

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE CHASSI VEICULAR: SOFTWARE APLICADO A OTIMIZAÇÃO DE MATERIAL DA LONGARINA DO CHASSI DE CAMINHÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

TOPOLOGY OPTIMIZATION VEHICLE CHASSIS: SOFTWARE APPLIED TO OPTIMIZATION TRUCKS CHASSIS STRINGER IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

MSc. Eng. Paulo Henrique Lixandrão Fernando ¹

Dr^a. Kelly Cristina de Lira Lixandrão ²

Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos ³

Prof. Dr. Osvaldo Luís Asato ⁴

Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto ⁵

Data de entrega dos originais à redação em: 11/09/2016
e recebido para diagramação em: 21/11/2017

A necessidade atual de redução de custos de fabricação na indústria automobilística é fortemente solicitada aos engenheiros do produto e processo. Por este fato, engenheiros e projetistas buscam em outras áreas as técnicas modernas que podem ser introduzidas ou utilizadas em seus projetos, como por exemplo, os métodos computacionais para otimização aplicadas ao desenho das peças. Esta técnica atual é conhecida como "Otimização topológica". Como a longarina do chassi do veículo é a ligação entre a cabine, motor, transmissão e eixos, este componente é de grande importância na construção do veículo. Para gerar bons produtos manufaturados, engenheiros das companhias tem elevados custos com tempo de desenvolvimento, assim, buscam desenvolver e projetar um produto com redução de peso do material suportado para a aplicação. A longarina do chassi é um dos mais importantes itens do veículo porque é onde é suportado todas as partes da estrutura no veículo automotivo. Este artigo procurará identificar a otimização topológica aplicada na longarina do chassi de um caminhão, comparando os resultados com alguns softwares comerciais. Será utilizado recursos de softwares existentes para avaliação e modelo do projeto como SolidWorks (Dassault Systèmes S.A) with ParetoWorks (SciArt Software Inc.), ANSYS e SpaceClaim (ESSS) com Virtual.PYXIS (VirtualCAE). Os resultados contribuirão para uma nova aplicação no meio acadêmico e uso industrial.

Palavras-chaves: Otimização Topológica. ParetoWorks. Virtual.PYXIS. ANSYS. SpaceClaim.

The necessity to reduce production costs in the automotive industry is strongly investigated by product engineers. For this reason, engineers and designers search in other areas modern techniques that can be improved or used in their projects, using computational methods for optimization applied to the part design. This actual technique is well-known with Topology Optimization. As the vehicle chassis is the link between the cabin, engine, transmission and axles, it has a great importance in the construction of vehicle. For the development of production, engineering companies have high costs due to the time it takes to get a better product, and it is very difficult to develop and design a product with the lightweight of the material that suits to the application. The stringer chassis is one of the most important items of the vehicle because that is where it supports all parts of the structure in the propellant vehicle. This paper search to identify such optimization technology, and applies it in the analysis of a chassis comparing some commercial software. It will be used for comparison some software that have some optimization type incorporated such as SolidWorks (Dassault Systèmes S.A) with ParetoWorks (SciArt Software Inc.), ANSYS and SPACECLAIM (ESSS) with Virtual.PYXIS (Virtual CAE). So, the proposal of this article find to identify the problems of the of stringer chassis, searching to reduce material for better distribution of weight x power ratio, with the use of the optimization topology. The results will contribute to a new application in academic and industrial use.

Keywords: Topology Optmization. ParetoWorks. Virtual.PYXIS. ANSYS. SpaceClaim.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das empresas, fabricantes de chassi veiculares, tentam diminuir o peso de suas estruturas. A redução do peso se dá como resultado final, com diversos fatores positivos, como diminuição do consumo do veículo, possibilidade de maiores volumes de carga para carrocerias, diminuição de peso de componentes dos eixos dianteiros e traseiros, possibilidade de

diminuir a rodagem, melhorando custos de pneu, etc. Como o chassi veicular é a ligação entre a cabine do veículo, motorização, eixos de transmissão e rodagem, o mesmo tem um grau de importância muito grande em um veículo rodante.

Existem muitas literaturas técnica da área de engenharia, no entanto, especificamente o método de otimização topológica é atual, ou seja, não há grandes

1 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Câmpus São Paulo < paulohl@yaho.com.br >.

2 - Universidade Federal do ABC < kellycrislira@yahoo.com.br >.

3 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Câmpus São Paulo < givanildo@ifsp.edu.br >.

4 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Câmpus Suzano < asato@ifsp.edu.br >.

5 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Câmpus São Paulo < nakamoto@ifsp.edu.br >.

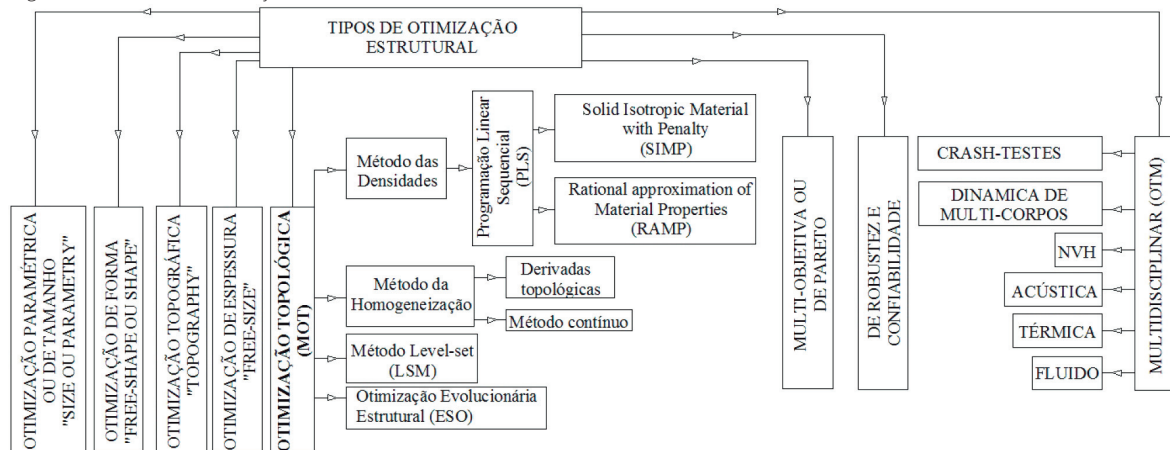
desenvolvimentos na área de projeto nas empresas fabricante de veículos nacionais. O estudo vem de encontro a este problema, e visa demonstrar softwares não somente de sistemas CAE (AVELINO, 2000), mas também de otimização topológica para a análise dos componentes e fabricação de chassi. A proposta consiste nas seguintes etapas: identificar um chassi existente no mercado fabricante de veículos automotores; entender as forças atuantes na longarina em relação ao peso bruto técnico admissível no equipamento, principalmente as forças de tensão torcionais no elemento; demonstrar o plano de furação atual desta longarina, e através do MOT (Método de otimização topológica), propor um novo plano de furação e cortes para esta longarina, resultado do software estudado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Introdução aos conceitos básicos de otimização

