



OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE CHASSI VEICULAR TIPO ESCADA

Michel Henrique Machado Alba

Suzana Moreira Ávila

Maura Angélica Milfont Shzu

michel.alba@hotmail.com

avilas@unb.br

maura@unb.br

Universidade de Brasília – Faculdade do Gama

Área Especial de Indústria Projeção A Brasília, 72.444-240, Gama – Setor Leste, Distrito Federal, Brasil

Resumo. *O presente trabalho tem como proposta a análise e otimização de um chassi de veículo automotivo do tipo escada, onde se tem como principal objetivo a redução do volume total da estrutura. Sendo o chassi responsável direto por suportar e proteger diversos outros sistemas presentes em um veículo, seu projeto de desenvolvimento requer elevada atenção, de forma que o custo e tempo de elaboração não sejam demasiados. Para tanto, atualmente são diversos os métodos de análise e algoritmos de otimização que tornam viável que o projeto seja inicialmente elaborado através de simulação computacional, evitando que gastos excessivos sejam empregues na concepção de muitos modelos de componentes para realização de testes experimentais até que se chegue ao resultado ótimo. Dessa maneira, o presente trabalho propõe a utilização de softwares de simulação e otimização, como ANSYS e modeFRONTIER, para elaborar o processo de desenvolvimento de um chassi tipo escada, modelo Cargo C-816. A otimização a ser realizada é do tipo paramétrica, na qual são alteradas as dimensões de perfil transversal das longarinas e travessas do chassi, de forma a minimizar o volume total e, por consequência, reduzir a quantidade de material utilizado em sua fabricação.*

Keywords: *otimização, chassi, análise estrutural.*

1 INTRODUÇÃO

O chassi é a estrutura responsável por sustentar e acoplar diversos componentes mecânicos e elétricos do veículo, além de promover dirigibilidade e segurança aos usuários. Sua construção abrange requisitos como resistência e estabilidade em diversas condições, afim de que os componentes a ele fixados, tais como motor, eixos, rodas, sistemas de freio, suspensão e direção, não tenham seu funcionamento comprometido.

Em condições normais de utilização de um veículo são aplicados sobre ele inúmeras solicitações estáticas e dinâmicas, devidas à ação de cargas, irregularidades do solo e forma de dirigibilidade, entre outros. Tais carregamentos demandam da estrutura veicular alta resistência a flexão e vibração, de forma a garantir que o veículo não sofra grandes deformações, fraturas por fadiga e que não haja danos à saúde dos usuários causados por frequências indevidas. As consideradas cargas básicas aplicadas a um veículo são cinco: flexão, torção, combinação flexão-torção, lateral e frontal/traseira (aceleração/frenagem) (Happian-Smith, 2002).

Em geral, chassis automotivos são fabricados em aço leve ou compósitos plásticos (Chandra et al., 2012), materiais que fornecem a robustez necessária para os trabalhos aos quais são submetidos (Singh et al., 2014). Ao longo do tempo, tal qual todo componente automotivo, os chassis sofreram diversas alterações quanto ao formato, material e maneira de concepção.

O modelo escolhido para este estudo, do tipo escada, também chamado *twin-rail*, foi aplicado nos primeiros veículos automotores fabricados. Nesses veículos quase todas as cargas (principalmente flexoras e torcionais) são suportadas pelo chassi, concentrando nele toda a rigidez da estrutura e, portanto, não havendo grande influência da carcaça. Nos primeiros modelos, inclusive, não havia teto e a carcaça era fabricada em madeira (Happian-Smith, 2002).

Ele é tipicamente composto por vigas de seção vazada retangular, circular ou perfil aberto “C”. É formado por dois membros paralelos dispostos no sentido do comprimento do veículo chamados longarinas (retas ou curvas, paralelas ou não), que são interligadas por membros transversais (com quantidade e disposição a depender do modelo), chamados transversinas ou travessas. (Oliveira, 2007).

Nesse tipo de estrutura, na qual a base e a carcaça são peças separadas, é possível que o chassi sofra torção sem causar estresse no habitáculo que comporta passageiros ou carga, prolongando a vida útil da carroceria e evitando o surgimento de ruídos. Também são mais baratos de fabricar e de reparar em caso de acidentes, em comparação com outros tipos de chassi utilizados atualmente.

No mercado atual a aplicação deste tipo de chassi é concentrada em veículos de médio e grande porte, de alta capacidade de carga e comumente sujeitos à torção devida a desnivelamento entre rodas, causados por terrenos irregulares (Samahá, 2009) tais como picapes, utilitários, caminhonetes e caminhões. Um modelo comum de chassi tipo escada, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, é ilustrado conforme a Fig. 1 a seguir:

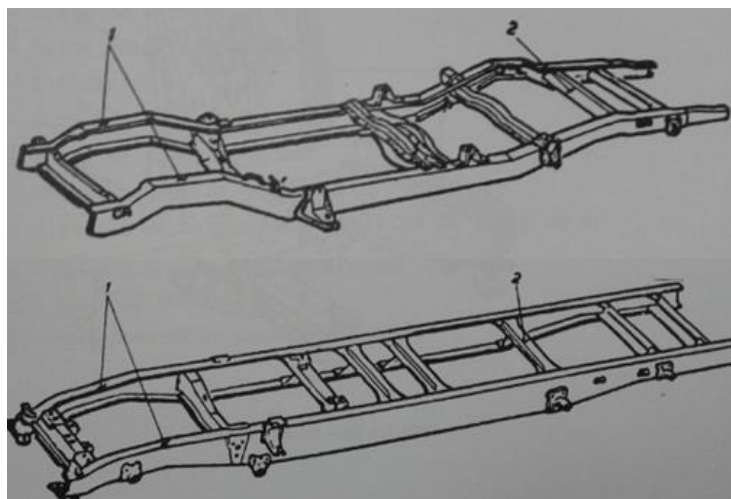


Figura 1 – Chassi tipo escada: 1 – longarinas, 2 – travessas. Fonte: ABNT, NBR 5533.

Por possuir baixa complexidade, na atualidade ainda ser amplamente utilizado e pela acessibilidade a dados para modelagem, o chassi tipo escada foi o que melhor se adequou a proposta deste trabalho, sendo o escolhido como objeto de estudo.

O modelo selecionado, C-816 da linha Cargo (Fig. 2), fabricado pela Ford, é o mais barato e de maior aplicabilidade da linha, utilizado em caminhões de categoria semileve (PBT de 3,5 a 6 toneladas, segundo CNT 2011), implementado em baú alumínio, baú frigorífico, baú lonado, plataforma de guincho e carga seca (Manual do implementador, 2014). No entanto, é sempre interessante buscar estratégias para a minimização dos custos visando o aperfeiçoamento da produção.

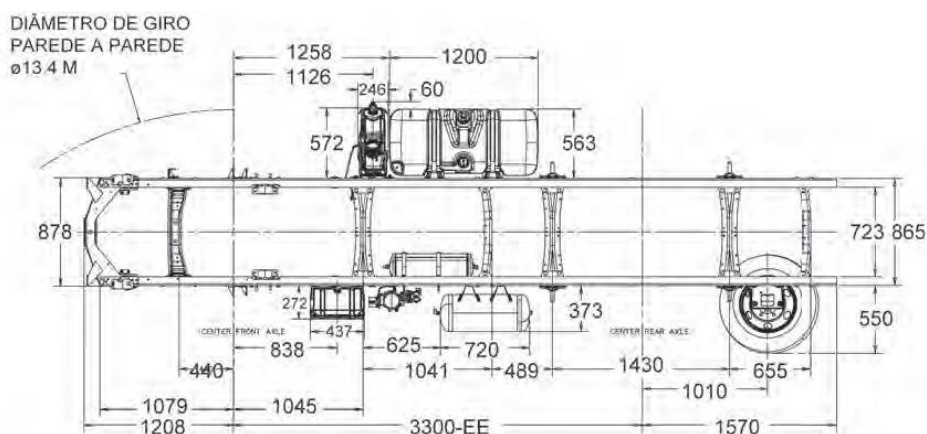


Figura 2 – Desenho técnico do modelo C-816 3300-EE. Fonte: Manual do Implementador, 2014.

