

Revista Eletrônica

AeroDesign

Magazine



Volume 18 - Número 1 – 2026

ISSN - 2177-5907

Análise Estática de Suportes e Racks de Equipamentos Aeronáuticos: Estudo das Reações Estruturais em Sistemas de Fixação de Equipamentos

Gabriel Negrin Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
g.negrin@aluno.ifsp.edu.br

Lucas Gabriel Vieira Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
vieira.lucas2@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

O presente artigo mergulha na análise de estruturas que seguram equipamentos eletrônicos (aviônicos) em aeronaves. Nosso objetivo principal é descobrir como as forças de peso desses equipamentos se distribuem e reagem nos racks de suporte, usando a estática. Para isso, simplificamos o sistema como se fosse uma viga apoiada e usamos as regras básicas de equilíbrio. Analisamos diversos casos de carregamento, mostrando que a posição do equipamento afeta muito onde a força se concentra nos suportes. Também calculamos as tensões para garantir que o material (o alumínio aeronáutico) aguarde a carga com segurança. Em resumo, este estudo prova que entender a estática é fundamental para criar racks aviônicos robustos e garantir que a estrutura da aeronave permaneça intacta

Palavras-chave

Estática; Estruturas aeronáuticas; Racks aviônicos; Equilíbrio; Reações de apoio.

Abstract

This paper presents a static analysis applied to support structures used for mounting equipment in aeronautical systems. The objective is to determine the structural reactions in avionics racks subjected to static loads from installed equipment. The methodology is based on structural modeling, free body diagrams, and equilibrium equations. Different loading conditions were analyzed, including centered, eccentric, and multiple loads. The results show that load distribution directly affects support reactions, potentially leading to structural stress concentration. A stress analysis was also performed, confirming structural safety based on aeronautical materials. The study highlights the importance of static equilibrium principles in aircraft structural design.

Keywords

Statics; Aeronautical structures; Avionics racks; Load distribution; Structural analysis.

1. Introdução

A tecnologia na aviação moderna está cada vez mais complexa, especialmente com os sistemas eletrônicos que chamamos de aviônicos. Eles são cruciais para a navegação, comunicação e controle de voo (NASA). Nas aeronaves comerciais, esses módulos eletrônicos (*Line Replaceable Units* - LRU) ficam organizados em espaços dedicados na fuselagem, chamados baias aviônicas.

Para segurar e proteger esses equipamentos, usamos os **racks aviônicos**. Estruturalmente, a função deles vai além de organizar: eles precisam transferir o peso dos equipamentos de forma segura para a estrutura principal do avião. Se o projeto desses racks falhar ou se as cargas forem mal distribuídas, a segurança do voo e a integridade do sistema podem ser comprometidas, o que viola as normas de certificação da *Federal Aviation Administration* (FAA).

O grande desafio da engenharia aeronáutica é criar racks que resistam a todo o esforço mecânico sem quebrar ou deformar demais. Para entender como essas estruturas se comportam e garantir sua estabilidade, a análise estática é fundamental. Ao modelar o sistema, conseguimos identificar todas as forças, momentos e concentrações de esforço que agem nos apoios, certificando que eles trabalhem dentro das margens de segurança exigidas pelos materiais aeronáuticos.

1.1- Objetivo do Trabalho

O estudo e a análise estrutural de sistemas mecânicos e aeronáuticos são fundamentais para garantir que as estruturas sejam capazes de suportar as cargas aplicadas durante sua operação. Em engenharia estrutural, a análise estática permite avaliar como forças externas atuam sobre uma estrutura e como essas forças são transmitidas para os pontos de apoio ou fixação. Esse tipo de análise baseia-se nos princípios fundamentais da mecânica, segundo os quais um corpo encontra-se em equilíbrio quando a soma de todas as forças e a soma de todos os momentos que atuam sobre ele são iguais a zero.

Estudar e analisar as estruturas de sistemas mecânicos e aeronáuticos é crucial para assegurar que elas suportem todas as cargas durante o uso. Na engenharia estrutural, a análise estática funciona como um raio-X: ela mostra como as forças externas agem sobre uma estrutura e como elas são transferidas para os pontos de fixação. Essa análise se baseia no princípio fundamental de que um corpo está em equilíbrio quando a soma de todas as forças e a soma de todos os momentos que atuam nele são zero.

