

Aplicação de Otimização Topológica no Projeto da Fuselagem de uma Aeronave SAE Aerodesign e no Chassi de um Veículo Ultra Eficiente

Application of Topology Optimization in the Design of SAE Aerodesign Aircraft Fuselage and Ultra Efficient Vehicle Chassis

Henrique Garcêz Alves¹, Tobias Anderson Guimarães², Ricardo Humberto de Oliveira Filho³

RESUMO

Otimização topológica consiste na obtenção do melhor layout ou distribuição de massa de uma estrutura visando atender algum critério específico, como por exemplo, minimização da energia de deformação ou volume final de um corpo. Neste trabalho, a técnica de otimização de topologia será aplicada no projeto de duas estruturas de máquinas que se beneficiariam com redução de peso para aumentar seu desempenho: 1) a fuselagem de uma aeronave de pequeno porte de competição SAE *Aerodesign* e 2) o chassi de um veículo ultra eficiente de competição. No primeiro caso, a metodologia será utilizada para otimizar o layout das barras da treliça, constituídas de material compósito, da fuselagem presente na aeronave da equipe Triângulo Aéreo da UFTM. No caso do veículo ultra eficiente da equipe Triângulo Verde, também da UFTM, a otimização de topologia será empregada na minimização da massa da estrutura do chassi construída em alumínio de forma a não violar os requisitos de integridade estrutural exigidos na competição. Os resultados comprovaram que a técnica de otimização topológica é de fato uma ferramenta efetiva a ser usada no projeto de uma estrutura contando que a modelagem e a análise sejam feitas corretamente.

Palavras-chave: Chassi Automotivo. Fuselagem em Treliça. Método dos Elementos Finitos. Otimização Topológica. Projeto Mecânico.

ABSTRACT

Topology Optimization is a technique used to obtain the best layout or material distribution of a structure which meets any specific criteria, as for example, minimization of the compliance and the final volume of the piece. In this work, topology optimization will be applied in the design of two structures which have best performance if the mass is reduced: the fuselage of a SAE Aerodesign aircraft and the spaceframe chassis of an ultra efficient vehicle for competition. In first case, the methodology will be used to optimize the layout of aircraft fuselage truss bars made of composite material for the Triângulo Aero Team from UFTM (Federal University of Triângulo Mineiro). In the case of ultra efficient vehicle, the topology optimization was applied in the chassis mass minimization so that the structural integrity requirements are not violated. The results proved that the topology optimization technique, indeed, is an effective tool to be used in the structural design provided that the modelling and the analysis be done correctly.

Keywords: Automotive Chassis. Mechanical Design. Method of Finite Elements. Topology Optimization. Truss Fuselage.

¹ Graduação em engenharia mecânica, CASTech Automação. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6466-1281>

E-mail:

eng.henrique_garcez@outlook.com

² Doutorado em engenharia mecânica, UFTM. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6350-7867>

³ Doutorado em engenharia mecânica, UFTM. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-9410>

1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de um projeto, um dos aspectos que o engenheiro deve se preocupar é a forma e geometria do produto final de seu trabalho, uma vez que esta, se incorretamente construída, pode se mostrar ineficiente às condições em que este está exposto, ou excessivamente robusta, ocasionando um desperdício de recursos para sua fabricação.

Para verificar se o *design* elaborado é capaz de exercer seu papel, podem ser realizados cálculos, análises e simulações, que determinarão o fator de serviço do mesmo, o que permite saber se esse pode ser simplificado ou reforçado, contudo, em sistemas complexos, não é simples determinar o quanto e como estas alterações devem ser realizadas.

Otimização topológica se tornou uma ferramenta efetiva para o projeto estrutural de menor peso e desempenho, especialmente na engenharia aeronáutica e aeroespacial (ZHU, ZHANG e XIA, 2015). Este método permite a redistribuição de material em uma peça ou estrutura de acordo com o “caminho” de elementos que suportam cargas aplicadas a essa. Nos últimos anos, otimização de topologia tem sido aplicada a uma variedade de problemas de engenharia em diversas áreas, tais como: análise de tensões de deformações, análise modal, transferência de calor, mecânica dos fluidos e eletromagnetismo (BENDSOE e SIGMUND, 2011).

Campofredo (2015) aplicou otimização de topologia em um modelo bidimensional (2D) do espaço de projeto de uma fuselagem em treliça de uma aeronave SAE Aerodesign. Neste trabalho, o material compósito das barras da treliça foi modelado como sendo isotrópico e após a otimização, a topologia foi substituída por um arranjo de tubos de fibra de carbono visando a construção da fuselagem. Uma reanálise do modelo geométrico da fuselagem com tubos usando o Método dos Elementos Finitos foi realizada a fim de se validar a topologia ótima da estrutura. Com a reanálise, concluiu-se que a estrutura otimizada atendia os critérios de integridade estrutural, ou seja, de fato, a rigidez da fuselagem foi maximizada e as tensões resultantes dos carregamentos foram menores que o limite de resistência da fibra de carbono.