Segundo Wilde (1978), otimização pode ser definida como “obter a melhor solução viável de acordo com uma medida quantitativa de efetividade pré-definida”. Vanderplaats (1984) define otimização em engenharia como “a melhor qualidade de vida possível com os recursos disponíveis”. Haftka e Gürdal (1992) exemplificam otimização com a invenção de alavancas e polias, que expressam o intuito do homem de maximizar a eficiência mecânica de seu trabalho.

O início de estudos relacionados à otimização estrutural é datado do final do século XIX e era baseado na ideia de, através da teoria da elasticidade, propor estruturas formadas por barras (treliça) com um alinhamento entre as direções das barras e das principais tensões, por

Maxwell (1872) e Mitchell (1904). Dessa forma, definiu-se que estrutura ótima (em que o material é mais bem aproveitado) será aquela em que os elementos estejam sujeitos apenas à tração e compressão, sem momentos fletores (Silva, 2003).

Por se tratar de um método de difícil aplicação a estruturas mais complexas à época, o seu desenvolvimento avançou muito pouco durante as décadas seguintes, dada a ausência de suporte computacional adequado. Apesar de este método de aproximação de treliças não ser uma representação adequada para meios contínuos, ele é comumente utilizado na atualidade como referência para aferição de softwares de otimização estrutural (Silva, 2003).

Com o advento da computação, a partir da década de 60 o estudo de otimização ganhou grande impulso. Ao obter-se tal suporte, diversos métodos de cálculos lineares foram surgindo através da chamada programação linear. Posteriormente tais métodos passaram a englobar também sistemas não lineares através da programação. Este avanço colaborou muito para o surgimento de novas técnicas de otimização.

A otimização paramétrica é a primeira abordagem a surgir e a mais comum delas. Suas variáveis de projeto são restritas às dimensões ou proporção das dimensões da estrutura, preservando-se assim a forma original. As dimensões geralmente são o comprimento dos elementos da estrutura e/ou as dimensões do perfil da seção transversal, como ilustra a Fig. 3.

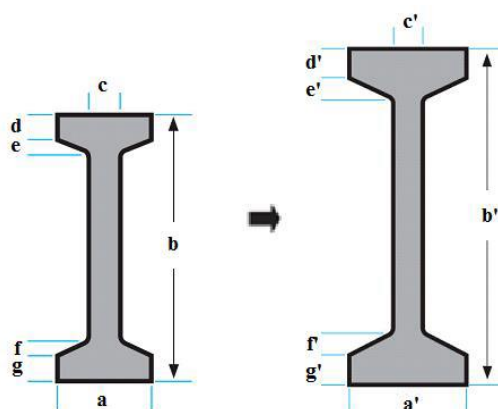


Figura 3 – Exemplo de aplicação de otimização paramétrica (adaptado). Fonte: Archi Expo.

Apesar de, em geral, apresentar resultados menos expressivos em relação à redução de material ao se comparar com outros métodos de otimização (de forma ou topológica) o método de parametrização em compensação possui estrutura mais simplificada e menor demanda computacional. Desse modo, é importante destacar que antes da escolha de determinado método de otimização é necessária uma avaliação geral do projeto, a fim de se observar suas principais características e recursos disponíveis, para que o método mais adequado seja corretamente selecionado e desenvolvido.

Para a construção de um projeto de otimização, são necessárias algumas etapas de desenvolvimento. Essas etapas do projeto são definições de quesitos que serão incisivos na obtenção dos resultados e na qualidade dos mesmos. Os conceitos associados a estes quesitos são: variáveis de projeto, função objetivo, restrição e domínios viável e inviável.

As variáveis de projeto são incógnitas sujeitas a manipulação em um processo de maximização ou minimização, que serão moldadas conforme necessidade do problema (Rockafellar, 2007). Segundo Silva (2003) elas podem ser divididas em contínuas ou não

contínuas (discretas), porém um problema de otimização pode ser adaptado, de forma ser tratado como uma ou outra, a depender do critério de projeto. A chamada função objetivo $f(x)$ ou funções objetivo $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$ são definidas a fim de serem aprimoradas e utilizadas como medida de eficiência do projeto (Haftka e Gürdal, 1992). Ela será função das variáveis de projeto estabelecidas e pode ser classificada como simples ou multiobjetivo (multicritério), a depender da quantidade de variáveis que se objetiva aperfeiçoar (Silva, 2003). Na abordagem paramétrica, os objetivos mais comumente escolhidos são peso, custo, tensões, deslocamentos e/ou frequências. As imposições aplicadas às variáveis de projeto (objetivos) que passam a ser tratados com valores limite (máximo ou mínimo), são chamadas restrições de projeto. Elas podem ser classificadas como restrições laterais, de desigualdade ou igualdade.

Definidos estes conceitos, um exemplo genérico de problema de otimização pode se formulado como:

Minimizar/Maximizar $f(x)$

$$\begin{array}{ll} \text{Tal que} & g_j(x) \geq 0 \quad j=1, \dots, m \\ & h_k(x) = 0 \quad k=1, \dots, n \end{array}$$

Onde

$f(x)$: função objetivo

x : vetor de variáveis de n componentes

g_j : restrições de desigualdade

h_k : restrições de igualdade.

Um problema de otimização pode ser linear ou não linear, a depender da linearidade da função objetivo e das restrições em relação às variáveis de projeto. Nota-se que são diversos fatores a serem considerados para elaboração de um projeto deste tipo, portanto a estratégia de otimização é altamente dependente da formulação matemática do problema (Kibsgaard et al., 1989).

A escolha do software de otimização é outro fator que afeta diretamente na qualidade dos resultados obtidos. Esta escolha deve ser baseada na complexidade da formulação elaborada, no tipo de aplicação de otimização em questão, no custo computacional requerido/disponível, na disponibilidade do software, entre outros. Os problemas de otimização resolvidos através de algoritmos numéricos, os chamados otimizadores, podem ser classificados em dois grupos: métodos de programação matemática e métodos probabilísticos. A diferença entre eles consiste no método de busca da solução ótima, onde o primeiro aponta para soluções locais (a menos que o problema possua apenas uma solução, sendo esta, neste caso, a solução global), enquanto o segundo grupo busca de forma randômica, guiado por decisões probabilísticas, a obtenção da solução global (Silva, 2003).

Entre os métodos probabilísticos destacam-se os algoritmos genéticos. Estes algoritmos são formulações numéricas inspiradas em seleção e genética natural. Sua principal ideia consiste em utilizar uma população de soluções para buscar a solução de problemas de otimização em engenharia. Ao invés de buscar a solução a partir de um único ponto no espaço de busca, estes algoritmos são iniciados com quantidade de palpites (população) da solução

do problema, normalmente distribuídos randomicamente em todo o domínio. A partir de então são realizadas, a cada iteração (geração) três operações sobre os indivíduos desta população: seleção, cruzamento e mutação. Estas operações, inspiradas em parte na própria natureza, servem, respectivamente, para: calcular o quão bom é um indivíduo; mixar elementos das melhores soluções para formar novas (em geral melhores); e para evitar perdas permanentes de diversidade dentro das soluções. Após estas operações uma nova população (geração) é gerada, e o processo continua até que se atinja ou um número determinado de gerações ou algum outro critério de convergência. (Coley, 1999). Estes algoritmos têm como vantagem a robustez e a possibilidade de se trabalhar com variáveis discretas e funções multiobjectivo com elevada robustez, porém a solução costuma ter pouca precisão e baixa taxa de convergência.

Os métodos de programação matemática são divididos em: lineares, não-lineares e métodos baseados em teoria de aproximações. Os primeiros são limitados a problemas mais simples, onde a função objetivo e as restrições são lineares em relação às variáveis de projeto e, apesar de não se encaixarem na proposta deste trabalho, atualmente ainda têm muita relevância em diversas áreas.

