energia transferida à aeronave durante o período de impacto não pode exceder 55 kJ.

3.9.5. Sistema de pouso por instrumentos (ILS)

Os critérios de projeto apresentados anteriormente, que tomam como base de cálculo uma aeronave de 3.000 kg, podem ser aplicados à antena do localizador (LOC) do sistema de pouso por instrumentos (ILS), bem como as premissas de frangibilidade baseadas em estrutura modular ou dispositivos de falha.

Dada a sua natureza única, não há ainda requisitos de frangibilidade aplicáveis à antena do Glide Path. O mesmo se aplica ao abrigo dos elementos do Glide Path, cuja frangibilidade é impraticável, devendo então ficar, a menos que fisicamente impossível, fora da faixa de pista.

4 - AVALIAÇÃO DE FRANGIBILIDADE

Esta seção tem como principal objetivo introduzir procedimentos para a aferição da conformidade de projetos com os requisitos de frangibilidade. Assim como toda análise estrutural, a avaliação de frangibilidade pode ser feita por meio de ensaios físicos ou por simulações computacionais.

Tendo em vista a diversidade de estruturas que devem ser frangíveis e a gama de condições físicas dos aeródromos, os procedimentos aqui explicitados não são exaustivos, mas podem ser adotados como balizadores.

4.1 - Ensaios

Os ensaios estruturais podem ser estáticos ou dinâmicos. Para a verificação de frangibilidade de auxílios visuais de massa reduzida e com altura máxima de 1,2 m, como luzes elevadas de pistas de pouso e decolagem e de táxi, sugere-se a aplicação de testes estáticos, já que esses apresentam menores custos.

Já para estruturas com mais de 1,2 m ou que se localizam em áreas susceptíveis ao impacto de uma aeronave em voo, devem-se realizar ensaios dinâmicos de modo a aproximar o evento simulado em laboratório do ambiente real de um aeródromo.

Por mais que testes sejam realizados em etapas intermediárias do desenvolvimento de um produto, somente pode-se atestar a sua frangibilidade a partir de testes conduzidos em elementos oriundos de ferramental e procedimentos que serão utilizados na produção em série, ou seja, a amostra testada deve possuir as mesmas características mecânicas do produto a ser comercializado.

4.1.1. Luzes elevadas de borda de pista de pouso e decolagem e de pista de táxi

Os testes devem ser conduzidos com a estrutura completamente montada, na sua altura nominal e fixada a uma base rígida, simulando a situação real de uso. O carregamento deve ser aplicado logo abaixo da lâmpada a uma taxa de no máximo 220 N por minuto até que o momento fletor descrito na seção 3.9.1 seja atingido. Uma vez garantido que a estrutura resiste a esta carga sem sofrer danos, o carregamento deve continuar na mesma taxa até que a falha ocorra.

Em estruturas cujo ponto de falha seja um encaixe por interferência, o teste deve ser repetido dez vezes na mesma peça para garantir que não haja afrouxamento do encaixe. Os testes devem ser conduzidos em cinco estruturas diferentes dentro da faixa de temperatura de trabalho. A falha no cumprimento dos requisitos ou o dano da estrutura antes do acionamento do ponto de falha são motivos para rejeição da amostra.

4.1.2. Sinalização vertical

Os elementos de sinalização vertical devem ser testados para assegurar os requisitos de frangibilidade impostos no item 3.9.2, bem como a resistência aos esforços de ventos decorrentes das operações cotidianas.

O ensaio deve ser executado com o conjunto inteiro montado e anexo à sua base de sustentação. Caso a base esteja na vertical, a massa do conjunto deve ser adicionada à carga de teste a ser aplicada. Uma carga estática deve ser uniformemente aplicada sobre toda a superfície do painel por um período de dez minutos. A sinalização não deve ceder nos seus pontos de frangibilidade e nem sofrer deformações plásticas. Para um vento de 320 km/h (172 nós), a carga estática aplicada deve ser decorrente de uma pressão de 6,21 kPa sobre a área frontal da sinalização. Uma vez aprovada neste ensaio e dentro dos limites mássicos impostos no item 3.9.2, a sinalização é considerada frangível.

Caso a estrutura da sinalização seja montada sobre molas, o procedimento de ensaio adotado deve ser ligeiramente diferente. Inicialmente, o painel deve ser submetido ao mesmo carregamento exposto acima, mas com as molas travadas, e não deve colapsar. Deve-se, então, destravar as molas e aplicar um carregamento incremental de modo a provocar a falha do ponto de frangibilidade.