Na análise do chassi de alumínio do veículo ultra eficiente não foi encontrado nenhum trabalho na literatura que trata da aplicação de técnicas de otimização na sua estrutura. Na maioria dos trabalhos, os autores realizam uma modelagem inicial do chassi por elementos finitos e após as simulações, fazem a remoção ou redução dos diâmetros dos tubos com

baixo nível de tensões visando a diminuição da massa total da estrutura (DUTRA, 2017; COLMANETTI, 2019). Entretanto, como o arranjo das barras do chassi foi melhorada com base em tentativas e erros, ela poderia ser otimizada empregando as técnicas de otimização topológica.

O objetivo desse trabalho é aplicar a técnica de otimização topológica no *layout* das barras de fibra de carbono da fuselagem de uma aeronave de pequeno porte para competição SAE BRASIL *AeroDesign* e no arranjo dos tubos de alumínio do chassi de um veículo de competição ultra eficiente. Após a geração das topologias otimizadas tridimensionais, será feita uma re-análise da estrutura equivalente da fuselagem da aeronave constituída por barras de fibra de carbono e do chassi equivalente composto por barras de alumínio usando o Método dos Elementos Finitos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo Silva (2006) a técnica de otimização topológica pode ser definida em 6 passos, conforme representado na Figura 1:

- a) a determinação do domínio em que a peça pode existir (condições de contorno, apoios e cargas aplicadas);
- b) a discretização do domínio inicial pelo Método dos Elementos Finitos;
- c) o processo iterativo de remoção de material atendendo o problema de otimização de topologia;
- d) a interpretação do resultado (desenho de uma estrutura real sobre o resultado da otimização dos elementos discretizados);
- e) verificação dos resultados para garantir que o método respeitou os critérios impostos;
- f) fabricação do componente otimizado.

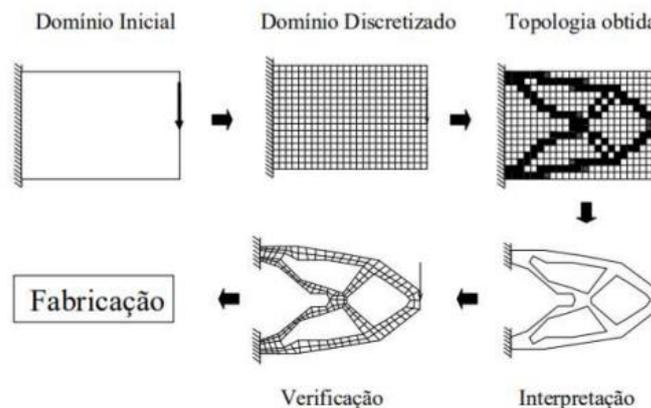


Figura 1. Etapas do procedimento de otimização topológica, (SILVA, 2006).

Neste trabalho, a otimização topológica será aplicada na modelagem tridimensional (3D) dos espaços de projeto da fuselagem da aeronave e do chassi do veículo ultra eficiente. Em ambos os casos, as estruturas serão modeladas como sólidos, de forma que o material a ser removido durante a otimização ficará restrito ao espaço de projeto delimitado pelos volumes de placas usadas na construção do projeto inicial, representando barras em todas as direções. Estes espaços de projeto dos problemas de otimização serão modelados de forma a preservar a geometria inicialmente prevista que possa atuar como desejado em suas respectivas máquinas (comportar e conectar componentes).

A Figura 2 ilustra a fuselagem em treliça da aeronave de competição SAE *Aerodesign* da equipe Triângulo Aéreo da UFTM do ano de 2022. O corpo da fuselagem é estrutura principal da aeronave servindo de fixação aos demais subsistemas, tais como, a asa, trem de pouso e o motor de propulsão. A sua estrutura deverá ser leve e suportar os carregamentos durante a aterrissagem, decolagem, as cargas aerodinâmicas durante o voo e a carga a ser transportada. A necessidade de menor peso estrutural sem perda de resistência pode ser atendido pela utilização de materiais compósitos, que em sua grande maioria apresentam baixa densidade ao mesmo tempo a alta resistência a esforços. De acordo com Dowling (2018), um material compósito é feito pela combinação de dois ou mais materiais que são mutuamente insolúveis, pela sua mistura ou união, de tal modo que cada um mantenha sua integridade.

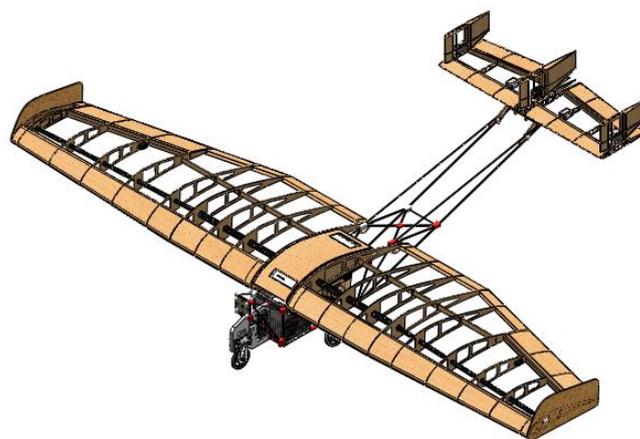


Figura 2. Desenho da aeronave SAE *AeroDesign* da equipe Triângulo Aéreo (Equipe Triângulo Aéreo *AeroDesign*, 2022).

