

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA NO PROJETO DE COMPONENTES AUTOMOTIVOS

Antonio de Assis Brito Neto, antonio.brito@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, R. Dona Francisca, 8300 - Bloco U - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-600

Resumo:

A indústria automotiva tem buscado, com o uso de ferramentas computacionais, uma forma de desenvolver veículos leves e eficientes do ponto de vista energético. Para alcançar este objetivo, se faz necessário o uso de técnicas de otimização. Dentre estas técnicas, destaca-se o método de otimização topológica. A mesma caracteriza-se como sendo uma peça chave para o desenvolvimento de produtos, constituindo-se como um poderoso método para reduzir o peso de uma peça sem comprometer a sua performance e seu nível de segurança, através da redistribuição do material da peça de forma a eliminar material de locais com baixo nível de solicitação. Aplicar o método de otimização topológica no desenvolvimento de componentes automotivos, gerando peças mais leves sem perda da sua rigidez e resistência, é o objetivo deste trabalho, sendo desenvolvido estudos de caso baseados na análise de componentes estruturais automotivos. A metodologia consiste, num primeiro momento, em determinar as cargas e condições de contorno do problema e, utilizando ferramentas de análise estrutural como o Método de Elementos Finitos, apresentar a distribuição de tensão sobre várias condições de trabalho do componente. Num segundo momento, utilizando a técnica de otimização topológica, deve-se ajustar as variáveis de otimização, com base nas restrições e na função objetivo, para determinar a distribuição ótima de material na peça. Pretende-se desenvolver uma metodologia que permita gerar geometrias otimizadas, mais leves e sem comprometer requisitos de resistência, rigidez e segurança. Portanto, este trabalho apresenta uma estratégia eficiente para tratar com a otimização topológica, onde peças automotivas foram analisadas e reprojetadas baseada na otimização topológica com o uso do software comercial ANSYS Workbench, que possibilita que a distribuição da tensão ótima do produto possa ser determinada ainda em seu estágio de projeto.

Palavras-chave: Otimização topológica, elementos finitos, projeto estrutural.

1. INTRODUÇÃO

A busca por automóveis mais leves é uma realidade e necessidade contemporânea, influenciando todo o processo de concepção das peças que irão equipar estes veículos que são energeticamente mais eficientes e, consequentemente, menos poluentes. Esta redução na massa dos componentes deverá ser feita de tal forma que não deverá provocar o comprometimento da funcionalidade, integridade e confiabilidade destes elementos estruturais quando em serviço. Diante desta necessidade de redução de peso nos componentes de veículos automotivos, tem-se como uma das principais ferramentas para este fim, os métodos de otimização. Dentre estes métodos, temos o método de otimização topológica, cuja principal característica é a possibilidade da localização de regiões na peça que são estruturalmente menos solicitadas e, por consequência, poderão ter o seu material eliminado. Esta técnica realiza furos na peça, deixando material onde realmente é necessário, sem comprometer a rigidez e a resistência do componente.

O método de otimização topológica refere-se, portanto, a uma das formas de otimização estrutural que tem como objetivo achar a geometria ótima sob determinadas condições de restrição (Jankovics, 2019). Na metodologia aqui utilizada, o método de elementos finitos é aplicado de uma forma iterativa para determinar quais elementos da malha original da peça deverão ter o seu material mantido e quais deverão se tornar uma espécie de vazio, sendo essa escolha tomada em função do nível de solicitação do elemento. Esta seleção de regiões na peça irá permitir maximizar ou minimizar uma determinada medida de desempenho, por exemplo, a rigidez da estrutura ou sua massa. Neste trabalho, a realização deste processo de otimização topológica será feita através do uso do software comercial de elementos finitos Ansys Workbench (Ansys, 2022), sendo a mesma uma ferramenta poderosa para o trabalho de engenheiros no projeto estrutural para obter a estrutura otimizada e que atenda aos requisitos do projeto.