Ao trabalhar-se com problemas não-lineares, destacam-se os métodos de programação que tem como base a técnica de funções de penalidade. Este grupo, também classificado como “métodos indiretos”, transformam problemas com restrições em irrestritos, tratando as restrições de forma indireta, penalizando (interna ou externamente ao domínio viável) sua violação através de termos inseridos na função objetivo, chamados parâmetros de penalidade. Também se pode trabalhar com função de penalidade interna estendida, que trata inconvenientes de descontinuidades da pseudo-função nos limites das restrições ao tornar esta contínua em qualquer lugar do espaço.

2 OBJETIVO

De forma geral, visando à aplicação de melhorias em processos de fabricação, este trabalho tem como propósito a utilização de procedimentos de simulação computacional na alteração de parâmetros de um componente automotivo, de forma que determinadas características de projeto sejam aprimoradas. O intuito principal é a aplicação de dois diferentes métodos e estratégias de otimização, fazendo uso, também de uma interface ANSYS x MODEFrontier, de modo a apresentar as vantagens e desvantagens dos algoritmos utilizados.

Para cumprimento dos objetivos propostos, foi selecionado como objeto de estudo o chassi automotivo descrito e ilustrado na Figura 2.

3 METODOLOGIA

Para um processo completo de otimização estrutural, algumas etapas de elaboração devem ser realizadas. Seguindo o escopo deste trabalho, no qual a modelagem é realizada através do ANSYS, inicialmente define-se como etapas de modelagem e análises o pré-processamento, a solução e o pós-processamento.

Em seguida, baseando-se nos resultados obtidos após modelagem e análises, foi realizado um processo preliminar de otimização, no qual o algoritmo utilizado foi o pacote de otimização do ANSYS. Por último, foi realizada a otimização através do software

modeFRONTIER, na qual foram incorporadas outras análises (dinâmicas) no processo de estruturação da otimização e explorado outro algoritmo de acordo com as novas características da estrutura da otimização.

3.1 Modelagem e Análises

Para realização destas primeiras etapas de modelagem e análises, foi utilizado o ANSYS como ferramenta de CAD e CAE. Esta etapa consiste na construção do modelo parametrizado do objeto de estudo, na elaboração dos diferentes tipos de análises propostas, a obtenção de resultados a partir delas e o processamento destes resultados de forma a serem empregues pelos algoritmos otimizadores. Este primeiro passo pode ser subdividido em: pré-processamento, análise/solução e pós-processamento. Todos os comandos utilizados podem ser realizados de forma interativa ou, conforme será utilizado no desenvolvimento deste trabalho, através da elaboração de scripts e inserção destes na linha de comando do software.

O pré-processamento, que refere-se à modelagem, é o primeiro passo e se inicia pelo comando /PREP7, onde serão definidos a geometria da estrutura, o tipo e propriedades do elemento utilizado no refinamento da malha, propriedades do material, entre outros. A importância da realização desse passo se dá devido à nele serem definidos os parâmetros da estrutura que serão alterados a cada iteração, ou seja, as variáveis de projeto. Uma adequada parametrização da estrutura pode trazer ao processo grande redução do custo computacional, ao se definir um número baixo de variáveis que possibilitem grande minimização da função objetivo.

Em seguida, com o objeto de estudo construído computacionalmente, é realizada a análise do problema com intuito de obtenção da solução do problema, iniciada pelo comando /SOLU. Para a execução desta etapa é preciso que as forças e restrições necessárias estejam devidamente aplicadas aos nós ou elementos. Esta etapa exige também grande atenção, pois através das análises são gerados os dados que os algoritmos utilizam como referência para examinar a convergência da função objetivo e a observância das restrições. Tratando-se de estruturas, elaborar corretamente as análises simulatórias das situações a que estas podem ser submetidas pode trazer ao projeto grande proximidade dos resultados obtidos com a realidade experimental.

No pós-processamento são realizados comandos sobre os resultados obtidos. Neste passo existem duas possibilidades de comando: o pós-processamento geral, ou o processamento ao longo do tempo/frequência (*time-history postprocessor*). A primeira opção permite a observação de resultados sobre modelo completo em determinado passo da solução (ou em determinado instante de tempo ou frequência), enquanto que a segunda permite a observação da variação de determinados resultados em pontos específicos (nós ou elementos, por exemplo) ao longo de uma faixa de tempo ou frequências. A depender do tipo de análise realizada, esforços, deslocamentos, tensões, frequências e outros resultados podem ser processados em formato de tabelas, gráficos ou plotados na estrutura.

Em relação à otimização, a principal função desta etapa é a exportação de outputs das análises (tais como volume, tensão, frequência) que serão utilizados no processo de otimização como função objetivo ou como restrições.

Estas etapas de modelagem e análises são realizadas ciclicamente pelos algoritmos de otimização, onde é definido um conjunto de valores (*inputs*) para as variáveis de projeto (parâmetros geométricos), gera-se a geometria, realizam-se as análises necessárias e então são avaliados os resultados obtidos com esta configuração, para na iteração seguinte serem

introduzidos novos valores de entrada e realizadas novamente as demais etapas até que se obtenham *outputs* que configurarão a estrutura ótima.

Destaca-se que o desenvolvimento deste processo se baseou em análises preliminares e aplicação da otimização sobre uma estrutura simplificada (uma treliça de três barras), com a intenção de validar a metodologia utilizada, atestando seu funcionamento e possibilitando a aplicação desta ao chassi escada.

3.2 Otimização – Primeira Preliminar

Na etapa preliminar de otimização do chassi, a base para otimização foi a análise do tipo estática, na qual é obtido o valor global de máxima tensão da estrutura, sendo este utilizado como restrição à minimização do volume total. O intuito da realização da etapa preliminar foi a aplicação de conhecimentos iniciais de otimização estrutural, para que em sequência o projeto fosse refinado através da inserção de novas ferramentas, análises e conceitos.

Sendo a função objetivo (volume total da estrutura) contínua e diferenciável, uma vez que as variáveis de projeto são tratadas como contínuas, se fez a opção pela otimização de primeira ordem do ANSYS, por ser aplicável e mais eficiente em casos como este.

Através da linha de comando do Ansys, são executados os comandos de otimização. Inicialmente definem-se os parâmetros, como variáveis de projeto, restrições e função objetivo. Em seguida define-se se o método de otimização será de ordem zero ou primeira ordem. Também é requerido pelo Ansys um número limite de iterações admitidas, ordenando automaticamente uma para do processo caso este limite seja alcançado. Ao final do processo pode-se comandar a listagem os resultados obtidos e a plotagem dos mesmos, ilustrando a variação da função objetivo, variáveis ou restrições ao longo das iterações.

A otimização pelo algoritmo de primeira ordem é realizada pela aplicação do método da descida mais íngreme (“steepest descent”, introduzido por Cauchy em 1847) para a primeira iteração, onde se procura encontrar a direção paralela ao gradiente da função com sinal oposto, que é a direção que determina a maior minimização da função. Como demonstrou Arora (2004), as direções de descida mais íngreme de duas iterações consecutivas serão ortogonais entre si, tendendo a desacelerar a convergência da solução, devido às mudanças de direção serem feitas em formato de degraus e pouco convergentes. Para evitar este problema, nas iterações seguintes passa a ser aplicado o método derivado do *steepest descent*, chamado método dos gradientes conjugados. Neste, as direções conjugadas não são ortogonais entre si, mas sim tendem a “cortar” diagonalmente as direções ortogonais de descida mais íngreme, aumentando a taxa de convergência.

O final da otimização acontece quando dois critérios de convergência, checados ao final de cada iteração, são alcançados: o valor da função objetivo encontrado é, no primeiro critério, comparado com o valor da iteração anterior; no segundo ele é comparado com o melhor valor obtido durante as etapas anteriores do processo. Se em ambos os casos a diferença entre valores obtidos forem menores que a tolerância determinada pelo usuário, o processo termina, caso contrário realiza-se uma nova iteração. Se não houver especificação de tolerância, o programa adota automaticamente o valor de 1% da função objetivo (Shzu, 2001).

