



XL CILAMCE
IBERO-LATIN AMERICAN
CONGRESS ON
COMPUTATIONAL
METHODS IN
ENGINEERING

NOVEMBER
11-14, 2019
Praiamar Natal Hotel & Convention
Natal, RN-BRAZIL

OPTIMUM DESIGN OF AN URBAN BUS CHASSIS BASED ON GENETIC ALGORITHM AND FINITE ELEMENT METHOD SIMULATIONS

José Elias de Oliveira Gomes Júnior

Matheus Abreu Lopes

josegomes.uerj@gmail.com

matheus.lopes1@hotmail.com

Mechanical Engineering Postgraduate Program, PPGEM/FEN/UERJ

Fonseca Teles St., 121, São Cristóvão, 20940-903, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

Francisco José da Cunha Pires Soeiro

José Guilherme Santos da Silva

Mechanical Engineering Department, State University of Rio de Janeiro, UERJ

Structural Engineering Department, State University of Rio de Janeiro, UERJ

São Francisco Xavier St., 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

Abstract. A very important part of the vehicles design is related to the chassis, on which several mechanical components are mounted. An important feature to the chassis is to provide the highest service reliability for as long as possible in a cost effective way. During its service life, the chassis is subjected to several static and dynamic loadings. This way, this research work aims to obtain an optimum design of an urban bus chassis manufactured based on current steel rectangular and “C” section structural elements and subjected to deterministic loads. The optimization problem considers the dimensions of the structural elements sections of the investigated chassis as its design variables, which are established based on commercial standard dimensions. The lengths of these structural steel elements are fixed in 9.75 m and 2.46 m, respectively. Throughout this investigation, the numerical model of the analysed chassis was developed, based on the use of the Finite Element Method (FEM), utilising usual discretization techniques implemented in the ANSYS computational program. The optimization problem was resolved using Genetic Algorithms (GA), utilising the MATLAB software. A properly interface between this two software ANSYS and MATLAB was developed in this investigation to work in synergy considering the FEM and the GA. The results of this study show that it is possible to obtain lower cost designs to the chassis, based on the application of optimization techniques as the Genetic Algorithms in structural analysis.

Keywords: Bus chassis, Optimum design, Structural optimization.

1 Introdução

Durante a vida útil de um chassi veicular, este é submetido a diferentes tipos de carga, dentre as quais são destaque e exercem papel fundamental no seu projeto as de flexão, torção e combinações destas, conforme Rahul [1]. Portanto, uma criteriosa análise estrutural sobre este elemento antes de projetá-lo tornou-se ponto chave antes de qualquer possibilidade de manufatura, como constataam Cazazu e Grama [2].

Hoje, com a grande capacidade tecnológica e computacional disponível aos projetistas, tornou-se possível encontrar de forma mais precisa os pontos críticos de projeto, quais são os esforços que mais exigem da estrutura e como contornar os mesmos da forma menos onerosa. Segundo Soriano e Lima [3], para realização dessas análises são necessários modelos matemáticos, dentre os quais o Método dos Elementos Finitos (MEF) é o um dos mais utilizados. Este método foi desenvolvido para análises de meios contínuos, possibilitando que esta ferramenta seja utilizada em diversos problemas de análise estrutural. A análise desses meios contínuos através do MEF não é uma tarefa simples, fazendo-se necessário criar hipóteses simplificadoras, de modo a aproximar o modelo matemático o máximo do modelo físico original.

Em seus estudos, Contractor e et al. [4] realizam uma comparação entre o método analítico para o cálculo dos deslocamentos em um chassi do tipo escada e o resultado obtido com o auxílio do MEF, que é um método de aproximação. Conforme esperado, o método dos elementos finitos obteve uma aproximação bastante satisfatória, sendo o erro da ordem de 0.1%.

Por definição, otimização é o ato de obter o melhor resultado dado dentre devidas circunstâncias. Em projetos de engenharia, seja em construção, manutenção ou em qualquer outra área, o objetivo será sempre obter o produto final através do menor esforço, ou com o maior benefício desejado possível. Uma vez que este menor esforço ou maior benefício geralmente podem ser expressos através de funções dependentes de determinadas variáveis, por exemplo, uma função $f(x)$, a otimização fica definido como a maximização ou a minimização da referida função $f(x)$. Também é importante ressaltar que se um determinado ponto é o valor máximo da função $f(x)$, o valor mínimo desta função pode ser obtido através da negativa, $-f(x)$, conforme Rao [5].

O Algoritmo Genético (AG) é uma técnica meta-heurística de busca de solução, oriunda da teoria da evolução Darwiniana, a qual se baseia na seleção natural. O fundamento básico deste algoritmo é a aplicação de diversos processos evolucionários de forma artificial para evoluir soluções de um determinado problema, até a obtenção da solução ótima. Cada AG é aplicado sobre uma população aleatória de n indivíduos, chamados cromossomos, que são os vetores de projeto, sendo que estes cromossomos portam genes, as variáveis de projeto, onde os genes representam uma possível solução ótima para o problema em interesse, de acordo com Mccall [6]. Uma linhagem de cromossomos é denominada geração, e a geração dada como condição inicial é conhecida como população inicial, que é o conjunto de vetores de projeto.

Indu e Airin [7] explicitam que uma das principais vantagens do AG diz respeito ao fato de que trata-se de um método de otimização de ordem zero, isto é, um método de busca randômico, não utiliza derivadas e, portanto, possui maior eficácia na busca do máximo ou mínimo global do problema a ser otimizada, enquanto que os outros métodos de ordem elevadas tendem a encontrar máximos e mínimos locais.