Escolheu-se, para os estudos de caso, componentes estruturais de um veículo automotivo que faz parte da competição Fórmula SAE (Fig. 1). Estes veículos de competição são desenvolvidos por estudantes de engenharia com o

objetivo de construir um carro de corrida de pequenas proporções, dando a oportunidade a estes futuros engenheiros de aplicar seus conhecimentos, de uma forma prática, para obter um veículo o mais eficiente possível. Neste processo de busca das soluções ótimas, tem-se a redução do peso do protótipo como sendo um caminho para obter uma solução energeticamente mais eficiente e competitiva, ou seja, que irá consumir menos combustível e ainda ser rápido em acelerações (Bossetti, 2019). Neste sentido, uma pequena redução na massa dos componentes estruturais levará a melhores resultados na pista. Desta forma, utilizar técnicas de otimização topológica para reprojetar determinados componentes do veículo Fórmula SAE poderá definir a forma geométrica que o componente deverá possuir para suportar os carregamentos de forma mais eficiente, melhorando a relação resistência/peso das peças do veículo.



Figura 1: Veículo Fórmula SAE (UFSC, 2018)

Diante do exposto, o principal objetivo do trabalho é aplicar a técnica de otimização topológica em dois componentes, com função estrutural, de um veículo Fórmula SAE para verificar a adequabilidade da ferramenta de otimização topológica no desenvolvimento de peças mais leves e eficientes, sem que exista o comprometimento de características da peça relacionadas a sua resistência, rigidez e funcionalidade. Para realizar esta simulação com o auxílio do software Ansys Workbench é necessário a definição dos parâmetros de entrada que melhor representem as condições de contorno e carregamento do problema, além de parâmetros relacionados à performance do software de otimização para buscar a solução ótima.

2. O MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Combinar técnicas de otimização com o método de elementos finitos demonstrou-se uma ferramenta poderosa para auxiliar o projeto estrutural. Existem basicamente três metodologias que fazem uso do método de elementos finitos juntamente com técnicas de otimização, são elas: a otimização paramétrica, a otimização de forma e a otimização topológica (Riordan *et al.*, 2018). Uma das principais diferenças da otimização topológica em relação as técnicas de otimizações paramétricas e de forma está na definição do domínio do problema, onde na otimização topológica o domínio permanece fixo durante todo o processo de otimização, podendo o componente atingir qualquer forma dentro do espaço de projeto. Na otimização topológica, a estrutura considerada ideal surgirá a partir da discretização do domínio por uma malha de elementos finitos e em função do nível de solicitação de cada elemento irá ser feito a separação de elementos na condição de vazio (elementos definidos como tendo densidade nula em função do seu baixo nível de solicitação) ou de reforço (elementos mantendo a condição de possuir material por apresentarem um nível de solicitação mais elevado) (Missio, 2019). Desta forma, a técnica de otimização topológica, oferece uma opção relevante para a obtenção de uma distribuição de material na peça, definindo a geometria ótima em função do nível de solicitação dos elementos. A técnica pode garantir a funcionalidade do componente sem que haja o comprometimento das restrições do projeto. Um exemplo simples deste processo iterativo de otimização topológica é mostrado na Fig. 2. Com esta implementação, uma forma otimizada é obtida em conjunto com a definição do domínio e condições de contorno do problema (Jankovics, 2019).



Figura 2. Método de otimização topológica com o domínio do projeto e as condições de contorno, com vários resultados de iterações mostrados (Jankovics, 2019).

O método de otimização topológica, em conjunto com o método de elementos finitos, propiciará o encontro da distribuição ótima de material dentro de um domínio especificado pelo projeto e sujeito a determinadas condições de contorno. Desta forma, o problema de otimização consiste basicamente num processo iterativo de busca do formato desta distribuição de material dentro do domínio de projeto, com a finalidade de maximizar ou minimizar a função objetivo especificada, como, por exemplo, maximizar a rigidez estrutural do componente ou minimizar a sua massa (Gimenes, 2015). O uso do software Ansys e sua ferramenta Workbench para realizar a otimização topológica dos componentes requer uma série de etapas e ajustes de parâmetros de entrada do software. Sendo as etapas para implementação do método de otimização topológica separadas em: definição do domínio do problema, juntamente com as condições de contorno; discretização do domínio pelo método de elementos finitos, estabelecendo a disposição da malha ao longo do domínio; solução do problema estático; fornecimento de dados para configuração do software de otimização topológica e, por fim, a análise do problema (Fornace, 2006). No cotidiano da indústria, uma posterior etapa ao processo de otimização é a fabricação do componente. Em virtude da possível complexidade geométrica resultante do processo de otimização topológica, torna-se necessário a adoção de processos de fabricação especiais como a manufatura aditiva. Este método de manufatura permite a fabricação de peças com geometrias complexas, tornando-se uma ótima opção para a fabricação de peças cuja forma foi proveniente do processo de otimização topológica.