O desenho do modelo geométrico do chassi do veículo ultra eficiente a ser otimizado neste trabalho está mostrado na Figura 3. Ao contrário da fibra de carbono dos tubos da fuselagem da aeronave que é um material ortotrópico, ou seja, com propriedades mecânicas diferentes nas 3 direções, o material dos tubos de seção quadrada e circular do arranjo tridimensional do chassi é alumínio e isotrópico com propriedades mecânicas iguais em todas as direções.

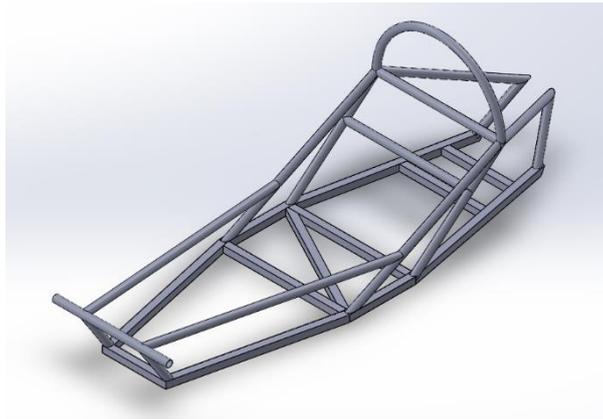


Figura 3. Desenho do chassi do veículo ultra eficiente da equipe Triângulo Verde (COLMANETTI, 2018).

Assim como a fuselagem da aeronave SAE *Aerodesign*, o chassi do veículo tem a função de suportar os carregamentos devido ao peso do piloto, reações das rodas sobre a estrutura e eventuais cargas dinâmicas que podem ocorrer durante a colisão da estrutura em um acidente. Como o objetivo é realizar a competição com o mínimo de consumo de combustível possível, é interessante que o peso total do chassi seja minimizado de forma a maximizar a eficiência energética.

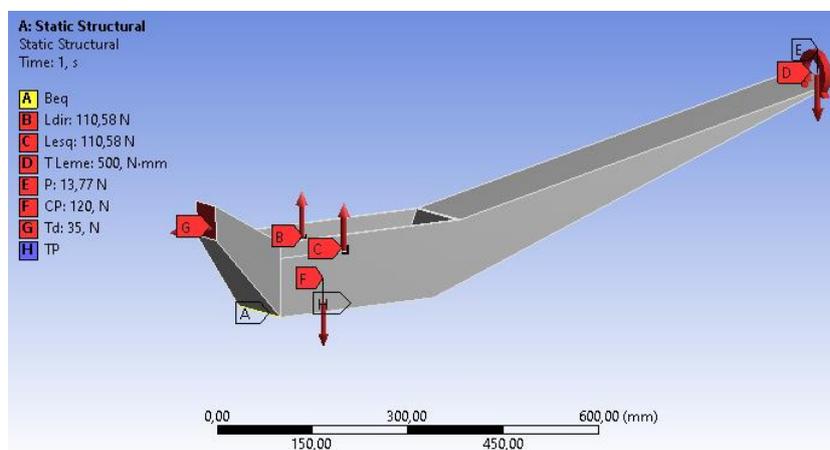


Figura 4. Cargas e condições de contorno em voo.

A Figura 4 ilustra os carregamentos e espaço de projeto inicial da fuselagem para a condição de voo da aeronave construído dentro de extensão *Mechanical* do software ANSYS®. Os pontos de apoio foram escolhidos com base nos elementos da aeronave em que se deseja conhecer a deformação causada pelos esforços, uma vez que, em voo, distanciamentos entre o conjunto trem de pouso e as superfícies sustentadoras podem causar deslocamento da carga, de acordo com o arranjo geométrico desenvolvido.

O material utilizado na construção da fuselagem é a fibra de carbono em matriz epóxi com as propriedades mecânicas descritas na Tabela 1. Essas propriedades foram retiradas da base de dados do próprio *software* ANSYS®. Como a fibra de carbono é um material ortotrópico, o Módulo de Elasticidade e Razão de Poisson varia de acordo com as direções X, Y e Z, conforme descrito na Tabela 1. Estes valores se aproximam das propriedades mecânicas das barras encontradas no mercado, que costumam ser utilizadas na construção da treliça da fuselagem da aeronave.

Tabela 1. Propriedades mecânicas de compósitos de fibra de carbono unidirecional em matriz Epoxi.