3.3 Otimização – Segunda Etapa

Para que o projeto de otimização estrutural de um componente veicular seja realista e efetivo, este deve contemplar aspectos tanto estáticos quanto dinâmicos, uma vez que um

veículo em situações comuns de uso está sujeito a efeitos de esforços devidos a forças dinâmicas em casos como aceleração, frenagem, curvas, impactos e irregularidades do solo. Para isso, o procedimento de análise que gera os parâmetros da estrutura de otimização requer que também sejam levados em consideração outros aspectos, tais como modos de vibração, resposta a forças harmônicas e transientes e outros. Dessa maneira, os resultados das análises compõem de maneira mais completa os parâmetros utilizados nos algoritmos, fazendo com que a solução ótima atenda de forma adequada os requisitos de projeto.

Com estes fatores levados em consideração, as etapas consequentes deste trabalho passam a abranger as demais análises necessárias para um completo estudo de caso. Como consequência, o número de restrições (ou de objetivos) passa a ser maior, de forma que o algoritmo de otimização deva ser adequado para as novas características do projeto.

O ANSYS trata-se um software voltado mais para a execução de análises estruturais, sem grande leque de ferramentas na área de otimização. Portanto, para superar a limitação imposta pelas duas únicas opções de algoritmo presentes nele, buscou-se encontrar outra opção de software que atendesse às necessidades do projeto, de forma que outros conceitos relacionados ao tema deste pudessem ser aplicados durante seu desenvolvimento. Para isso, e devido às vantagens descritas no item 2.2.5, o software modeFRONTIER foi escolhido para dar continuidade ao desenvolvimento do presente trabalho.

Para a continuidade do trabalho, manteve-se a análise do tipo estática, com apenas algumas correções e melhorias pontuais, com a diferença que o script desta passou a ser executado iterativamente através do modeFRONTIER e não mais pelo ANSYS.

Além disso, foi incluída no projeto uma análise do tipo modal, através da qual são encontradas as chamadas frequências naturais da estrutura e os modos com que esta se deforma quando excitada nas suas frequências naturais. Também foi realizada a análise do tipo harmônica, através da qual busca-se determinar quais das frequências naturais possuem maior influência na resposta à vibração. Esta análise é feita aplicando-se um carregamento do tipo harmônico com frequências que variam dentro de uma determinada faixa (baseada na listagem de frequências naturais obtida na análise harmônica), então se avalia para quais frequências a resposta da estrutura foi mais significativa. Uma vez que nesta análise são avaliados apenas os efeitos permanentes sobre a estrutura, faz-se necessária a realização de análise transiente, na qual é avaliada a resposta da estrutura ao longo do tempo devido à força externa do tipo dinâmica.

Além da inclusão das novas análises, nesta etapa foram também pesquisados e avaliados os diferentes algoritmos existentes atualmente para que se fosse determinado o que melhor de adequa ao tipo e às características do projeto.

No modeFRONTIER estão presentes diferentes tipos de algoritmos, tais como os baseados em gradientes, heurísticos, evolucionários, multi estratégicos, entre outros. A disponibilidade de uma gama maior de otimizadores traz ao projeto a possibilidade de avaliação da melhor opção, baseada tanto experimentalmente quando por referência bibliográfica oferecida pelo próprio software para cada algoritmo. Também são vantagens da utilização do software a disponibilidade de ferramentas de avaliação da otimização, a serem citadas no tópico a seguir. Dessa forma possibilita-se que o projeto de otimização de qualquer estrutura seja melhor elaborado e que resultados mais expressivos sejam obtidos.

3.4 Avaliação Pós Otimização

Por último, faz-se uso das diversas ferramentas presentes no modeFRONTIER com o intuito de promover uma avaliação dos métodos empregues. Estas ferramentas possibilitam melhor visualização e interpretação de resultados, facilitando a avaliação do projeto de forma comparativa com os objetivos buscados.

Através da interface do software, é possível realizar a análise dos resultados obtidos, de forma a se observar e correlacionar com os conceitos pesquisados na revisão bibliográfica o comportamento da estrutura conforme a otimização foi sendo estruturada e realizada. Também se observa a possibilidade de interpretação, por exemplo, da influência das variáveis de projeto nos resultados, bem como a interferência das restrições determinadas pelo usuário como reflexo do algoritmo e do método de criação do chamado Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments*), que possibilita ao usuário obter o máximo de informações de um número limitado de iterações ao eliminar tentativas redundantes.

A utilização das ferramentas presentes no software possibilita a qualificação dos resultados obtidos, proposição de melhoras para projetos futuros e principalmente a compreensão dos conceitos envolvidos no desenvolvimento deste tipo de trabalho.

4 RESULTADOS

4.1 Otimização – Primeira Etapa (Ansys)

Baseando-se nos conceitos pesquisados e na análise preliminar de validação, o projeto de otimização foi então aplicado sobre o chassi tipo escada. O modelo escolhido, Cargo C-816, segundo o Manual do Implementador (2014), é produzido em aço LNE 60, possui duas longarinas planas, retas, de perfil “U” de seção constante, ligadas por travessas estampadas fixadas com rebites a frio e parafusos. As dimensões da seção e propriedades do material estão indicadas nas Tabelas 1 e 2, bem como ilustrado na Fig. 5:

Tabela 1. Dimensões da seção transversal (adaptado). Fonte: Manual do Implementador (2013)

Dimensão	Valor [mm]
Largura extrema das abas	64,5
Altura interna do perfil	173,2
Espessura da chapa	6,4

Tabela 2. Propriedades do aço LNE 60. Fonte: Adaptado de Furtado, 2013

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade	207 [GPa]
Densidade	7,789 [g/cm ³]
Coefficiente de Poisson	0,31
Tensão de Escoamento	600 a 720 [MPa]
Resistência a Tração	680 a 810 [MPa]

A construção da estrutura foi feita com uso de elementos BEAM189, baseado na teoria de viga de Timoshenko (que inclui efeitos de deformação por cisalhamento), de aproximação

quadrática, tridimensional, de 3 nós com 6 graus de liberdade cada. A este elemento foi aplicada a seção transversal de perfil “C” e os valores das dimensões. Na otimização preliminar foram utilizadas 6 variáveis de projeto, porém, após reavaliação do projeto para a segunda etapa de otimização, levando-se em consideração empecilhos relacionados ao processo de fabricação de peças com diferentes espessuras de aba e mesa, bem como redução de custo computacional, estes foram reduzidos a apenas 3, conforme ilustra a Fig. 4. Os respectivos valores iniciais estão indicados na Tabela 3.

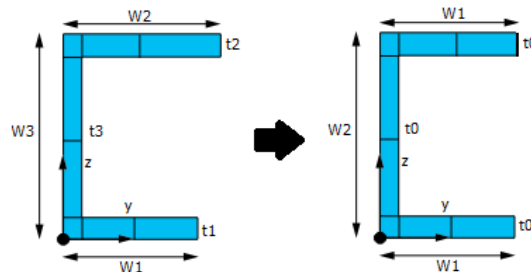


Figura 4 – Parametrização na seção transversal nas duas etapas de otimização.

Tabela 3. Dimensões iniciais (variáveis de projeto).

Parâmetro	Valor de Entrada – 1ª Etapa [mm]	Valor de Entrada – 2ª Etapa [mm]
W1	70,9	70,9
W2	70,9	186,0
W3	186,0	-
t1	6,4	6,4
t2	6,4	-
t3	6,4	-

Conforme elaborado por Furtado (2013) a carga aplicada ao chassi será do tipo distribuído sobre as longarinas, com valor referente ao máximo peso que o caminhão Cargo C-816 pode transmitir ao pavimento, conforme ilustrado a seguir, na Fig. 5:

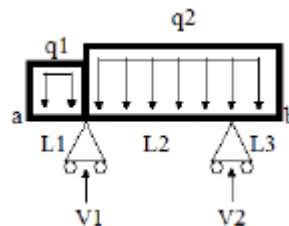


Figura - 5 Vista lateral dos carregamentos distribuídos aplicados às longarinas. Fonte: Furtado, 2013.

