

AVALIAÇÃO NUMÉRICA PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE MINIFOGUETES USANDO O CRITÉRIO DE FALHA DE VON MISES

Rafael Bonioli Kneip, rafael.kneip@engenharia.ufjf.br¹

Lara Albino Delage, lara.delage@engenharia.ufjf.br¹

Vinicius Pires Diniz de Oliveira, vinicius.pires@engenharia.ufjf.br¹

Washington Orlando Irrazabal Bohorquez, wirraz@engenharia.ufjf.br¹

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, Campus Universitário, CEP: 36036-900, Juiz de Fora - MG - Brasil

Resumo. As forças e processos envolvidos em um sistema de recuperação que faz uso de um paraquedas para a diminuição da velocidade de seu projétil, embora possam ser complexos, devem ser estudados para garantir o funcionamento adequado de todo o sistema. Essa análise pode ser feita considerando a snatch force, uma importante estimativa teórica. O presente trabalho visa o estudo, através de uma simulação computacional estática e linear, da snatch force em um protótipo que liga as cordas do paraquedas à fuselagem do foguete projetado para o apogeu de um quilômetro. A força considerada para essa simulação foi 527,34 N. Com os resultados da simulação realizada, o modelo foi validado através da análise do deslocamento que estará sujeito e dos valores obtidos para o Critério de Falha de Von Mises. Estes resultados possibilitam a continuidade do estudo do modelo.

Palavras chave: Minifoguete. Critério de Falha. Paraquedas. Snatch Force.

Abstract. The forces and processes involved in a recovery system that uses a parachute to decrease the terminal velocity of its projectile, even though can be complex, shall be studied to guarantee the proper function of the whole system. Such analysis can be done taking into account the snatch force, an important theoretical estimate. This work aims the study, through a static linear computational simulation, of the snatch force on a prototype that connects the parachute chords to the body of the rocket designed to an one kilometer apogee. The considered force for this simulation was 527.34N. With the results of the simulation that was carried out, the model was validated by the analysis of the displacement it will be subjected to and the values for the von Mises Stress. These results allow the continuity of the model study.

Keywords: model rocket, failure criterion, parachute, snatch force.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Araujo (2017), “a análise numérica é o estudo de algoritmos que busca resultados numéricos de problemas das mais diferentes áreas do conhecimento humano, modelados matematicamente”. Com a aplicação dos mesmos, por vezes assistida computacionalmente, é possível que problemas de grande complexidade possam ter soluções aproximadas, o que possibilita a análise dos mesmos.

De fato, a condução de simulações para a avaliação de projetos vêm sendo utilizada amplamente nos últimos anos. No trabalho de Benachio *et al.* (2016), os autores validaram um projeto de escada retrátil para automóveis com o uso de simulações computacionais. Ademais, no trabalho Fedaravičius *et al.* (2016), foram comparados dois modelos de míssil, utilizando simulação fluidodinâmica, a fim de determinar importantes características dos projetos, de modo a guiar a construção de um modelo seguro.

No âmbito do foguetemodelismo, também conhecido como míssilmodelismo, tais simulações também podem ser realizadas com o mesmo propósito. Uma vez que um foguete é constituído de vários sistemas e subsistemas, diferentes simulações podem ser conduzidas com base no tipo de análise dos mesmos que se deseja realizar.

Dentre os sistemas que compõem um foguete, os sistemas de recuperação desempenham papéis de grande importância, seja para garantir a segurança dos presentes em um lançamento, seja pelos danos que seriam causados no impacto em todos os componentes do foguete devido a queda livre. Em tais sistemas, paraquedas podem ser usados para promover um retorno suave e seguro do foguete ao chão. Para garantir o correto funcionamento do mesmo, sabe-se que é importante que os componentes do foguete nos quais o paraquedas será preso sejam capazes de suportar os esforços inerentes ao uso

desse.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo analisar os resultados de uma simulação numérica estrutural de um protótipo submetido a tais esforços. Como, entre as forças atuantes desde a liberação do paraquedas da estrutura do foguete até sua total abertura, uma das forças a ser considerada é a *snatch force*, essa foi utilizada na simulação. O modelo usado foi idealizado para ligar a fuselagem de um foguete projetado para apogeu de um quilômetro ao paraquedas do sistema de recuperação.