A análise de otimização topológica através do software Ansys Workbench requer a configuração de parâmetros como o número máximo de iterações (500 iterações é o valor *default* do software), exatidão da convergência, tipo de *solver*, definição da função objetivo, fator de penalidade, etc. Todos estes parâmetros podem ser escolhidos como sendo os valores pré-definidos pelo sistema, também se permite que o próprio software faça o controle de alguns destes parâmetros ou pode-se optar pelo usuário como sendo o responsável por fazer a escolha destes parâmetros de entrada. O processo iterativo de otimização irá fornecer um resultado de distribuição de massa de forma a maximizar/minimizar a função objetivo escolhida.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM PARTES AUTOMOTIVAS

Para avaliar a aplicabilidade da técnica de otimização topológica em componentes da indústria automotiva, foram escolhidos dois componentes estruturais de um veículo de competição Fórmula SAE. Os dois componentes são o pedal de freio e o balancim da suspensão traseira do veículo. Estes componentes são responsáveis por transmitir forças durante o seu funcionamento e dessa forma estão sujeitos a um determinado nível de solicitação mecânica. O método de otimização topológica será responsável por fornecer uma estrutura mais leve e estruturalmente mais eficiente na medida que permite definir uma distribuição de massa no componente em função do nível de solicitação da peça. Por não ser o foco do trabalho, as forças atuando nesses componentes durante o seu funcionamento foram obtidas através de literatura especializada. O modelo tridimensional em CAD das geometrias foram desenvolvidos no software SolidWorks e a malha com a estratégia de discretização do domínio foram geradas no próprio ambiente do Ansys Workbench.

4.1 Análise do balancim

Um típico balancim de um veículo Fórmula SAE será reprojetoado através do método de otimização topológica. A Fig. 3 apresenta um balancim montado em um veículo de competição. O balancim é um dispositivo da suspensão de automóveis esportivos que recebe as forças oriundas do movimento de rolagem do veículo e as transmite para a estrutura do chassi de forma a minimizar os esforços gerados durante o funcionamento da suspensão. Esta redução dos níveis de solicitação do mecanismo da suspensão é feita através de uma relação de momentos gerada pela geometria do balancim, bem como os movimentos são também suavizados pelo conjunto mola-amortecedor do sistema de suspensão (Barroso, 2015).

Dentro do foco principal do trabalho, tem-se como objetivo reprojetoar o balancim para moldar a sua geometria de maneira a reduzir ao máximo a sua massa sem prejudicar a funcionalidade e integridade estrutural do componente. Este processo de otimização levará em consideração a geometria inicial do componente, os carregamentos aplicados, o material da peça e as condições de contorno do problema, ou seja, a forma como a peça é fixada à estrutura e como as cargas são aplicadas ao componente.



Figura 3. Vista do balancim na suspensão de um veículo Fórmula SAE (Rubio, 2017)

Uma das hipóteses a ser considerada neste estudo de caso é que o carregamento submetido ao balancim terá o seu valor crítico quando o veículo estiver em movimento e realizando uma frenagem juntamente com a execução de uma curva, uma vez que a transferência de peso longitudinal devido a uma aceleração positiva (arranque) é menor do que na frenagem (Barroso, 2015). Os níveis dos carregamentos aplicados ao balancim foram obtidos de um estudo de caso publicado na literatura na qual é apresentada esta situação crítica de utilização do componente (Rubio, 2017). O material escolhido para o balancim é o aço estrutural, cujas propriedades são apresentadas na biblioteca de materiais do próprio software Ansys Workbench. A Fig. 4 apresenta a malha de elementos finitos utilizada.