A pressão que resulte na falha da estrutura com as molas destravadas é chamada de pressão de falha (P_{falha}). Deve-se medir também o ângulo de rotação da estrutura em relação à vertical (θ) que é provocado pela aplicação deste esforço.

A pressão a ser aplicada no ensaio final (P_{ensaio}) – novamente com as molas travadas – pode ser calculada pela Equação abaixo:

$$P_{ensaio} = P_{falha} \cdot \cos\theta$$

Este esforço deve ser aplicado uniformemente sobre toda a superfície do painel durante um minuto. Não pode haver nenhuma falha ou deformação plástica na estrutura da sinalização ao fim desse período. Uma vez aprovado nos dois testes, a sinalização vertical montada sobre molas tem sua frangibilidade garantida.

4.1.3. Indicador de trajetória de aproximação de precisão

O fabricante deve demonstrar por ensaios de carregamento estático ou – preferencialmente – por testes em túnel de vento, que a estrutura é capaz de suportar as velocidades de escoamento de ar previstas no item 3.9.3 em qualquer direção sem que haja deslocamento significativo do dispositivo ótico, evitando que sua funcionalidade seja afetada.

4.1.4. Sistemas de luzes de aproximação (ALS)

As estruturas de suporte das luzes do ALS costumam ter mais de 1,2 m de altura e ficam em posições nas quais estão susceptíveis ao impacto de uma aeronave em voo. Para tal situação, recomenda-se a execução de ensaios dinâmicos para a validação da frangibilidade da estrutura.

O teste deve ser realizado com um objeto que simule uma asa, com uma massa representativa em relação ao dispositivo que será suportado pela estrutura.

A Figura 7 apresenta um exemplo de arranjo de teste para uma estrutura de ALS.

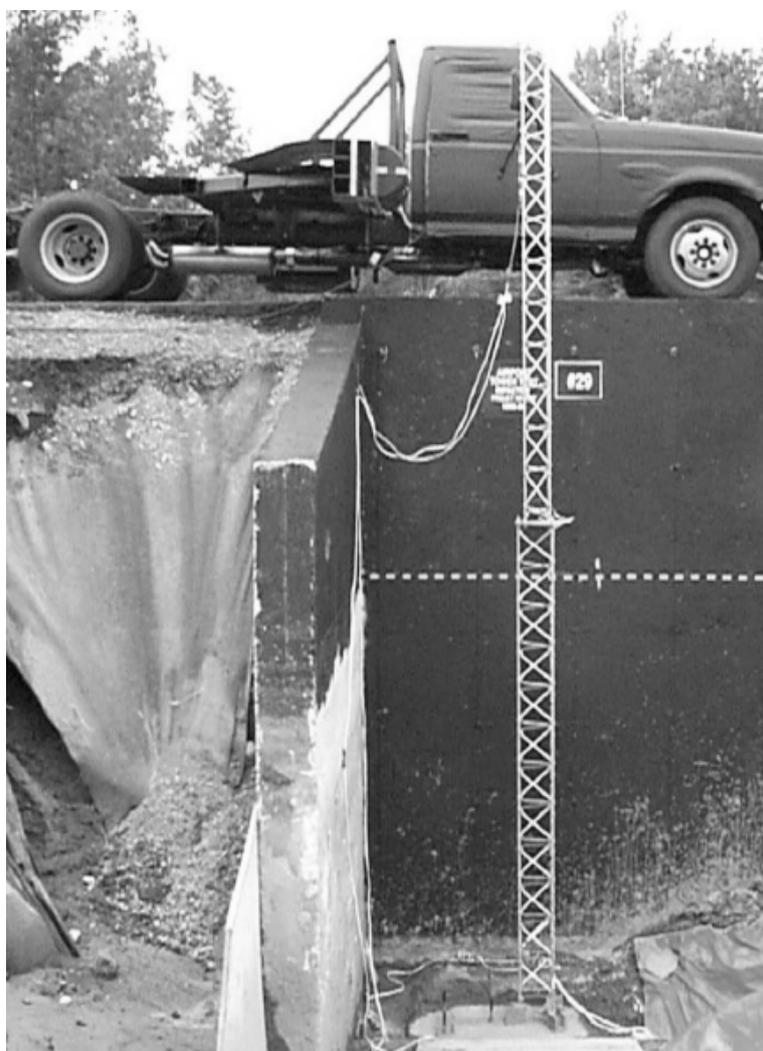


Figura 7 – Exemplo de arranjo de teste de frangibilidade de estrutura de ALS (Fonte: DOC 9157 – Part 6)