O trabalho foi motivado pela necessidade de garantir o funcionamento de tal sistema no foguete. Assim, buscou-se validar o protótipo para que fosse possibilitada a continuidade do seu estudo, bem como seu uso como base para futuras decisões.

A simulação, estática e linear, foi conduzida no software de simulação na nuvem *SimScale*, disponível comercialmente. Para a interpretação da mesma, foram estudados resultados acerca do deslocamento que o modelo estará sujeito e dos resultados obtidos em relação ao Critério de Falhas de von Mises.

2. METODOLOGIA

No presente trabalho, o protótipo pertencente ao sistema de recuperação simulado é constituído por um anteparo, mostrado na Fig. 1b, e um olhal, Fig. 1a. Já na Fig. 1c, é mostrado a montagem das peças apresentadas. Além disso, as dimensões das peças são apresentadas na Fig. 2.

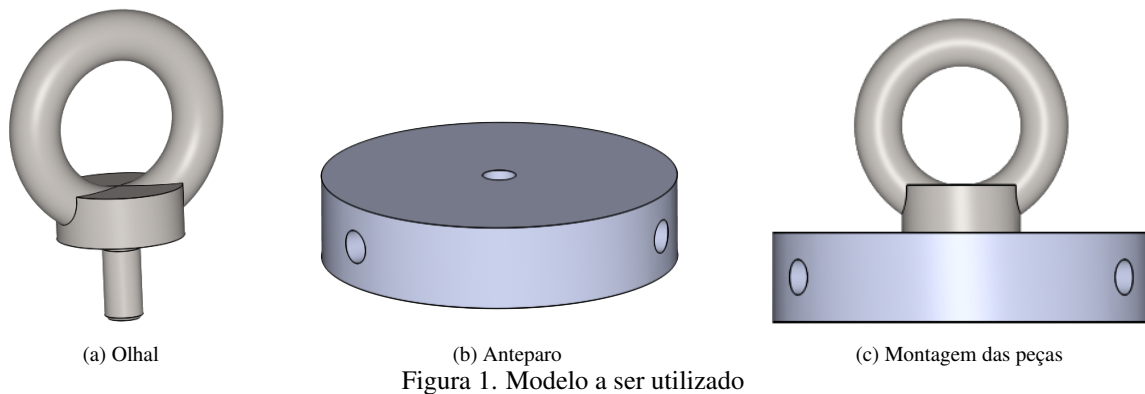


Figura 1. Modelo a ser utilizado

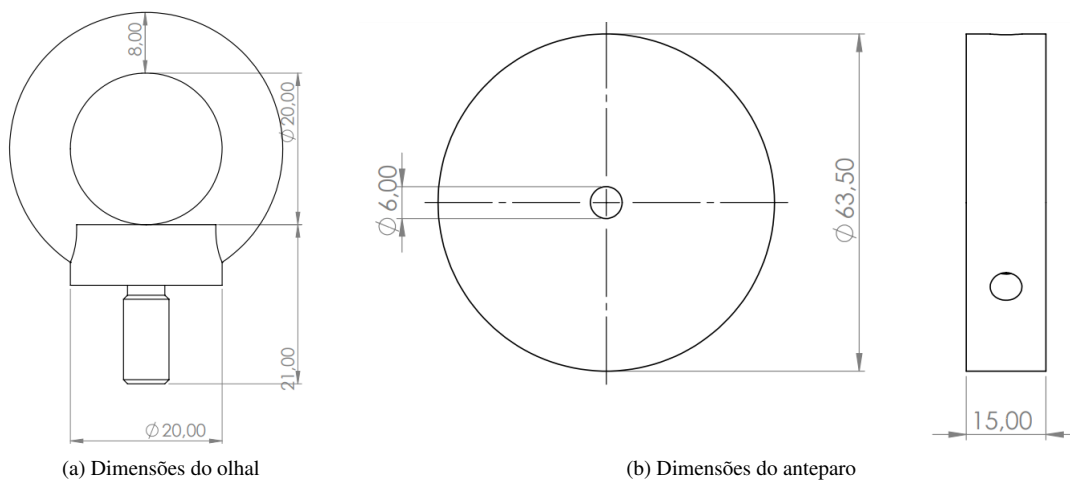


Figura 2. Dimensões das geometrias do modelo, em mm

Tanto o anteparo como o olhal são feitos de aço AISI 304 trabalhado a quente e recozido por 75 minutos. As propriedades desse material, retiradas da obra de Callister and Rethwisch (2009), podem ser vistas na Tab. 1 e foram, então, atribuídas às geometrias.

Tabela 1. Propriedades para aço AISI 304 trabalhado a quente e recozido por 75 minutos

Propriedade	Valor
Módulo de Young	$1,95 \times 10^{11}$ Pa
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade	8000 kg/m^3

O modelo formado pela montagem é posicionado próximo a coifa do foguete. As cordas do paraquedas são amarradas no olhal, enquanto o anteparo é preso à fuselagem do foguete.

2.1 Condições de contorno

De acordo com Whitlock and Bendura (1969), considerando um sistema no qual o paraquedas é alocado em uma bolsa antes de sua ejeção do foguete e só começará o seu processo de inflagem após ser totalmente liberto da mesma, a *snatch force* pode ser considerada uma estimativa teórica da força máxima atuante nas cordas do tirante deste paraquedas, ou seja, nas cordas que o ligarão a algum dispositivo do sistema de recuperação.