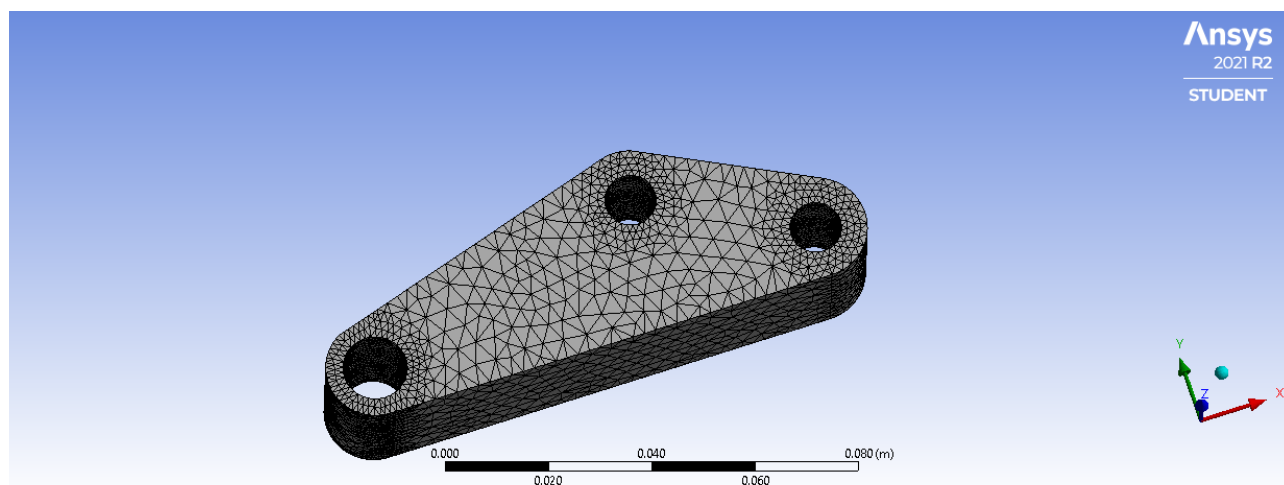


Figura 4. Malha de elementos finitos utilizada no balancim.

A primeira etapa do processo de otimização foi a análise estrutural estática do componente. A Fig. 5 apresenta a distribuição de tensões de von Mises na peça como resultado desta análise. Esta distribuição de tensões já fornece um indicativo das regiões menos solicitadas da peça e que provavelmente serão eliminadas durante o processo de otimização. Em seguida, parte-se para a utilização do pacote de otimização topológica do software Ansys Workbench. Para a realização da otimização topológica, o software permite ajustar parâmetros de entrada do programa como o fator de penalidade, o número máximo de iterações, bem como definir a região de otimização e escolher a função objetivo a ser minimizada. As opções para a escolha da função objetivo são a flexibilidade (*compliance*), a tensão no componente, a sua massa, seu volume, além de critérios que podem ser definidos pelo usuário. Nesta análise do balancim, escolheu-se a flexibilidade como função objetivo.

Com o modelo de Elementos Finitos do componente definido e os parâmetros de entrada do algoritmo de otimização escolhidos, o software de otimização topológica foi executado. Sendo o objetivo da análise minimizar a flexibilidade, com uma restrição imposta para reter 50% da massa original. As Fig. 6 e 7 apresentam o resultado da otimização topológica em duas vistas. O processo de otimização resultou, com 33 iterações, numa redução da massa do componente da ordem de 50% da massa original. Demonstrando assim, a grande vantagem deste processo que é a

redução da massa do componente sem comprometer a sua funcionalidade. No software não existe uma opção para definir como será o formato final da peça para lhe dar uma aparência esteticamente mais agradável, tendo apenas a opção de definir áreas que não deverão ser otimizadas e assim não terem material retirado. Sendo, portanto, o software de otimização o total responsável por definir a forma final da peça otimizada.