Soni et al. [8] realizaram a otimização, via AG, de uma estrutura treliçada utilizando a interface entre o MATLAB e o ANSYS, obtendo uma redução de massa 25,88% superior em comparação ao *Teaching Learning Based Algorithm* (TBLO) e 58,23% ao *Heuristic Particle Swarm Optimization* (HPSO). Tal fato respalda a eficácia do AG em relação a outros métodos de otimização.

Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo realizar a otimização estrutural do chassi de ônibus urbano modelo B10M EDC 4x2, projetado pela Volvo do Brasil, de forma a obter uma solução ótima para a estrutura em termos da redução do peso. Para tal, o programa ANSYS será utilizado para realizar as análises estruturais, e o MATLAB, para otimização do sistema, via emprego do AG. A otimização estrutural é feita com base na interface entre o MATLAB e o ANSYS.

O presente trabalho concluiu que é possível desenvolver uma metodologia de otimização para chassis de ônibus urbanos a partir de uma interface apropriada entre o AG e o ANSYS, de forma que

no estudo de caso real apresentado foi possível obter uma redução de massa em comparação com a configuração original de projeto. A otimização, embora a partir de hipóteses simplificadoras, resultou em uma redução mássica da ordem de 64%. Logo, para que este chassi seja efetivamente fabricado é necessário que seja realizada uma análise dinâmica do componente, ao invés de utilizar somente o fator de segurança recomendado pela literatura.

2 Modelagem em Elementos Finitos

O chassi modelo B10M EDC 4x2 da Volvo do Brasil analisado consiste de uma estrutura metálica, fabricada com duas longarinas em perfil estrutural de aço em seção “C”, de comprimento 9750 mm e por travessas soldadas transversalmente às longarinas. As travessas são perfis estruturais de seção retangular e totalizam 5 travessas com comprimento de 2460 mm e uma travessa de 824 mm, como é possível observar na Fig. 1. No que diz respeito às dimensões das seções retas dos perfis estruturais, pode-se verificar tais valores (em milímetros) na Fig. 2. O material especificado para a construção do chassi corresponde ao aço SAE 1020 cujas propriedades são apresentadas na Tabela 1.

A modelagem por elementos finitos foi desenvolvida através do software ANSYS, utilizando o elemento SOLID45 [9] de suas biblioteca e gerando uma malha de elementos sólidos tridimensionais hexaédricos de 8 nós, com 3 graus de liberdade por nó, cada um associado aos deslocamentos translacionais relativos aos três eixos cartesianos. O chassi em questão resultou em um modelo com 25128 nós e 12660 elementos finitos, em um total de 75384 graus de liberdade, tal como apresentado pela Fig. 3.

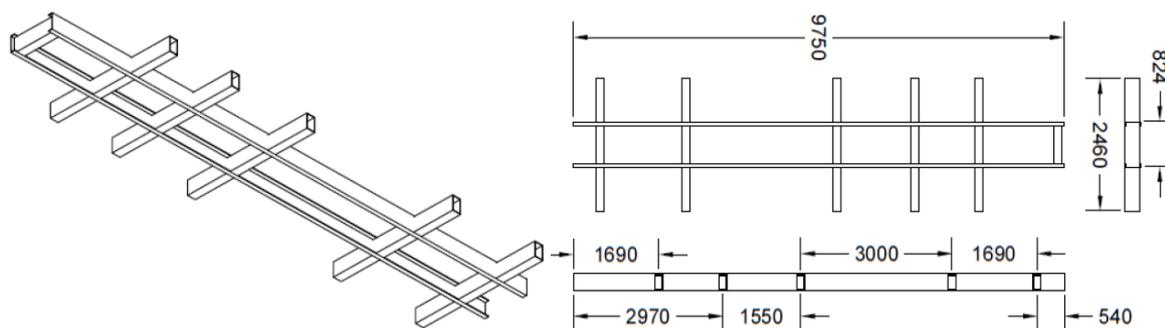


Figura 1. Sistema estrutural do chassi investigado (Dimensões em milímetros).

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço SAE 1020. [10]

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade Longitudinal	205 GPa
Massa Específica	7870 kg/m ³
Coefficiente de Poisson	0,29
Tensão Limite de Escoamento	350 MPa

Para o modelo em elementos finitos foi realizada uma análise estática linear e, no que diz respeito às cargas, foram aplicados carregamentos uniformemente distribuídos na área superior das longarinas, ao longo de seu comprimento, onde todos os demais componentes do veículo são montados. Os carregamentos foram calculados em função da capacidade técnica de carga de 17700 kgf, especificada pela Volvo do Brasil para o chassi [11].

A distribuição das tensões equivalentes de Von Mises está disposta na Fig. 4 para o carregamento distribuído aplicado na área superior das longarinas, de acordo com a capacidade técnica de carga de 17700 kgf. Percebe-se que tensão de Von Mises máxima na estrutura atinge um valor de 68.1 MPa e que as longarinas estão sujeitas a um efeito de torção devido à aplicação do carregamento distribuído fora de seus centróides. Por outro lado, as travessas possuem um valor de tensão de Von Mises praticamente nulo, com exceção de alguns pontos na região de união com as longarinas. Este resultado

é devido à maior inércia dos perfis estruturais utilizados para as travessas, quando comparados aos perfis estruturais utilizado para as longarinas

A partir de uma simples comparação da tensão de Von Mises máxima encontrada pelo modelo com o a Tensão Limite de Escoamento do aço SAE 1020, percebe-se que existe uma grande margem para otimização do volume da estrutura, a partir da redução das dimensões das seções retas dos perfis estruturais e, conseqüentemente, da massa da estrutura.