Onde

$$q1 = 5,25 \text{ KN/m}$$

$$q2 = 7,1 \text{ KN/m}$$

A estrutura foi discretizada através da divisão de cada linha (elemento de viga) em menores elementos de valor fixado em 0.1m. Esta configuração apresentou resultados viáveis em relação a refinamentos mais grossos ou mais finos, ao levar-se em consideração o custo computacional requerido para convergência de resultados.

Para a primeira etapa de otimização, baseada somente em análise estática, o modelo computacional do chassi ficou conforme ilustrado a seguir na Fig. 6:

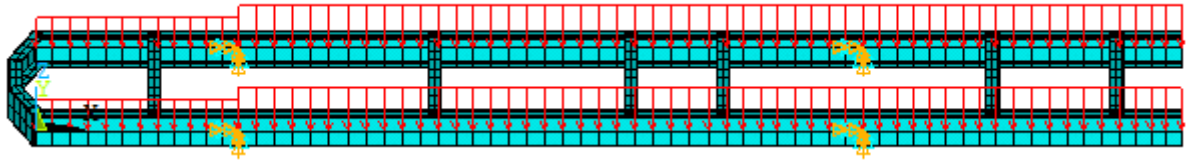


Figura 6 – Chassi modelado para a otimização preliminar.

Da análise estática é extraído o valor da máxima tensão (σ_{max}) ocorrida na estrutura, para ser utilizado no processo de otimização como restrição. O resultado da análise é dado conforme ilustra a Fig. 7:

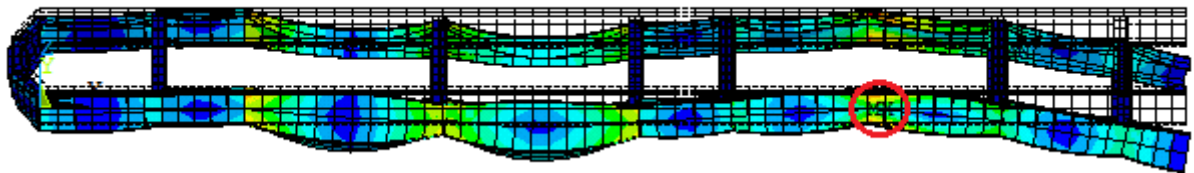


Figura 7 – Tensões no chassi.

Dessa forma, função objetivo (volume), variáveis de projeto e restrições são definidas, configurando a estrutura de otimização. Na etapa de otimização preliminar, realizada com o algoritmo de primeira ordem do Ansys, após decorridos 6 minutos e 7 segundos e 18 iterações, utilizando um computador de processador Intel® Core™ i5 3210M de 2.5Ghz e memória RAM de 4GB, o programa retornou o conjunto de parâmetros otimizados conforme valores indicados na Tabela 4:

Tabela 4. Resultados da otimização preliminar.

Parâmetros	Etapa Inicial	Etapa Final
σ_{max} [MPa]	107,00	119,46
$W1$ [mm]	70,9	69,837
$W2$ [mm]	70,9	66,467
$W3$ [mm]	186,0	171,95
$t1$ [mm]	6,4	5,902
$t2$ [mm]	6,4	5,400
$t3$ [mm]	6,4	5,400
Volume [dm ³]	36,8245	29,9310

Utilizando os valores inicial e final da função objetivo (V_i e V_f , respectivamente), calcula-se o percentual de redução de volume (RV) como:

$$RV = 1 - (V_f/V_i) = 1 - (29,931/36,8245)$$

$$RV = 18,72\%$$

A Fig. 8 ilustra a variação do volume total da estrutura ao longo das iterações.

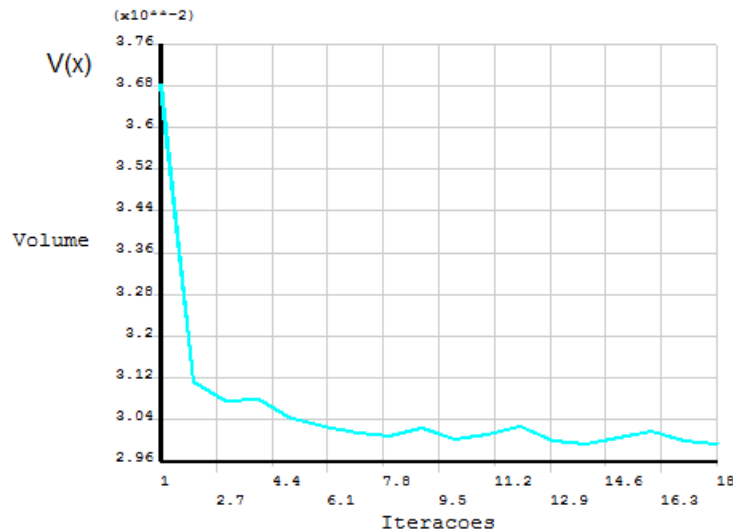


Figura 8 – Variação do volume total da estrutura no decorrer das iterações.

Ao final desta etapa, nota-se que a um custo computacional baixo (processamento realizado em pouco tempo e em pequeno número de iterações), o algoritmo de primeira ordem do ANSYS proporcionou a redução do volume total da estrutura. Destaca-se o fato de estas observações feitas deverem-se à simplicidade da estrutura de otimização desenvolvida, baseada em análise relativamente simples.

Como citado anteriormente a respeito das características dos diferentes algoritmos de otimização, sabe-se que o método utilizado nesta análise preliminar (busca do ótimo através de gradientes da função objetivo para determinação da direção de busca), apesar da boa taxa de convergência apresentada, não garante robustez e precisão do resultado, uma vez que este, em muitos casos, ocasiona finalização do processo em pontos de mínimo local.

4.2 Otimização – Segunda Etapa (modeFrontier)

Com intuito de dar continuidade ao desenvolvimento do processo de otimização do chassi escada, bem como aplicar novos conceitos pesquisados ao longo da elaboração do trabalho, a segunda etapa do presente projeto, conforme citado anteriormente, se deu através da adição de novas análises e de utilização de novas ferramentas, no caso, por meio do software modeFRONTIER, desenvolvido pela Esteco.

Para realização das análises (que passam então a ser relativas ao comportamento dinâmico da estrutura), apenas algumas alterações na etapa de pré-processamento foram realizadas. Entre elas, foram adicionados novos nós para criação de elementos que representam de forma simplificada a atuação de sistemas de suspensão sobre os quatro apoios (que eram restringidos de forma fixa em todos os graus de liberdade, até então).

Os novos elementos selecionados foram de dois tipos: massas e elementos de mola. O primeiro foi adicionado para representar a massa não suspensa do sistema de suspensão, e foi feito através de associação do elemento do tipo MASS21 à 4 novos nós criados (5000N cada). Este elemento pontual definido por nós únicos possui seis graus de liberdade (3 de translação e 3 de rotação) e podem ser associados à ele valores para deslocamentos nos graus de liberdade disponíveis, constantes reais ou propriedades de material.

O outro tipo de elemento, COMBIN14, foi adicionado para simular as rigidezes dos pneus e das suspensões frontais e traseiras. Ele foi criado entre os nós das massas e quatro novos nós

de apoio da estrutura (restritos em todos os seis graus de liberdade) para representar os pneus (177 KN/m), e entre as massas e quatro nós do chassi para simular as suspensões (85 KN/m na frontal e 250 KN/m na traseira). Para eles foram adicionados os valores de rigidez, também com base nas análises realizadas no trabalho de Furtado (2013). Este tipo de elemento possui capacidade de aplicações longitudinais e torcionais.

Mantendo-se o mesmo refinamento de malha utilizado na etapa preliminar do trabalho e após as alterações na modelagem original descritas, o chassi com os elementos de massa e mola-amortecedor ficou conforme ilustra a Fig. 10. Nela são indicados por K0 e M0 os novos elementos adicionados (mola e massa, respectivamente), os novos nós (enumerados, com exceção dos nós 3001 e 4001) e os novos apoios: engastes (em amarelo) e restrição de translação nos eixos x e y (em azul mais claro).