Propriedade	Valor
Densidade [kg/m ³]	1518
Módulo de Young na direção X [GPa]	123,34
Módulo de Young na direção Y [GPa]	7,78
Módulo de Young na direção Z [GPa]	7,78
Coefficiente de Poisson XY	0,27
Coefficiente de Poisson YZ	0,42
Coefficiente de Poisson ZX	0,27
Módulo de cisalhamento XY [GPa]	5
Módulo de cisalhamento YZ [GPa]	3,08
Módulo de cisalhamento ZX [GPa]	5
Limite de resistência a tração em X [MPa]	1632
Limite de resistência a tração em Y [MPa]	34
Limite de resistência a tração em Z [MPa]	34
Limite de resistência a compressão em X [MPa]	704
Limite de resistência a compressão em Y [MPa]	68
Limite de resistência a compressão em Z [MPa]	68
Limite de resistência ao cisalhamento XY [MPa]	80
Limite de resistência ao cisalhamento YZ [MPa]	55
Limite de resistência ao cisalhamento ZX [MPa]	80

Fonte: Base de dados de engenharia da ANSYS® Granta, versão de 2020.

Naturalmente, elementos como as barras utilizadas são construídos de forma que a direção de maior resistência (adotada direção X) seja coincidente com a direção axial do elemento, proporcionando assim capacidade de suportar maiores esforços de tração e compressão, o que é desejável aos elementos que compõem uma estrutura treliçada.

Os esforços aos quais a aeronave é submetida durante sua atuação foram calculados pela equipe Triângulo Aéreo durante seu projeto detalhado e dimensionamentos

estruturais, e foram fornecidos para a elaboração deste artigo (listados na Tabela 2). Estes valores foram alimentados no *setup* da simulação estática em forma de forças aplicadas a faces, forças remotas em pontos de aplicação e apoios fixos e simples.

Tabela 2. Carregamentos aplicados na fuselagem.

Denominação	Intensidade
Tração disponível (Td)	35 [N]
Sustentação máxima da asa (L)	221,17 [N]
Sustentação da empenagem com profundor defletido ao máximo (P)	13,77 [N]
Torque devido a ventos laterais na cauda (T)	500 [N.mm]
Carga paga (CP)	120
Força de pouso horizontal (Fx)	103,71
Força de pouso vertical (Fy)	414,82

Fonte: Equipe Triângulo Aéreo, 2022.

Um procedimento semelhante foi aplicado na estrutura do veículo, a qual foi atribuído o alumínio 6061 T6 como material para estudo, cujas propriedades estão descritas na Tabela 3. Para este estudo, foi gerada uma malha de elementos com 30 mm, preenchendo o sólido com 30140 nós em 15353 elementos.

Tabela 3. Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061 T6.

Propriedade	Valor
Densidade [kg/m ³]	2710
Módulo de Young [GPa]	68,4
Coefficiente de Poisson	0,33
Limite de resistência a tração [MPa]	313
Limite de escoamento [MPa]	259

Fonte: Base de dados de engenharia da ANSYS® Granta, versão de 2020.

Tabela 4. Carregamentos aplicados no chassi.

Denominação	Intensidade [N]
Colisão Frontal	9375
Colisão Lateral	9375
Peso do piloto (estimativa)	600
Peso do <i>Power Train</i> (aprox.)	150

Fonte: Colmanetti, 2019.

Como citado por Colmanetti (2019), para o estudo do chassi, os casos de colisão frontal e lateral devem ser avaliados, uma vez que, apesar de não idealizado para isto, é desejável que caso ocorra algum acidente, o veículo mantenha integridade estrutural. Os esforços

aplicados por ele em sua simulação, listados na Tabela 4 serão também utilizados para gerar uma estrutura otimizada neste trabalho, conforme o espaço de projeto inicial do chassi do veículo apresentado na Figura 5.

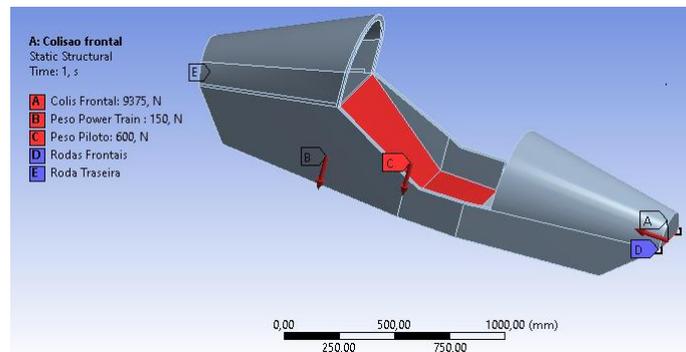


Figura 5. Cargas e condições de contorno em colisão frontal.

3. RESULTADOS

A topologia ótima da fuselagem da aeronave considerando os carregamentos e condições de contorno para a condição de voo está mostrada na Figura 6. Para a condição de voo foi encontrada uma solução após 17 iterações que manteve 29,63% do volume do original. É interessante observar que o algoritmo de otimização manteve mais material nas regiões sujeitas aos maiores carregamentos durante o voo da aeronave

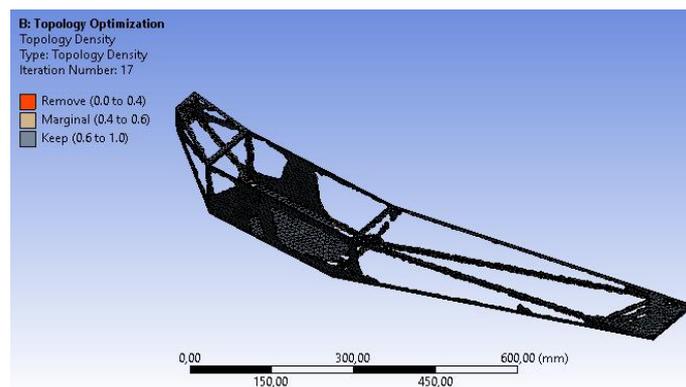


Figura 6. Topologia ótima da fuselagem simulando a condição de voo da aeronave.