De acordo com Jenkis (2015), atualmente a otimização estrutural é dividida em algumas classes que são classificadas de acordo com a figura 1:

Figura 1 - Classes de otimização



• Otimização Estrutural

Segundo Haftka (1992), é a otimização de estruturas de tamanho, forma, topográfica, de espessura, topológica. Atualmente existem outros tipos de otimização, como multi-objetiva ou de pareto, de robustez e confiabilidade, multidisciplinar, etc.

• Otimização paramétrica ou de tamanho

Serve para resolver problemas em que a minimização de uma função objetiva é especificada através de um conjunto de dados definidos, onde é possível diminuir em um conjunto de componentes diferentes espessuras. Otimização de tamanho consiste em modificar propriedades dos elementos da estrutura.

• Otimização de forma

Esta trabalha nos nós do componente (free-shape) ou no próprio elemento (shape) diminuindo as tensões dos contornos. A shape tem mais controle de malha do que a free-shape (BENDSOE, 1995).

• Otimização topográfica

É utilizada em componentes estampados, melhorando rigidez em determinados relevos da

estrutura, focada em mudar a superfície do componente. Otimização topografia e topométrica, são somente aplicadas para elementos 2D ou elementos de casca.

• Otimização de espessura

É utilizada para materiais plásticos ou compósitos, onde há a necessidade de controle das espessuras dos componentes.

• Otimização Multi-objetiva ou de Pareto

É o método para numericamente definir as fronteiras de pareto com base em fatores exógenos, com decisão por humanos e não por modelo de computação somente.

• Otimização de Robustez e Confiabilidade

São métodos para controle de medidas em termos de principal valor e variância.

• Otimização Multidisciplinar (OMD)

É a atual área que envolve várias disciplinas como: de fluidos, térmica, acústica, NVH, dinâmica de multi-corpos, crash-testes, etc.

2.2 Introdução a otimização topológica

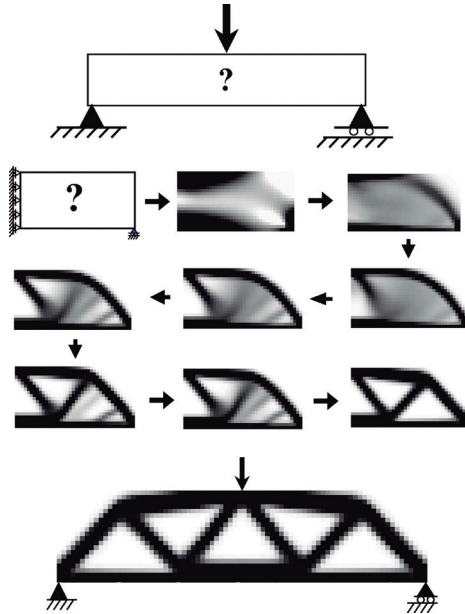
É um dos tipos de otimização estrutural. Otimização topológica é a forma de reduzir material através de alguns modelos, com ou sem densidades, com homogeneização (HASSANI et al.,1999), com método level-set (MLS) ou por otimização evolucionária estrutural (OES). O começo da otimização topológica deu-se principalmente na área de aviação, onde a redução do peso do material foi exaustivamente estudada para reduzir os custos de fabricação. A classe de otimização é conhecida como MOT, que é descrita em várias referências bibliográficas, (SIGMUND, 1994), (BENDSOE, 1995), (ROSVANY, 1997), (BENDSOE et al., 2003) e (RAO, 2009).

Existem alguns softwares existentes para otimização, mas estes necessitam de CPUs com alta performance de processamento e cálculo de velocidades. A principal proposta deste artigo é de analisar os softwares existentes e comparar o MOT com uma aplicação na indústria automotiva.

Desde o final da década de 1980, vários estudos de otimização nas universidades e também na indústria aeronáutica foram testados. Bendsoe et al. (1988) propôs a aplicação em otimização de estruturas

contínuas através de densidades, esta possibilidade foi um passo para que a obtenção de estruturas ótimas tenham sido realizadas para diversas aplicações. No método há a possibilidade de encontrar as posições denominadas vazias (0) ou cheias (1), (Figura 2).

Figura 2 - Princípio de otimização topológica (EMILIO, 2014)



A otimização topológica é um método computacional de otimização estrutural. O método permite definir a topologia ótima de estruturas, com a distribuição de material no interior de um domínio de projeto, que visa a retirada ou colocação do material em cada ponto do domínio, que poderá minimizar (ou maximizar) a função objetivo especificada. O método consiste em coletar os dados, objetivos, recursos, etc. Deve ser observado quais são os dados do material, quais são os objetivos, por exemplo encontrar uma flecha máxima, com recursos por exemplo de tensão normal e tensão de cisalhamento. Através destes dados, objetivos, recursos é feita a formulação do problema de otimização. Na formulação é definido as variáveis do projeto como por exemplo, área, comprimento ou altura do modelo, elas podem ser chamadas como as dimensões do modelo.