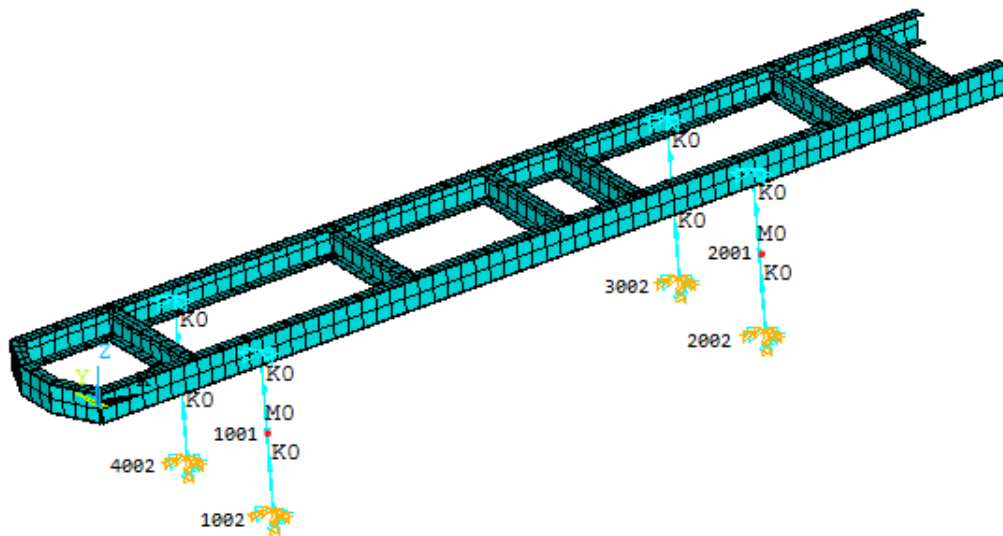


Figura 9 – Chassi modelado para a segunda etapa de otimização.

A partir de então, as próximas alterações feitas na elaboração do processo de otimização foram pertinentes à etapa de análises e soluções. Como citado anteriormente, para uma análise realista e fiel ao comportamento de um veículo automotor faz-se necessária a utilização de simulações de caráter dinâmico para uma reprodução mais precisa do regime de trabalho deste sistema.

Inicialmente, a análise adicionada ao processo foi do tipo modal. O intuito neste tipo de análise é a obtenção das frequências naturais da estrutura, referentes aos modos com as quais esta se deforma quando excitada à frequências próximas das naturais. No âmbito da otimização, esta análise também servirá como método para extração de uma nova função objetivo: a primeira frequência natural. Na prática, este tipo de procedimento é realizado quando se visa alterar propriedades da estrutura a fim de que as frequências naturais sejam alteradas para valores distantes daqueles das frequências de excitação que surgem durante o regime de trabalho do componente.

O segundo propósito na realização da análise modal é a extração de parâmetros para a elaboração da próxima etapa: a análise do tipo harmônica. Ao final desta etapa, através do script foi comandado que se criassem dois novos parâmetros escalares: *FREQ1* para armazenar o valor da primeira frequência natural, e *FREQ20* para o da vigésima frequência. No procedimento de otimização, o primeiro parâmetro será definido como um dos objetivos

na análise estática, o volume total. O segundo parâmetro servirá como referência para a análise harmônica: pelo script, comanda-se que esta seja realizada na faixa de frequência de 0 Hz ao valor de duas vezes $FREQ20$. Portanto:

$$FREQ1 = 0,93779 \text{ Hz (Função Objetivo)}$$

$$FREQ20 = 69.284 \text{ Hz}$$

Consequentemente, a análise harmônica será realizada, na primeira iteração, na faixa de 0 até $2 \cdot 69,284$ Hz. Na segunda iteração a faixa irá de 0 até duas vezes a nova vigésima frequência natural (parâmetro $FREQ20$ atualizado), e assim sucessivamente.

Para esta segunda análise dinâmica, são requeridos o método de análise harmônica (no caso deste trabalho, foi definido o método *full*), a faixa de frequências (conforme citado anteriormente), o número de *substeps*, ou seja, a quantidade de pontos em que serão extraídos resultados (definidos em 800, de forma a serem obtidos valores de amplitude a cada 0,175 Hz), além da definição das forças aplicadas e das constantes de amortecimento proporcional, calculadas por Furtado (2013). As forças aplicadas foram definidas com amplitude de 17700N na direção negativa no eixo z. O ponto de aplicação foram os nós definidos como junção entre o chassi e o sistema de suspensão. Através da interpretação dos harmônicos gerados para diferentes pontos da estrutura, é determinado qual frequência natural gera o maior pico, sendo esta então a de maior influência sobre o comportamento da estrutura.

A próxima etapa consiste em outra análise dinâmica, desta vez do tipo transiente. No regime transiente da simulação de uma carga dinâmica sobre uma estrutura, são analisadas as variações da resposta dinâmica do modelo (deslocamento, esforços e tensões) ao longo do tempo (Furtado, 2013). No que concerne o processo de otimização, o intuito da aplicação de análise transiente, da mesma forma citada para o caso da análise modal, tem a possibilidade de se basear em diversas situações de uso do veículo. Pelo fato de o foco principal do presente trabalho estar voltado à utilização de ferramentas de utilização, o aprofundamento da conceituação referente à objetivos de análise transiente não será pretendido. Baseado na continuidade do trabalho de Furtado (2013), a análise transiente deste projeto baseia-se na ocorrência de transposição de quebra-molas pelo veículo em estudo e o efeito consequente sobre seu chassi. Esta não é a única abordagem pertinente, sendo possível, por exemplo, a análise de diferentes tipos de colisão, desacelerações, retomadas, entre outras.

O processamento dos resultados é realizado para determinado ponto da estrutura, da mesma maneira feita na análise anterior, porém desta vez ao longo de uma faixa de tempo. Sendo o objetivo desta análise a obtenção do máximo valor de deslocamento da estrutura, também foi observado o comportamento dos nós considerados críticos na estrutura, para determinação daquele que mais sofre efeito das cargas aplicadas.

Desta análise é extraído o valor do deslocamento máximo do chassi, que serve como outra restrição ao problema de otimização. Este valor encontrado foi determinado pela variável $DESLOC_MAX$, com valor igual a:

$$DESLOC_MAX = 201,2 \text{ mm}$$

Uma vez que a elaboração dos scripts das análises foi concluída, estes puderam ser então importados pelo *modeFRONTIER*, para que o software comandasse a execução do Ansys em modo batch e a também o processamento dos scripts por meio dele.

A próxima etapa foi a elaboração do *workflow* de otimização por meio do *modeFRONTIER*. Esta construção foi baseada, principalmente, na utilização do chamado *EasyDrive*, uma das opções de interface do software que permite, através de um único nó (do

tipo Script Node), a inclusão de arquivos base de entrada e saída (*input e output templates*), representados pelos scripts e pelos arquivos que contém as variáveis de saída, como citado anteriormente. Além disso, permite a inclusão do caminho para o arquivo executável do software utilizado para realização das análises, no caso, o Ansys Mechanical APDL.

Definem-se então na elaboração deste *workflow* outros nós: o DOE (Planejamento de Experimento), *Schedules* (algoritmo de otimização a ser utilizado) e o *logic end*, que encerra o processo.

No primeiro seleciona-se o método de geração dos pontos (designs) iniciais a partir dos quais o algoritmo baseará a busca pelo ponto ótimo. A técnica utilizada inicialmente foi a geração Randômica da sequência de designs, com intuito de validar a execução da análise. Em seguida, foi aplicado o DOE chamado *Uniform Latin Hypercube* (ULH) que gera, para cada variável, pontos randomicamente e uniformemente distribuídos em todas as dimensões do domínio, conforme ilustra a Fig. 10.