No avião, usamos a estática para checar como suportes, estruturas de fixação e racks de

equipamentos eletrônicos aguentam o peso. Esses sistemas têm que suportar as cargas dos equipamentos e passá-las com segurança para a estrutura do avião, mantendo tudo íntegro e seguro.

Para fazer isso, precisamos de métodos que nos ajudem a calcular as forças e as reações nos apoios. A mecânica aplicada nos dá as ferramentas essenciais: a modelagem da estrutura, a criação de Diagramas de Corpo Livre (DCL) — que são representações gráficas das forças — e as equações de equilíbrio estático. Ao aplicar esses conceitos, podemos entender o comportamento dos sistemas de suporte e confirmar se eles são seguros e estáveis para o uso em aeronaves.

Objetivo Geral

Realizar a análise estática de um rack de equipamentos aeronáuticos, determinando as reações estruturais nos pontos de fixação por meio da aplicação das equações de equilíbrio da mecânica.

Objetivos Específicos

Modelar o sistema estrutural representativo de um rack de equipamentos aeronáuticos;

Elaborar o diagrama de corpo livre do sistema estrutural analisado;

Aplicar as equações de equilíbrio da estática para determinar as forças atuantes no sistema;

Calcular as forças de reação nos pontos de apoio ou fixação do rack estrutural.

2 - Fundamentação Teórica

2.1 - Conceitos Fundamentais de Estática

A Estática é a parte central da mecânica clássica que estuda quando um corpo fica em perfeito equilíbrio, mesmo sob a ação de forças. Basicamente, a estática investiga sistemas mecânicos que estão parados ou se movendo em velocidade constante, onde a soma de todas as forças e momentos aplicados é zero.

Na prática da engenharia, usamos a análise estática o tempo todo para dimensionar estruturas e conferir se elas aguentam o tranco, calculando as forças internas e as reações nos apoios sob diferentes cargas.

Para que uma estrutura esteja em equilíbrio, ela precisa cumprir duas regras:

Equilíbrio translacional;

Equilíbrio rotacional.

Matematicamente, isso significa que a soma de todas as forças e a soma de todos os momentos que atuam no corpo devem ser iguais a zero. Na engenharia aeronáutica, estes princípios são aplicados em praticamente tudo, desde os suportes e sistemas de fixação até as estruturas que sustentam os equipamentos eletrônicos

2.2 - Diagramas de Corpo Livre

O diagrama de corpo livre (DCL) é uma ferramenta fundamental na análise de sistemas mecânicos e estruturais. Ele consiste na representação gráfica de um corpo isolado, na qual são indicadas todas as forças externas, momentos e reações que atuam sobre esse corpo.

Segundo Engineering Mechanics: Statics, o objetivo do diagrama de corpo livre é simplificar a análise estrutural ao representar apenas o elemento estrutural de interesse e as forças que atuam sobre ele.

A construção de um diagrama de corpo livre envolve algumas etapas fundamentais:

Isolamento do corpo ou estrutura a ser analisada;

Identificação de todas as forças aplicadas;

Identificação das reações nos apoios;

Definição de um sistema de coordenadas para a análise.

No caso de racks aeronáuticos utilizados para instalação de equipamentos aviônicos, o diagrama de corpo livre permite representar o sistema estrutural simplificado do rack, indicando o peso dos equipamentos instalados e as reações estruturais nos pontos de fixação.

Esse tipo de representação gráfica é essencial para a aplicação das equações de equilíbrio e para o cálculo das forças de reação nos suportes estruturais.

2.3 - Equações de Equilíbrio da Estática

A análise estática de estruturas baseia-se na aplicação das equações de equilíbrio, que garantem que o sistema analisado permanece em repouso ou em movimento uniforme.