Considerando estes resultados, e a dificuldade relacionada a produzir uma estrutura com um design de paredes complexas, optou-se por seguir o procedimento anteriormente aplicado pela equipe, e construir um arranjo treliçado nas paredes deste componente, uma

vez que, a obtenção de elementos lineares construídos em compósito de fibra de carbono para a montagem de uma estrutura com estas proporções seria de baixa dificuldade para equipes de extensão.

No caso da simulação de colisão frontal do chassi, foi obtida uma topologia com 32,691% do volume original em 21 iterações, conforme a Figura 7. Para a interpretação dos resultados, considerou-se que o chassi do veículo deve ser construído utilizando perfis extrudados de alumínio (tubos circulares de dimensões comerciais para facilidade de aquisição pela equipe e praticidade de montagem) soldados entre si, o que é um processo menos flexível que a montagem por conexões, uma vez que o soldador deve maior acesso ao canto unido, o que por sua vez não permite um grande número de elementos saindo do mesmo ponto da estrutura.

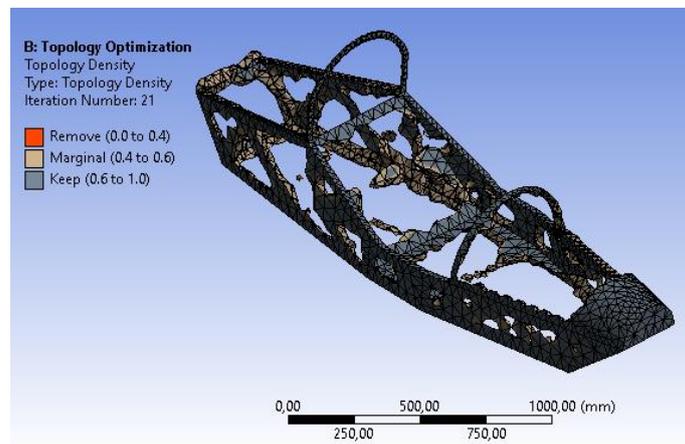


Figura 7. Topologia ótima do chassi do veículo ultra eficiente para simulação de colisão frontal.

4. DISCUSSÃO

Para a topologia ótima da fuselagem ilustrada na Figura 6, buscou-se uma interpretação que unisse características dos dois resultados em um arranjo que garantisse a rigidez da estrutura sem adicionar peso desnecessário (Figura 8). Para a condição de voo, observou-se uma concentração de material, já prevista, ligando a posição do trem de pouso à localização da fixação da asa. Assim, optou-se por posicionar uma vareta de seção transversal circular, de diâmetro 4 mm entre estes 2 pontos, sendo essa ligação que mais será solicitada em toda a estrutura, devido à magnitude dos esforços ali aplicados.

Com base na experiência anterior da equipe e nos próprios resultados de deformação do material na simulação inicial, optou-se por também fazer uso de varetas de 4 mm nos

elementos inferiores do *tail boom*, uma vez que devido à direção do esforço causado pela sustentação na empenagem, este será submetido a compressão, e, pela esbelteza do material nessa região pela otimização, espera-se que este poderá sofrer flambagem.

Na maioria restante da estrutura serão utilizadas varetas de 3 mm, devido à menor concentração de material resultante, e alguns elementos de reforço serão adicionados em varetas de 2 mm para atuarem diminuindo comprimentos efetivos de flambagem ou braços de alavanca em momentos gerados, sem aumentar a massa total do componente em áreas em que se notou uma menor concentração de elementos no resultado da otimização.

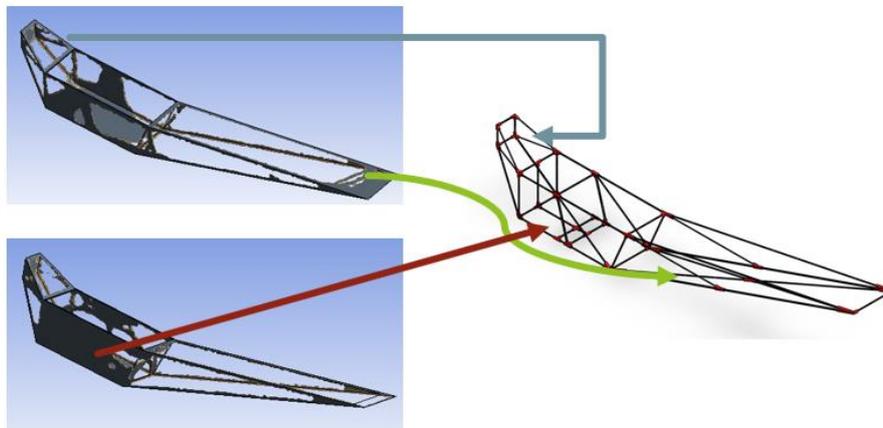


Figura 8. Indicativos para a interpretação entre os dois resultados de otimização da fuselagem.

