



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE CHASSI VEICULAR
TIPO ESCADA**

**Autor: Michel Henrique Machado Alba
Orientador: Suzana Moreira Ávila**

**Brasília, DF
2015**



MICHEL HENRIQUE MACHADO ALBA

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE CHASSI VEICULAR TIPO ESCADA

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Suzana Moreira Avila D.Sc

Co-Orientador: Maura Angelica Milfont Shzu D.Sc.

**Brasília, DF
2015**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Alba, Michel Henrique Machado.

Otimização Paramétrica de Chassi Veicular Tipo Escada
/ Michel Henrique Machado Alba. Brasília: UnB, 2015.
70 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Bacharel em Engenharia Automotiva) –
Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Suzana
Moreira Ávila.

1. Chassi. 2. Otimização. 3. Análise estrutural I. Ávila, Suzana.
II. Otimização Paramétrica de Chassi Veicular Tipo Escada.

CDU Classificação



OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE CHASSI VEICULAR TIPO ESCADA

Michel Henrique Machado Alba

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 01/12/2015 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. D.Sc: Suzana Moreira Ávila
Orientador

Prof. D.Sc.: Maura Angélica Milfont Shzu
Co-Orientador

Prof. D. Sc. Carta Tatiana Mota Anflor, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Alessandra Machado Alba e Jolnei Luiz Alba por todo o amor, suporte, dedicação e bons exemplos a mim entregues durante toda a vida. Também à minha irmã Alexandra Machado Alba por todo o incentivo e companheirismo

À minha segunda família, tios Jaira Maria Alba Puppim e Ramsés di Mauricio Puppim, primos Atila Puppim e Régis Puppim, por me acolher em Brasília e dar todo o apoio necessário para seguir em frente.

As Professoras Suzana Moreira Ávila e Maura Angélica Milfont Shzu pela orientação, paciência e ensinamentos transmitidos, fundamentais para realização deste trabalho.

A toda minha família, materna e paterna, amigos de Campo Grande e de Brasília, colegas, demais professores e colaboradores que direta ou indiretamente me apoiaram ao longo dessa jornada e tornaram possível a conquista dos meus objetivos.

A Universidade de Brasília pela formação e suporte.

A Deus, por tudo.

“É necessário sempre acreditar que o sonho é possível [...]”

Edy Rock

RESUMO

Este trabalho consiste em um procedimento de análise e aprimoramento de um chassi de veículo automotivo do tipo escada, onde objetiva-se a redução da quantidade de material empregue em sua concepção. O chassi automotivo é responsável direto pelo bom funcionamento de quase todos os outros sistemas em um veículo, porém também é responsável por considerável parcela do custo de produção. Atualmente existem diversos métodos de análise e algoritmos otimizadores aplicáveis a estruturas, através dos quais é possível a elaboração de modelagem de componentes automotivos e estudos de melhoria em diversos aspectos. A proposta deste trabalho é de, através do algoritmo otimizador de primeira ordem do software Ansys 13.0, elaborar um processo de otimização paramétrica de um chassi tipo escada, modelo Cargo C-816, no qual as dimensões do perfil de seção transversal sejam alteradas, de forma a minimizar o seu volume total e conseqüentemente a quantidade de material utilizado para sua fabricação. Os critérios utilizados para tratamento dos parâmetros foram inicialmente baseados em uma análise estática, pelo Método dos Elementos Finitos.

Palavras-chave: Otimização, Chassi Escada, Análise estrutural, MEF.

ABSTRACT

This work consists in a ladder automotive chassis analysis and enhancement procedure, where the objective is weight reduction. The automotive chassis is directly related to the good behavior of almost all vehicle systems, but also is associated to a substantial portion of the manufacture cost. Currently there are many analysis methods and optimization algorithms applicable to structures through which is possible the modeling of automotive componentes and improvement studies in several aspects. The proposition of this study is, through the Ansys 13.0 first order optimization algorithm, formulate a parametric optimization of a ladder chassis, model Cargo C-816, which the cross-section profile are modified so the total volume is minimized and consequently descreases the amount of material used in the fabrication. The criteria used for the parameters processing were, at first, based in a static analysis with the Finit Element Analysis method.

