

ANÁLISE DO PROJETO DA MOLA CANTILEVER NO TREM DE POUSO

Ibsen Danilo da Silva⁽¹⁾ (ibsendanilo@hotmail.com) Benjamin Batista de Oliveira Neto⁽¹⁾ (benjamin.batista@ifam.edu.br) Michaella Socorro Bruce Fialho⁽¹⁾ (michaella.fialho@ifam.edu.br) Paulo Fernando Figueiredo Maciel⁽¹⁾ (paulo.figueiredo@ifam.edu.br)

⁽¹⁾ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas; Departamento de Processos Industriais

RESUMO: *Molas cantilever são frequentemente preferidas para equipar a aviação geral por sua simplicidade de manutenção, baixo custo e menor peso. Estas molas planas têm uma extremidade presa à estrutura da aeronave e a outra suportando as cargas decorrentes de pousos, decolagens e manobras no solo. Diante disso, este estudo tem como objetivo aprimorar o dimensionamento teórico dessas vigas, substituindo a tradicional viga prismática por uma viga com momento de inércia variável. A largura da viga foi ajustada de modo a permitir uma tensão constante ao longo da mesma, mantendo-se a deflexão e otimizando a utilização do material na seção transversal. Essa abordagem permite um uso mais eficiente dos materiais, resultando em uma viga mais leve e com mesmo desempenho. Para o correto dimensionamento das vigas, foram realizados cálculos de deformação por flexão, utilizando a integração da equação diferencial elástica e o método energético de Castigliani. Adicionalmente, o software Autodesk Inventor foi empregado para simular a deflexão e analisar os esforços envolvidos. Essa combinação de métodos teóricos e simulações digitais permitiu uma análise dos diferentes modelos de vigas. Os resultados confirmaram que as vigas com momento de inércia variável oferecem um desempenho superior em comparação às vigas prismáticas. Ambas as configurações cumprem a mesma função estrutural, mas a viga com geometria variável se destaca por sua menor massa, tornando-a uma solução mais eficiente para aplicações na aviação geral.*

PALAVRAS-CHAVE: GEOMETRIA DE VIGAS, MOMENTO DE INÉRCIA, MOLAS ESPECIAIS.

ANALYSIS OF CANTILEVER SPRING DESIGN IN LANDING GEAR

ABSTRACT: *Cantilever springs are often preferred for general aviation due to their ease of maintenance, low cost, and reduced weight. These flat springs have one end attached to the aircraft structure and the other supporting the loads from landings, takeoffs, and ground maneuvers. This study aims to improve the theoretical design of these beams by replacing the traditional prismatic beam with one of variable moment of inertia. The beam's width was adjusted to allow for constant stress along its length, maintaining deflection while optimizing material use in the cross-section. This approach enables more efficient material usage, resulting in a lighter beam with the same performance. For proper beam design, deformation calculations were conducted using the integration of the elastic differential equation and Castigliano's energy method. Additionally, Autodesk Inventor software was used to simulate deflection and analyze the forces involved. This combination of theoretical methods and digital simulations allowed for an analysis of different beam models. The results confirmed that beams with variable moment of inertia offer superior performance compared to prismatic beams. Both configurations fulfill the same structural function, but the variable geometry beam stands out for its lower mass, making it a more efficient solution for general aviation applications.*

KEYWORDS: BEAM DESIGN, MOMENT OF INERTIA, SPECIAL SPRINGS.

1. INTRODUÇÃO

O Trem de pouso é um sistema que tem a função de prover à aeronave estabilidade nas manobras no solo, durante taxi ou tratoramento, decolagem e pouso com segurança. Foi definido por Conway (1958) como “O intermediário necessário entre a aeronave e a catástrofe”. O amortecedor é o principal componente do sistema de trem de pouso e trabalha para atenuar a energia do pouso e manobras no solo transmitida à estrutura da aeronave. São classificados, de maneira simplificada, quanto tipo: os que utilizam molas sólidas (madeira, aço ou borracha) e os que utilizam fluido como mola (óleo, gás ou uma junção de ambos).

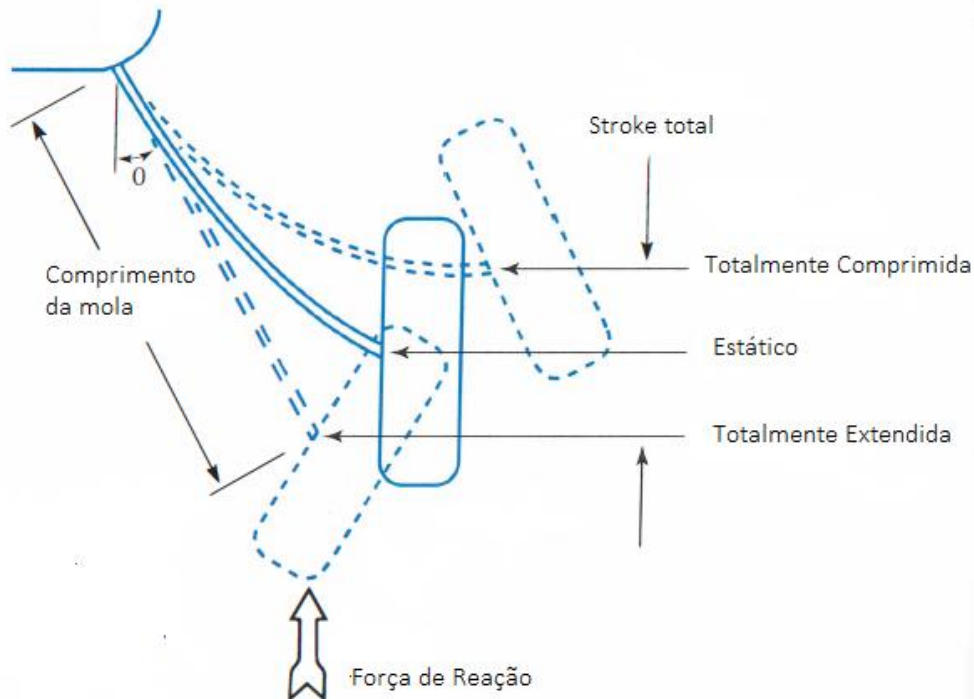
Vigas do tipo cantilever são utilizadas como amortecedores nos trens de pouso na aviação desde 1939 pois são simples construção, forte, durável e com resistência de arrasto reduzida ao mínimo (PAZMANY, 1986). Nos dias atuais esse sistema ainda é utilizado na aviação geral de pequeno porte por manter sua simplicidade, agregar confiabilidade e ser de fácil manutenção. Apesar de sua simplicidade este tipo de amortecedor apresenta variáveis em seu projeto como seleção do material, dimensões e restrições quanto ao peso e desempenho da deflexão durante sua operação na dissipação da energia do pouso, por exemplo.