Para um corpo rígido em equilíbrio, as equações fundamentais da estática são:

Equilíbrio de forças

$$\sum F_x = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (3)$$

Equilíbrio de momentos

$$\sum M = 0 \quad (4)$$

Essas equações indicam que a soma das forças atuantes em cada direção e a soma dos momentos em relação a qualquer ponto devem ser iguais a zero.

Segundo Vector Mechanics for Engineers: Statics, essas equações permitem determinar as reações estruturais nos apoios de vigas, suportes e sistemas estruturais submetidos a diferentes tipos de carregamento.

Na análise de racks estruturais aeronáuticos, essas equações são utilizadas para calcular as forças de reação nos suportes que conectam o rack à estrutura da aeronave.

2.4 - Padrões Racks Aviônicos e ARINC 600

Em aeronaves modernas, diversos sistemas eletrônicos são responsáveis por funções críticas, como navegação, comunicação e gerenciamento de voo. Os racks aviônicos são projetados para suportar cargas associadas ao peso dos equipamentos e transmitir essas cargas de forma segura para a estrutura da aeronave. De acordo com a literatura de estruturas aeronáuticas, os sistemas de suporte para equipamentos eletrônicos devem garantir estabilidade estrutural, facilidade de manutenção e resistência às cargas operacionais presentes durante o voo (Megson, 2017).

Um dos padrões mais utilizados na indústria aeronáutica para instalação de equipamentos eletrônicos é o padrão **ARINC 600**, amplamente empregado em aeronaves comerciais para acomodação de unidades eletrônicas modulares denominadas **LRUs (Line Replaceable Units)**. Esse padrão define dimensões estruturais, interfaces mecânicas e sistemas de conexão elétrica utilizados na instalação de equipamentos aviônicos (SAE International, 2019).

Os equipamentos baseados no padrão ARINC 600 utilizam um sistema modular denominado MCU (Modular Concept Unit), que define a largura da unidade. Um MCU equivale a aproximadamente 25,4 mm (1 polegada). A altura desses módulos é padronizada em 194 mm, permitindo o encaixe uniforme em racks de baias aviônicas comerciais.

Essas dimensões são especificadas nos padrões industriais utilizados para a instalação de equipamentos aviônicos em aeronaves comerciais (SAE International, 2019).

Tabela 1 - Dimensões MCU (Modular Concept Unit).

| Tamanho | Largura Aproximada | Altura Padrão |
|---------|--------------------|---------------|
| 1 MCU | 25,4 mm | 194 mm |
| 4 MCU | 124 mm | 194 mm |
| 8 MCU | 250 mm | 194 mm |
| 12 MCU | 380 mm | 194 mm |

Fonte: Adaptado de ARINC Report 600-19: *Air Transport Avionics Equipment Interfaces*

Além dos racks modulares baseados em padrões industriais, aeronaves também utilizam **racks estruturais instalados em baias aviônicas**, responsáveis por suportar múltiplos equipamentos eletrônicos simultaneamente. Esses racks são geralmente fabricados em ligas de alumínio aeronáutico e fixados diretamente à fuselagem da aeronave.

Dimensões típicas desses racks estruturais variam conforme o tipo de aeronave, mas estudos e manuais de engenharia aeronáutica indicam dimensões aproximadas na faixa de:Essas dimensões são compatíveis com estruturas de suporte utilizadas em baias aviônicas descritas em literatura de engenharia estrutural aeronáutica (Megson, 2017; NASA Technical Reports Server).

Tabela 2 - Dimensões Típicas.

| Parâmetro | Dimensão típica |
|-------------|-----------------|
| Largura | 400 – 600 mm |
| Comprimento | 500 – 700 mm |
| Altura | 300 – 500 mm |

3.0 - Metodologia

3.1 - Descrição do Sistema Analisado

O sistema analisado neste estudo consiste em um modelo simplificado de rack estrutural utilizado para suporte de equipamentos aviônicos em aeronaves.

O modelo foi inspirado em racks instalados em baias aviônicas e em estruturas de montagem de equipamentos baseadas no padrão ARINC 600.