Keywords: Optimization. Ladder Chassis. Structural Analysis, FEA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cargas suportadas pelo veículo. Fonte: Happian-Smith, 2002	15
Figura 2.2 - Chassi ladder de seção aberta da década de 1920. Fonte: Happian-Smith (Cortesia da Vauxhall Archive Centre), 2002	16
Figura 2.3 - Chassis tipo Escada; 1 - longarinas, 2 – travessas. Fonte: ABNT, NBR 5533	17
Figura 2.4 - Chassi tipo Escada com travessas em “X”, um dos primeiros modelos criados. Fonte: Happian-Smith, 2002	17
Figura 2.5 - Chassi escada da Ford F-450 americana. Fonte: Best Cars, 2009.....	18
Figura 2.6 – Mercedes 300SLR. Fonte: Edgar’s Cars’N’Fun, 2014.....	19
Figura 2.7 - Chassi tubular tipo space frame. Fonte: Technical F1 Dictionary.....	20
Figura 2.8 - Estrutura space frame do modelo alternativo ao kart da companhia australiana Hyper PRO Racer. Fonte: Kart Sport News	20
Figura 2.9 - Citroën Traction Avant: destaque em inovação à época devido ao chassi monobloco e à tração dianteira. Fonte: FlatOut	21
Figura 2.10 - Chassi monobloco. Fonte: Barata, 2012	22
Figura 2.11 - Chassi monobloco da Suzuki Gran Vitara JIII; destaque nas regiões de reforço estrutural. Fonte: 4x4 Brasil, 2008	22
Figura 2.12 - Linha de produção do chassi monobloco do Volkswagen Up!, em Taubaté-SP. Fonte: Eco Curitiba, 2014.....	23
Figura 2.13 - Desenho técnico do modelo C-816 3300-EE. Fonte: Manual do Implementador, 2014.....	24
Figura 2.14 - Exemplo de aplicação de otimização paramétrica (adaptado). Fonte: Archi Expo.....	26
Figura 2.15 - Exemplos de aplicação de otimização de forma. Fonte: Silva, 2003 ...	27
Figura 2.16 - Exemplos de aplicação de otimização topológica. Fonte: Silva, 2003 .	28
Figura 2.17 - Exemplos de solução ótima dentro de domínio viável. Fonte: Silva, 2003.....	31
Figura 2.18 - Exemplo de solução gráfica para um problema de otimização (adaptado). Fonte: Arora, 2004	33
Figura 3.1 - Treliça de três barras (adaptado). Fonte: Haftka e Gürdal, 1992	40
Figura 3.2 - Esforços internos da treliça.....	41
Figura 3.3 – Deslocamentos da treliça.....	41
Figura 3.4 – Tensões geradas na treliça.....	44
Figura 3.5 – Variação dos raios no decorrer das iterações	46
Figura 3.6 – Variação do volume total no decorrer das iterações	47
Figura 3.7 - Perfil da seção transversal do modelo. Fonte: Manual do Implementador, 2013.....	48
Figura 3.8 - Dimensões da seção transversal de perfil “U”. Fonte: Ansys Tutorials ..	49
Figura 3.9 - Vista lateral dos carregamentos distribuídos aplicados às longarinas. Fonte: Furtado, 2013.....	50
Figura 3.10 - Chassi modelado no Ansys.....	51
Figura 3.11 - Tensões no chassi.....	51
Figura 3.12 - Deslocamentos no chassi.....	51
Figura 3.13 - Variação dos comprimentos do perfil no decorrer das iterações	53
Figura 3.14 - Variação das espessuras do perfil no decorrer das iterações.....	53
Figura 3.15 - Variação do volume total da estrutura no decorrer das iterações	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos elementos	40
Tabela 2 – Entradas do algoritmo	43
Tabela 3 – Tensões nos elementos	44
Tabela 4 – Resultados das tensões e deslocamento máximo	45
Tabela 5 – Dados iniciais e finais (19ª iteração).....	46
Tabela 6 – Dimensões da seção transversal (adaptado). Fonte: Manual do Implementador, 2013.	48
Tabela 7 – Propriedades do aço LNE60. Fonte: Furtado, 2013	49
Tabela 8 – Dimensões iniciais das variáveis de projeto	50
Tabela 9 – Dados iniciais e finais (18ª iteração).....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTO	11
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 MOTIVAÇÃO	11
1.4 METODOLOGIA	12
1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 CHASSI AUTOMOTIVO	14
2.1.1 Conceitos	14
2.1.2 Tipos	15
2.1.2.1 Chassi <i>Ladder</i> ou Escada	15
2.1.2.2 Chassi tubular <i>space frame</i> ou <i>bird cage</i>	18
2.1.2.3 Chassi monobloco	21
2.2 OTIMIZAÇÃO	24
2.2.1 Histórico	24
2.2.2 Tipos	26
2.2.2.1 Otimização Paramétrica	26
2.2.2.2 Otimização de Forma	26
2.2.2.3 Otimização Topológica	27
2.2.3 Estrutura	29
2.2.3.1 Variáveis de projeto	29
2.2.3.2 Função objetivo	29
2.2.3.3 Restrições	30
2.2.3.4 Domínio Viável e Inviável	30
2.2.3.5 Soluções	32
2.2.3.5.1 Analíticas	32
2.2.3.5.2 Gráficas	32
2.2.3.5.3 Numéricas	33
2.2.4 Otimizadores	34
2.2.5 Aplicações	36
2.2.6 Procedimentos	37
2.3 ESTADO DA ARTE	38
3 RESULTADOS PRELIMINARES	40
3.1 VALIDAÇÃO DO MODELO SIMPLES (TRELIÇA)	40
a) Cálculos Analíticos	40
b) Simulação	43
3.2 OTIMIZAÇÃO DO CHASSI	48
4 CONCLUSÕES PRELIMINARES	55
5 PLANO DE TRABALHOS FUTUROS	56
5.1 Perspectivas TCC2	56
5.2 Cronograma	56
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	57
ANEXOS	60

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

No atual cenário do ramo industrial, são diversas as estratégias requeridas e adotadas pelas grandes produtoras de equipamentos e serviços que tem como intuito o aperfeiçoamento da produção. Para estar em conformidade com exigências normativas e de mercado, e simultaneamente obter o maior lucro possível, em muitos casos toma-se a decisão equivocada de poupar recursos humanos e financeiros, mantendo os mesmos procedimentos e parâmetros de processo, inviabilizando o aperfeiçoamento da produção.