Molas cantilever são vigas planas fixas em uma extremidade e que sofrem uma carga na outra. Podem ter seção transversal constante por todo o seu comprimento (vigas prismáticas) ou variável (vigas não prismáticas), as vigas prismáticas são de mais fácil dimensionamento e construção, porém as vigas não-prismáticas possuem um melhor aproveitamento do material empregado o que reduz o peso e melhor utiliza as suas propriedades mecânicas.

A deflexão do amortecedor é um dado importante para o projetista porque influencia no *stroke* da aeronave, pois este é o somatório da deflexão dos amortecedores e dos pneus. O correto dimensionamento desta medida é primordial para atender os requisitos das agências reguladoras como FAA (*Federal Aviation Administration*) ou ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e prover a segurança necessária durante os pousos e decolagens.

A Figura 1 demonstra o comportamento das molas cantilever na aeronave, tendo basicamente três posições totalmente estendida quando em voo e sem sofrer esforços, outra posição a meio curso quando a aeronave se encontra estacionada no solo e totalmente comprimida quando no momento mais crítico do pouso inicia a deformação para absorver a energia do impacto onde a mesma é dissipada em parte devido ao movimento lateral do pneu no solo e a outra retorna em níveis aceitáveis para a estrutura da aeronave. A distância que corresponde ao intervalo entre totalmente estendido e totalmente comprimido é conhecido por *stroke*.

FIGURA 1: Comportamento de viga tipo cantilever instalada em aeronave



Fonte: Editado de Raymer (1989)

1.1. Objetivos e Justificativas

1.1.1. Objetivos gerais

Este trabalho visa reduzir o peso do sistema de trem de pouso por meio do aprimoramento do design da viga amortecedora, analisando como a geometria dessa viga influencia sua deflexão e a distribuição de tensões sob a carga do pouso

1.1.2. Objetivos específicos

- I. Analisar os esforços de deflexão aos quais estão submetidas as vigas;
- II. Calcular a deflexão das vigas;
- III. Comparar a utilização de vigas prismáticas e não prismáticas como amortecedores; e
- IV. Verificar a possibilidade de redução de peso do sistema de trem de pouso.

1.1.3. Justificativas

Segundo Sadraey (2012), aspectos do sistema de trem de pouso como amortecedores são problemas “não aeronáuticos” e devem ser determinados por engenheiros mecânicos. Esta afirmação serve para definir até que ponto do projeto do sistema de trem de pouso é atribuição do engenheiro aeronáutico, quando falamos em tipo de configuração, se retrátil ou não, distância do solo, e carga por trem é atribuição do engenheiro aeronáutico. Contudo, sistema de freio, mecanismo de retração e amortecedores tem seu projeto realizado pelo engenheiro mecânico.

Os amortecedores devem ser submetidos a cargas previstas pelo engenheiro aeronáutico e devem respeitar no ponto mais baixo a distância do solo previsto em projeto. É fundamental entender como comportam-se as molas planas ao desempenhar essa função em conjunto com os pneus para absorver e dissipar a energia proveniente do pouso. Além de quantificar a deflexão proveniente das cargas aplicadas nos amortecedores para respeitar os limites do projeto da aeronave. A aviação geral de pequeno porte utiliza na maioria de suas aeronaves vigas como amortecedores por sua simplicidade, baixo custo de manutenção e peso reduzido quando comparado com outros tipos de amortecedores.

O peso conjunto de trem de pouso é, em média, de 3%-6% do peso máximo de decolagem da aeronave e tem influência em diversos fatores como alcance, velocidade máxima, duração do voo, além disso traz a necessidade de pistas de pouso maiores. Estes fatores evidenciam a necessidade de reduzir o peso de uma aeronave o máximo possível. (Sadraey, 2013)

Diante do exposto, este estudo verifica a possibilidade de reduzir material nos amortecedores do trem de pouso, o que invariavelmente reduzirá o peso total da aeronave, sem alterar o *stroke*. Realizando a substituição de uma viga prismática por uma viga de momento de inércia variável para compreender o comportamento destes tipos de geometria das vigas e o quanto influenciam na absorção de energia.