Recentemente foi implementado no processo construtivo do treliçado uniões e conexões entre tubos impressas em 3D utilizando filamentos de ABS, de acordo com o estudo proposto por Santos (2021), e, para melhor representação da estrutura real a ser aproveitada deste trabalho, estas serão adicionadas à simulação.

Para efeitos de simulação, as conexões foram modeladas como sólidos isotrópicos com as propriedades do plástico ABS fornecidas pela base de dados do ANSYS®, conforme apresentadas na Tabela 5. A Figura 9 apresenta o modelo 3D do treliçado interpretado da otimização, construído utilizando as ferramentas para sistemas estruturais do Solidworks®.

Tabela 5. Propriedades mecânicas do ABS.

Propriedade	Valor
Densidade [kg/m ³]	1040
Módulo de Young [GPa]	2,39
Coefficiente de Poisson	0,399
Limite de resistência a tração [MPa]	44,3
Limite de escoamento [MPa]	41,4

Fonte: Base de dados de engenharia da ANSYS® Granta, versão de 2020.

Com o intuito de validar os resultados da otimização, a geometria treliçada foi submetida a uma nova análise, considerando as características de cada um dos elementos que a compõe. Para tal, o desenho criado no Solidworks® deve ser previamente processado utilizando as ferramentas fornecidas no ANSYS® *Workbench* (como o *Design Modeler* e o *Spaceclaim*) para solucionar as interferências entre as conexões e a treliça (utilizando a operação *Boolean* do *Design Modeler* por exemplo) e transformar as varetas de sólidos para superfícies (sempre considerando o diâmetro externo) para que possam ser identificadas pela extensão que trata do processamento de compósitos.

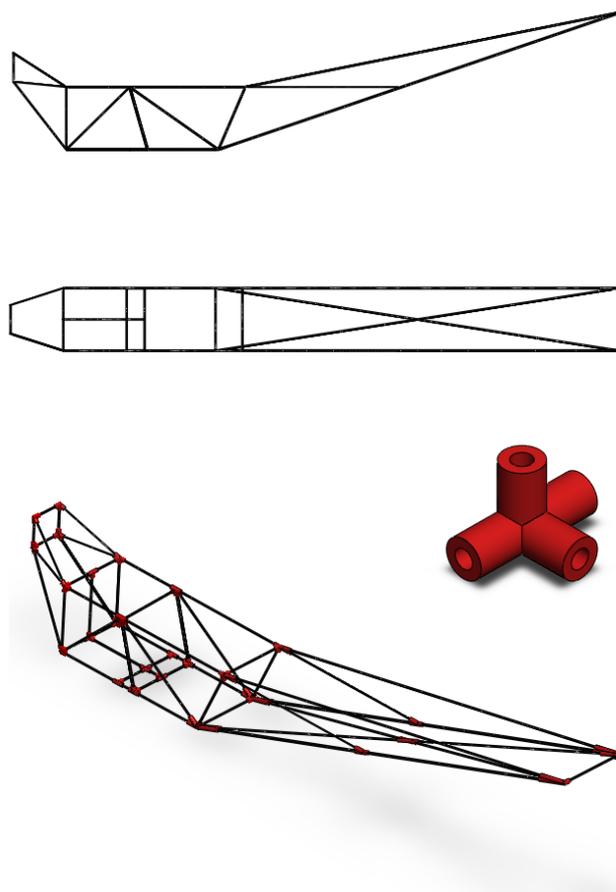


Figura 9. Interpretação das otimizações para formar um treliçado e exemplo de conexão impressa.

Após o a análise da fuselagem com as barras em fibra de carbono com as conexões em ABS, foi aplicado o Critério de Tsai-Hill para verificação da integridade estrutural. Com isto foi simulada a reação aos esforços da fuselagem, avaliando como resultados o fator de segurança da estrutura, obtendo-se um valor mínimo de 1,93 para a estrutura treliçada. A

Figura 10 mostra os valores obtidos através dos gráficos de distribuição ao longo do sólido tridimensional.