Segundo Newlands (2020), a *snatch force* (F_s) pode ser calculada através da Eq. (1):

$$F_s = \Delta V_{max} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n k_i \right) \cdot m_c}, \quad (1)$$

onde ΔV_{max} é a maior velocidade do paraquedas em relação ao foguete, n é o número de cordas ligadas ao paraquedas, k é uma constante relacionada com a corda usada e m_c , a massa do paraquedas e das cordas.

As variáveis utilizadas dizem respeito ao foguete projetado para o apogeu de um quilômetro, como mencionado. Após a aplicação dessas na fórmula, foi obtido o valor de $527,34 \text{ N}$. Na Tab. 2, é possível observar os valores que foram utilizados para tal cálculo. Essa força foi, então, utilizada como carregamento, aplicada na parte superior do olhal do modelo.

Tabela 2. Valores das variáveis utilizadas para o cálculo da *snatch force*

Variável	Valor
Varição máxima da velocidade do paraquedas em relação ao foguete (ΔV_{max})	$11,9 \text{ m/s}$
Número de cordas (n)	6
Somatório da constante das cordas (k)	$45,99 \text{ kN}$
Massa das cordas e do paraquedas (m_c)	$0,0427 \text{ kg}$

Os furos presentes no anteparo foram, por sua vez, definidos como apoio fixo.

2.2 Método dos Elementos Finitos

Segundo Madenci and Guven (2015), para a condução de uma simulação que o faz o uso do Método dos Elementos Finitos, como a realizada neste trabalho, o modelo de interesse, contínuo, é dividido em um número finito de elementos, que podem variar de acordo com a simulação adotada e a forma como a mesma está sendo conduzida. Os nós, por sua vez, são responsáveis pela conexão entre esses elementos, formando a malha. Desse modo, os dados obtidos pela simulação são resultados de uma análise executada não no modelo físico em si, mas sim em um modelo matemático formado pela malha.