O dispositivo de testes deve se assemelhar, em sua forma, à asa de um avião de 3.000 kg, mas deve ter rigidez suficiente para que não seja inutilizado pelo próprio teste. Para isso, o dispositivo de testes deve ser um tubo semicircular rígido, com diâmetro externo de 250 mm e espessura de parede suficiente para garantir a sua rigidez, não devendo ser menor do que 25 mm. O dispositivo deve ser de aço e sua superfície deve ter baixa rugosidade e estar livre de revestimentos ou acabamentos especiais.

O dispositivo deve ser firmemente preso ao veículo de testes de modo a garantir que a interação do impacto ocorra somente entre a estrutura a ser testada e o dispositivo de teste. Sensores, como células de carga, devem ser instalados entre o dispositivo de teste e o veículo que o carrega para registrar o histórico e a força do impacto em diversas direções.

O teste deve ser realizado a 140 km/h (75 nós), com o impacto ocorrendo a 4 m acima do solo ou 1m abaixo do topo da estrutura, o que for mais alto. Uma massa equivalente à do equipamento a ser suportado deve ser colocada no topo da estrutura. Toda a instalação elétrica deve ser montada na estrutura para a execução do teste.

Além dos dados provenientes das células de carga, ou sensores equivalentes, informações sobre o impacto devem ser obtidas a partir da filmagem do ensaio com câmeras de alta velocidade, permitindo a análise da dinâmica da falha.

A frangibilidade é garantida caso a falha ocorra nos parâmetros definidos nesta seção e na seção 3.9.4 e caso os seguintes critérios sejam atendidos:

- Para torres que possam ser atingidas por aeronaves em voo, é desejável que não só a força do impacto seja minimizada, mas também a sua duração, de modo a não atrapalhar a trajetória de voo. Deve-se evitar o efeito de “envelopamento” da estrutura do ALS sobre a aeronave, o que acaba por tomar muita quantidade de movimento da aeronave;
- A estrutura do ALS deve colapsar em diversas partes e componentes. A massa de cada fragmento e a maneira como eles se desprendem da estrutura não devem causar um dano secundário à aeronave.

4.2 - Simulações computacionais

Ensaio em escala ou em tamanho real são muito dispendiosos tanto do ponto de vista financeiro quanto temporal, podendo até inviabilizar um projeto. Para superar tais restrições, métodos alternativos podem ser utilizados para avaliar a frangibilidade de estruturas. As já bastante desenvolvidas técnicas de simulação computacional apresentam resultados suficientemente confiáveis quando bem aplicadas e são largamente utilizadas quando em fase de projeto.

O método mais empregado em projetos estruturais – e foco desta seção do Manual – é o dos elementos finitos. No entanto, outros métodos, como por exemplo o das diferenças finitas, também são utilizados e os resultados são satisfatórios quando bem aplicados.

Seguindo o mesmo critério e os mesmos parâmetros dos ensaios físicos apresentados na seção 4.1, estruturas de até 1,2 m de altura devem ser objeto de análise estática, ao passo que estruturas maiores devem passar por uma análise dinâmica a fim de verificar o seu comportamento ao longo do tempo durante o impacto.

4.2.1. Análise estática

A análise estática de pequenas estruturas tende a encontrar pequenos deslocamentos e pequenas deformações, isto é, considera-se que a estrutura apresenta linearidade geométrica. Caso seja constatada a linearidade física, ou seja, que o material em questão apresenta uma relação tensão-deformação linear (de acordo com a Lei de Hooke), pode-se aplicar uma análise linear, o que reduz o tempo de cálculo e simplifica a interpretação dos resultados. A hipótese de linearidade é bastante razoável para os processos produtivos atuais de materiais metálicos e poliméricos.