Os racks aviônicos são normalmente instalados em módulos substituíveis que podem ser removidos e instalados rapidamente durante procedimentos de manutenção (Megson, 2017). Para a análise estrutural foi considerado um rack representado por uma estrutura metálica horizontal apoiada em dois suportes laterais, simulando a configuração estrutural típica de racks utilizados para instalação de equipamentos aviônicos.

O equipamento instalado no rack foi representado por uma carga concentrada correspondente ao peso total do equipamento. Para fins de análise foi adotado um valor de **500 N**, representando o peso aproximado de uma unidade eletrônica aviônica de médio porte.

A utilização de valores representativos para cargas estruturais em análises simplificadas é uma prática comum em estudos preliminares de engenharia estrutural (Hibbeler, 2016).

3.2 - Hipóteses Simplificadoras

O modelo simplificado assume que as cargas do equipamento são estáticas, assim como a estrutura dos racks, baias e bandejas são estruturas rígidas.

Os efeitos dinâmicos e vibracionais do ambiente aeronáutico foram contemplados de forma simplificada no modelo estático através da adoção de fatores de carga inerciais, transformando excitações dinâmicas em cargas estáticas equivalentes máximas

3.3 - Construção do Diagrama de Corpo Livre

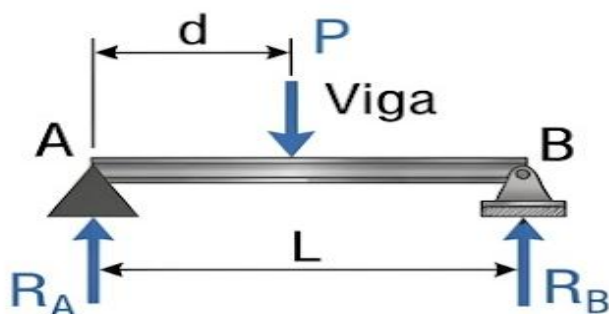


Figura 1 – Diagrama de Corpo Livre.

Os diagramas de corpo livre abordam o peso P do equipamento aplicado sobre uma viga apoiada pelo apoio A e o apoio B, o peso está a uma distância (d) do centro da viga de comprimento L , as reações R_A e R_B ditam as forças que os apoios respectivos reagem ao sistema. Considera-se que o peso do equipamento depende da força G atuante no sistema

3.4 - Definição do Sistema de Coordenadas

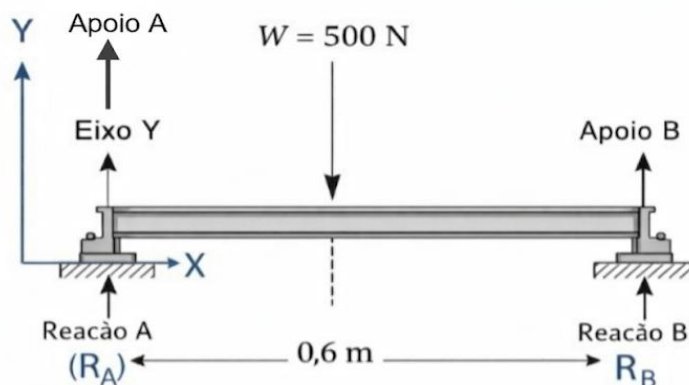


Figura 2 – Sistema de coordenadas bidimensional.

3.5 - Propriedades do Material e Perfil Estrutural

Para a realização da análise de tensões e verificação de segurança, foi necessário definir o material e a geometria da seção transversal da estrutura do rack. Considerando os padrões da indústria aeronáutica para componentes usinados e estruturas de suporte secundárias, adotou-se a liga de alumínio 2024-T3. Esse material é amplamente utilizado na aviação devido à sua excelente relação resistência-peso e tolerância ao dano (Megson, 2017). A liga 2024-T3 possui um limite de escoamento (σ_e) aproximado de 345 MPa (DoD, 2003).

Para a simplificação do cálculo do momento de inércia, o perfil do rack foi modelado como uma viga de seção transversal retangular maciça, com base (b) de 20 mm (0,02 m) e altura (h) de 30 mm (0,03 m). Essa geometria permite calcular as tensões de flexão atuantes no suporte quando submetido ao carregamento estático do equipamento.