Nesse método, as forças são modeladas de forma a atuarem nos nós da malha, ao passo que restrições aplicadas indicam que estes não sofrerão movimentação em nenhum sentido. Para cada um dos elementos, a relação entre as forças aplicadas e os deslocamentos sofridos é dada pela matriz de rigidez $[K^e]$. Desse modo, a matriz de rigidez para todo o modelo $[K]$ pode ser obtida através da união de todos os elementos individuais. Assim, conhecendo-se o valor das forças nodais F , a Eq. 2 pode ser usada para calcular o valor dos deslocamentos nodais δ (Boccaccio *et al.*, 2011).

$$\{F\} = [K]\{\delta\}. \quad (2)$$

Dessa forma, segundo os autores, os cálculos são realizados da seguinte forma: as forças em cada nó são consideradas nulas, exceto nos nós onde a carga é aplicada. Com isso, os dados de entrada podem ser aplicados na Eq. 2 e, assim, obtém-se o conjunto completo dos deslocamentos nodais. Feito isso, as derivadas parciais de cada componente de deslocamento são computadas e combinadas para obter-se as deformações e, através de equações construtivas, as tensões.

2.3 Discretização do modelo

Ainda, de acordo com Madenci and Guven (2015), tal modelo matemático torna-se mais confiável com o aumento do número de elementos usados na discretização do modelo. Entretanto, como são realizados cálculos para cada um dos elementos da malha, um aumento do número de elementos gera um aumento no tempo necessário para a obtenção dos resultados da simulação.

Nesse sentido, é comum que refinamentos sejam aplicados em regiões específicas do modelo, de maior interesse para a análise conduzida (SimScale, 2020c). Outras regiões, porém, sem grande relevância para o projeto, não necessitam naturalmente de tanta atenção. No presente trabalho, a determinação da área a ser refinada foi feita também através de uma simulação. Essa análise, de caráter inicial, buscava conhecer os perfis de distribuição do Critério de Falha de von Mises no modelo.

Primeiramente foi gerada uma malha com as especificações *default* do *software*. Os elementos foram de primeira ordem e o algoritmo utilizado foi o *Standard*. Foi-se usado, ainda, o nível 5 na escala do parâmetro *Fineness*, relacionada ao tamanho dos elementos a serem usados na criação da malha.

Essa malha inicial, gerada sem grande preciosismo, foi usada para uma análise primária do problema estudado: uma simulação foi conduzida, com as condições de contorno mencionadas anteriormente, de modo que fosse possível identificar as regiões com os maiores valores para o Critério de Falhas de von Mises. Após a realização desta simulação inicial pôde ser observado que a região com maiores valores para a variável analisada na geometria estava localizada na parte inferior do arco do olhal.

Determinada a região a ser refinada, foi utilizada a ferramenta de refinamento *Region Refinement*. Através da mesma, são definidos, através do parâmetro *Maximum Edge Length*, valores máximos para as arestas dos elementos da porção do modelo que se deseja refinar. No presente trabalho, tal propriedade foi definida como 0,0005m.

Como resultado, obteve-se uma malha constituída de 561594 elementos e 105479 nós, representada na Fig. 3.