1.2. Referencial Teórico

Molas planas são carregadas como viga e as do tipo *cantilever* possuem a peculiaridade de serem engastada em uma extremidade e ter a outra livre que resiste a uma carga e sofre deflexão. Para fins de projeto, é necessário que as tensões de flexão e cisalhamento não ultrapassem as tensões admissíveis do material da viga, sendo essa uma característica constante do material, o projetista deve trabalhar para encontrar o tamanho e forma ideal de modo a evitar ultrapassar os limites elásticos do material e provocar uma deformação plástica.

Iniciando pela resistência a flexão, o módulo de seção (S) exigido é igual ao momento fletor máximo (M_{max}) dividido pela tensão de flexão admissível para o material expresso na Equação 1.

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}} \quad (1)$$

A tensão admissível σ_{adm} está baseada nas propriedades mecânicas e no fator de segurança desejado para o projeto. A viga deve ser projetada com uma área de seção transversal maior do que o valor de S para evitar a que a tensão admissível seja superada. Conhecido o valor do módulo de seção, se a geometria da viga for simples, um retângulo ou círculo, as dimensões da viga podem ser facilmente determinadas através do valor do módulo de seção para um retângulo, Equação 2, e para um círculo, Equação 3:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3)$$

Hibbeler (2010) destaca a importância da resistência ao cisalhamento apenas quando se trabalha com madeira e que na maioria dos casos quando se trabalha com aço ou alumínio não será um problema. Carlos Branco (1989) afirma que a tensão de corte máxima em uma viga com seção retangular é, em regra, vinte vezes menor que a tensão de flexão máxima. Shigley (2011) alega que quando a relação de comprimento e espessura da viga é maior que dez ($l/t > 10$) o cisalhamento é desprezível. Com isto exposto, esse estudo não terá como foco a tensão de cisalhamento pois o material utilizado como amortecedores de trens pouso são ligas de aço ou alumínio e em regra tem a relação comprimento/espessura muito superior a dez.

Apesar de reconhecer o cisalhamento como uma tensão desprezível, na maior parte dos casos, esta pesquisa considerará as tensões de Von Mises para análise e finalidade de equivalência de esforços sofridos pela mola. A tensão equivalente de Von Mises é definida por “a tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicadas. Por regra, quando a tensão de Von Mises não ultrapassa a tensão de escoamento do material não há deformação plástica nem rotura na peça (NORTON, 2010).

Para vigas plenamente tensionadas (não prismáticas), as dimensões da seção transversal são variáveis o que leva a uma máxima tensão permitida em todas as seções. O que difere da viga prismática que tem uma seção transversal constante tendo em seu comprimento partes

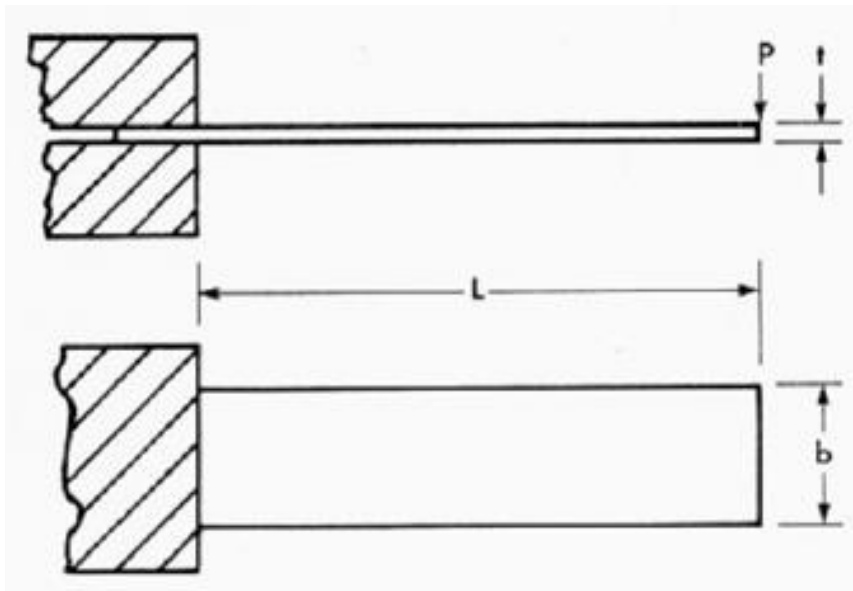
superdimensionadas quando analisamos a tensão. A variação da seção transversal pode ser em função da redução de largura, espessura ou uma combinação de ambas.

Há uma classificação básica de acordo com essas variações adotada pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) que classifica em função da espessura. As molas que tem espessura constante são classificadas como *Flat* e pertencem ao grupo “F”, as que tem a espessura reduzida acompanhando um contorno parabólico pertencem ao grupo “P” e as que tem espessura reduzida a uma taxa constante pertencem ao grupo “T”. Seguiremos o estudo dos tipos F1 – Cantilever retangular e F2 – Cantilever Trapezoidal pois são as mais utilizadas para a finalidade aeronáutica.