4.2.2. Análise dinâmica

Quando a intenção é avaliar grandes estruturas (mais de 1,2 m) e a sua resposta sob impacto ao longo do tempo, a premissa de linearidade geométrica não é mais válida, mesmo que o material obedeça à Lei de Hooke. Para grandes deslocamentos, a deflexão lateral de um membro pode trazer como consequência o aparecimento de momentos fletores adicionais – ditos secundários – em virtude da presença de um esforço normal. Estes efeitos de não-linearidade estão associados às equações de equilíbrio, que consideram, a cada instante, a estrutura deformada e as relações deformação-deslocamento.

Primeiramente, deve-se executar uma análise modal para definir os modos de vibração (autovetores) e qual deles será excitado pelo impacto de uma aeronave. Uma vez definido este modo, uma análise não-linear transiente deve ser capaz de atestar a frangibilidade de acordo com os parâmetros estabelecidos neste Manual.

A Figura 8 apresenta uma comparação entre o resultado de uma análise dinâmica por meio do método de elementos finitos e um teste em escala real. O teste simula uma estrutura treliçada com uma massa de 5,44 kg no topo e um impacto com corpo rígido a 140 km/h.

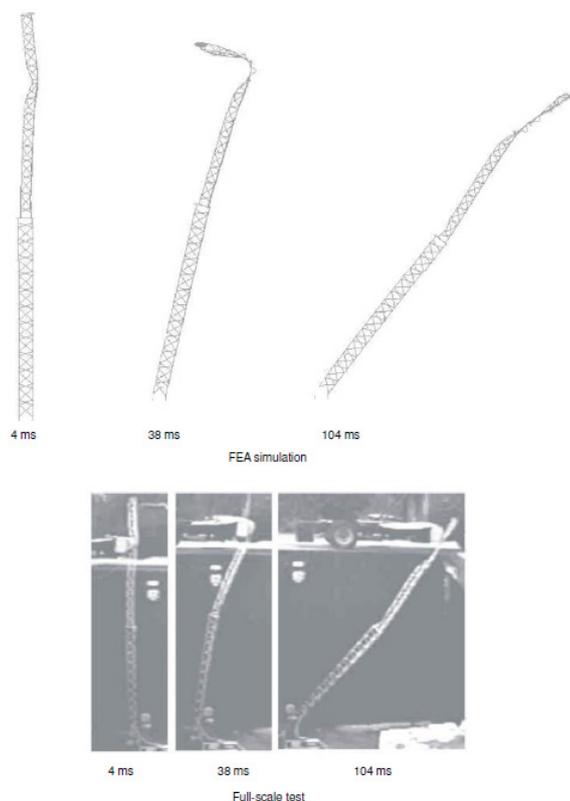


Figura 8 – Comparação entre resultados de análise por elementos finitos e teste em escala real
(Fonte: DOC 9157 – Part 6)

Em qualquer uma das duas análises, há dois fatores cruciais a serem definidos: a malha e o critério de falha. Ambos dependem das particularidades de cada estrutura, do nível de confiabilidade desejado e do tipo de falha esperado.

A definição da malha pode englobar diferentes tipos de elemento (sólidos, casca, viga etc.) e diferentes tamanhos de elementos. Deve-se atentar, no entanto, para a geometria da estrutura em análise e as possíveis descontinuidades formadas pela malha. É importante também analisar com cuidado os resultados para garantir que eles são representativos e não apenas "lixo numérico".

O critério de falha depende das propriedades mecânicas, sobretudo a ductilidade, do material a ser empregado. Para materiais frágeis sugere-se a utilização do Critério de Máxima Tensão Normal (Critério de Rankine) ou do Critério de Mohr, sendo o segundo mais completo por permitir que as resistências à tração e à compressão sejam diferentes.

Caso seja considerada a utilização de material dúctil, deve-se aplicar o Critério da Máxima Tensão Cisalhante (Critério de Tresca) ou o Critério da Máxima Energia de Distorção (Critério de Von Mises).

Por fim, a interpretação dos resultados é o ponto crucial da análise para garantir que o estudo é de fato representativo e não constitui simples cálculos computacionais inócuos. Assim, se as condições de contorno atenderem aos critérios de projeto estabelecidos neste Manual e os resultados cumprirem com os requisitos enunciados, pode-se dizer que a frangibilidade da estrutura está assegurada.

REFERÊNCIAS

Federal Aviation Administration. (2009). AC No: 150/5220-23 - Frangible Connections.

International Civil Aviation Organization. (2006). DOC 9157 - Aerodrome Design manual, Part 6 Frangibility.