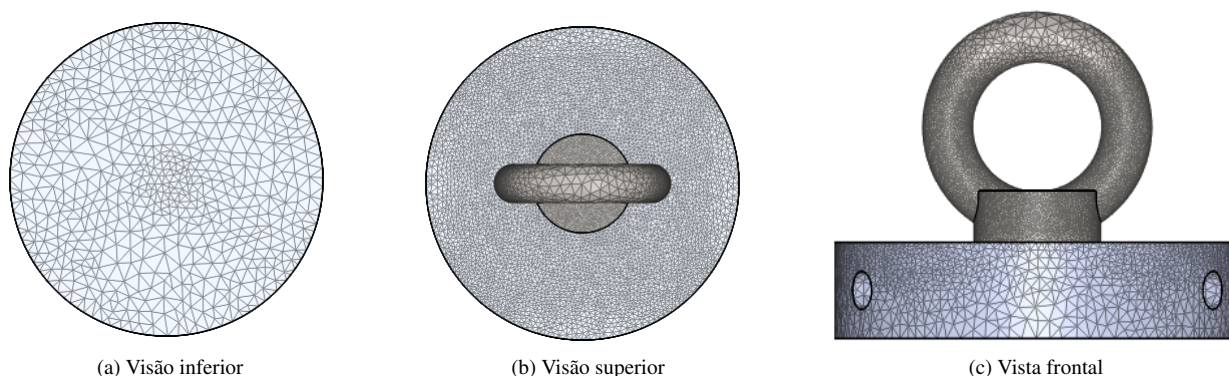


Figura 3. Malha usada para a discretização do modelo

Devido ao importante papel desempenhado pela mesma na geração de resultados confiáveis, foi feita uma análise da qualidade dos seus elementos comparando certas propriedades dos mesmos valores recomendados pode ser vista na Tab. 3.

Tabela 3. Comparação entre valores obtidos para parâmetros da malha e valores recomendados para os mesmos

Parâmetro	Valor obtido	Valor recomendado (SimScale, 2020b)
Proporção de Aspecto	5.457	«100
Proporção de Aresta	11.721	«100
Não-ortogonalidade	60.609	«75
Proporção de Volume	35.182	«100

Comprovada a sua qualidade, a simulação foi, então, conduzida com a mesma, sendo usadas as condições de contorno anteriormente descritas na presente seção.

Com o modelo apresentado é constituído da associação de várias geometrias, foi necessário definir as condições de contato no *software*. A definição escolhida para o protótipo foi do tipo *Bonded*, recomendada para casos onde as geometrias que constituem a montagem não possuem deslocamento entre si (SimScale, 2020a).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise da validade do projeto, foram estudados os contornos de deformação na geometria, bem como o Critério de Falha de von Mises.

Quanto ao deslocamento sofrido pela peça, os maiores valores para essa variável, $2,285 \times 10^{-6} \text{m}$, estão localizadas na parte superior do olhal, como pode ser visto nas Fig. 4a e 4b. É possível inferir que as mesmas estão dispostas de uma forma coerente com o esperado para o estudo uma vez que a força é aplicada nesta região.