F1 – Cantilever retangular, representada na Figura 2, se comporta como uma viga prismática. Tem espessura (t) e largura (b) constante e ao ser submetida a uma carga P , na extremidade livre, sofre uma deflexão (z) que pode ser calculada através da Equação 4, onde E corresponde o módulo de elasticidade do material.

$$z = \frac{4PL^3}{Ebt^3} \quad (4)$$

FIGURA 2: Cantilever Retangular

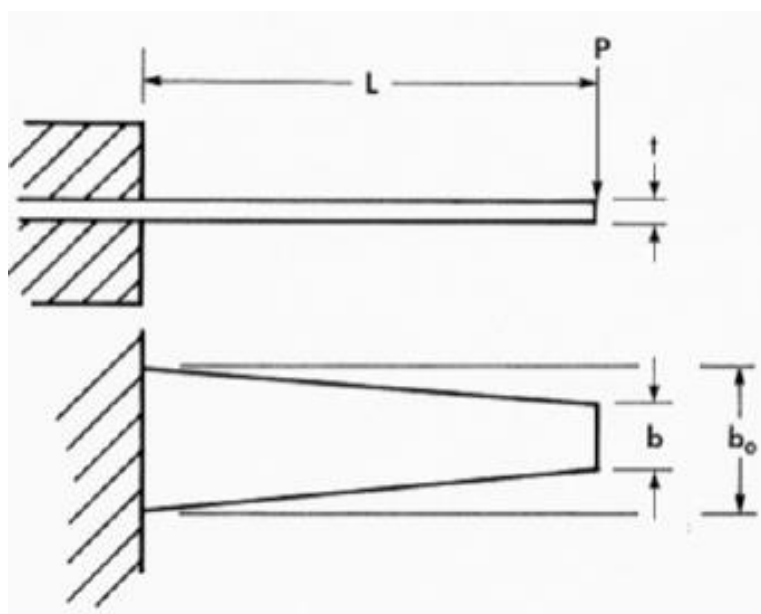


Fonte: Engineering Guide to Spring Design (2021)

F2 – Cantilever trapezoidal, representada na Figura 3, se comporta com uma viga não prismática, tem espessura constante e largura variável. Ao ser submetida a uma carga P na extremidade livre sofre uma deflexão que pode ser calculada através da Equação 5:

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{12P}{Et^3} \times \frac{x}{b_0 + 2 \times tg \alpha} \quad (5)$$

FIGURA 3: Cantilever Trapezoidal.



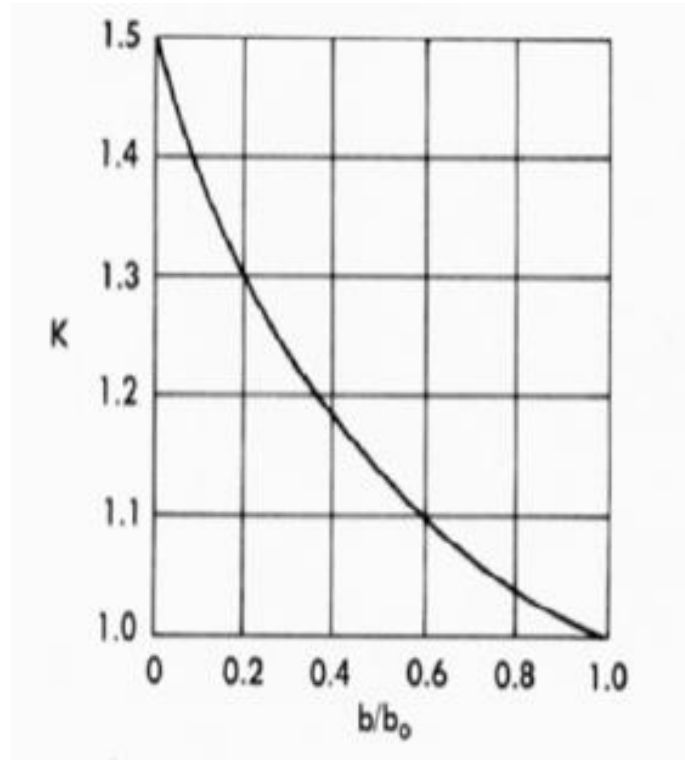
Fonte: Engineering Guide to Spring Design (2021)

A constatação da simplicidade para fins de projeto de uma viga prismática em relação a uma viga não prismática evidencia a dificuldade do projetista em realizar o correto dimensionamento da mola do trem de pouso. O engenheiro Vance Jaqua (1995) confirma essa dificuldade na execução do correto dimensionamento e cita a diferença entre as aeronaves que são certificadas e as aeronaves caseiras e protótipos, que ou possuem bons pilotos para caso de serem subdimensionadas ou quando superdimensionadas é mais constrangedor do que perigoso.

Tendo em vista a dificuldade para realizar os cálculos através da Equação 5, a utilização de meios gráficos para auxiliar o projeto da viga quando a mesma não possui o momento de inércia constante é bastante comum em vigas com largura trapezoidal. A relação da largura inicial (b_0) com a largura final (b_1) da viga é encontrada uma constante (k), por meio do gráfico da Figura 4, que será utilizada na Equação 6:

$$z = \frac{4KPL^3}{Eb_0t^3} \quad (6)$$

FIGURA 4. Fator de correção para viga trapezoidal.



Fonte: Engineering guide to spring design (2021)

O segundo teorema de Castigliano, método de energia útil para deflexão de viga, provê de modo direto e assertivo o cálculo para encontrar deflexões de uma estrutura tendo como ponto de partida sua energia de deformação. Para exemplificar, considere uma viga do tipo *cantilever* com uma carga P atuando na extremidade livre, a energia de deformação (*U*) é conhecida através da Equação 7:

$$U = \frac{PL^2}{6EI} \quad (7)$$

Derivando esta equação em relação a carga P aplicada temos:

$$\frac{dU}{dP} = \frac{d}{dP} \left(\frac{P^2 L^3}{6EI} \right) = \frac{PL^3}{3EI} \quad (8)$$

Portanto, a derivada da energia de deformação em relação a carga é igual a deflexão correspondente a carga no ponto de aplicação, neste caso específico, corresponde a deflexão máxima.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados dados do livro *Design for Flying* do autor David B. Thurston para iniciar o dimensionamento teórico de molas do trem de pouso utilizando viga prismática e modificando-a para viga não prismática alterando apenas a largura. Em seguida foi realizada a comparação entre as geometrias das vigas, visando obter o melhor aproveitamento do material empregado na absorção e dissipação de energia mantendo como referencial o peso total da mola.