Nasequência define-se a função objetivo e adota-se um processo de otimização como por exemplo minimizar a função. Executa-se um processo de interações da função, sendo que cada interação, é verificada uma nova taxa de redução convergindo a estrutura para uma solução ótima. Consequentemente para que o número de interações seja reduzido, há um grande número de cálculos e deve-se adotar as restrições para a função. O MOT (Método de otimização topológica) busca a distribuição ótima de material no interior de um domínio de projeto, retirando-se e adicionando material no

domínio fixo de maneira a tender uma função objetivo. Os estudos atualmente envolvendo o MOT se baseiam em transferência de calor, escoamento de fluidos, vibrações, estruturas contínuas.

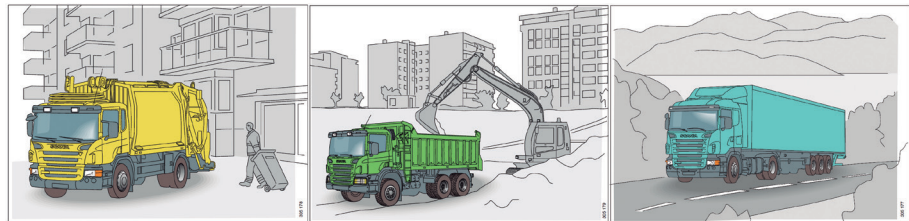
2.3 Programação Matemática - Abordagem Simplex

Um dos tipos de abordagem de otimização provindo da programação Linear, formulada para o uso de funções lineares foi o método simplex, conhecido como SIMP ao qual a lei do material é um só lido isotrópico penalizado. Ele foi desenvolvido por Dantzig (1963), permitindo assim a solução de problemas de programação linear com maior eficiência. No MATLAB (2016) temos uma rotina que resolve problemas lineares, chamada LINPROG (STRANG, 2002). Esta rotina foi desenvolvida para auxiliar os programadores no cálculo de programação linear, pois é um programa robusto e amplamente utilizado na resolução de problemas de engenharia. Outra função linear é conhecida como RAMP ao qual as propriedades do material são aproximações racionais, ver Figura 1.

2.4 Critérios de Projeto e Fabricação de Chassis

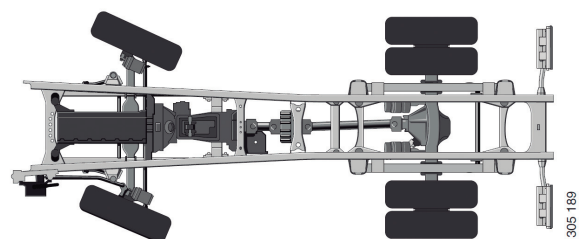
Os engenheiros do produto no Brasil utilizam atualmente o método CAE para analisar estruturas contínuas utilizando softwares como ANSYS etc. O chassi é especificado exclusivamente para dar ao veículo algumas melhorias com relação aos aspectos de resistência, conforto, características de condução e processamento da carga. O chassi é projetado para absorver contato com sobre-chassi de carrocerias de diversas aplicações, como carro coletor de resíduos, carro de carga basculante, carro de transporte de carga rodoviário, etc, conforme figura 3.

Figura 3 - Tipos de carrocerias aplicados no chassi (SCANIA a - 2016, documento on-line fotos 305 177, 305 178, 305 179)



As configurações do chassi dependem do tipo ou modelo do equipamento, variando de 4x2, ou seja com 4 rodas de contato com o pavimento, porém com tração em 2 rodas, passando por 4x4, 6x2, 6x6, 8x2 ou 8x4. Algumas outras condições de configuração de chassi podem ser projetadas para equipamentos especiais, ver Figura 4.

Figura 4 - Chassi 4x4 (SCANIA a - 2016, documento on-line foto 305 189)



A maioria dos implementos feito pelos fabricantes de carrocerias exige dimensões diversificadas de entre-eixo. O entre-eixo é a distância do eixo frontal até o eixo traseiro. Isto se deve pelo fato de que as indústrias fabricantes de veículos possuem em seu catálogo de venda apenas algumas medidas padronizadas de entre eixos devido a minimização de custo do seu processo de fabricação. Essa exigência de dimensão diversificada faz com que haja alterações no posicionamento do eixo traseiro alterando furações na longarina do chassi quando estas não são definidas pelo fabricante, (Figura 5). Também por este fato é importante que os engenheiros conheçam detalhadamente a longarina do chassi aplicada ao veículo.

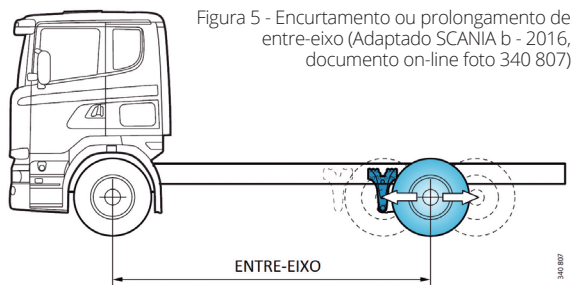
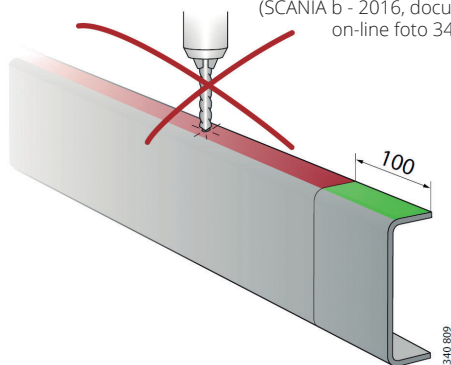