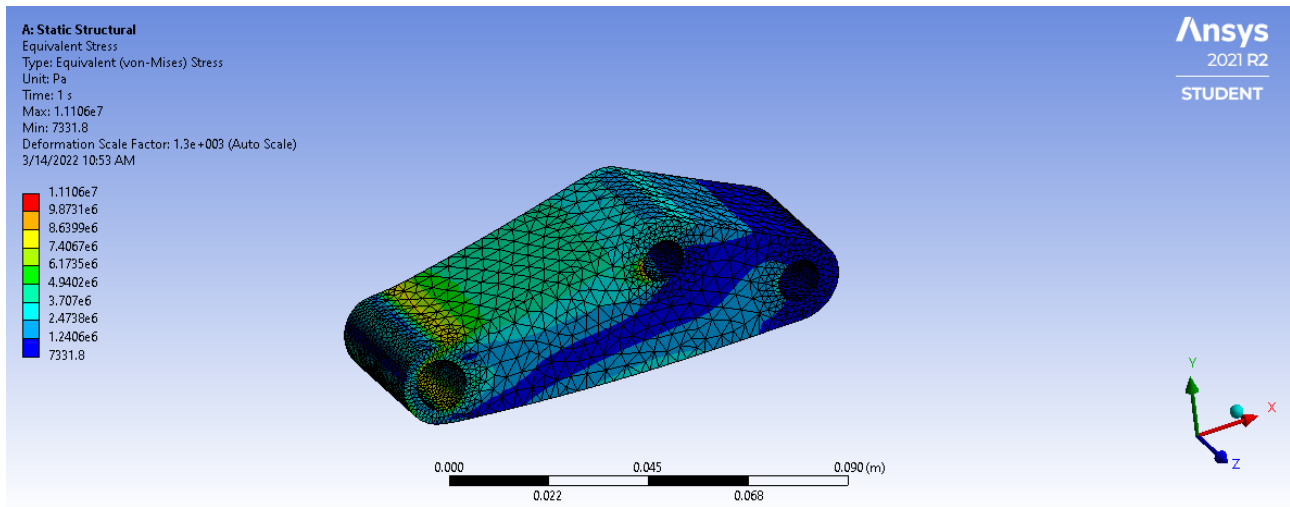


Figura 5. Distribuição das tensões de von Mises.

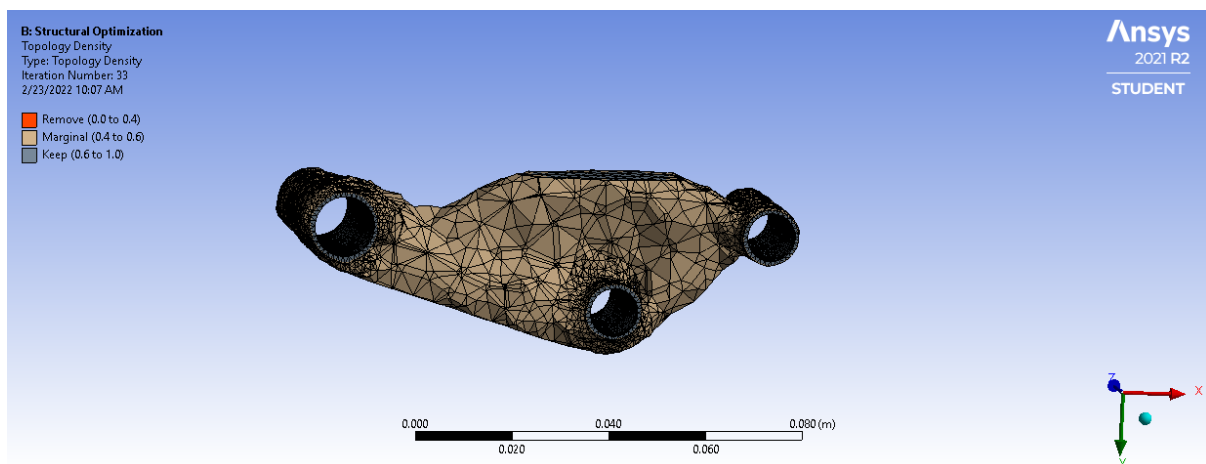


Figura 6. Resultado da otimização topológica do balancim.

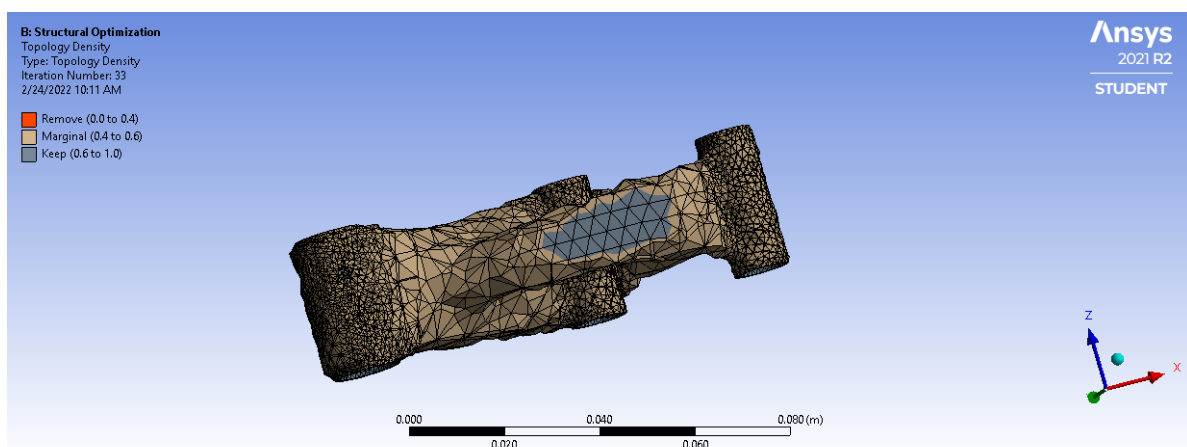


Figura 7. Vista inferior do resultado da otimização topológica no balancim.