Os cálculos matemáticos da deflexão teórica da viga cantilever foram realizados através das Equações 4, 6 e 8, citadas no referencial teórico. Somados a simulação da deflexão das vigas e distribuição de tensões através do software Autodesk Inventor Professional 2025, utilizou-se uma licença estudantil, como forma de facilitar o entendimento e confirmar os cálculos teóricos.

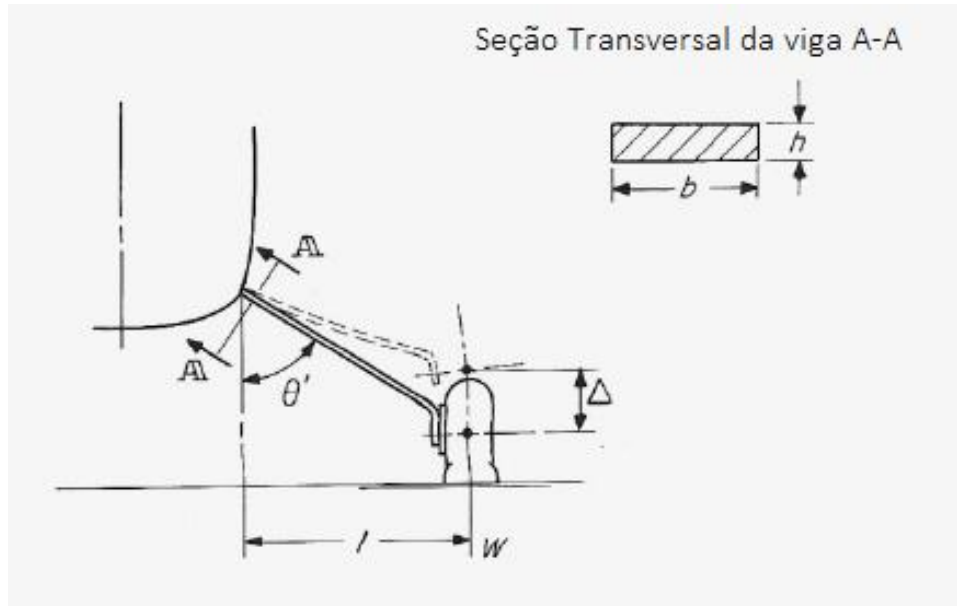
Por fim, foram computados os volumes de material necessário para construção das vigas em função das diferentes geometrias das molas e o valor das tensões máximas. As vigas resistiram a mesma carga e realizaram uma deflexão idêntica, de modo a igualar as condições as quais estão submetidas as molas.

2.1. Viga prismática

Na Figura 5, verifica-se uma mola do tipo *cantilever* atuando em conjunto com o pneu realizando o amortecimento da energia do pouso executando um trabalho através de uma distância vertical Δ . Esse deslocamento vertical, que para fins aeronáuticos é conhecida como *stroke*, é permitido pela deflexão da viga e do pneu. No corte A-A é apresentada a seção transversal dessa viga que é constante durante sua extensão. Os dados referentes ao pneu não serão levados em consideração para esta pesquisa, que focará na viga amortecedora. Informações adicionais que são relevantes para esta pesquisa são o comprimento l , 22,5 in, os valores de b e h , respectivamente 3 in e 0,69 in, o peso bruto da aeronave 2200 lb, e o módulo de elasticidade do aço é 3×10^7 psi. Será utilizado o peso total da aeronave por determinação da FAA que na FAR 23.473(g) define que cada trem de pouso

principal tem que ter capacidade de suportar no mínimo a carga vertical do pouso da aeronave com seu peso máximo.

FIGURA 5. Viga Prismática no trem de pouso



Fonte: Thurston (1978)

Ao utilizar a mola cantilever prismática para amortecer o pouso de uma aeronave com peso bruto de 2200 lb e utilizando os dados do texto acima para aplicar na Equação 4, determinou-se que a deflexão máxima será:

$$z = \frac{2200 \times 22,5^3}{3 \times 30 \times 10^6 \times \frac{3 \times 0,69^3}{12}} = 3,39in$$

Conhecida a deformação do amortecedor com momento de inércia constante, este valor foi utilizado como referência para o projeto da viga trapezoidal de modo a manter inalterado o stroke da aeronave e fazer com que as duas realizem o mesmo trabalho.