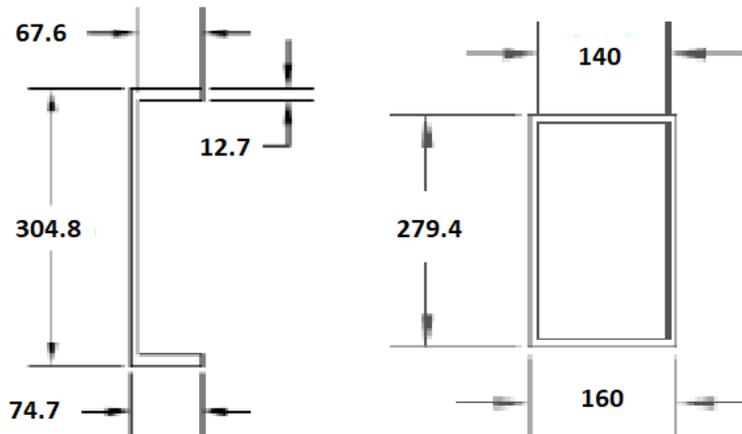


Figura 2. Seções retas dos perfis de aço (Dimensões em milímetros).

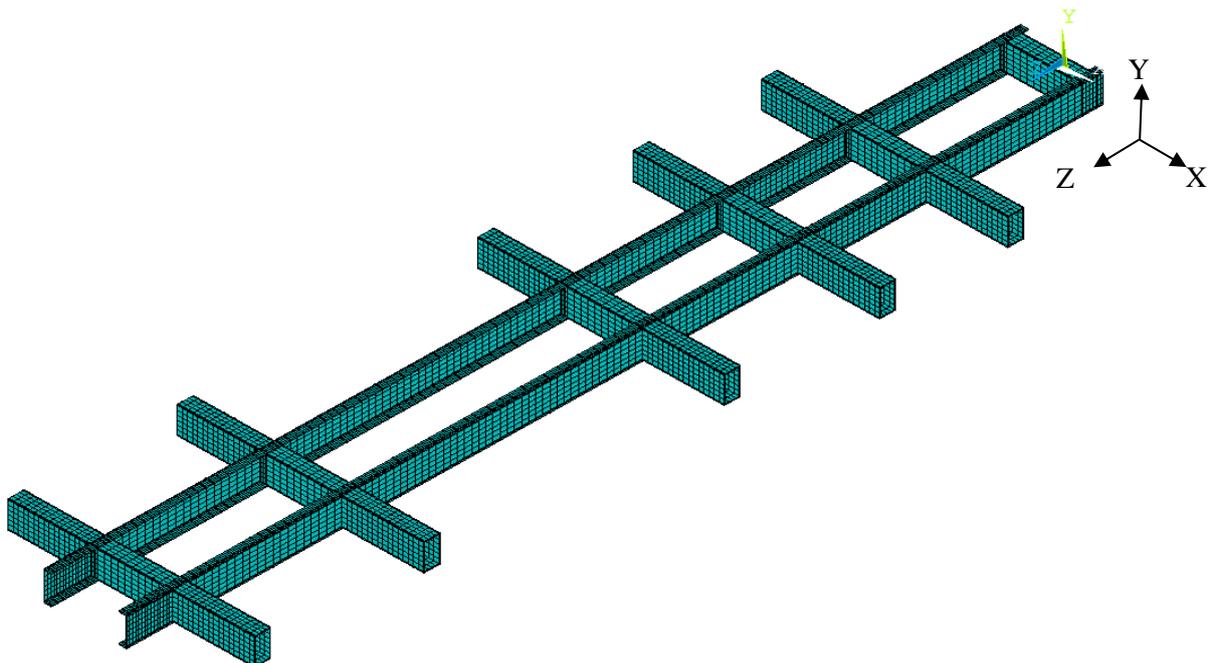


Figura 3. Modelo numérico em elementos finitos do chassi utilizando-se o elemento finito SOLID45.

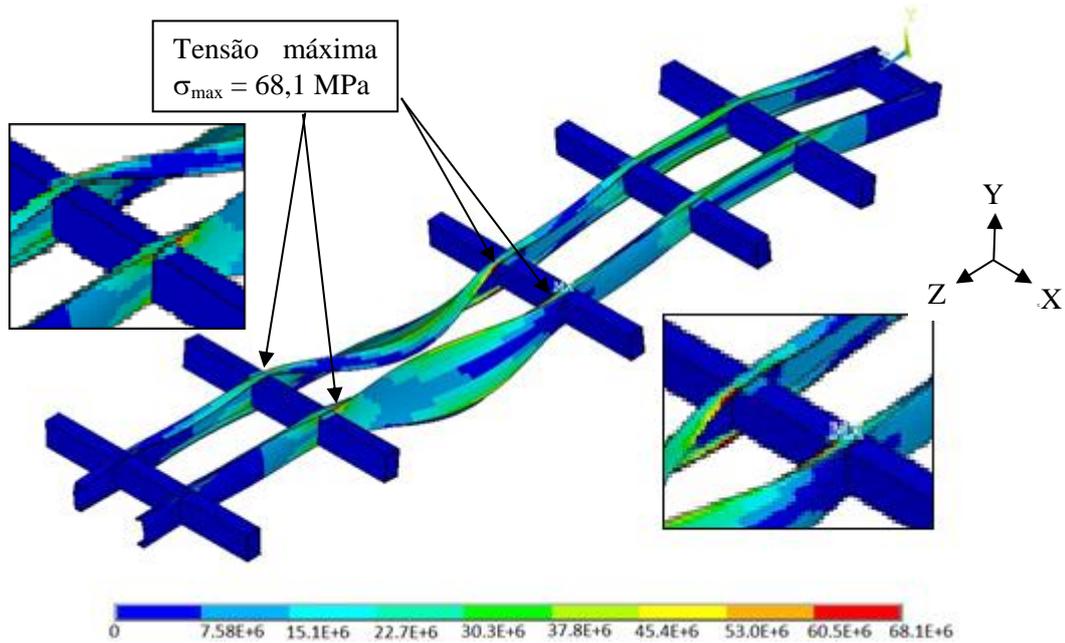


Figura 4. Distribuição de tensões de Von Mises atuantes sobre o chassi (Unidades em Pa).