4.2 Análise do pedal de freio

O pedal de freio do veículo atua como uma alavanca para o motorista parar o veículo, sendo, portanto, uma parte crítica do sistema veicular. Este dispositivo pode ser considerado o componente inicial do sistema de freios de um carro, tendo a função de transmitir a força de acionamento exercida pelo motorista para o cilindro mestre, o qual transmitirá pressão ao fluido de freio para acionar as pinças que irão reduzir a velocidade do veículo. Sendo o pedal de freio também responsável pela multiplicação da força que aciona o sistema hidráulico devido ao braço de alavanca gerado por sua geometria (Machado, 2018). Durante a frenagem de emergência, uma grande força do motorista é impressa ao sistema de freio em um curto intervalo de tempo, exigindo do pedal de freio uma grande resistência mecânica para suportar esta força. Engenheiros automotivos estão continuamente explorando novos materiais, novas metodologias de projeto e novas tecnologias de manufatura, para reduzir o custo do projeto e fabricação de componentes importantes como os pedais de freio (Sargini, 2020). Dentre estas técnicas de projeto, o método de otimização topológica se encaixa perfeitamente com o método de manufatura aditiva, fornecendo uma excelente alternativa para o desenvolvimento de componentes estruturalmente eficientes. A Fig. 8 apresenta o modelo em CAD do pedal a ser otimizado. Este modelo delimita a região na qual o processo de otimização irá atuar.



Figura 8. Modelo em CAD do pedal de freio do veículo fórmula SAE.

A força máxima aplicada ao pedal na simulação será de 2 kN, pois esta é a força, estabelecida pelas regras da competição Fórmula SAE, que o pedal deverá suportar durante uma prova de desempenho para avaliar a segurança e confiabilidade do pedal de freio. Ou seja, o pedal terá que suportar esta carga, durante um teste experimental, para que o mesmo seja considerado seguro para a realização das outras provas da competição. Diante deste requisito, está será a força que será utilizada para projetar o pedal do freio do veículo.

Definido o nível do carregamento e sua forma de aplicação no pedal de freio, as condições de contorno (modo de fixação da peça aos outros componentes do sistema de freio), o material da peça (aço estrutural), foi realizada a análise estrutural estática do problema. A Fig. 9 apresenta as tensões de von Mises no pedal de freio com a geometria original, dando um indício das regiões na peça em que o nível de sollicitação de tensões está abaixo da tensão de escoamento do material, que fica em torno de 250 MPa.

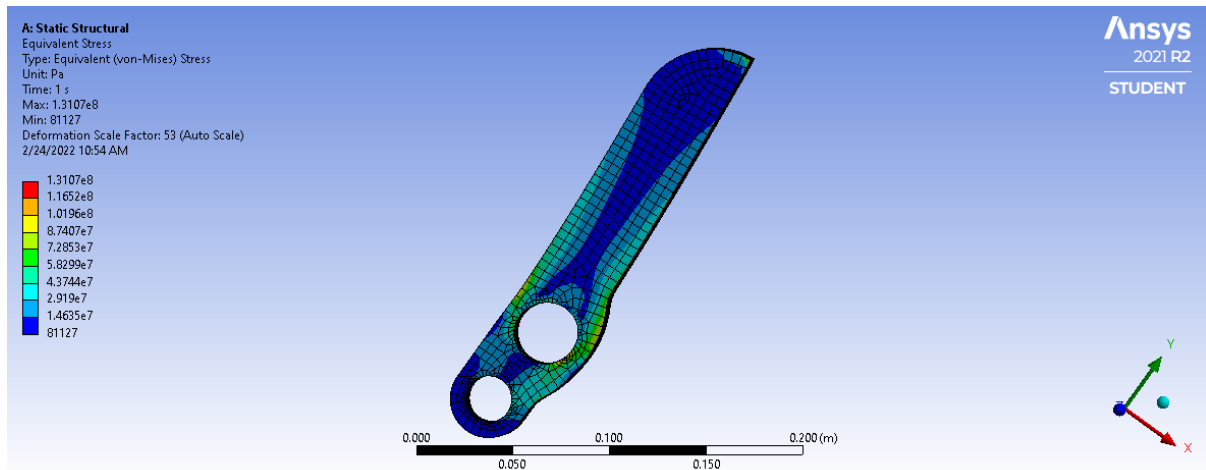


Figura 9. Análise de tensões na geometria original.