2.2. Viga Trapezoidal com largura variável

Buscando modificar a viga prismática do item 2.1 para uma viga com perfil trapezoidal. Foi mantido o valor da deflexão tendo em vista ser característica importante ao projeto da aeronave pois tem influência no *stroke*. Utilizando a equação de flecha máxima (z), identificada como a Equação 8 do item 1.2 deste estudo, o segundo o teorema de Castigliani, para vigas prismáticas e isolando a largura (b) na extremidade que é o ponto de maior deflexão, é possível encontrar o valor equivalente a b_1 que é menor valor para largura mantendo a tensão constante.

$$b_1 = \frac{PL^3}{4Ezt^3} = \frac{2200 \times 22,5^3}{4 \times 30 \times 10^6 \times 3,39 \times 0,69^3} \cong 0,20in$$

Utilizando a Equação 6 do item 1.2, e selecionando a relação entre as larguras (K) igual a 1,46 no gráfico da Figura 4, temos:

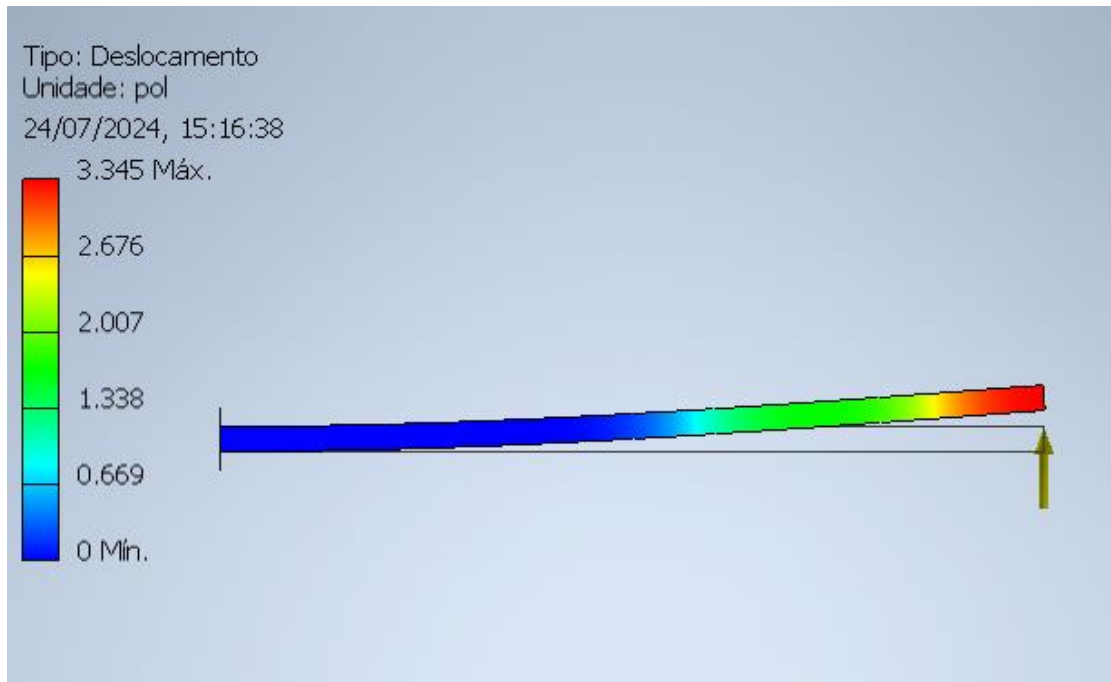
$$b_0 = \frac{4KPL^3}{Ezt^3} = \frac{4 \times 2200 \times 1,46 \times 22,5^3}{30 \times 10^6 \times 3,39 \times 0,69^3} = 4,38in$$

3. RESULTADO

Após projetar a viga com momento de inércia constante, utilizando as dimensões informadas no item 2.1 Viga prismática, no software Autodesk Inventor Professional 2025 constatou-se que a deflexão calculada através da aplicação da Equação 4 possui valor muito próximo ao apresentado na Figura 6. A simulação foi executada através da ferramenta de análise de tensão do software onde uma extremidade da viga foi fixada e na outra foi aplicada a carga de 2200 lb, já citada como peso bruto da aeronave.

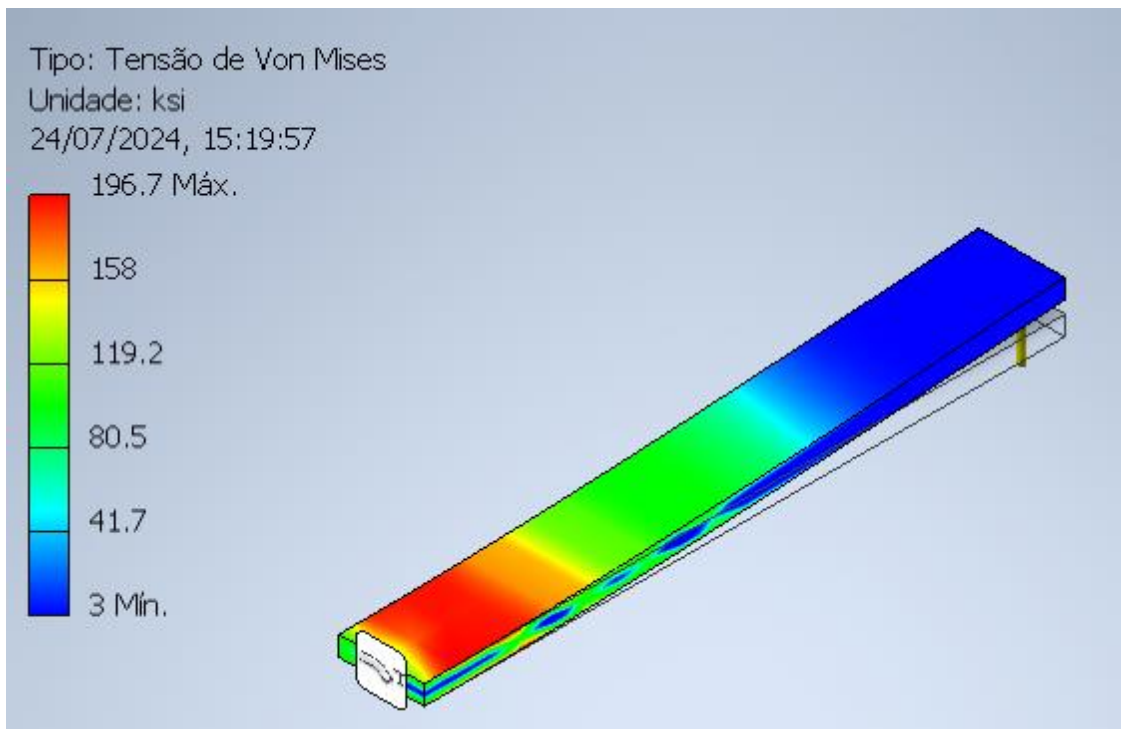
A simulação de tensões na mola, apresentada na Figura 7, revela que a resistência ao escoamento do material da viga, conforme especificado no item 2.1 Viga prismática, supera a tensão máxima de Von Mises de 196,7 ksi. Isso indica que a mola não sofrerá rompimento tampouco deformação plástica.