3 Otimização pelo Algoritmo Genético

A otimização é a escolha do melhor elemento, respeitando determinado critério ou um grupo de critérios, dentro de uma gama de alternativas oferecidas. Neste trabalho, um critério importante a ser analisado na redução da massa da estrutura é a tensão de projeto σ_p , que é a máxima tensão de Von Mises admissível, sendo esta calculada através da Eq. (1).

$$\sigma_p \leq \frac{\sigma_e}{FS}. \quad (1)$$

Onde σ_e é a Tensão Limite de Escoamento do material, aço SAE 1020, que equivale a 350 MPa e FS é o fator de segurança do projeto, que para fins de análise estática em chassis do tipo escada, é comumente utilizado como 3.0 conforme Francis e outros [12]. A redução mássica diminuirá o custo de fabricação do chassi não só em termos do preço do aço, mas também em função de outros custos associados em sua produção tais como gastos logísticos relacionados ao transporte dos perfis estruturais, consumíveis de solda e etc. Não se limitando somente a tais economias, a otimização do chassi também reduzirá o peso do veículo, o que porventura proporcionará menores gastos em combustível, já que um veículo mais leve requer menor potência para transportar sua carga.

O problema de otimização deste trabalho é definido matematicamente na busca de um vetor \mathbf{x} , onde estão contidas as variáveis de projeto, que minimize a função $f(\mathbf{x})$, representando a massa do chassi, sujeito a restrição de desigualdade. A Eq. 2 apresenta o problema de otimização.

$$\text{Encontrar } \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix}, \text{ sujeito à restrição } g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ para } j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

A Eq. (3) representa a a massa do chassi em função das variáveis de projeto. As variáveis $W1$, $W2$, $W3$, $H1$, $H2$ e $H3$ são as dimensões dos perfis estruturais. A dimensão $C1$ representa o comprimento do chassi e as dimensões $C2$ e $C3$ representam os comprimentos das travessas.

$$m = d[(2W1T1 + T2H2)(2C1) + (W2H2 - W3H3)(6C2 + 10C3)]. \quad (3)$$

As variáveis $W1$, $T1$, $T2$, $H1$, $W2$ e $T3$ apresentadas na Eq. (3) estão representadas geometricamente na Fig. 5, que apresenta as seções transversais dos perfis estruturais que compõem o chassi. Durante o processo de otimização estas variáveis serão modificadas de forma estruturada seguindo uma sequência característica dos Algoritmos Genéticos, na busca pela solução ótima, isto é, a variação das dimensões dos perfis estruturais de forma a obter a menor massa possível, sem que a tensão de projeto seja ultrapassada, conforme o limite definido pela Eq. (1). A Tabela 2 apresenta os valores máximos e mínimos das variáveis de projeto conforme disponibilidade comercial.

Tabela 2. Restrição dimensional das variáveis de projeto.

Cota	Valor Máximo (mm)	Valor Mínimo (mm)
W1	96,9	35,8
T1	16,5	6,9
T2	20,7	4,32
H1	381,0	76,2
W2	200,0	40,0
T3	16,0	3,6

Para otimizar a estrutura é necessário determinar os parâmetros inerentes ao AG no *MATLAB*, como taxa de *crossover*, taxa de mutação, número de gerações e população inicial. A taxa de *crossover* determina quantos novos indivíduos serão gerados através da permutação de genes entre indivíduos já gerados previamente, a taxa de mutação determina a probabilidade de que um indivíduo seja gerado com a presença de um gene não encontrado em nenhum de seus pais, enquanto que o número de gerações é a quantidade de vezes que uma nova família de cromossomos será gerada, i.e., quantas iterações serão realizadas até o encerramento do *software*. A Tabela 3 demonstra os dados escolhidos para este projeto, onde 70% dos indivíduos serão recombinados e os outros 30% possuem 10% de probabilidade de sofrerem mutação. Não há descarte de indivíduos.

É válido ressaltar que o Algoritmo Genético utilizado para a otimização se aplica a problemas de otimização sem restrições, mais especificamente para problemas de minimização. Para que seja possível definir o problema de otimização com restrição, o Algoritmo Genético faz uso da função penalidade. A função penalidade é uma função que engloba tanto a função objetivo, quanto as restrições, de forma que, caso as restrições não seja respeitadas, elas irão aumentar o valor da função penalidade e indicará que o indivíduo em questão não contribui de forma a minimizar a função penalidade e, provavelmente, este não será selecionados pela sua menor adaptabilidade.

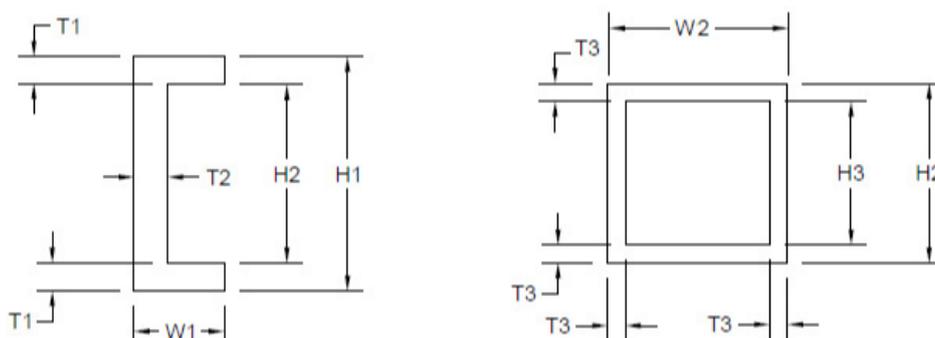


Figura 5. Seções transversais com as dimensões do chassi a serem otimizadas nas análises.