4 - Modelagem do Sistema Estrutural

Para a realização da análise estrutural, o rack foi modelado como uma viga simplesmente apoiada com dois suportes estruturais localizados nas extremidades da estrutura.

Esse tipo de modelagem é amplamente utilizado em análises preliminares de engenharia para representar estruturas que suportam cargas estáticas distribuídas ou concentradas. A aplicação desse modelo permite determinar as reações estruturais nos apoios a partir das equações fundamentais de equilíbrio da estática (Hibbeler, 2016; Beer & Johnston, 2015).

O modelo adotado representa uma simplificação de racks utilizados em baias aviônicas e estruturas de montagem de equipamentos eletrônicos baseadas no padrão ARINC 600. Nesses sistemas, os equipamentos eletrônicos são instalados em bandejas estruturais que transmitem as cargas para suportes metálicos fixados à estrutura da aeronave.

Considerando um comprimento estrutural de **0,6 m**, representativo de racks aviônicos compactos, foi aplicada uma carga concentrada correspondente ao peso do equipamento instalado no centro da estrutura.

A partir desse modelo estrutural simplificado, foram aplicadas as equações de equilíbrio da estática para determinar as reações estruturais nos suportes do rack.

4.1 - Aplicação das Equações de Equilíbrio

Para determinar as forças de reação nos suportes estruturais, foram aplicadas as equações fundamentais da estática.

De acordo com os princípios do equilíbrio de corpos rígidos, um sistema encontra-se em equilíbrio quando a soma das forças e a soma dos momentos que atuam sobre ele são iguais a zero.

Equilíbrio de forças na direção vertical:

$$\sum F_y = 0$$

Considerando as reações estruturais nos suportes A e B e o peso do equipamento aplicado na estrutura, a equação de equilíbrio pode ser escrita como:

$$R_A + R_B - W = 0$$

onde:

R_A = reação no suporte A;

R_B = reação no suporte B;

W = peso do equipamento.

Substituindo o valor adotado para o peso do equipamento:

$$R_A + R_B - 500 = 0$$

ou

$$R_A + R_B = 500N$$

Essa equação indica que a soma das reações nos suportes deve ser igual ao peso total aplicado na estrutura.

4.2 - Cálculo das Reações Estruturais

Para determinar os valores individuais das reações estruturais, aplica-se a equação de equilíbrio de momentos em relação a um dos apoios.

Considerando o cálculo do momento em relação ao suporte A:

$$\sum M_A = 0$$

O momento gerado pela reação no suporte B e pelo peso do equipamento pode ser representado da seguinte forma:

$$R_B \cdot L - W \cdot \frac{L}{2} = 0$$

onde: L = comprimento da viga.

Substituindo os valores adotados:

$$R_B \cdot 0.6 - 500 \cdot 0.3 = 0$$

$$R_B = \frac{150}{0.6}$$

Portanto:

$$R_B = 250N$$

Substituindo esse valor na equação de equilíbrio de forças:

$$R_A + 250 = 500$$

$$R_A = 250N$$

Assim, as reações estruturais nos suportes são:

$$R_A = 250N$$

$$R_B = 250N$$

4.3 - Distribuição das Cargas na Estrutura

A análise realizada indica que, para o caso em que a carga está aplicada no centro da estrutura e os apoios encontram-se posicionados simetricamente, as reações estruturais nos suportes apresentam valores iguais.

Isso ocorre porque a distribuição da carga é simétrica em relação aos pontos de apoio, fazendo com que cada suporte seja responsável por suportar metade do peso total aplicado na estrutura.

Em estruturas reais de racks aviônicos instalados em aeronaves, a distribuição das cargas pode variar dependendo da posição dos equipamentos instalados e da configuração estrutural do rack. Entretanto, a modelagem simplificada adotada neste estudo permite compreender o comportamento

estrutural básico do sistema e demonstrar a aplicação das equações de equilíbrio na determinação das reações estruturais.