FIGURA 6. Simulação de deflexão.



Fonte: Autor (2024)

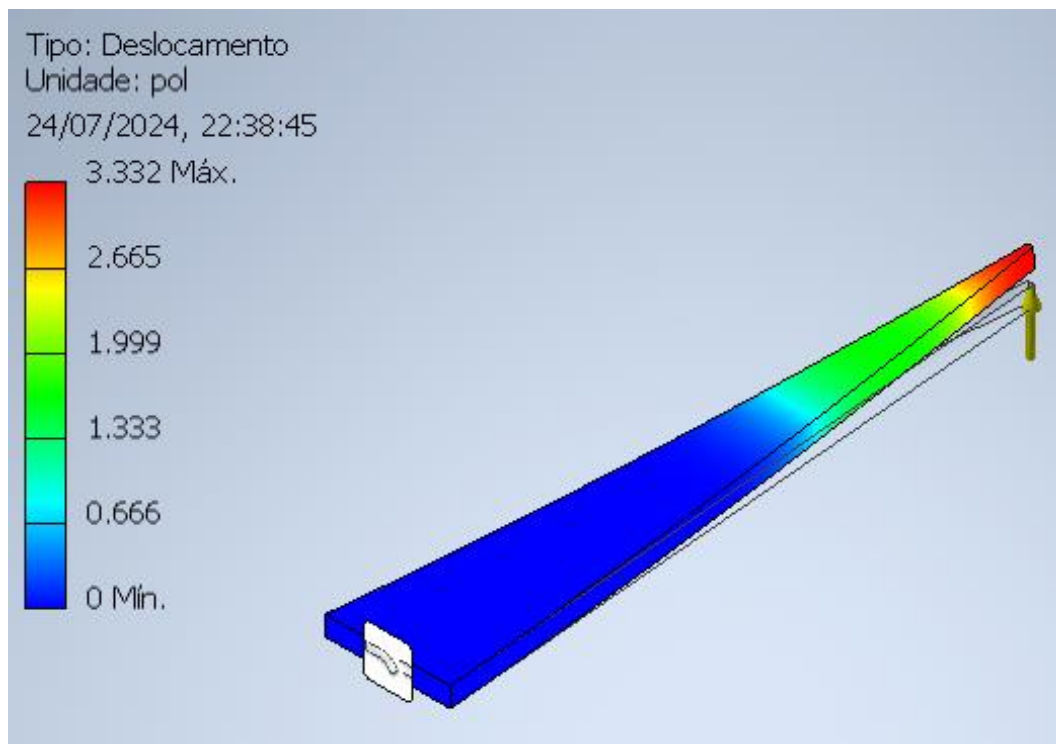
FIGURA 7: Tensões de Von Mises.



Fonte: Autor (2024)

Utilizando os valores de largura definidos no item 2.2, referente à viga trapezoidal de largura variável, e mantendo o comprimento e a espessura constantes, a viga de geometria variável foi projetada no software. A análise da Figura 8 confirma que a deflexão da viga trapezoidal se manteve idêntica à da viga prismática.

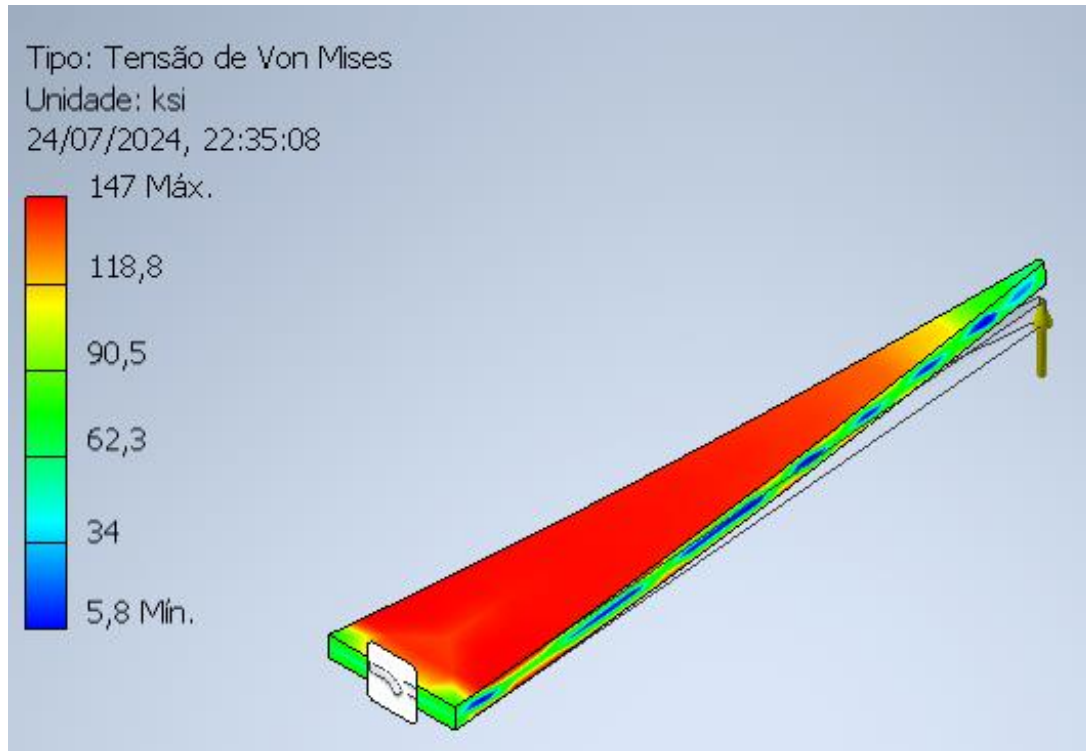
FIGURA 8. Simulação de deflexão.