Para que haja o correto funcionamento do Algoritmo Genético, é preciso que a linguagem esteja escrita corretamente, de forma que compatível com os dois softwares, i.e., como um problema clássico de otimização, é necessário que sejam definidos a função objetivo, as variáveis de projeto e as restrições do mesmo, além de parâmetros inerentes ao AG, que já foram definidos acima.

Uma vez que todos os parâmetros tenham sido estabelecidos, principalmente a função objetivo, que será o determinante da solução otimizada, dar-se-á início a referida interface, i.e., o *MATLAB* fará uma primeira iteração utilizando a população inicial gerada pelo *software*, onde os indivíduos dessa

geração inicial serão levado ao ANSYS e uma análise estrutural será feita para cada indivíduo. Os resultados das análises estruturais (No caso, a máxima tensão de Von Mises atuante na estrutura), são importados pelo MATLAB que associa tais valores a cada indivíduo e utiliza tais informações para verificar se os critérios e restrições foram respeitados, de acordo com a Fig. 6.

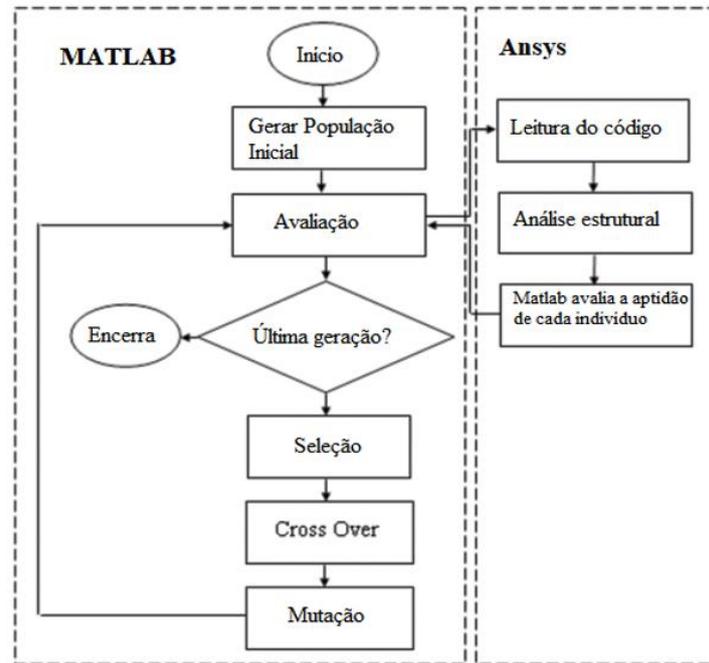


Figura 6. Fluxograma da interface *MATLAB-ANSYS*.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no Algoritmo Genético (AG).

Parâmetro	Valor
Taxa de Mutaçao	10%
Taxa de Crossover	70%
Geraçoes	100
Populaçao	150

4 Resultados e Discussões

A utilização de 100 gerações com populações de 150 indivíduos em cada totalizou 15000 iterações, ou seja, foram criados 15000 indivíduos que foram testados na função objetivo e levados ao ANSYS para as análises estruturais. Após as 15000 iterações realizadas pelo Algoritmo Genético, o mínimo global da função objetivo foi alcançado, apresentando assim a solução ótima do problema. A Figura 7 apresenta a evolução dos valores da função penalidade em cada geração do AG, além disso, são apresentados o melhor resultado e a média dos resultados por geração para esta função. O melhor valor encontrado é a massa mínima do chassi, $m = 523.32$ kg.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos após a otimização e compara a resposta com as variáveis de projeto iniciais, que são as dimensões com as quais o chassi é fabricado. É interessante observar que todas as variáveis tiveram seu valor absoluto reduzido, com exceção de $T1$ e $T2$, que representam a espessura da alma e das abas do perfil C. Desta forma, para que as demais variáveis fossem reduzidas e, por conseguinte, a massa do chassi, as espessuras deste perfil necessitaram ser aumentadas para que a inércia das seções não reduzissem de forma a não resistir a tensão resultante da carga crítica aplicada sobre o chassi.

A Figura 8 apresenta a configuração deformada do chassi com os valores ótimos das variáveis encontradas, via resolução do problema de otimização, para uma análise estática realizada na estrutura otimizada com carregamento distribuído aplicado na área superior das longarinas, de acordo com a

capacidade técnica de carga de 17700 kgf. O ponto crítico se deu na ligação entre as longarinas e travessas e a tensão máxima obtida foi de 116,62 MPa, respeitando o critério de falha da tensão de projeto.