Esse tipo de análise é amplamente utilizado em engenharia estrutural para avaliar o comportamento de sistemas de suporte e verificar se os elementos estruturais são capazes de suportar as cargas aplicadas sem comprometer a estabilidade da estrutura.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação das equações de equilíbrio ao modelo estrutural do rack aeronáutico analisado. Além disso, é realizada a interpretação física dos resultados, discutindo-se o comportamento estrutural do sistema e as limitações do modelo adotado.

A análise realizada baseia-se em um modelo estrutural simplificado que representa um rack utilizado para suporte de equipamentos eletrônicos em baias aviônicas de aeronaves.

4.4 - Análise de Carga Excêntrica

Embora a análise de uma carga centrada forneça o comportamento básico do sistema, na prática operacional das baias aviônicas, os equipamentos (LRUs) podem estar posicionados de forma assimétrica. Para avaliar esse cenário, realizou-se o cálculo das reações de apoio considerando a mesma carga de 500 N, porém deslocada para uma distância de 0,2 m do apoio A.

Aplicando a equação de equilíbrio de momentos em relação ao apoio A:

$$\sum M_A = 0$$

$$R_B \cdot L - W \cdot d = 0$$

$$R_B = \frac{100}{0.6} \approx 166,67 \text{ N}$$

Em seguida, aplicando o equilíbrio de forças na direção vertical:

$$\sum F = 0$$

$$R_A + R_B - W = 0$$

$$R_A = 500 - 166,67 = 333,3 \text{ N}$$

Onde:

M_A = Momento em relação ao apoio A ($N \cdot m$);

σ = Reação estrutural no suporte A (N);

R_B = Reação estrutural no suporte B (N);

W = Força peso do equipamento (N);

L = Comprimento total da estrutura (viga) (m);

d = Distância do ponto de aplicação da carga até o apoio de referência (m);

F_y = Forças atuantes no eixo vertical (N).

Os resultados demonstram que a excentricidade da carga altera significativamente a distribuição das forças, sobrecarregando o apoio mais próximo do centro de gravidade do equipamento.

4.5 - Análise de Tensão de Flexão

Para garantir a integridade do rack, é imperativo calcular a tensão máxima de flexão que atua na estrutura. O pior cenário de momento fletor (M_{max}) em uma viga simplesmente apoiada ocorre quando a carga está centralizada. O momento máximo é dado por:

$$M_{max} = \frac{W \cdot L}{4}$$

$$M_{max} = 75 \text{ N} \cdot \text{m}$$

A tensão de flexão (σ) é calculada através da fórmula clássica da resistência dos materiais (Hibbeler, 2016):

$$\sigma = \frac{M_{max} \cdot C}{I}$$

Onde (C) é a distância da linha neutra até a fibra mais externa (metade da altura, ou seja, 0,015 m), e (I) é o momento de inércia da seção retangular:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Onde:

M_{max} = Momento fletor máximo atuante na estrutura ($N \cdot m$);

σ = Tensão normal de flexão (Pa ou MPa);

C = Distância da linha neutra (centroide) até a fibra mais externa do perfil (m);

I = Momento de inércia da área da seção transversal (m);

b = Base do perfil da seção transversal (m);

h = Altura do perfil da seção transversal (m).

Considerando as dimensões do perfil retangular estipuladas na metodologia ($b = 0,02 m$ e $h = 0,03 m$), temos que $c = 0,015 m$. O momento de inércia é:

$$I = \frac{0,02 \cdot (0,03)^3}{12}$$

$$I = 4,5 \times 10^{-8} m^4$$

Substituindo os valores na equação de tensão:

$$\sigma = \frac{75 \cdot 0,015}{4,5 \times 10^{-8}}$$

$$\sigma = 25 \times 10^6 Pa$$

ou

$$\sigma = 25 MPa$$

A tensão máxima normal de flexão gerada na viga sob carga estática de 1G é de 25 MPa.

5 - Resultados Obtidos

A aplicação das equações de equilíbrio da estática permitiu determinar as reações estruturais nos suportes do rack aeronáutico.

Considerando o modelo adotado, no qual o rack foi representado como uma viga simplesmente apoiada com uma carga concentrada aplicada no centro da estrutura, foram obtidos os seguintes valores de reação nos apoios estruturais.