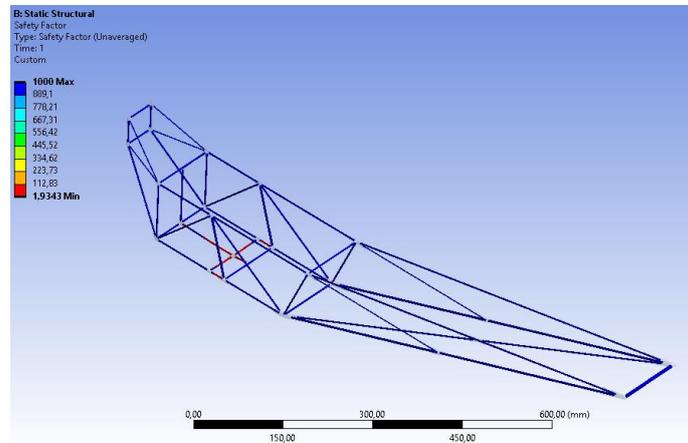


Figura 10. Resultado da simulação da estrutura para a condição em voo, analisando o fator de segurança por Tsai-Hill.

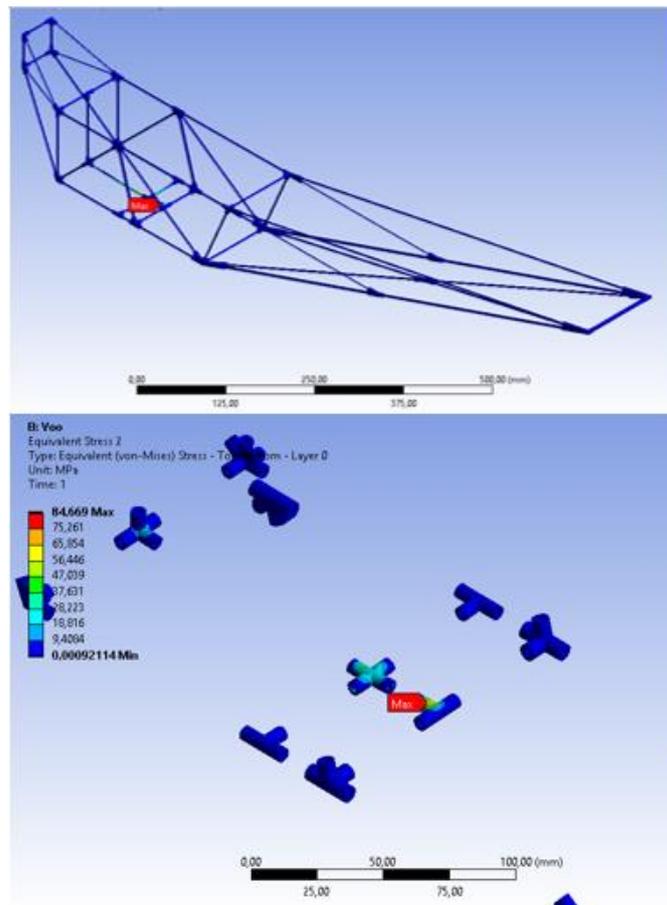


Figura 11. Análise dos elementos de conexão na condição de maior esforço na estrutura da fuselagem.

Também foram avaliadas as tensões nos elementos de conexão (utilizando o critério de Von Mises apenas as conexões) com o intuito de identificar em quais pontos as impressões devem ser feitas aumentando a quantidade de material para proporcionar segurança estrutural à aeronave (Figura 11). Como se observa na Figura 11, a máxima Tensão de Von Mises foi de aproximadamente 84 MPa, praticamente o dobro do Limite de Escoamento (41,4 MPa) do ABS usado na conexão. Desta forma, seria interessante aumentar a espessura desta conexão.

A partir da topologia ótima do chassi do veículo ultra eficiente mostrado na Figura 7, foi modelado um sistema estrutural, utilizando a ferramenta de mesmo nome do *software* Solidworks® (como feito para o treliçado da fuselagem), que tivesse elementos acompanhando as direções de maior quantidade de material, e permitisse a representação dos cordões de solda para a simulação de sua resistência, conforme o que mostra a Figura 12. Para a construção desta estrutura, foi observada novamente a quantidade de elementos finitos em cada área do modelo e levadas em consideração as dimensões de elementos que a equipe Triângulo Verde já utiliza no seu modelo.

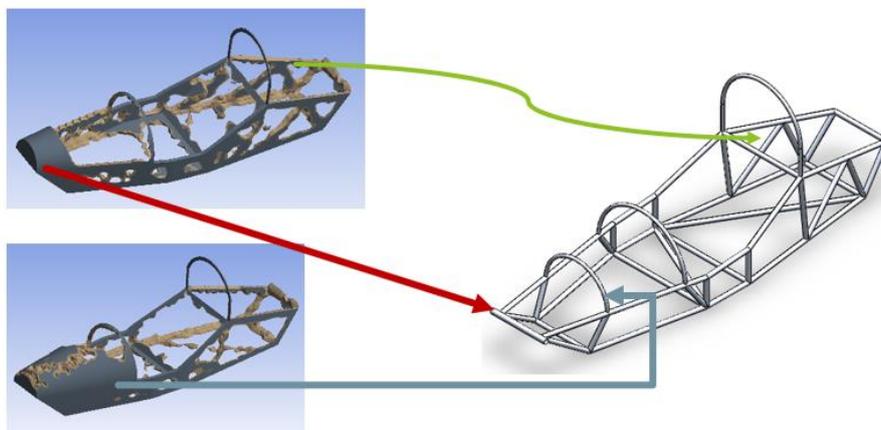


Figura 12. Indicativos para a interpretação entre os dois resultados de otimização do chassi.