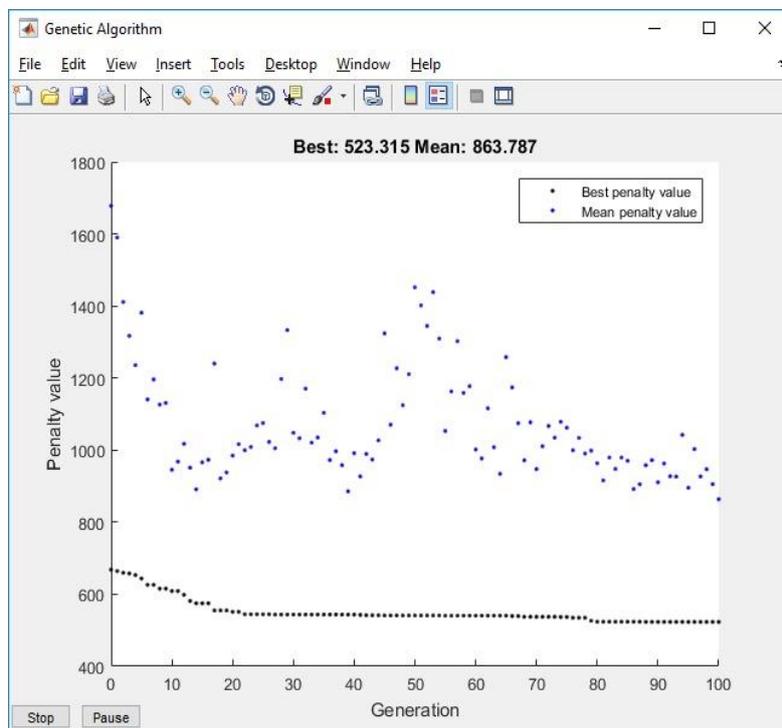


Figura 7. Evolução da função penalidade de acordo com as gerações do AG

Tabela 4. Resultados obtidos após a otimização utilizando-se o elemento finito SOLID45

Cota	Valor Inicial (mm)	Valor Otimizado (mm)
W1	74,7	36,8
T1	12,7	16,1
T2	7,11	8,79
H1	304,8	179,1
W2	160,0	53,0
T3	10,0	3,6

A análise da influência da tensão na estrutura é um dos objetos principais deste trabalho, uma vez que é onde encontram-se os principais limitantes em respeito a projetos, como tensão de ruptura e de escoamento. A natureza desta tensão é dada de acordo com a aplicação da carga, podendo ser tensão normal ou de cisalhamento.

Conforme mencionado, a carga é quem definirá que tipo de tensão a estrutura está sendo submetida. A tensão normal é resultante das tensões geradas devido à forças normais, sendo elas de tração ou compressão, e momento fletor. Já a tensão de cisalhamento, por sua vez, é oriunda do momento de torção, ou torque, e das cargas cisalhantes.

Ao analisar a distribuição de cargas no chassis em estudo, conforme mostra a Fig. 8, pode-se concluir que não há cargas normais, sendo a totalidade das forças de natureza cisalhante. Portanto, toda tensão normal será proveniente do momento fletor enquanto as tensões cisalhantes são compostas tanto pela aplicação do esforço cortante quanto da torção sofrida pelas longarinas.

Deve-se mencionar que o ponto crítico, i.e., o de maior tensão na estrutura é o mesmo na estrutura otimizada e antes da otimização, o que corrobora a integridade do processo de otimização, já que o mesmo não altera as características de projeto da estrutura. O que ocorre é a diminuição das seções dos perfis transversais e, logo, da massa e o aumento da tensão no ponto crítico, já que a carga que o chassi deve suportar não é alterada.

É interessante realizar uma comparação dos resultados encontrados utilizando a otimização com um modelo de elemento finito sólido em contrapartida com os resultados obtidos pelo modelo com elemento finito de viga realizado nos estudos de Gomes Júnior e Cabral [13]. A Figura 9 apresenta a distribuição de tensões inicial utilizando o elemento de viga BEAM188 [9] do ANSYS, para o carregamento distribuído aplicado na área superior das longarinas, de acordo com a capacidade técnica de carga de 17700 kgf. Neste trabalho inicial foi escolhido o elemento de viga BEAM 188 por tratar-se de uma viga de Timoshenko e ser possível considerar os efeitos de cisalhamento presentes na estrutura. Este elemento possui diversas hipóteses simplificadoras e foi discretizado com menos elementos, isto motivou a continuação do trabalho inicial que resultou neste artigo, com uma modelagem mais refinada e utilizando um elemento sólido, o SOLID45.

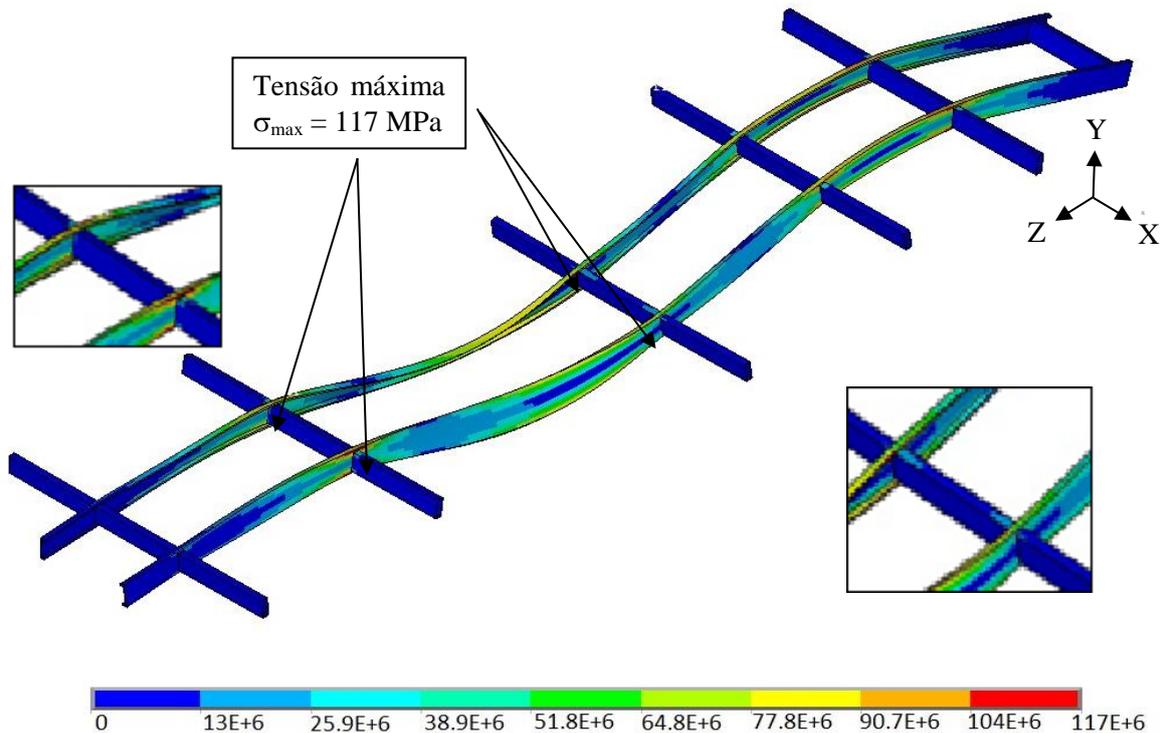


Figura 8. Distribuição de tensões no chassi após a otimização com o SOLID45 (Unidades: Pa)