1.2 OBJETIVOS

Visando a aplicação de melhorias em processos de fabricação, este trabalho tem como propósito a utilização de procedimentos de simulação computacional que alterem parâmetros estruturais e, dessa forma, minimize-se o quantitativo de material consumido na produção de um componente automotivo.

Através do processo de otimização com modelagem e simulações realizados no software ANSYS, o objetivo específico deste trabalho é a redução de dimensões em um chassi automotivo do tipo escada (*ladder*), modelo Cargo C-816, no qual se pretende obter economia de material através de redução de volume, sem que sejam desrespeitados limites estruturais, como resistência a tensões e pequenos deslocamentos.

1.3 MOTIVAÇÃO

O interesse desta pesquisa veio através da possibilidade de somar à contribuição dada por Furtado (2013) para os registros acadêmicos. O referido autor realizou, para diferentes modelagens de elementos finitos, simulações estruturais estáticas e dinâmicas em um chassi de caminhão tipo escada.

Outra fonte de interesse veio na possibilidade de preenchimento da lacuna deixada pelo setor automotivo de aperfeiçoamento do processo de produção

realizado por simulações computacionais, onde os conceitos estudados e elaborados no âmbito da universidade muitas vezes podem ser aplicados.

1.4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi iniciado com uma revisão bibliográfica com intuito de se aprofundar o conhecimento teórico e matemático sobre o tema. A respeito do chassi, o foco esteve no modelo previamente definido como objeto de estudo, enquanto os conceitos e métodos de otimização foram pesquisados de forma generalizada, a fim de que se encontrasse de forma crítica o método mais adequado à proposta do projeto.

A forma para a obtenção dos resultados está moldada em uma divisão em duas etapas: primeiramente a aplicação de conceitos a um modelo simplificado de estrutura (uma treliça de três barras) a fim de validação da metodologia utilizada e, posteriormente, o desenvolvimento das simulações com o chassi.

As simulações foram feitas utilizando o Método dos Elementos Finitos através do ANSYS 13.0. Também nele foi utilizado um algoritmo de otimização de primeira ordem do próprio software, com foco na redução de volume da estrutura. Por fim os resultados obtidos foram avaliados para que se fossem elaboradas conclusões do trabalho realizado e apresentadas propostas de trabalhos futuros.

1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos, a serem apresentados a seguir:

No Capítulo 1 está a introdução ao conteúdo do presente trabalho, abordando contexto, objetivos e a estruturação do projeto.

No Capítulo 2 foi feita Revisão Bibliográfica do trabalho, onde aspectos como histórico, modelos e funções de chassis automotivos e de otimização foram aprofundados.

O Capítulo 3 descreve o que foi obtido através do desenvolvimento e da metodologia deste trabalho. A apresentação dos resultados e a discussão dos mesmos foram divididas conforme descrito no tópico 1.4.

O Capítulo 4 traz as conclusões obtidas com a realização da otimização e seus resultados, e apresenta cronograma e proposta de continuidade do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para realização do presente trabalho de análise e otimização de parâmetros em um chassi tipo escada se faz necessário um conhecimento profundo acerca da estrutura do objeto de estudo, através de conceitos como aplicações, características e também de seu desenvolvimento ao longo da história.

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica do trabalho, relacionando o chassi em seus diversos tipos, desde os primeiros modelos produzidos, com definição de conceitos estruturais, de métodos de análise e fundamentos das ferramentas utilizadas para a otimização. Por último será apresentado um estudo do estado da arte deste assunto.

2.1 CHASSI AUTOMOTIVO

2.1.1 Conceitos

O chassi automotivo 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 inúmeros esforços estáticos e dinâmicos, devidos à ação de cargas, irregularidades do solo e forma de dirigibilidade, entre outros. Tais esforços demandam da estrutura veicular alta resistência a flexões e vibrações, 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).

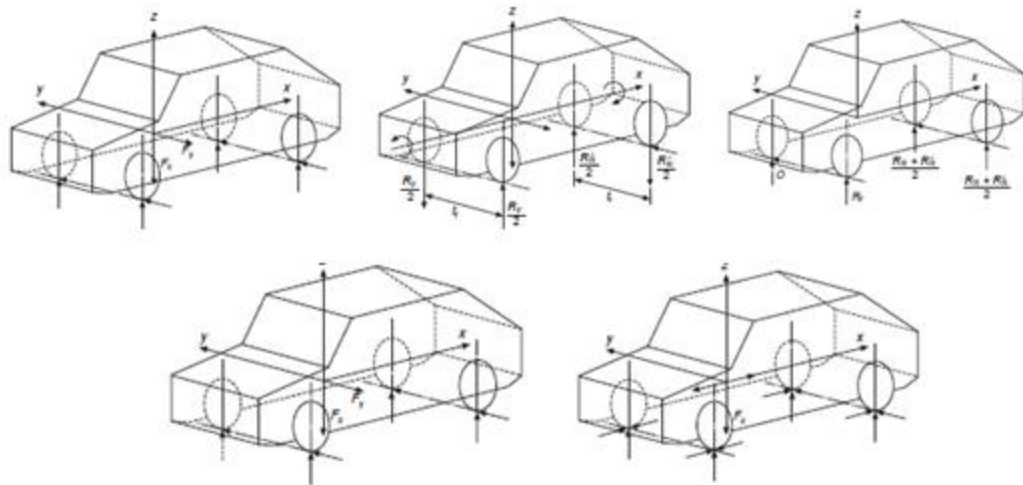


Figura 2.1 – Cargas suportadas pelo veículo. Fonte: Happian-Smith, 2002.