Figura 5 - Encurtamento ou prolongamento de entre-eixo (Adaptado SCANIA b - 2016, documento on-line foto 340 807)

O encurtamento dos chassis é muito prejudicial ao veículo devido ao corte promovido no quadro do chassi, em caminhões trator e basculantes sem sobre-chassi é proibido pelo fabricante tal corte, pois todos os esforços estão aplicados diretamente no chassi quando se tem a inexistência do sobre-chassi como nestes casos. A furação ou retirada de material no chassi é um dos elementos mais importantes em relação a eficácia da aplicação. Um fato proibido pelos fabricantes de veículos a perfuração na aba das longarinas quando estas forem do tipo perfil C, pois é nestas abas que se tem as maiores tensões da longarina do chassi, podendo originar ruptura ao redor dos orifícios perfurados, (Figura 6). Deve-se portanto analisar tecnicamente a furação, sempre que possível utilizando a alma do perfil C para a retirada dos materiais.

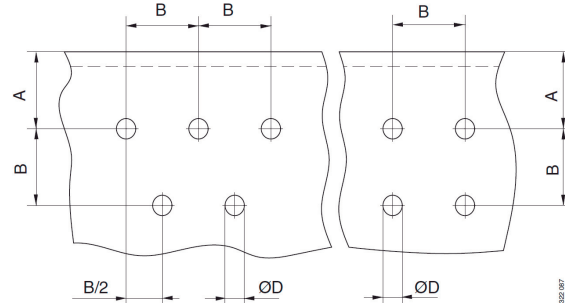
Figura 6 - Regras e condições de furação no chassi. Unidade: mm (SCANIA b - 2016, documento on-line foto 340 809)



O fabricante do chassi prevendo o problema que pode ser originado em relação a perfuração de uma longarina de chassi, recomenda que sempre que possível possa ser utilizado o padrão de orifícios pré-furados nas longarinas, no entanto caso haja a necessidade de fazer novas furações pede-se que adotem a configuração da Figura 7 para a furação (Norma de acordo com 2007/46/EC.). Onde a letra

"A" mostra a distância mínima entre o orifício e a aba, delimitando que esta dimensão deve ser 3 vezes o diâmetro do orifício acima de 40mm, já a dimensão "B" deve ser também 3 vezes o diâmetro mas maior que 50mm. O fabricante define que o furo entre o eixo dianteiro e o eixo traseiro tem que ser no máximo 30mm.

Figura 7 - Padrão permitido de furação na longarina. (SCANIA c - 2016, documento on-line foto 322 087)



Por mais que este padrão de furação da longarina foi adotado, existe sempre uma dúvida se aquele ponto da longarina pode ser furado ou não por parte dos encarroçadores, sem que isto afete criticamente a estrutura da longarina. Esta dúvida será encontrada nos resultados esperados deste trabalho.

3 JUSTIFICATIVA TÉCNICA

A constante dificuldade dos engenheiros de projetos que dimensionam carrocerias em chassis e se deparam com o excesso de peso nos eixos dos veículos limitando a carga é considerável. A presente proposta de trabalho tem como justificativa auxiliar o projetista a determinar a melhor posição dos furos na longarina, sem comprometer a funcionalidade da mesma, e reduzir o tempo de desenvolvimento do projeto das longarinas. Demonstrará através de revisão literária que a otimização topológica é um dos melhores métodos para análise de estruturas rígidas que podem sofrer alguma deformação, por isto utilizar-se-á este método para o estudo em questão. Será adotado no presente trabalho uma longarina de chassi de mercado de um veículo automotor específico, no entanto o trabalho visará demonstrar o método aplicado ao produto. Este método pode futuramente ser estudado para ser aplicado em outras partes do veículo como cabine, motorização e propulsão, carroceria, etc. Ficará demonstrado matematicamente o método de otimização topológica para esta aplicação, com o uso do software *SolidWorks* com o add-in *ParetoWorks* (SURESH, 2009) e também o *ANSYS* com o add-in *Virtual.PYXIS*. Toda a análise será feita nestes módulos, também será possível analisar os resultados do sistema CAE, e será possível demonstrar a eficiência do MOT e propor a criação posterior de um software através da rotina LINPROG (MATLAB), utilizada pelo método SIMPLEX.

4 METODOLOGIA

As empresas de engenharia de projetos apresentam desenvolvimentos em diversos campos de atuação, o MOT pode ser aplicado em vários segmentos, no Brasil ainda há poucas empresas que buscam suprir as necessidades dos clientes para o desenvolvimento de produtos através do MOT. Dessa forma, o tema de estudo pode ser apresentado da seguinte maneira:

“Otimização topológica de chassi veicular: Software aplicado a otimização de material da longarina do chassi de caminhões na indústria automotiva.” O trabalho visa dar uma contribuição à área em questão no âmbito de propor uma estrutura para as tarefas ou atividades/ciclos, para a realização do MOT aplicado ao produto chassi veicular, fazendo com que o projeto se torne rentável, com baixa densidade de material, etc. É útil, portanto, que o conhecimento adquirido através deste trabalho, poderá fazer com que o leitor entenda o que é uma estrutura construída através de uma metodologia, que poderá ser não somente para atividades específicas em questão, mas para qualquer ideia sugerida por alguma pessoa ou através da relação destas. Os conceitos trabalhados neste tema procuram entender a estrutura de tarefas para a validação de um produto através do MOT, e através desta procurar soluções para que haja uma desmitificação da dificuldade do uso dos sistemas CAE pelos projetistas de empresas de engenharia. Para atingir os objetivos deverá ser realizado um estudo de um chassi veicular através dos softwares *ParetoWorks* e *Virtual.PYXIS*, e através de funções de programação linear de modelo matemático. O objetivo da metodologia é o de ajudar-nos a compreender o não compreensível, nos mais amplos termos, não os produtos somente da pesquisa científica, mas o próprio processo, desta forma, qualquer pesquisa científica bem sucedida implica em certa consciência metodológica, (KAPLAN, 1969). O caminho que foi percorrido para a metodologia científica se dá de acordo com a execução dos estudos das bibliografias de referência que existem com relação aos casos similares, e a partir destes estudos, mensurar, ou seja, quantificar os estudos referente a aplicação do MOT nas empresas de Engenharia. Esta execução buscará primeiro definir a fundamentação do que é, e como atuam as empresas de engenharia nas diversas organizações deste meio no Brasil, com relação ao desenvolvimento de produtos através do MOT, a partir desta definição será explorado os tipos