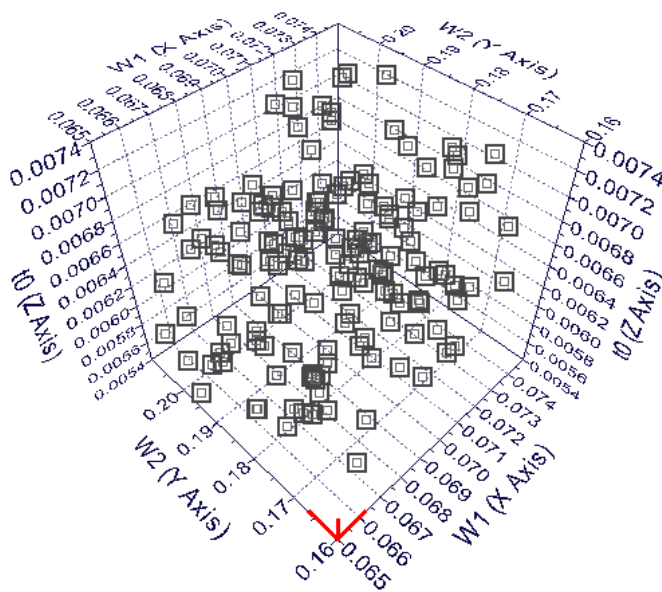


Figura 10 – Distribuição das variáveis no domínio (ULH).

Já no nó *Scheduler* são definidos o algoritmo de otimização e as respectivas propriedades. O algoritmo escolhido, chamado *Multi Objective Genetic Algorithm II* (MOGA-II), foi desenvolvido utilizando a busca através do operador chamado *smart multi-search elitism*. Este operador fornece a preservação de soluções candidatas a ótimo sem que haja convergência prematura para mínimos locais. A utilização deste algoritmo é recomendada por, do ponto de vista prático, trazer baixa complexidade ao procedimento de estruturação da otimização ao requerer poucos parâmetros definidos pelo usuário, tendo internamente diversos outros parâmetros pré-estabelecidos, promovendo robustez e eficiência ao algoritmo otimizador.

Dessa forma, o *workflow* do processo de otimização do chassi tipo escada, por análises realizadas no Ansys e importadas para o modeFRONTIER para execução da otimização, foi definido conforme ilustra a Fig. 11.

O próximo passo então foi a execução do processo de otimização. Esta etapa teve uma duração de 16 horas, 39 minutos e 21 segundo. Do total de 15000 designs gerados pelo DOE, 1407 foram executados, 87 foram determinados como pertencentes ao domínio inviável (unfeasible) e 30 geraram erro. O computador utilizado nesta etapa possui processador Intel® Core™ i7 de 3.4 Ghz e memória RAM de 16 GB.

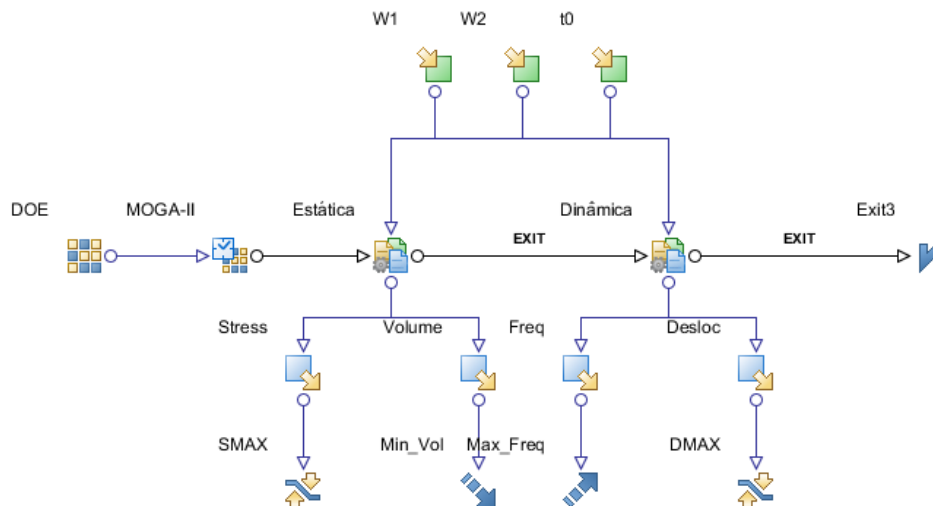


Figura 11 – Workflow do processo de otimização.

As variações das funções objetivo (volume e primeira frequência natural) ao longo das iterações estão ilustradas a seguir respectivamente na Fig. 12:

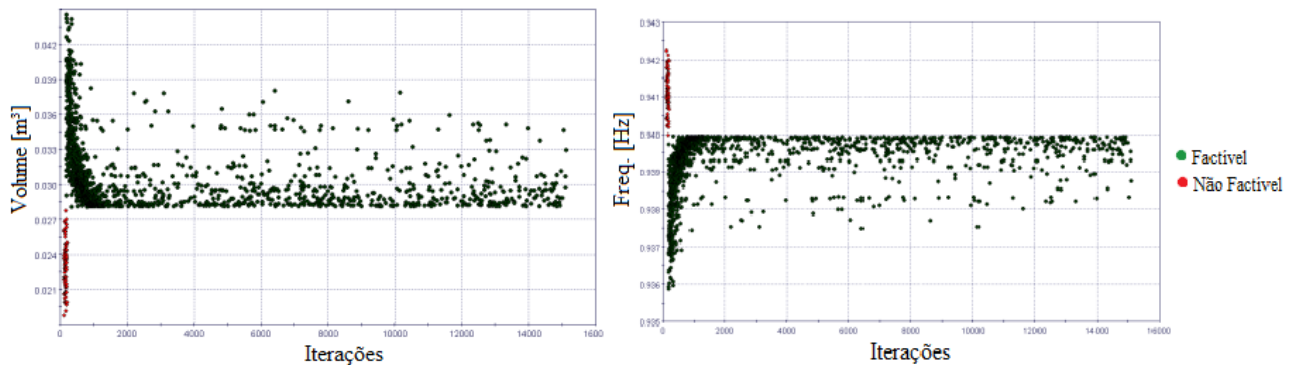


Figura 12 – Variação do volume e frequência ao longo das iterações.

Observa-se a semelhança entre os gráfico, demonstrando que o comportamento de cada objetivo ao longo das iterações reflete inversamente a variação do outro. Este fato ilustra claramente que, no caso de otimizações multiobjetivo, se faz necessária a interferência do usuário na definição da importância entre estes objetivos. Caso contrário, o algoritmo admite pesos iguais para eles e, como resultado da otimização, são encontrados vários pontos candidatos a ótimo, ou seja, uma Fronteira de Pareto. A Fig. 13 ilustra isso:

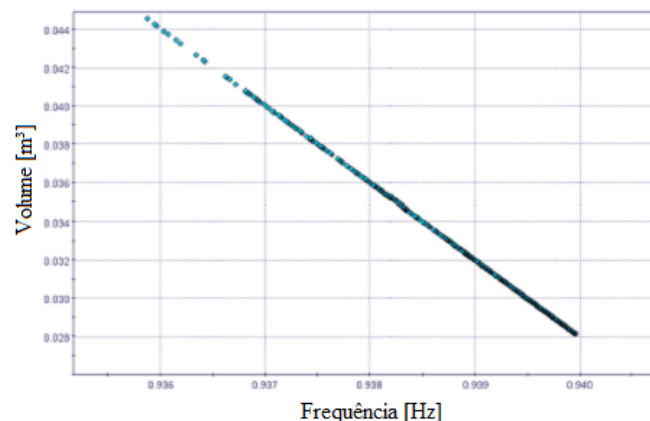


Figura 13 - Fronteira de Pareto Volume vs. Frequência.

Prosseguindo na análise dos resultados obtidos com o procedimento de otimização e as respectivas interpretações, aplicam-se outras ferramentas disponíveis no softwares, com intuito de explorar e demonstrar as possibilidades de projetos de otimização através destes. Para tanto, inicialmente utiliza-se a ferramenta de criação de metamodelos (RSM) para determinação da influência das variáveis de projeto sobre os dados obtidos ao final da otimização. Esta correlação entre os inputs e outputs é mensurada através da normalização de coeficientes da função RSM para cada variável. Conforme ilustrado no Gráfico de Coeficientes RSM da Fig. 15, estes coeficientes são plotados juntamente com o termo constante “1” do polinômio, que corresponde ao valor da variável de saída quando todas as variáveis de entrada forem zero. Para o presente trabalho utilizou-se o modelo de Decomposição em Valores Singulares (Polynomial SVD), um modelo clássico que promove aproximação de respostas minimizando os quadrados das estimativas de erro para determinado conjunto de dados (*modeFrontier Documentation*).