Além de todas as demandas impostas ao chassi em condições normais de utilização, existem normas que exigem que o mesmo absorva impacto e sofra deformações que minimizem danos físicos decorrentes de fortes impactos em acidentes de trânsito.

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, o chassi sofreu diversas alterações em seu formato, material e forma de concepção. A seguir são descritos os principais tipos utilizados na atualidade, com uma abordagem relacionada aos tipos de aplicação, surgimento cronológico, vantagens e desvantagens.

2.1.2 Tipos

2.1.2.1 Chassi *Ladder* ou Escada

A utilização dessa forma de chassi, também chamada “twin-rail” foi aplicada 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).

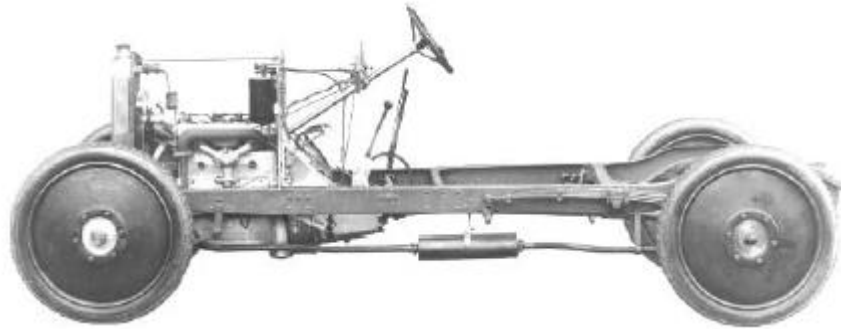


Figura 2.2 – Chassi *ladder* de seção aberta da década de 1920. Fonte: Happian-Smith (Cortesia da Vauxhall Archive Centre), 2002.

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 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.

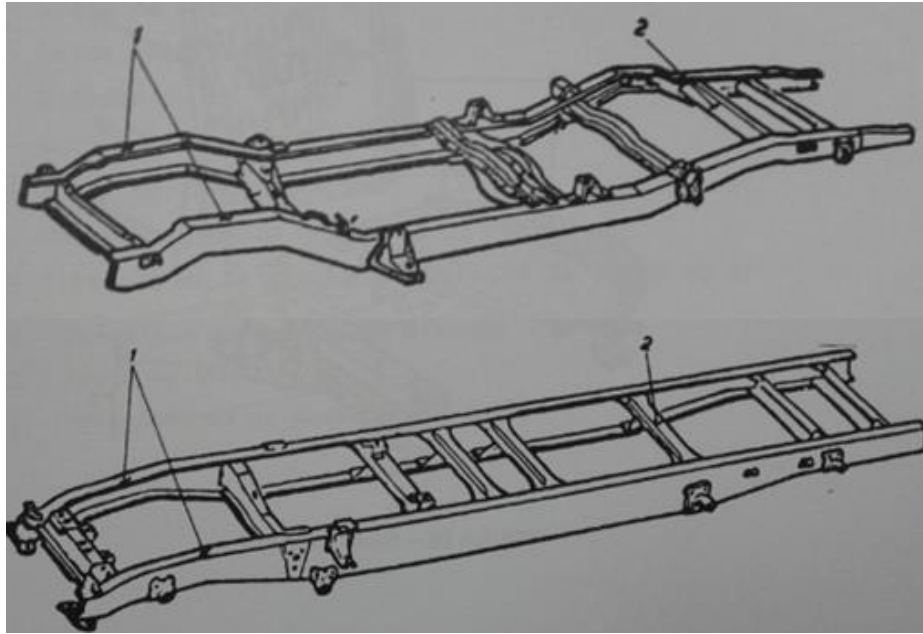


Figura 2.3 – Chassis tipo Escada; 1 - longarinas, 2 – travessas. Fonte: ABNT, NBR 5533.

Outra vantagem é a chamada modularidade, que permite a criação de diferentes modelos de veículos através de diferentes arranjos de componentes montados sobre a mesma estrutura, podendo 30% dos componentes serem utilizados em diferentes modelos (REIMPELL, et al 2001). Um estudo mais profundo sobre as vantagens desse tipo de conceito na indústria automotiva foi desenvolvido por Rodrigues (2010).

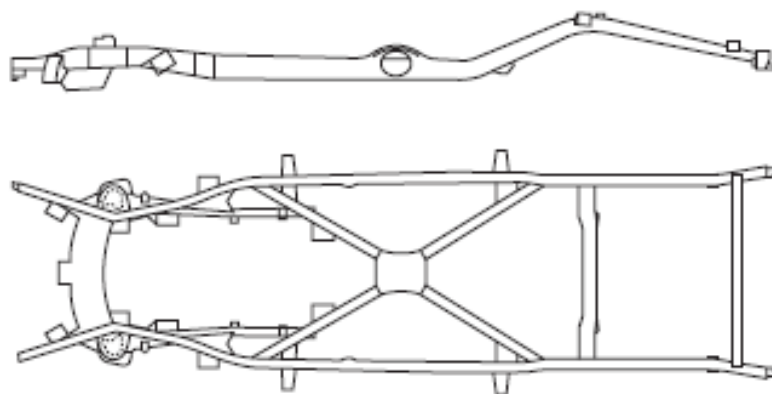


Figura 2.4 – Chassi tipo Escada com travessas em “X”, um dos primeiros modelos criados. Fonte: Happian-Smith, 2002.