de tarefas que já existem através do estudo de MOT, e após isto foi relacionado com o estudo de fabricação de um protótipo de um chassi veicular. Na elaboração do trabalho, adotou-se uma metodologia que foi estruturada pela sequência de passos representados graficamente na Figura 8.

Por meio da técnica proposta inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica de referência, com enfoque nas áreas de Otimização Topológica, Mecânica de Estruturas e Processos de Fabricação, representadas na Figura 9. Foi considerado estas áreas por estarem mais associadas a delimitação do tema. Os conceitos abordados a estas três áreas contemplam o interesse da pesquisa.

Sendo assim, será realizada uma pesquisa da bibliografia de referência, levantando-se os principais itens relativos à questão da pesquisa (objeto de estudo). Também será definido os aspectos como características do produto para estruturar o estudo. Como principal técnica para atingir os objetivos deste trabalho, utilizara a pesquisa Documental, que segundo Godoy (1995), é o exame de materiais de natureza diversa, que ainda não receberam um tratamento analítico, ou que podem ser reexaminados, buscando-se interpretações novas ou complementares. Esta parte documental será gerado através dos resultados dos softwares *ParetoWorks* e *Virtual.PYXIS*.

5 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

O código do algoritmo de otimização topológica é implementado no MATLAB usando o LINGPROG (uma rotina do MATLAB). A cada iteração do algoritmo de otimização topológica, a análise estrutural é conhecida através do Método de Elementos Finitos (AVELINO, 2000), para contar o cálculo de saída da tensão da estrutura.

A equação a seguir demonstra, a função objetivo, variável e restrição do projeto, e a resposta demonstrada ao MOT do problema.

O problema em estudo procurará obter máxima rigidez com mínimo volume de material, assim temos (LIMA, 2012):

Maximizar: $c(\rho)$: função objetivo
 Sujeito à $K.u=f$: Equação de equilíbrio

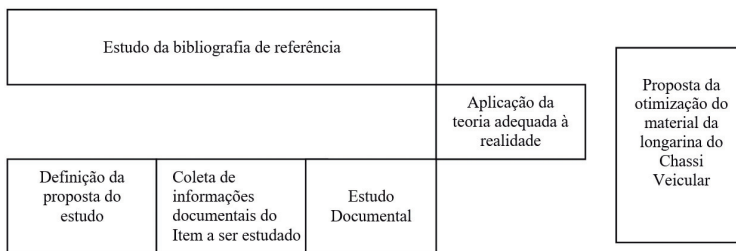
$$\sum_{i=1}^n V_i \rho_i \leq V^* \text{ Restrições do projeto}$$

$0 \leq \rho_i \leq 1$ onde $\rho_i (i=0, \dots, n)$: Variável do projeto

$$c(\rho) = f^T \cdot u = u^T \cdot K \cdot u = L = \text{Flexibilidade média a ser encontrada}$$

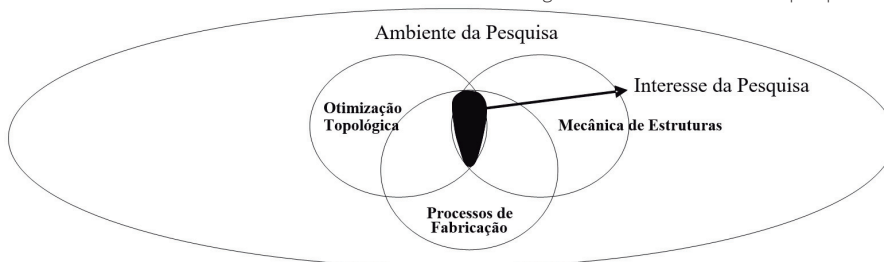
Onde:
 $c(\rho)$ = função objetivo
 ρ = pseudo densidade do material (0 a 1) = variavel de design
 K = matriz de rigidez global da estrutura
 u = deslocamento gerado pelo f
 f = carregamento/força do vetor

Figura 8 - Estrutura de pesquisa



Fonte: autor

Figura 9 - Área de interesse da pesquisa



Fonte: autor

n = número total de variáveis do problema
 T = vetor transposto
 V^* = volume do material desejado ao final da otimização
 L = Principal flexibilidade

Os gradientes da função objetivo são calculados. O otimizador gera uma nova camada de variáveis, depois a iteração da otimização continua até convergir para a função objetiva, (ANTONIOU et al., 2007).

O PLS resolve vários sub problemas lineares sequencialmente encontrando a solução do problema não-linear. OPLS é aplicado com sucesso na otimização topológica em muitos artigos, assim é a escolha do método a trabalhar.