Fonte: Autor (2024)

No que se refere às tensões na viga com momento de inércia variável, a Figura 9 ilustra que, com a redução da seção transversal, a mola permanece tensionada por uma maior extensão de seu comprimento, mas ainda dentro do limite elástico do material. A Tabela 1 apresenta os valores relativos ao volume de material utilizado na fabricação das duas vigas estudadas, bem como a tensão máxima de Von Mises.

FIGURA 9. Tensão Von Mises



Fonte: Autor (2024)

Tabela 1. Comparação do volume do material e tensões.

Geometria	Volume do material (in ³)	Tensão Máxima de Von Mises (ksi)
Viga Cantilever Retangular	46,58	196,7
Viga Cantilever Trapezoidal	35,55	147,0

Fonte: Autor (2024)

4. CONCLUSÃO

As vigas foram submetidas à mesma carga e dimensionadas para realizar o mesmo deslocamento, com o objetivo de identificar, durante a simulação, qual delas apresentaria melhor desempenho. A análise teórica mostrou que vigas plenamente tensionadas, quando utilizadas como molas no sistema de trem de pouso, oferecem vantagens em comparação às vigas prismáticas.

Houve uma redução na quantidade de material utilizado e, conseqüentemente, no peso da viga, além de uma melhor distribuição das tensões enquanto resistiam à carga. A variação na seção transversal da viga permitiu manter a operação segura e evitar o superdimensionamento da mola. A característica de deflexão máxima não foi comprometida, preservando a integridade do projeto final da aeronave.

O peso do amortecedor do trem de pouso foi reduzido em 23,7%, e as tensões de Von Mises diminuíram em 25%, evidenciando a eficácia das vigas trapezoidais em comparação às retangulares. No entanto, a viabilidade econômica deve ser considerada, pois as vigas retangulares por possuírem um processo de produção e design mais simples são mais baratas do que as vigas trapezoidais.

5. DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIATED SPRING, ENGINEERING GUIDE TO SPRING DESIGN. Barnes Group Inc, Plymouth, Michigan, 129 p., 2021.

BRANCO, C. M. Mecânica dos Materiais – Teoria e Aplicações. McGraw-Hill de Portugal, Lda, Lisboa, Portugal, 449 p., 1989.

CARLSON, H. Spring Designer's Handbook. Marcel Bekker, Inc, New York, New York, EUA, 350 p., 1978.

CONWAY, H. G. Landing Gear Design. Chapman & Hall, LTD, Londres, United Kingdom, 342p., 1958.

CURREY, N. S. Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Washigton – DC, 373 p., 1988.

Federal Aviation Administration, Department of Transportation, FAR PART 23 – Airworthiness Standards: Normal Category Airplanes, FAA, 2013.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. Mecânica dos Materiais – Tradução da 7ª versão norte-americana, Cengage Learning, São Paulo, São Paulo, 858 p., 2010.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais 7ª edição. Pearson Education do Brasil LTDA, São Paulo, São Paulo, 636 p., 2010.

JAUHA, V. The Right of Spring – Consider the spring landing gear. Kitplanes Magazine, Jan 1995, p 56 – 63, 1995.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas – uma versão integrada. Bookman Editora LTDA, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1028 p., 2011.

PAZMANY, L. Landing Gear Design for Light Aircraft – vol. 1. Pazmany Aircraft Corporation, San Diego, Califórnia, EUA, 380 p, 1986.

RAYMER, D. P. Aircraft Design: A Conceptual Approach. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Washigton – DC, 745 p., 1992.

SADRAEY, M. H. Aircraft Design: A Systems Engineering Approach. John Wiley & sons Ltd, West Sussex, United Kingdom, 778 p., 2012.

SHEKHAWAT, H. S.; ZHOU, H. Analysis and Design of Cantilever Springs. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v. 4, 2015.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SPRING DESIGN MANUAL – PARTE 1 DESIGN AND APPLICATION OF LEAF SPRING SAE HS 788, SAE, 1980.

SURESH, G. K.; ZHOU, H. Shape Design of Cantilever Springs, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v. 05, 2016.

THURSTON, D. B. Design for Flying. McGraw Hill Higher Education, New York, New York, EUA, 274 p., 1978.