Dessa forma, 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.



Figura 2.5 – Chassi escada da Ford F-450 americana. Fonte: Best Cars, 2009.

2.1.2.2 Chassi tubular *Space Frame* (ou *Bird Cage*)

Outra forma de chassi é o tipo tubular *space frame* ou *bird cage*, que diferentemente do tipo escada, é tridimensional, pois possui uma profundidade com dimensão relevante se comparada ao comprimento e à largura.

Ele nada mais é que uma estrutura em forma de treliças, composta por tubos de seções transversais circulares e vazadas, que acarretam em uma massa relativamente baixa, porém com alta rigidez e resistência. Nesta configuração, todas as barras compõem planos triangulares, de forma que os elementos de viga sejam sujeitos apenas a esforços axiais de tensão ou compressão, com exceção das juntas soldadas que recebem pequenas flexões e torsões (HAPPIAN-SMITH, 2002).

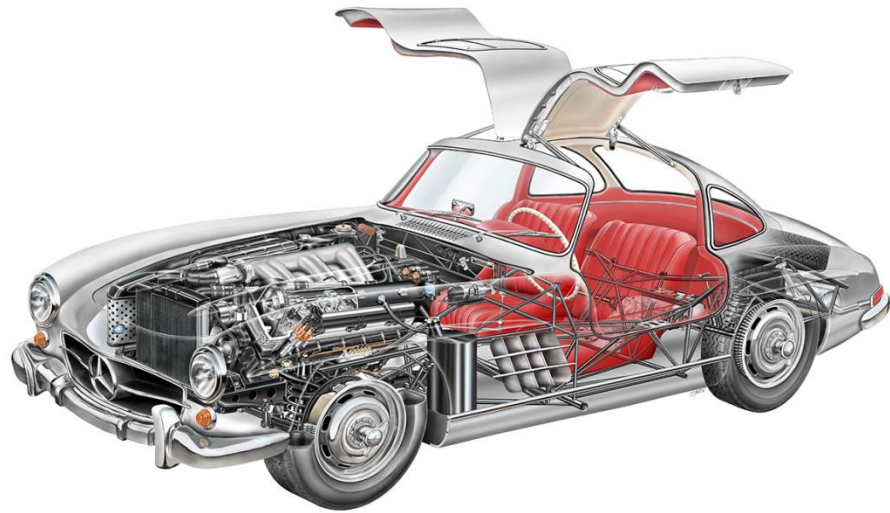


Figura 2.6 – Mercedes 300SLR. Fonte: Edgar's Cars'N'Fun, 2014.

A origem desse tipo de chassi remete, segundo Oliveira (2007), à época da II Guerra Mundial, onde o aviador Barnes Wallis o desenvolveu com o intuito de aumento na resistência de aviões, para que pudessem suportar grandes quantidades de dano, mesmo em condições de voo. Posteriormente, foi utilizado este tipo de chassi em modelos de veículos renomados, como o Mercedes 300SLR (Fig. 2.7), Lamborghini Countach e o Jaguar Bird Cage, além outros modelos das fabricantes Lotus e Maseratti (OLIVEIRA, 2007) (PINTO FILHO, 2004). Atualmente, a principal aplicação é feita em veículos de corrida, que necessitam de alta resistência, baixo peso e segurança ao motorista.

O objetivo de se obter alta rigidez aliada a um baixo peso, a fim de garantir aos carros de corrida bom contato com o solo e maior eficiência dinâmica compõe uma grande demanda de engenharia automotiva, que muitas vezes atinge excelentes resultados, tornando vantajosa a opção desse tipo de concepção para algumas aplicações. Dessa forma, é uma boa opção de aplicação de otimização para trabalhos futuros.

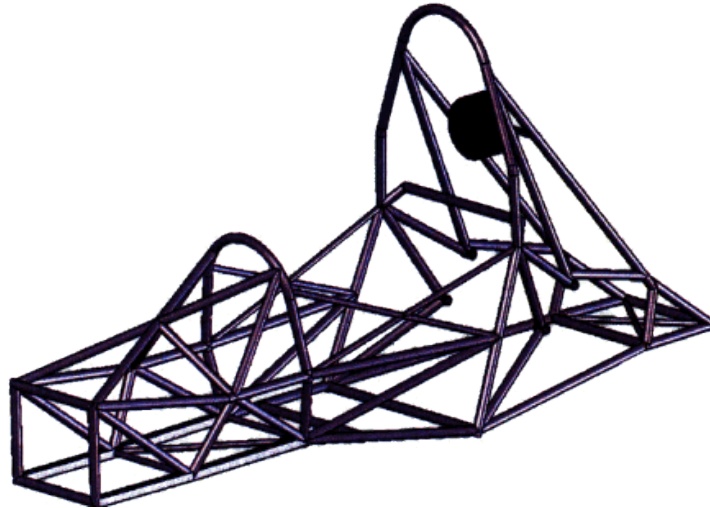


Figura 2.7 – Chassi tubular tipo space frame. Fonte: Technical F1 Dictionary.