O processo de otimização será responsável por remover material de forma estratégica, ou seja, material será retirado de regiões menos solicitadas do ponto de vista de tensões. A otimização retirou mais material da região central do pedal, uma vez que, como demonstra a Fig. 9, esta é uma região onde os níveis de tensões são menores. A massa do pedal remanescente foi de 53% da original. O processo de otimização foi relativamente rápido, precisando apenas de vinte e quatro iterações. A Fig. 10 apresenta o resultado do processo da otimização topológica no pedal do fórmula SAE.

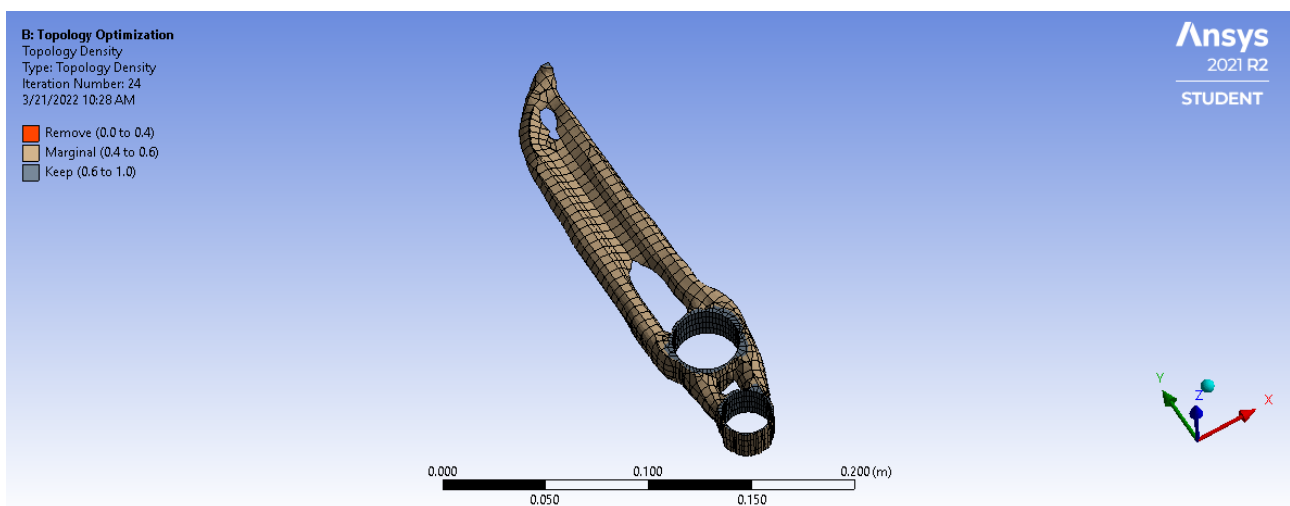


Figura 10. Geometria do pedal de freio obtida através do método de otimização topológica.

4. CONCLUSÕES

O método de otimização topológica é um método atual e efetivo para criar modelos geométricos de peças otimizadas e tem uma grande perspectiva de aplicação na indústria automotiva, pois são diversos os componentes estruturais veiculares que poderão ter sua geometria otimizada e sua massa reduzida, contribuindo para o desenvolvimento de veículos estruturalmente e energeticamente mais eficientes. A otimização topológica do balancim e do pedal de freio se mostraram eficientes no momento que apresentaram uma redução significativa da massa do componente sem comprometer a sua função estrutural. O software de otimização do Ansys Workbench se mostrou como sendo uma ferramenta eficaz e de fácil utilização na implementação de projetos de otimização. Diante do exposto, a técnica de otimização topológica utilizada no desenvolvimento de componentes automotivos é uma realidade e constitui-se como uma ferramenta fundamental para a concepção de peças mais eficientes do ponto de vista estrutural. Um dos grandes limitantes da ampla utilização da técnica de otimização topológica no desenvolvimento de componentes estruturais, das mais diversas áreas, seria a dificuldade de fabricação da peça otimizada diante da grande complexidade geométrica obtida pelo processo de otimização. No entanto, com o desenvolvimento e difusão das técnicas de manufatura aditiva, certamente a otimização topológica irá ganhar um enorme espaço na concepção e desenvolvimento de componentes da indústria automotiva.