Método numérico requerendo o domínio contínuo da estrutura é discretizado. Então, tem-se, por exemplo, instabilidade de distribuição contínua de densidade dentro da estrutura. Neste trabalho, o domínio da estrutura é discretizado dentro de elementos. O MOT proposto neste artigo é descrito na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama do MOT proposto

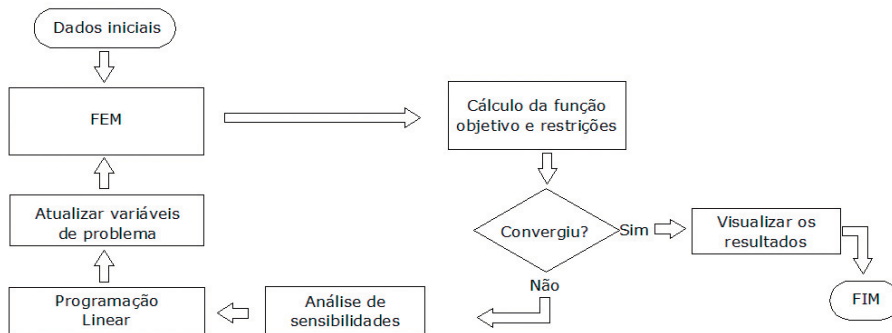


Figura 11 - Cortesia Lavrita Engenharia (LAVRITA, 2016)



Alongarina do chassitem muitas furações para fixar seus componentes da estrutura. Os projetistas e engenheiros da Scania procuram desenvolver a longarina colocando os furos e depois simulando através de software CAE toda a estrutura, mas não é utilizado o MOT para desenhar os furos da longarina. O desenho existente do chassi atualmente está de acordo com a Figura 12.

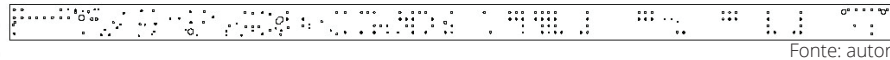
6 RESULTADOS

O projeto tem como premissa o desenvolvimento através do MOT para reduzir material de uma longarina de um chassi de caminhão, com os modelos matemáticos *ParetoWorks* e *Virtual.PYXIS*, pode ser usado na indústria automotiva, principalmente por vários projetistas e engenheiros de veículos. Neste trabalho nós confrontamos o método de análise de otimização topológica com o método de elementos finitos (CAE), observando a melhor eficiência para a função de minimizar massa através de ciclo de iterações. É possível reduzir custos para fabricar em escala produtiva um novo plano de furações da longarina do chassi, através da simulação de software MOT. Esta pesquisa tem sido altamente incentivada pela indústria automotiva, através de empresas como a Scania do Brasil (fabricante do chassi) e Lavrita Engenharia (fabricante das diversas carrocerias), provisionando recursos, informações técnicas e complementares, etc.

6.1 A longarina do chassi

A longarina do chassi estudado é existente na indústria. O modelo do caminhão é o Scania P440 CB 4x4. O chassi é fabricado para atender especialmente veículos especiais como caminhão de bombeiro, etc (Figura 11).

Figura 12 - Longarina Scania P440 CB 4x4



Fonte: autor

6.2 Cargas e apoios

A longarina do chassi do caminhão de bombeiro tem a carga máxima de 100.000N e é fixada em 6 pontos na sua estrutura. O material desta estrutura é o LNE 380 que é um aço carbono de alta resistência com a tensão limite de escoamento com 440 MPa, o material é isotrópico. Ver Figura 13.

Figura 13 - Cargas e apoios da estrutura



6.3 Critério para análise CAE e MOT

Para simplificar a análise foi verificado a alma do perfil C da longarina, desconsiderando as abas, no entanto foi analisado os elementos sólidos desta longarina em toda a sua extensão.

6.4 Resultados do CAE

A análise de pós-processamento foi feita considerando apenas o comportamento estático, todo e qualquer comportamento dinâmico foi desconsiderado.

Foi utilizado o *Software ParetoWorks* e *ANSYS*. Foi observado a máx. tensão de Von Misses (Figuras 14, 15) e o máximo deslocamento, (Figuras 16, 17).