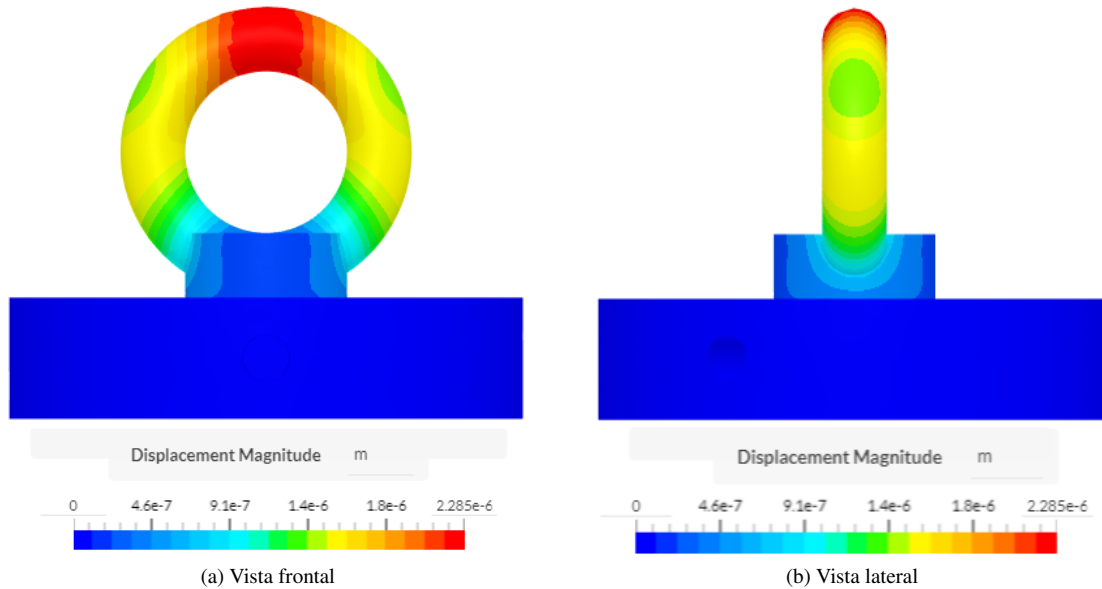


Figura 4. Deslocamento sofrido modelo

Para a melhor visualização destes valores, foi aplicado o filtro *Isovolumes*, que destaca a região da geometria onde localiza-se o intervalo de valores fornecido para determinada variável. Em preto, na Fig. 5, estão destacados os 50% maiores valores obtidos para o deslocamento.

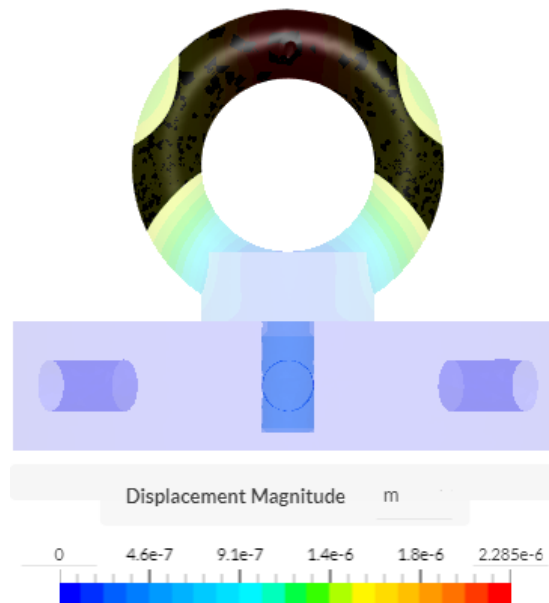


Figura 5. Deslocamento sofrido pelo modelo. Filtro *Isovolumes* aplicado

Através da análise das deformações as quais a geometria está sujeita, pode-se concluir que as mesmas não são preocupantes para o projeto uma vez que são extremamente baixas, bem como localizadas em regiões já esperadas.

No que tange a tendência de falha do modelo, o Critério de Falhas de Von Mises possibilita a previsão da mesma. Tal previsão pode ser feita através da comparação deste critério com o valor do limite de escoamento elástico do material estudado. A comparação de tais valores é válida pois, para determinado material dúctil, caso o valor do Critério de von Mises seja maior que o seu limite de escoamento, é previsto que este fenômeno ocorra no material (SimScale, 2020d). O conhecimento das condições para o início do escoamento desse tipo de material é importante pois, segundo Hibbeler (2006), seu início determina a falha do mesmo.

As regiões que apresentam os maiores valores para o Critério de Falhas estão localizadas na parte inferior do arco do olhal, como pode ser visto nas Fig. 6a e 6b.