Por outro lado, a complexidade desse modelo devida às junções soldadas o torna de difícil concepção e reparo. Além disso, o acesso ao habitáculo do motorista tem certa restrição dependendo da disposição dos tubos, sendo este um dos motivos da Mercedes-Benz ter adotado em alguns modelos (como o 300SLR) a abertura de portas do tipo “asa de gaivota” e outras fabricantes terem optado pelo uso de chassis tipo *space frame* apenas em modelos conversíveis ou estruturas mistas (região central em casca e regiões frontal e traseira treliçadas), porém sempre é preciso adotar-se estratégias adicionais ao incrementar-se a rigidez de um veículo pela aplicação desse tipo de estrutura (OLIVEIRA, 2007).



Figura 2.8 – Estrutura *space frame* do modelo alternativo ao kart da companhia australiana Hyper PRO Racer. Fonte: Kart Sport News.

2.1.2.3 Chassi Monobloco

Este modelo, que é o mais utilizado na atualidade, tem disposição tridimensional, assim como no *space frame*, e possui como principal característica a forma integrada de chassi e carroceria, compondo uma estrutura única.

Surgidos na década de 1920, após o predomínio dos chassis tipo escada, o pioneiro deste tipo de estrutura foi o Lancia Lambda de 1922. Posteriormente surgiram outros modelos com esta configuração, tais como Citroën Traction Avant e Chrysler Airflow (1934), Opel Olympia (1935), Lincoln Zephyr (1936), entre outros (SAMAHÁ, 2009). Atualmente são aplicados a 95% dos veículos de passeio.



Figura 2.9 - Citroën Traction Avant: destaque em inovação à época devido ao chassi monobloco e à tração dianteira. Fonte: FlatOut.

Segundo Pinto Filho (2004), do ponto de vista estrutural um monobloco tem que resistir aos mesmos esforços e atender aos mesmos requisitos que um veículo similar que possua quadro de chassi e carroceria. Seu processo de fabricação envolve a produção de suportes nas regiões inferiores mais reforçadas que remetem à longarinas e travessas. São acrescentadas à base colunas verticais laterais nas regiões traseira, central e frontal, placas metálicas através de estampagem formam a carroceria e outros componentes como portas e capôs, que posteriormente são soldados à base.



Figura 2.10 – Chassi monobloco. Fonte: Barata, 2012.

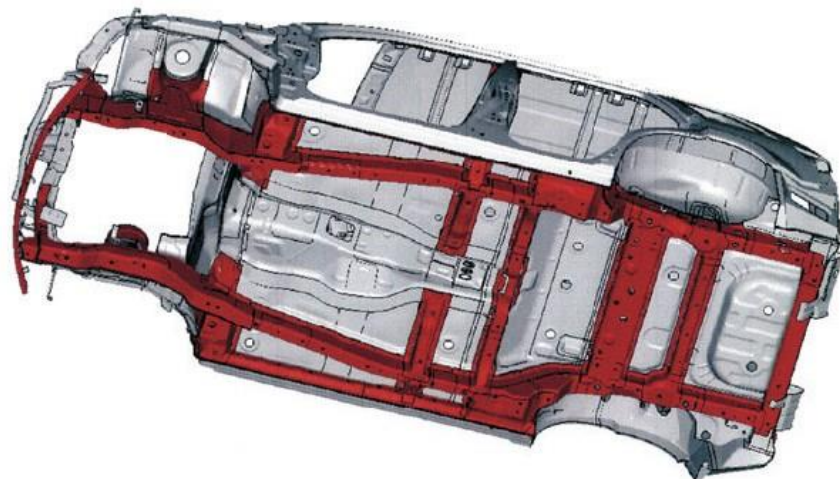


Figura 2.11 – Chassi monobloco da Suzuki Gran Vitara JIII; destaque nas regiões de reforço estrutural. Fonte: 4x4 Brasil, 2008.

Segundo Happian-Smith (2002) as vantagens da estrutura integral são numerosas. É mais rígida em torção e flexão, possui menor peso do que quando se utiliza chassi e corpo separados, pode ser produzido com um custo mais baixo, e produz um carro mais silencioso para os passageiros, além de oferecer boa utilização do espaço interno e proteção contra impactos. Outra importante vantagem, segundo Oliveira (2007) é a sua facilidade de adequação aos processos automatizados de fabricação, o que minimiza o custo.

Uma grande desvantagem, porém, é que ao envolver alto custo ferramental, de molde e máquinas de estampagem, torna inviável sua produção em escala abaixo de cem mil veículos por ano (HAPPIAN-SMITH, 2002). A alta complexidade da união de membros através de solda (em sua maioria soldas-ponto, com algumas aplicações de cordão de solda MIG e a laser) faz necessária a automatização de etapas de processo, o que eleva o custo de produção, principalmente em baixa escala, além de requerer importantes testes experimentais para assegurar um bom comportamento sob torção e resistência à fadiga (CASTRO, 2008).

Para elaboração de um projeto de otimização de peso, neste tipo de estrutura, a modelagem e as análises através de simulação tomam proporções complexas que excedem o escopo deste trabalho.



Figura 2.12 – Linha de produção do chassi monobloco do Volkswagen Up!, em Taubaté-SP. Fonte: Eco Curitiba, 2014.