Figura 14 - *ParetoWorks*: Máxima Tensão

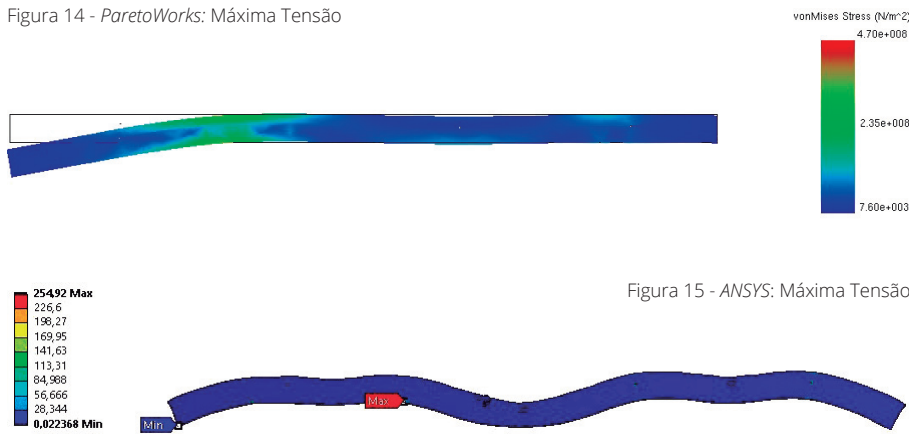


Figura 15 - *ANSYS*: Máxima Tensão

Figura 16 - *ParetoWorks*: Máximo Deslocamento

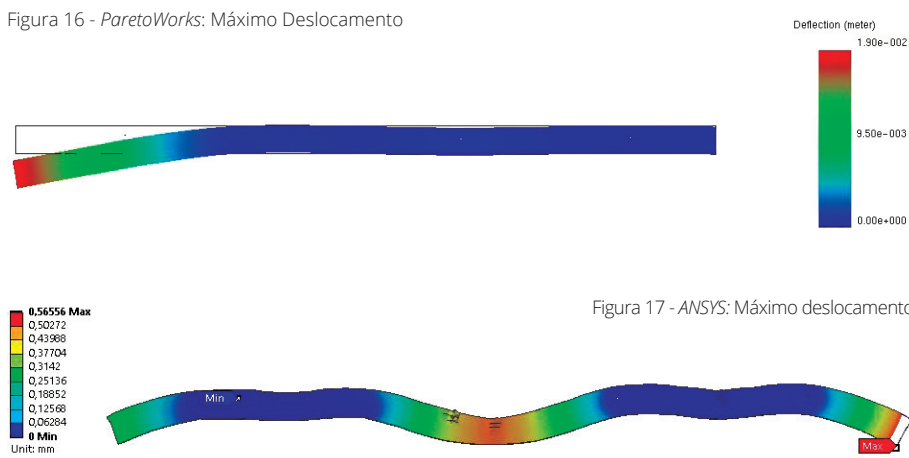


Figura 17 - *ANSYS*: Máximo deslocamento

Entre os resultados nós temos a tabela comparativa dos dados encontrados. Ver tabela 1.

É possível observar que a máxima tensão é diferente entre os softwares *ANSYS* e *software ParetoWorks*. Já no *ParetoWorks* o MOT é pela classe de Pareto que é outro tipo de otimização o *ANSYS* busca por meio de um critério de falha obter o envelope de máxima tensão e máximo deslocamento. É possível observar que foi utilizada uma quantidade de aproximadamente 1000 elementos, para caracterizar uma amostra similar dos dados inputados pelo projetista.

6.5 Resultados da análise MOT

Foi adotado por condição de critério do projetista, a condição de minimização do volume em até 70 por cento da estrutura. Este critério foi adotado porque foi analisado a estrutura para maximizar a tensão limite de escoamento, que é onde o material poderia falhar. A redução se deu entre 50-55 por cento, então não se adotou este critério mantendo a minimização do volume em até 70 por cento, onde o projetista tem certeza que o material não irá falhar. (Figuras 18, 19).

Tabela 1 - Resultados numéricos

Software	Nº. Elementos	Maxima Tensão (MPa)	Maximo Deslocamento(mm)
<i>PARETOWORKS</i>	1000	470,000	19,00
<i>ANSYS</i>	986	254,920	0,565

Figura 18 - *ParetoWorks*: MOT

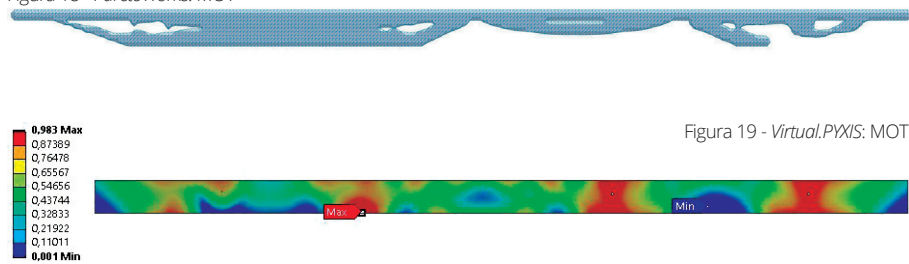
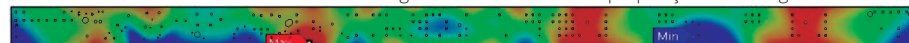


Figura 19 - *Virtual.PYXIS*: MOT

Figura 20 - *ParetoWorks*: Superposição com Longarina do Chassi



Figura 21 - *Virtual.PYXIS*: Superposição com Longarina do Chassi



6.6 Superposição o com a longarina do chassi existente

De acordo com a proposta deste artigo, é possível transformar o desenho do MOT obtido através das otimizações e remover os furos da longarina existente. Foi encontrado 2 casos de análise cada uma com o *ParetoWorks*, *Virtual.PYXIS*. Na Figura 20 tem o primeiro caso com o *ParetoWorks*, na Figura 21 tem o segundo caso com o *Virtual.PYXIS*.

Nas Figuras 22, 23 é proposto o novo plano de furação para cada um dos casos.

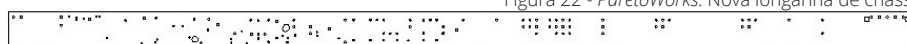


Figura 22 - ParetoWorks: Nova longarina de chassi

6.7 Nova longarina do Chassi

Este é o resultado final da proposta. Os projetistas e engenheiros da indústria automotiva tem uma nova forma de avaliar o plano de furação da longarina do chassis de seus caminhões. (Figuras 22 e 23).



Figura 23 - Virtual.PYXIS: Nova longarina do chassi

6.8 Comparação entre softwares

Os dois softwares foram analisados com as mesmas cargas e fixações no material. *ParetoWorks* teve problemas para processar acima de 10.000 elementos nesta aplicação de longarina de chassi, mas com 1.000 elementos foi o mais rápido para configurar as condições de contorno. No entanto, foi observado que para pequenas estruturas é possível configurar mais do que 1.000.000 de elementos facilmente.

Virtual.PYXIS é muito eficiente para MOT, tem muitas funções, e por trabalhar com o solver (*ANSYS*) é rápido para resolver o cálculo matemático do problema.

Os diferentes resultados encontrados para o novo plano de furações da longarina do chassi é considerado normal, porque cada software tem o seu específico algoritmo. A otimização com o *Virtual.PYXIS* para esta aplicação foi considerado o melhor uso-benefício pelo autor (chassis com comprimento acima de 6.000mm), porque somente reduziu furos em partes realmente aceitáveis de acordo com a prática e o que o projetista quer fixar de componentes ao longo da estrutura do chassi. O otimizador de método OC e lei do material SIMP sem penalização, foi o método melhor encontrado para a aplicação. No entanto o software *ParetoWorks* pode ser testado em diversos outros componentes do veículo, assim todos os softwares estudados são possíveis para serem utilizados pelo método MOT.