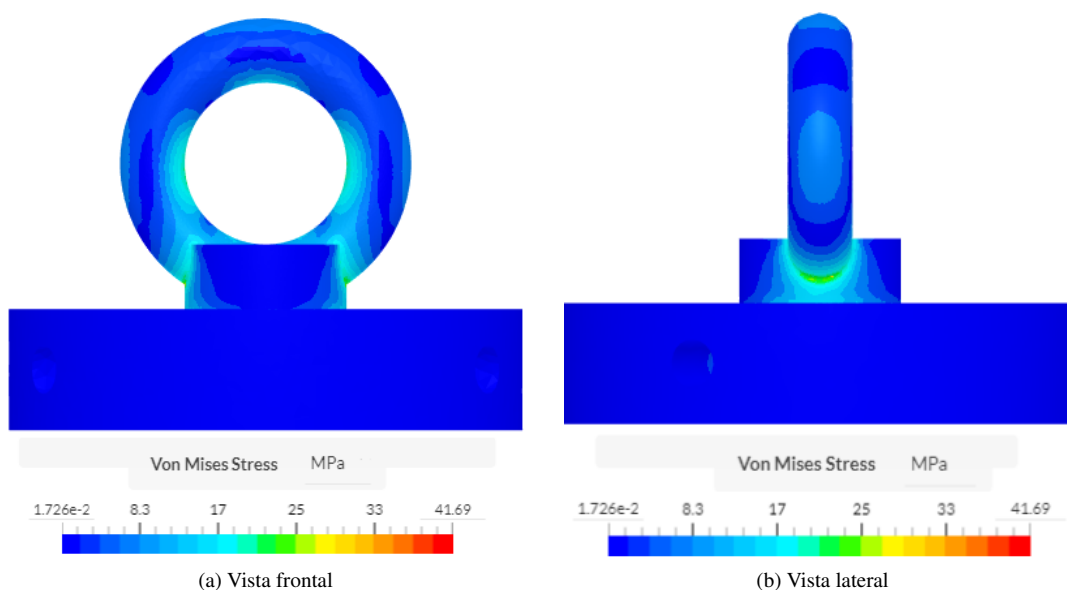


Figura 6. Contorno para Critério de Falhas de Von Mises

Em preto, na Fig. 7, estão destacados os 50% maiores valores obtidos para o critério.

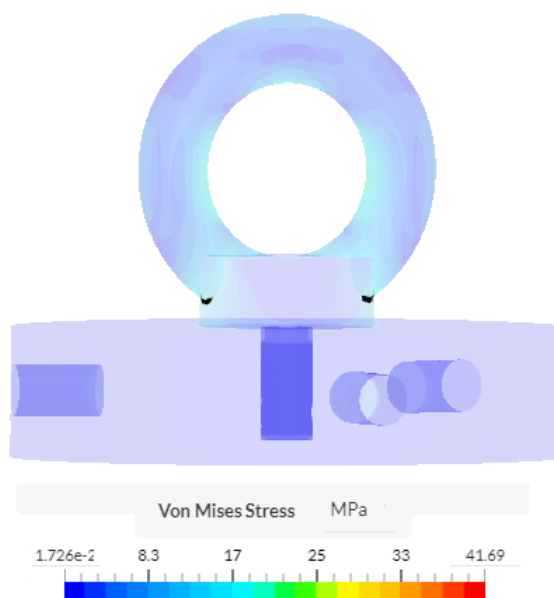


Figura 7. Contorno para Critério de Falhas de Von Mises. Filtro *Isovolumes* aplicado

Para o modelo estudado, o maior entre os valores obtidos para o Critério de Falhas ao longo do mesmo, 41.69 MPa , é menor que o valor do limite elástico do aço AISI 304 do qual é feito, 205 MPa . Assim, uma vez que tal valor não é atingido em nenhuma região do modelo, de acordo com o critério analisado, este não está suscetível a falhas e pode ser considerado compatível com as solicitações oriundas da sua aplicação.

É importante notar que a escolha do modelo de simulação foi também validada pelos resultados. Uma análise linear pode ser utilizada para o estudo de um sistema quando é esperado que o mesmo comporte-se de forma linear, experimentando deformações elásticas, o que, de acordo com Callister and Rethwisch (2009), indica pequenos deslocamentos. Tais condições são satisfeitas ao serem analisados os valores de deslocamento, bem como a tendência do material em não escoar, como foi discutido anteriormente.

4. CONCLUSÃO

Estudos acerca dos efeitos das forças inerentes ao uso de um paraquedas no sistema de recuperação de um foguete de pequeno porte são importantes para o sucesso de toda a missão. Nesse sentido, o presente trabalho apresentou os resultados obtidos pela análise conduzida no software *SimScale* de um modelo projetado para unir a fuselagem às cordas do paraquedas de um foguete projetado para o apogeu de um quilômetro.