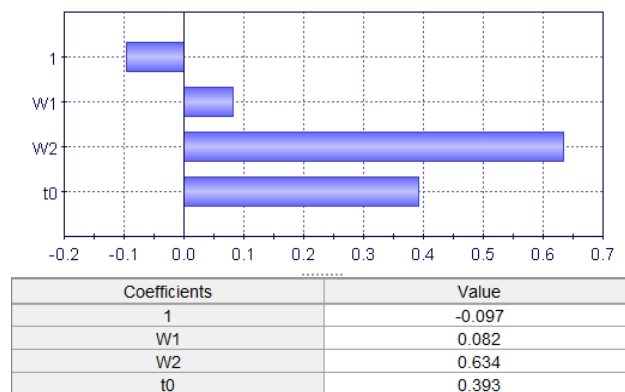


Figura 14 – Coeficientes RSM - Função Volume.

Nota-se que a variação do parâmetro W2 é o que mais influi sobre a variação do volume total da estrutura, seguido pelo parâmetro t0, enquanto o parâmetro W1 tem a menor influência. Também através do algoritmo RSM, ao avaliar-se o processo de otimização, se pode-representar graficamente o metamodelo tridimensional de influência de variáveis sobre determinada função objetivo. Na Fig. 15 foi ilustrada em 3-D o gráfico RSM do volume total da estrutura em função dos parâmetros W1 e W2, a partir da aplicação do algoritmo Polynomial SVD.

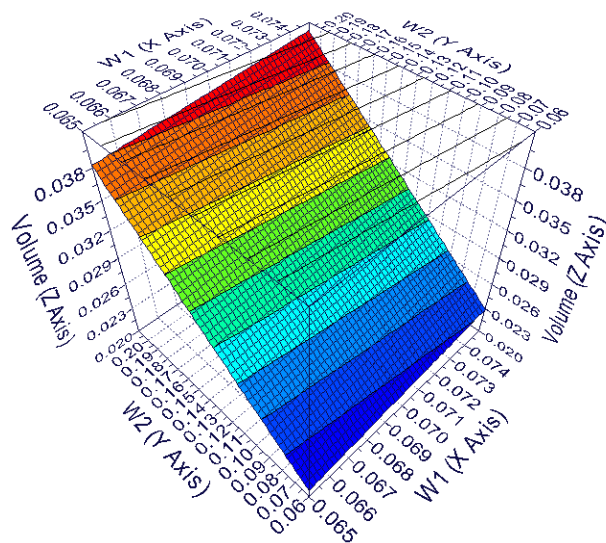


Figura 15 – RSM tridimensional.

De maneira semelhante faz-se interessante a aplicação da ferramenta presente no software voltada à ponderação dos critérios de decisão para seleção da solução ótima, o *Multi Criteria Decision Maker*. Neste contexto, a aplicação da ferramenta permite que, através da atribuição de fatores de importância, determine-se aos parâmetros preferência ou indiferença quanto a influência nos resultados obtidos. A ferramenta permite, de forma interativa, atribuir-se maior ou menor importância a determinado parâmetro, de forma a se observar a tendência da solução a convergir para determinado ponto do domínio.

Por meio da interpretação da Fronteira de Pareto, nota-se que a faixa de valores obtidos para a função objetivo frequência possui menor abrangência em comparação à faixa de valores gerada para a função volume. Percebe-se com isso que a otimização dos parâmetros possui maior influência sobre este último objetivo do que sobre o primeiro. A partir de então, por meio de barra de variação de importância dos parâmetros (Fig. 16) atribui-se pesos conforme ilustrado.

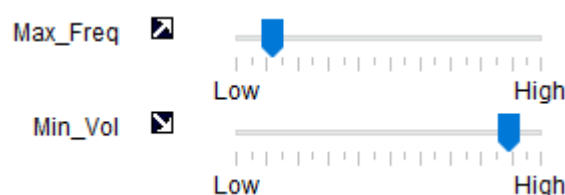


Figura 16 – Ferramenta de atribuição de peso aos objetivos.

Com isso se obtém a solução do problema multiobjetivo que, dadas as devidas análises de resultados, pode convergir para um ponto de ótimo, conforme indicado na Tabela 5:

Tabela 5. Resultados da otimização.

Parâmetro	Valor Ótimo [mm]
W1	65
W2	166
t0	5,4

Determinando como solução ótima os objetivos apontados, no valor de 28,131 dm³ e 0,9399 Hz, para o volume e frequência, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Conforme esperado, o processo de otimização baseado em algoritmo genético trouxe resultados mais expressivos quanto à redução do volume total da estrutura em relação a otimização preliminar, baseada em análise simplificada e com algoritmo baseado em gradiente. Como pesquisado, o método utilizado, aliado ao método de geração do DOE, evitou que mínimos locais impedissem a continuação do processo, agregando robustez à otimização, porém ao preço de um custo computacional muito maior. Devido à atribuição de pesos e os conceitos de critérios de decisão, o algoritmo foi influenciado de modo a priorizar a redução de peso à maximização da primeira frequência natural, claramente observado nos resultados obtidos.

Destaca-se a demonstração da ampla gama de possibilidades ao se explorar as diversas ferramentas computacionais disponíveis atualmente, agregando muito valor ao projeto de elaboração de um componente automotivo. A correta aplicação dos conceitos e métodos de otimização, e consequentemente uma utilização eficiente das ferramentas disponíveis,

possibilita a redução de custos de projeto relativos a desenvolvimento de protótipos e testes experimentais, uma vez que simulações computacionais bem elaboradas podem prever falhas e inviabilidades sem a necessidade de construção de modelo físico, indicando os parâmetros ótimos para um componente o mais próximo possível do ideal.

REFERÊNCIAS

- Chandra, M. R.; Sreenivasulu, S.; Hussain, S. A. Modeling and Structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections. *International Journal of Modern Engineering Research*, India, 2012.
- Coley, D. A. An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers. *World Scientists Publishing*, 1999.
- Furtado, D. C. Análise estrutural de chassi de veículos automotivos. 2013. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade de Brasília, Brasília*, 2013.
- Haftka, R. T.; Gürdal, Z. Elements of Structural Optimization: Third Revised and Expanded Edition. *Dordrecht: Kluwer Academic Publishers*, 1992.
- Happian-Smith, J. An introduction to modern vehicle design. *Woburn: Butterworth-Heinemann*, 2002.
- Kibsgaard, S.; Olhoff, N.; Rasmussen, J. Concept of an optimization system. *First International Conference on Computer Aided Optimum Design of Structures Application*, 1989.
- Manual Do Implementador. Manual do Implementador da Ford Caminhões. Versão de Março de 2014. Disponível em <<http://www.ford.com.br>> Acesso em: 5 de novembro de 2015.
- Maxwell, J. C. On reciprocal figures, frames, and diagrams of force, *Scientific Papers*, 2, *University of Press, Cambridge*, 1872.
- Mitchell, A. G. M. The limits of economy of material in frame-structures. *Phil Mag.* 8, 1904.
- Oliveira, F. C. G. Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica. *Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia*, 2007.
- Rockafellar, R. T. Fundamentals of Optimization. *Seattle: Dept. of Mathematics, University of Washington*, 2007. Lecture Notes.
- Samahá, F.; Cartaxo, I. Monobloco e carroceria sobre chassi: vantagens e desvantagens. *Best Cars Uol*, 2009. Disponível em: <<http://bestcars.uol.com.br>>. Acesso em: 22 de outubro de 2015.
- Silva, E. C. N. PMR 5215 - Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos. *Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP*, 2003. Apostila.
- Singh, A.; Soni, V.; Singh, A. Structural Analysis of Ladder Chassis for Higher Strength. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, India, 2014.
- Vanderplaats, G. N. Numerical Optimization Techniques for Engineering Design With Applications. *New York: McGraw-Hill*, 1984.
- Wilde, D. J. Globally Optimal Design. *New York: Wiley-Interscience*, 1978.