Existem ainda outros tipos de chassi não citados, como o “coluna vertebral” (backbone) e modelos fabricados especificamente para aplicações agrícolas. Durante a presente revisão bibliográfica foram levadas em consideração as características de cada tipo de chassi e sua aplicabilidade. Dessa forma, por possuir baixa complexidade, na atualidade ainda ser amplamente utilizado e pela acessibilidade a 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, 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).

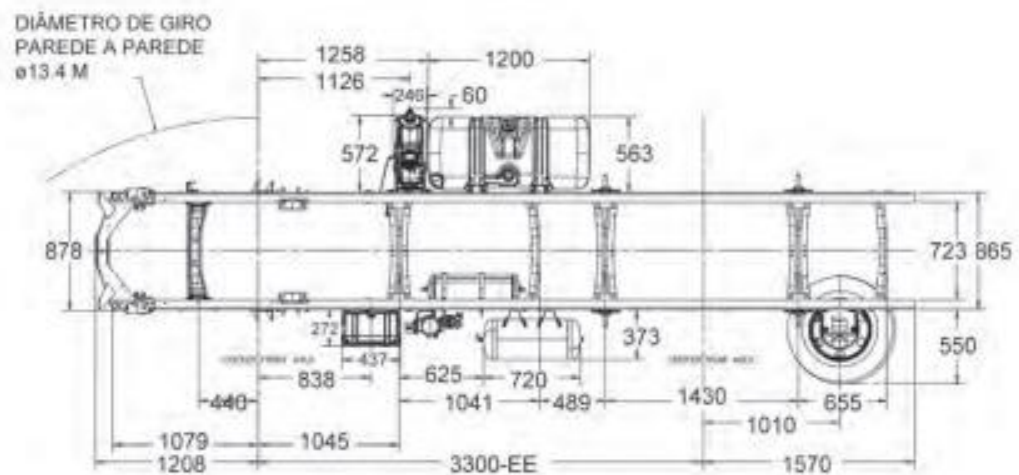


Figura 2.13 – Desenho técnico do modelo C-816 3300-EE. Fonte: Manual do Implementador, 2014.

2.2 OTIMIZAÇÃO

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.

2.2.1 Histórico

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.

Neste período houve grande desenvolvimento do chamado Método dos Elementos Finitos (MEF, ou FEA – *Finit Elements Analysis*), que teve seu surgimento no século XVIII quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos (OLIVEIRA, 2000) e o desenvolvimento de teorias e técnicas analíticas para solução de problemas por matemáticos durante o século seguinte, porém limitado até o advento da computação para realização do processamento de equações algébricas (GALLAGHER, 1975).

Também no período surgiu o conceito Computer-Aided Engineering (CAE), que define a utilização de computadores para suporte ao trabalho em engenharia, que utiliza o MEF para obtenção de resultados de análises estáticas, dinâmicas, térmicas, acústicas e magnéticas para obtenção de tensões, deslocamentos, vibrações, transferência de calor, escoamento de fluidos e diversas outras aplicações (SANTOS et al, 2004).

Aspectos que inicialmente eram inviáveis de serem calculados, tais como treliças com grande número de barras, onde, mesmo as de formato simples, geram sistemas de equações complexos, passaram a ser realizados de forma computacional e extremamente mais rápida. Com este recurso em mãos, o desenvolvimento de algoritmos que elaboram soluções de sistemas de equações

complexos também teve enorme crescimento, o que permitiu o surgimento e desenvolvimento de estudos de otimização.

Com isso, problemas discretos antes difíceis de resolver se tornaram triviais e, então, problemas de meio contínuo passaram a ser desenvolvidos através da discretização em elementos finitos de mesmas propriedades, para obtenção de solução aproximada.

Atualmente, o processo de otimização de estruturas pode ser dividido em três métodos. Seguindo ordem cronológica de surgimento: paramétrica, de forma e topológica.

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Otimização Paramétrica

Esta 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.

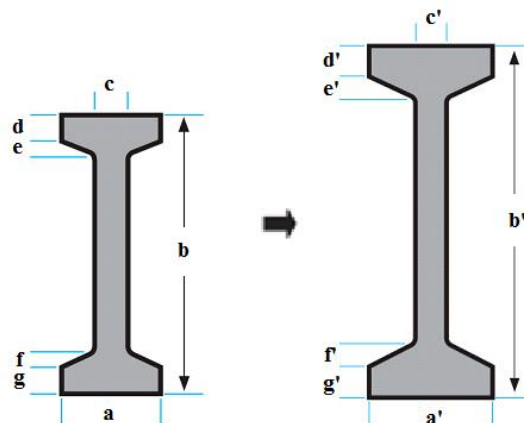


Figura 2.14 – Exemplo de aplicação de otimização paramétrica (adaptado).

Fonte: Archi Expo.

2.2.2.2 Otimização de Forma

Neste método de otimização o foco está nos contornos internos e externos da estrutura. Ele tem como premissa a alteração da posição dos nós e a remoção de

elementos no modelo MEF (Haftka e Gürdal, 1992). Esta abordagem permite a otimização de cavidades da estrutura, buscando sua melhor forma, porém diferentemente da otimização topológica não envolve a criação de novas cavidades.