7 Conclusão

É percebido que a área de otimização estrutural é nova e que poderá ser bem utilizada para reduzir custos na indústria automotiva. Este artigo se propôs a encontrar na bibliografia e através de softwares comerciais, um novo modelo para descobrir a melhor furação da longarina do chassis de um veículo. Um algoritmo específico a esta aplicação, como já mencionado será possível ser desenvolvido através deste estudo.

Como possibilidade futura é possível desenvolver um novo estudo com a inserção do comportamento dinâmico da longarina do chassis, como efeito de vibração, fadiga, etc.

8 Agradecimentos

O Estudo foi auxiliado por VIRTUAL CAE Brasil (Sr. Leandro Garbin e Sr. Paulo Nigro); SCIART (Sr. Praveen Yadav); University of Winconsin (Prof. Dr. Krishnan Suresh e MBA Liz Christenbury), Lavrita Engenharia (Sr. Wilson Molina), e SCANIA (Sr. Hugo) e também

Prof. Dr. Cicero Ribeiro de Lima (UFABC-SP) pelo incentivo em desenvolvimentos de otimização topológica nesta área e por todos os colegas do IFSP-SP.

REFERÊNCIAS

ANTONIOU, A.; WU-SHENG L.; *Practical Optimization - Algorithms and Engineering Applications*, Springer Science+Business Media, LLC: University of Victoria, British Columbia, Canada, 2007.

AVELINO A. F.; *"Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE"*, São Paulo: Ed. Érica, 2000.

BENDSOE, M.P.; *Optimization of Structural Topology*, Shape, and Material, Springer - Verlag Berlin Heidelberg: Technical University of Denmark, 1995.

BENDSOE, M.P.; KIKUCHI, N.; *"Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method"*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, pp. 197-224, 1988.

BENDSOE, M.P.; SIGMUND O.; *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, Berlin: Springer-Verlag, ISBN 3-540-42992-1, 2nd edition, 2003.

DANTZIG, G.B.; *"Linear programming and extensions"*, New Jersey: Princeton, 1963. GODOY, A.S.; *Pesquisa Qualitativa: Tipos Fundamentais*. *RAE, SP*, v. 35, n. 3, p. 20-29, Maio/Jun. 1995.

GODOY, A.S.; *Pesquisa Qualitativa: Tipos Fundamentais*. *RAE, SP*, v. 35, n. 3, p. 20-29, Maio/Jun. 1995.

HAFTKA, R.T.; GURDAL, Z.; *Elements of Structural Optimization*, Dordrecht: Kluwer Academic, 1992.

HASSANI, B.; HINTON, E.; *Homogenization and Structural Topology Optimization - Theory, Practice and Software*, Springer-Verlag London Limited, 1999.

JENKINS, B.; *Design optimization: Topology and much more*, 3Dcadworld, 2015. Disponível em: < <http://www.3dcadworld.com/design-optimization-topology-and-much-more> >. Acesso em: 17 set. 2015

KAPLAN, A.; LEWINSKI, T.; *Conduta na Pesquisa: Metodologia para as ciências do comportamento*. Traduzido por Leônidas Hegenberg e Ocyanny Silveira da Moda. São Paulo: Editora Helder, 1969. Tradução de: *The conduct of inquiry. Methodology for behavioral science*.

LAVRITA, Disponível em: < <http://www.lavrta.com.br/equipamentos/combate-a-incendio-aeroporto.html> >. Acesso em: 04 dez. 2016

LIMA, C. R.; LIBERA, W. M. M.; **Aplicação do método de otimização topológica ao projeto de estruturas aeroespaciais**. UFABC-SP, 2012.

RAO, S. S.; **Engineering Optimization** - Theory and Practice, John Wiley and Sons, Inc, 4nd edition, 2009.

ROSVANY, G.I.N.; **Topology Optmization in Structural Mechanics**, Springer-Verlag Wien GmbH, 1997.

SCANIA a), **Informações sobre chassis e designações de modelo** - Scania Bodybuilder Homepage. Disponível em: <<https://til.scania.com/groups/bwd/documents/bwm/mdaw/mju2/edisp/bwm000002716.pdf>>. Acesso em: 4 dez. 2016

SCANIA b), **Modificações da distância de eixo** - Scania Bodybuilder Homepage. Disponível em: <<https://til.scania.com/groups/bwd/documents/bwm/mdaw/mju2/edisp/bwm000027301.pdf>>. Acesso em: 4 dez. 2016.

SCANIA c), **Perfuração** - Scania Bodybuilder Homepage. Disponível em: <<https://til.scania.com/groups/bwd/documents/bwm/mdaw/mjux/edisp/bwm000038001.pdf>>. Acesso: 4 dez. 2016.

SIGMUND, O; **Design of material structures using topology optimization**, DTU: Technical University of Denmark, 1994.

SILVA, EMILIO C. N.; **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas**. USP-SP, 2014.

SOFTWARE ANSYS. Disponível em: <<http://www.esss.com.br/software/ansys.php>>.

SOFTWARE MATLAB. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>.

SOFTWARE ParetoWorks. Disponível em: <<http://sciartsoft.com/paretoworks/>>.

SOFTWARE SolidWorks. Disponível em: <<http://www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/packages.htm>>.

SOFTWARE Virtual.PYXIS. Disponível em: <<http://virtualcae.com.br/software/virtual-pyxis/>>.

Standard Directive for vehicles. N° 2007/46/EC. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/NOT/?uri=CELEX:32007L0046>>, 2007 >.

STRANG, G.; MATLAB CODE, Disponível em: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/2166-introduction-to-linear-algebra/content/strang/linprog.m>>, 2002.

SURESH, K; Efficient Generation of Large-Scale Pareto-Optimal Topologies, University of Winsconsin, Madison, 2009.