Foi empregado um modelo de simulação conveniente com o estudado realizado e foi concluída a validade do protótipo: o deslocamento sofrido pelo modelo estudado será baixo e o mesmo não tende a sofrer falhas quando submetido a uma força com valor de $527,34 N$.

Desse modo, uma vez que, como mencionado, a *snatch force* produz uma superestimação do valor real da força a qual as cordas de um paraquedas estarão submetidas durante o seu funcionamento, os resultados obtidos possibilitam a continuação do estudo do modelo teórico para a aplicação do mesmo nos sistemas de recuperação dos foguetes a serem posteriormente desenvolvidos.

Como um exemplo de próximo passo até o desenvolvimento do modelo final, pode-se citar a realização de otimizações topológicas no mesmo, visando uma diminuição de massa, importante fator a ser considerado no projeto de minifoguetes. Além disso, outra simulação interessante é a análise estrutural com foco na rosca do anteparo a fim de estudar mais especificamente esse componente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte dado pela equipe de competição de foguetemodelismo Supernova *Rocketry*, Faculdade de Engenharia e Universidade Federal de Juiz de Fora.

6. REFERÊNCIAS

- Araujo, E., 2017. “Métodos numéricos para simulação na engenharia”. Blog ESSS - O maior arquivo de conteúdo sobre simulação computacional da América Latina. 30 Nov. 2017 <<https://www.esss.co/blog/metodos-numericos-para-simulacao-na-engenharia/>>.
- Benachio, J.P.M., da S Mazuquiel, M.V., de Paula, B.R., Laporte, D.J., Barbosa, F.M. and Branco, F.P., 2016. “Escada retrátil para automóvel”. *XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica*, Vol. 7, pp. 181–190.
- Boccaccio, A., Ballini, A., Pappalettere, C., Tullo, D., Cantore, S. and Desiate, A., 2011. “Finite element method (fem), mechanobiology and biomimetic scaffolds in bone tissue engineering”. *International Journal of Biological Sciences*, Vol. 7, pp. 112–132.
- Callister, W.D. and Rethwisch, D.V., 2009. *Materials Science and Engineering - An Introduction*. John Wiley & Sons, New Jersey, 8th edition.
- Fedaravičius, A., Kilikevičius, S., Survila, A. and Patašienė, L., 2016. “Analysis of aerodynamic characteristics of the rocket-target for the „stinger” system”. *PROBLEMS OF MECHATRONICS ARMAMENT, AVIATION, SAFETY ENGINEERING*, Vol. 7, pp. 7–16.
- Hibbeler, R.C., 2006. *Resistência dos Materiais*. Pearson Education Inc., São Paulo, 5th edition.
- Madenci, E. and Guven, I., 2015. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*. Springer, New York, 2nd edition.
- Newlands, R., 2020. “Parachute recovery system design for large rocket vehicles”. Aspirespace Rocket Engineering Society. 25 Jul. 2020 <www.aspirespace.org.uk>.
- SimScale, 2020a. “Contacts”. SimScale. 18 Nov. 2020 <<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/contacts/>>.
- SimScale, 2020b. “Mesh quality”. SimScale. 8 Out. 2019 <<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/mesh-quality/>>.
- SimScale, 2020c. “What is a mesh?” SimScale. 9 Out. 2019 <<https://www.simscale.com/docs/simwiki/preprocessing/what-is-a-mesh/>>.
- SimScale, 2020d. “What is von mises stress?” SimScale. 9 Out. 2019 <<https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-von-mises-stress/>>.
- Whitlock, C.H. and Bendura, R.J., 1969. *Inflation and Performance of Three Parachute Configurations from Supersonic Flight Tests in a Low-density Environment*. NASA, Washington, 1st edition.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.