Pela análise da Figura 12 foi observado um acúmulo de material na parte frontal do chassi. Assim, foi atribuído um tubo de 5/4 polegadas para o elemento mais dianteiro desta. Os tubos conformados em arcos foram adicionados para estabilidade e redução dos comprimentos livres da estrutura, portanto, buscando a redução da massa do veículo, estes componentes são constituídos de tubos de 3/4 de polegadas.

Por fim, todo o restante do chassi foi construído utilizando tubos de 1 polegada (todos os elementos foram modelados com 2 milímetros de parede), conforme indicado na representação da Figura 12.

Aplicando os esforços a esta estrutura foram observados as tensões equivalentes na simulação de uma colisão frontal (Figura 13). De acordo com o resultado, observa-se que a geometria está dimensionada para tais eventos, respondendo com deslocamentos pequenos em relação a suas dimensões e apresentando um coeficiente de segurança mínimo de 1,32, o que significa que em caso de acidentes, apesar de não ser o propósito do veículo, este será capaz de suportar os esforços.

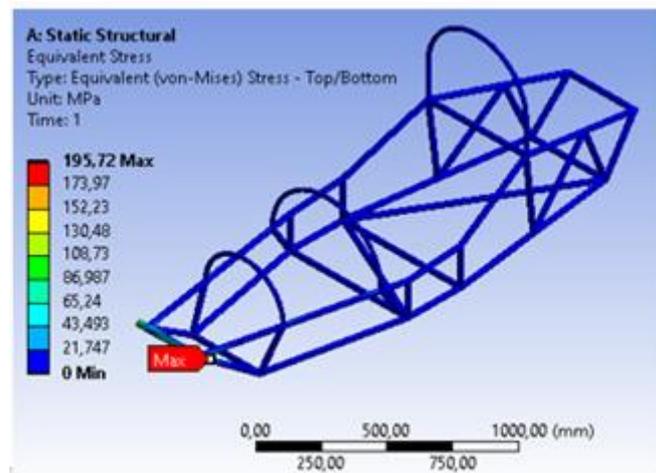


Figura 13. Resultados da simulação da estrutura do chassi para colisão frontal.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta uma metodologia para otimização de topologia de duas estruturas para competição universitárias: a fuselagem em fibra de carbono de uma aeronave SAE Aerodesign e o chassi em liga de alumínio de um veículo ultra eficiente. Avaliando os resultados computacionais dos estudos desenvolvidos para este trabalho nota-se que um dos pontos mais importantes de toda a metodologia é a interpretação dos resultados de otimização. Após a interpretação das topologias ótimas da fuselagem da aeronave e do chassi do veículo, nota-se que ambas as estruturas apresentaram um bom desempenho, tanto sob o ponto de vista de redução de massa, como também sob a capacidade de resistir os esforços sem comprometer a integridade estrutural.

Na análise da topologia otimizada da fuselagem em fibra de carbono, foram introduzidos elementos de conexão em ABS de modo a reduzir a massa e facilitar o

processo de montagem da treliça. Dentre os pontos a serem melhorados neste estudo, deve-se destacar a análise mais aprofundada das conexões que integram os elementos da fuselagem. Para próximos trabalhos, seria interessante modelá-las como elementos ortotrópicos (devido à direção de deposição de material resultante do processo de impressão 3D e a relação de resistência entre camadas) e avaliar de forma iterativa as espessuras de parede para resistir aos esforços sofridos com margens de segurança significativas, uma vez que estes representam elementos de substituição trabalhosa em caso de fratura durante o trabalho.

Já com relação ao chassi, observou-se uma redução de 4% na massa da estrutura, que, devido aos resultados ainda incertos sobre a análise dos cantos soldados, deve ser reavaliada com maior cautela antes de ser validada efetivamente.

REFERÊNCIAS

BENDSOE, M.P., SIGMUND, O., 2011. **Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications**. Springer.

COLMANETTI, M. C., 2019. **Análise de elementos finitos da integridade estrutural do chassi de um veículo de alta eficiência energética e medição experimental de deformação por extensometria**. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.

DOWLING, N., 2018. **Comportamento Mecânico dos Materiais: Análise de engenharia aplicada a deformação, fratura e fadiga**. 4 ed.: LTC. Rio de Janeiro.

DUTRA, G. G., 2017. **Análise elasto-plástica do chassi de um veículo a carregamento dinâmico de impacto**. Relatório final de projeto de pesquisa do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.

SANTOS, E. R., SHIMANO, M. M., 2021. **Estudo do comportamento mecânico de fixadores para a fuselagem de aeronaves de Aerodesign feitos em impressora 3D tipo FFF**. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.

SILVA, E. C. N., 2006. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da USP. São Paulo.

TSAI, S. W., 1965. **Strength Characteristics of Composite Materials**, NASA CR-224, 1965.

ZHU, J. H., ZHANG, W. H., XIA, L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 23.