Tabela 3 – Reações estruturais nos suportes do rack.

| Suporte | Reação Estrutural (N) |
|-----------|-----------------------|
| Suporte A | 250 |
| Suporte B | 250 |

Os resultados indicam que cada suporte é responsável por suportar metade do peso total aplicado na estrutura, uma vez que a carga foi considerada simetricamente distribuída em relação aos pontos de apoio.

Esse comportamento é consistente com os princípios da estática aplicados a vigas simplesmente apoiadas submetidas a cargas concentradas em posição central.

5.1 - Interpretação Física dos Resultados

A distribuição das forças de reação obtidas está diretamente relacionada à posição da carga aplicada na estrutura do rack.

Quando uma carga concentrada é aplicada exatamente no centro de uma viga simplesmente apoiada, ocorre uma distribuição simétrica das forças de reação nos apoios. Nesse caso, cada suporte absorve metade da carga total aplicada.

Entretanto, em aplicações reais de engenharia aeronáutica, a distribuição das cargas pode ser diferente da considerada neste estudo. Equipamentos eletrônicos instalados em racks aviônicos nem sempre apresentam distribuição uniforme de massa, o que pode resultar em reações estruturais diferentes em cada ponto de apoio.

Por exemplo, se o equipamento estiver instalado mais próximo de um dos suportes, a reação estrutural nesse suporte será maior, enquanto o outro suporte receberá uma carga menor. Esse comportamento decorre do aumento do momento gerado pela força peso em relação ao apoio mais distante.

Esse tipo de análise é essencial no projeto estrutural de racks aeronáuticos, pois permite identificar como as cargas são transmitidas para a estrutura da aeronave e verificar se os elementos estruturais possuem capacidade suficiente para suportar essas forças.

É importante ressaltar que, em uma **baia aviônica** real, a distribuição de carga raramente é perfeitamente simétrica. Como os racks acomodam múltiplas LRUs de diferentes larguras MCU, o centro de gravidade do sistema pode estar deslocado. Isso exige que o engenheiro calcule as reações considerando cargas pontuais assimétricas para garantir que os suportes de fixação na fuselagem não excedam os limites de escoamento do material sob fatores de carga operacionais.

5.2 - Verificação de Segurança Estrutural

Com a tensão máxima de flexão determinada em 25 MPa, procedeu-se com a verificação da margem de segurança da estrutura em relação ao material adotado (Alumínio 2024-T3, com limite de escoamento de 345 MPa). O Fator de Segurança (FS) estático do projeto é calculado pela razão entre o limite de escoamento do material e a tensão máxima de trabalho:

$$FS = \frac{\sigma_e}{\sigma}$$

$$FS = \frac{345}{25}$$

$$FS = 13,8$$

Onde:

FS = Fator de Segurança (adimensional);

σ_e = Limite de escoamento do material (MPa);

σ = Tensão máxima atuante calculada (MPa);

O valor obtido demonstra que, sob condições puramente estáticas e de repouso (1G), a estrutura está amplamente superdimensionada e não sofrerá deformação plástica. No entanto, no contexto aeronáutico, as regulamentações como a FAR Part 25 (FAA, 2023) exigem que os racks suportem cargas inerciais severas, como forças de aceleração vertical ou impactos (podendo chegar a 9G em pousos de emergência). O alto Fator de Segurança estático encontrado garante que a estrutura possua reserva mecânica suficiente para absorver essas excitações dinâmicas sem falhar

5.3 - Limitações do Modelo

Embora o modelo estrutural adotado permita demonstrar a aplicação das equações de equilíbrio e compreender o comportamento básico do sistema, algumas simplificações foram adotadas durante a análise.

Primeiramente, foi considerado que a estrutura do rack comporta-se como um corpo rígido, desconsiderando possíveis deformações estruturais que podem ocorrer quando a estrutura é submetida a cargas reais.

Além disso, o estudo considerou apenas cargas estáticas associadas ao peso do equipamento instalado no rack. Em condições reais de operação de aeronaves, os racks aviônicos estão sujeitos a diversos tipos de cargas adicionais, como vibrações, acelerações durante manobras de voo e efeitos dinâmicos associados à operação da aeronave.