Observa-se que neste caso a tensão máxima corresponde a 98.7 MPa, valor consideravelmente superior ao encontrado com o elemento SOLID45. O valor encontrado apresenta-se superior ao obtido pela modelagem com elementos sólidos pois a malha utilizada para elementos de viga é mais simples de menor discretização, com menos nós e elementos.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos após a otimização com o elemento de viga BEAM188. A tensão final encontrada foi de 116.67 MPa, mesmo valor obtido com a otimização utilizando o elemento SOLID45.

Observa-se na Tabela 5 que os valores das variáveis de projeto reduzem significativamente, com exceção de $T1$ e $T2$, que são as espessuras das longarinas. Este resultado é similar ao obtido neste estudo. Contudo, a discretização utilizando elemento sólido foi realizada nó a nó, sendo assim muito mais precisa que a discretização utilizando elemento de viga. Deste modo, pode-se afirmar então que os resultados obtidos utilizando o elemento sólido são mais precisos porque levam em consideração o comportamento interior dos perfis, aspectos não analisados por completo com elementos de viga.

Os resultados encontrados para a redução mássica obtidos pelo elemento sólido e pelo elemento de viga são contrapostos na Tabela 6. Observa-se que a massa ótima obtida com o elemento SOLID45 é muito próxima a obtida com o BEAM188, mas ainda assim um pouco inferior. Isto ocorre devido as considerações que o elemento sólido consegue equacionar no interior da estrutura, o que não é considerado pelo elemento de viga. Em outras palavras, o elemento sólido representa melhor cada ponto da estrutura e apresenta um resultado confiável no que tange a tensões e restrições dimensionais.

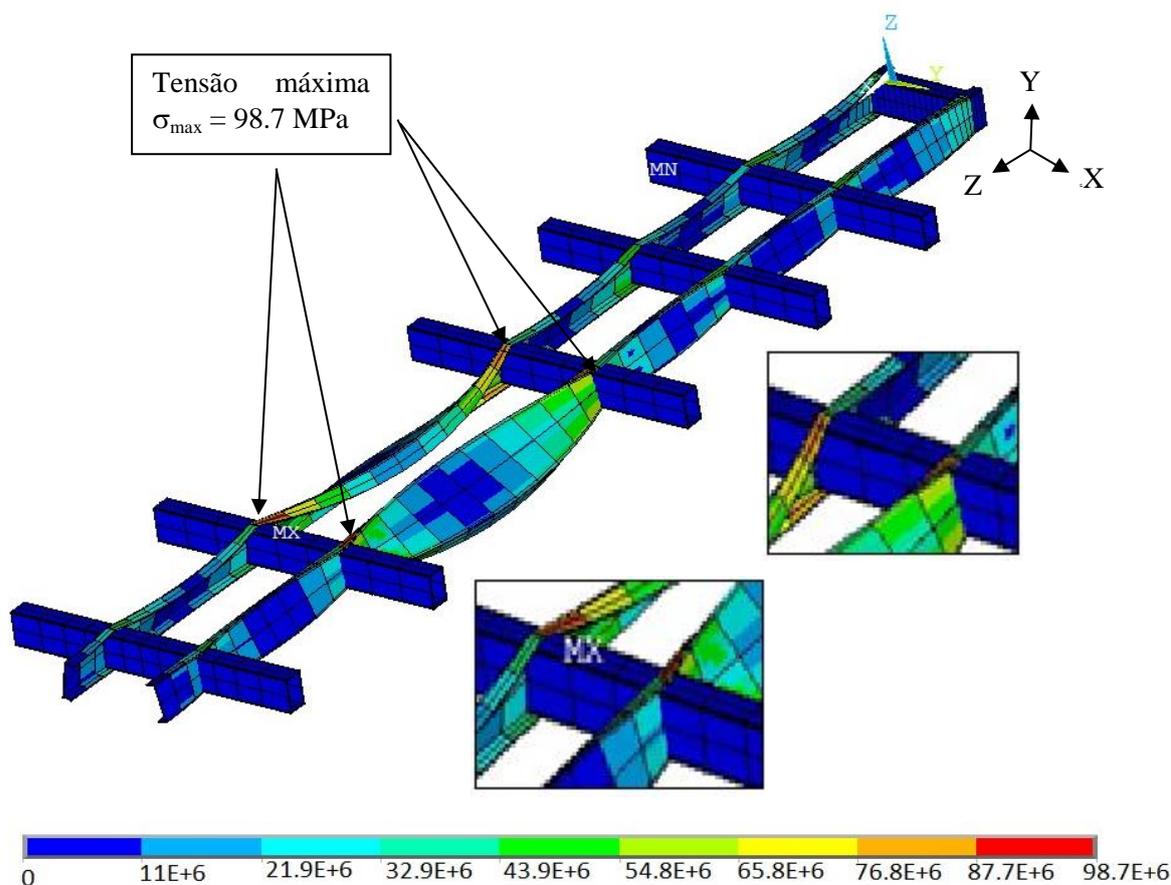


Tabela 5. Resultados obtidos após a otimização utilizando o elemento finito beam188