5. REFERÊNCIAS

- Ansys, 2022, disponível em: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>, acesso em: 15/03/2022.
- Bordalo, S.N., Ferziger, J.H. and Kline, S.J., 1989. "The development of zonal models for turbulence". In *Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1, pp. 41- 44.
- Barroso, D.A., *et al*, 2015. "Análise do Balancim da suspensão do protótipo fórmula SAE por Método de Elementos Finitos". *Holos*, vol 5, Ano 31.
- Bosseti, P, 2019, "Framing a Lighter, Stronger Race Car", *Revista Ansys Advantage*.
- Fornace, L. V., 2006. "Weight Reduction Techniques Applied to Formula SAE Vehicle Design: An Investigation in Topology Optimization", tese da Universidade da Califórnia, San Diego.
- Gimenes, R. and Moriguchi, S. K., 2015. "Aplicação de técnicas de otimização topológica via software". *CONIC – 18 Congresso de Iniciação Científica*.
- Jankovics, D. and Barari, A., 2019, "Customization of Automotive Structural Components using Additive Manufacturing and Topology Optimization", *IFAC Papers On Line*, pg 212–217.
- Machado, M. D. and Benini, L., 2018, "Dimensionamento e otimização do pedal de freio para um veículo tipo fórmula SAE elétrico", III semana acadêmica de Engenharia Mecânica e de Produção.
- Missio, L. H. D. C., 2019, "Otimização topológica de pistão em suspensão a ar", *Projeto de Graduação – Universidade de Brasília*. Departamento de Engenharia Mecânica.
- Riordan, C. *et al*, 2018, "Topology Optimization of a Formula SAE Upright Using OptiStruct", *SAE International*, 28 de julho.
- Rúbio, G. P., 2017, "Projeto de uma suspensão duplo A para um veículo tipo fórmula SAE", *Trabalho final de graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá*.
- Sargini, M. *et al*, 2020, "Finite element analysis of automotive arm brake pedal for rapid manufacturing", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 715.
- UFSC, 2018, disponível em: <https://noticias.ufsc.br/2018/03/tripe-universidade-empresa-e-sociedade-marca-a-instalacao-da-ufsc-em-joinville/>, acesso em 15/03/2022.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O autor é o único responsável pelo conteúdo deste trabalho.

USE OF THE TOPOLOGY OPTIMIZATION METHOD IN THE DESIGN OF AUTOMOTIVE COMPONENTS

Antonio de Assis Brito Neto, antonio.brito@ufsc.br¹

¹ University Federal of Santa Catarina, R. Dona Francisca, 8300 - Bloco U - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-600

Abstract. *The automotive industry has sought, with the use of computational tools, a way to develop light and energy efficient vehicles. To achieve this goal, it is necessary to use optimization techniques. Among these techniques, the topological optimization method stands out. It is characterized as being a key part of the development of products, constituting itself as a powerful method to reduce the weight of a part without compromising its performance and its level of safety, through the redistribution of the part material to eliminate material from low-demand locations. Applying the topological optimization method in the development of automotive components, generating lighter parts without losing their stiffness and strength, is the objective of this work. Case studies were developed based on the analysis of automotive structural components. The methodology consists, at first, in determining the loads and boundary conditions of the problem and using structural analysis tools such as the Finite Element Method to present the stress distribution under various working conditions of the component. In a second moment, using the topological optimization technique, the optimization variables must be adjusted, based on the constraints and the objective function, to determine the optimal distribution of material in the part. It is intended to develop a methodology that allows generating optimized geometries, lighter and without compromising strength, rigidity and safety requirements. Therefore, this work presents an efficient strategy to deal with topological optimization, where automotive parts were analyzed and redesigned based on topological optimization using the commercial software ANSYS Workbench, which allows the optimal stress distribution of the product to be determined even in your design stage.*

Keywords: *Topological optimization, automotive design, finite element method.*