Outro aspecto não considerado foi a presença de cargas aerodinâmicas e cargas inerciais decorrentes das condições de voo, que podem influenciar significativamente o comportamento estrutural do sistema.

Por fim, a distribuição real de massa dos equipamentos instalados nos racks foi representada por uma carga concentrada no centro da estrutura, o que constitui uma simplificação em relação às condições reais de instalação.

Apesar dessas limitações, o modelo adotado é adequado para fins didáticos e para demonstrar os princípios fundamentais da análise estática aplicada a estruturas aeronáuticas.

5.4 - Implicações para Engenharia Aeronáutica

A análise estática de estruturas de suporte para equipamentos eletrônicos desempenha um papel fundamental no projeto estrutural de aeronaves. Racks aviônicos são componentes essenciais para a instalação e organização de sistemas eletrônicos responsáveis por funções críticas, como navegação, comunicação e controle de voo.

O dimensionamento adequado dessas estruturas garante que os equipamentos permaneçam firmemente fixados à estrutura da aeronave e que as cargas geradas durante a operação sejam transmitidas de forma segura para os elementos estruturais da fuselagem.

De acordo com literatura de engenharia estrutural aeronáutica, a aplicação dos princípios da estática constitui uma etapa inicial importante no desenvolvimento de estruturas de suporte. A partir dessa análise preliminar, engenheiros podem avaliar o comportamento estrutural do sistema e definir requisitos para análises mais avançadas, como simulações numéricas e análises dinâmicas.

Assim, a análise estática contribui significativamente para a segurança estrutural e para a confiabilidade dos sistemas instalados em aeronaves.

6 - Conclusões

Nosso trabalho buscou realizar a análise estática de um rack aeronáutico que segura equipamentos eletrônicos nas baias aviônicas. Para isso, criamos um modelo simples, tratando o rack como uma viga apoiada sob o peso de um equipamento.

Os primeiros resultados mostraram que, quando o peso está bem no centro do rack, os dois suportes dividem a carga igualmente. No entanto, ao analisar a carga fora do centro (excêntrica), ficou claro que o deslocamento do equipamento muda drasticamente essa distribuição, forçando muito mais o apoio que está mais próximo. Isso reforça a necessidade de ter um cuidado extra ao dimensionar os pontos de fixação.

Olhamos também para a segurança estrutural, calculando que a tensão máxima no perfil de alumínio 2024-T3 é de 25 MPa. Comparando isso com o limite de escoamento do material, chegamos a um Fator de Segurança estático de 13,8. Embora esse número sugira que a estrutura é muito forte em condições normais (parada ou 1G), concluímos que essa grande margem é vital para o setor aeroespacial. Ela garante que o rack tenha a resistência de sobra para aguentar as cargas dinâmicas e inerciais extremas (como em pousos de emergência) exigidas pelas certificações aeronáuticas, evitando falhas.

Em suma, calcular as reações estruturais é essencial para que os suportes sejam dimensionados corretamente e para garantir que o equipamento fique íntegro. A análise estática e a resistência dos materiais são, portanto, ferramentas indispensáveis no projeto aeronáutico, aumentando a segurança, a confiabilidade e a eficiência dos sistemas a bordo.

7 – Referências Bibliográficas

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. *Vector mechanics for engineers: statics*. Nova York: McGraw-Hill, 2015.

DOD – DEPARTMENT OF DEFENSE. *MIL-HDBK-5J: metallic materials and elements for aerospace vehicle structures*. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2003.

FAA – FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *14 CFR Part 25: airworthiness standards: transport category airplanes*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2023. Disponível em: <https://www.faa.gov>.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MEGSON, T. H. G. *Aircraft structures for engineering students*. 6. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *NASA technical reports server (NTRS)*. Washington, D.C.: NASA. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov>.

SAE INTERNATIONAL. *SAE aerospace standards*. Warrendale: SAE International, 2019. Disponível em: <https://www.sae.org>.