Cota	Valor Inicial (mm)	Valor Otimizado (mm)
W1	74,7	37,7
T1	12,7	13,8
T2	7,11	7,79
H1	304,8	267,6
W2	160,0	42,7
T3	10,0	3,6

Tabela 6. Massas obtidas após a otimização com diferentes elementos finitos

Massa Original (kg)	Massa Ótima SOLID45 (kg)	Massa Ótima BEAM188 (kg)
1462,41	523,32	525,63

Considerações Finais

Com base na análise estrutural realizada no chassi da Volvo foi possível perceber que o mesmo foi projetado de forma conservadora a fim de elevar os índices de segurança ao ser utilizado em situações cotidianas do veículo para o qual fora projetado. Adicionalmente, utilizando o AG para otimização, obteve-se uma configuração otimizada do chassi, na qual houve uma redução da massa em aproximadamente 64%, tornando o projeto menos oneroso e mantendo um fator de segurança dentro de padrões aceitáveis em conformidade com a literatura [12].

Tendo em mente um custo médio de R\$ 3,00 por quilograma dos perfis estruturais de aço SAE 1020, uma fabricação do chassi de acordo com a configuração de projeto otimizada proposta por este trabalho resultaria em uma economia de R\$ 2817,27 por unidade de chassi fabricado pela Volvo do

Brasil. Entretanto, deve-se salientar que esta redução de massa foi extremamente alta e isto decorre das hipóteses simplificadoras impostas na modelagem do chassi, de forma que a análise estrutural foi puramente estática, sem considerar carregamentos dinâmicos e efeitos de fadiga. Observa-se que em dois trabalhos semelhantes e utilizando dois elementos finitos diferentes, o resultado encontrado foi similar. Contudo, deve-se atentar para o fato de que neste trabalho não foi realizada a análise dinâmica da estrutura, de forma que a otimização se baseou em uma restrição a partir de uma análise estática linear, ou seja, a única restrição de projeto que limitou a otimização foi o nível de tensão desenvolvido no chassi devido à capacidade técnica de carga da estrutura, especificada pela Volvo do Brasil. Apesar de não terem sido realizadas análises dinâmicas e avaliação de fadiga, um fator de segurança de 3.0 é consideravelmente alto em projetos, o que abre uma oportunidade de se investigar, com base em análises dinâmicas e de fadiga, o campo de aplicação dos fatores de segurança em conjunto com análises estáticas.

É importante salientar que neste trabalho desejava-se desenvolver um procedimento genérico para a otimização de chassis do tipo escada. O método foi corroborado utilizando elementos finitos distintos e, portanto, pode ser utilizado em qualquer tipo de chassi, basta que sua modelagem seja realizada corretamente. Isto inclui a modelagem dinâmica, basta que acrescenta-se ao código computacional uma restrição de desigualdade para deslocamentos e o projeto pode ser otimizado da mesma maneira.

Por intermédio do que fora aqui apresentado, torna-se viável diversas modificações a fim de realizar comparações com as respostas obtidas, tais como quanto à troca do tipo de perfil das longarinas e travessas e como isto pode refletir na análise estrutural, quanto ao tipo de material mais propício a este tipo de chassi e especialmente utilizando outras restrições de projeto para a otimização. Portanto, todos os objetivos buscados nesta pesquisa foram devidamente alcançados, tornando este projeto uma base para futuras análises com maior complexidade e abrangência às áreas pertinentes à engenharia.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

Referências

- [1] V. Rahul et al. Structural analysis of pick-up truck chassis using fem. *International Journal of ChemTech Research*, v. 9, p. 384–391, 2016.
- [2] R. Cazacu e L. Grama. Structural optimization with genetic algorithms and particle swarm optimization. *Proceedings of the Annual Session of Scientific Papers*, IMT Oradea, v. 12, n. 22, p. 19–22, 2013.
- [3] H. L. Soriano e S. S. Lima. *Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas*, Vol. 1. EdUSP, 2003.
- [4] A. R. Contractor, G. P. Rathod e T. M. Pathel. Design and analysis of ladder frame chassis considering support at contact region of leaf spring and chassis frame. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Volume 12, Issue 2, Ver. IV (Mar - Apr. 2015), p. 63-71.
- [5] S. Rao. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. JohnWiley Sons, 2009.
- [6] J. Mccall. Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Elsevier, v. 184, n. 1, p. 205–222, 2005.
- [7] K. R. Indu e Airin M. G. Optimization of Tapered Cantilever Beam Using Genetic Algorithm: Interfacing MATLAB and ANSYS. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 4, Issue 10, October 2015.
- [8] N. Soni, P. Dave, V. Patel e V. Savsani. Size and Shape Optimization of Structures Using GA-FEA Interface. *International Journal of Technology and Engineering Studies*, vol, 2, no. 3, pp. 76-82, 2016.
- [9] ANSYS, Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 12.1.

- [10] AZO. Propriedades Mecânicas do Aço SAE 1020. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>.
- [11] Volvo do Brasil. *Ficha Técnica do Chassi de Ônibus B10M EDC 4x2 Urbano*.
- [12] V. Francis, R. K. Kai, A. K. Singh, P. K. Singh e H. Yadav. Structural Analysis of Ladder Chassis Frame for Jeep Using Ansys. *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol. 4, Iss. 4, Apr. 2014.
- [13] J. E. O. Gomes Júnior e T. F. D. Cabral. *Otimização Estrutural de um chassi de ônibus urbano utilizando o método dos elementos finitos e o algoritmo genético*. Projeto de Graduação, FEN/UERJ, 2019.