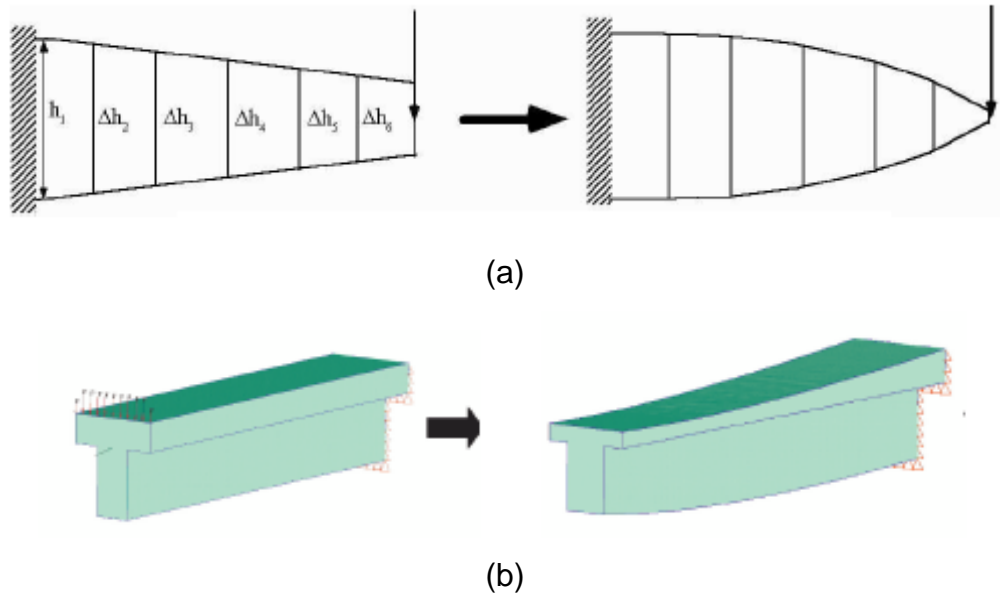


Figura 2.15 – Exemplos de aplicação de otimização de forma. Fonte: Silva, 2003.

2.2.2.3 Otimização Topológica

O método de otimização topológica (MOT) é a abordagem de otimização mais recentemente desenvolvida. Em relação aos outros métodos, este em geral envolve maior remoção de material do objeto inicial e possui diversas aplicações na engenharia além da estrutural. O MOT basicamente distribui o material no interior de um domínio fixo de forma a maximizar ou minimizar uma função custo especificada (por exemplo, máxima rigidez e mínimo volume de material) (SILVA, 2003).

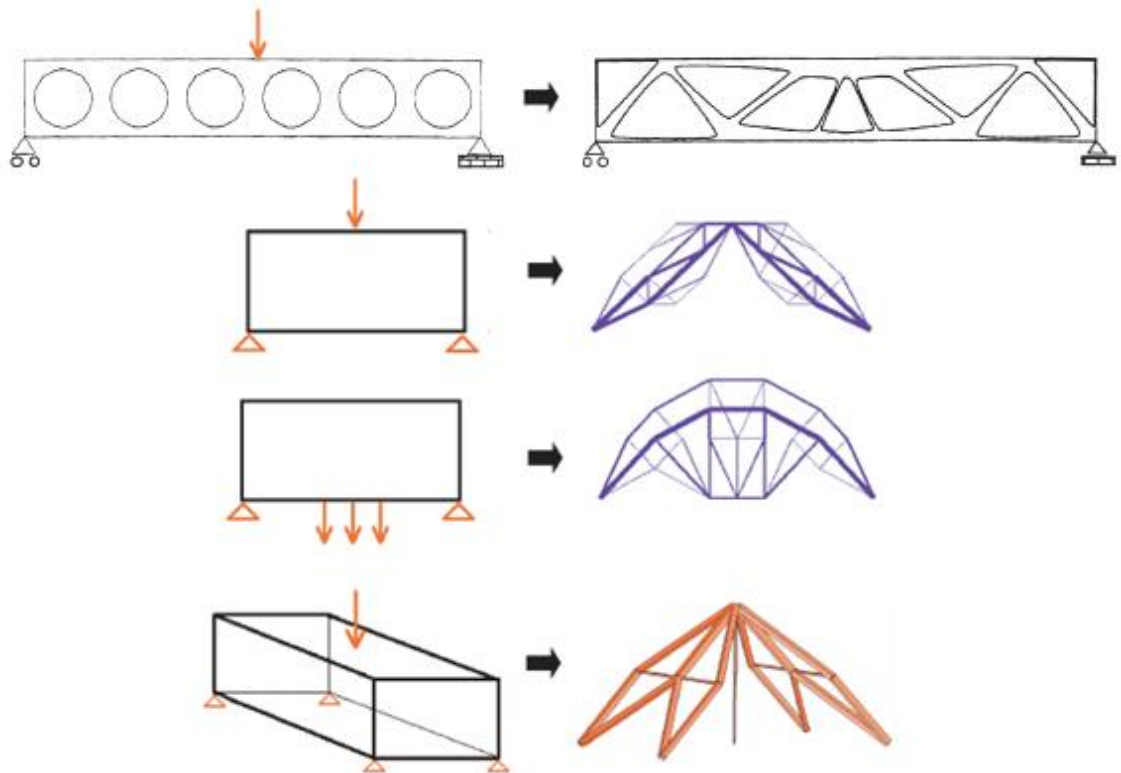


Figura 2.16 – Exemplos de aplicação de otimização topológica. Fonte: Silva, 2003.

Definidos os tipos de otimização existentes, é importante salientar que todos têm suas vantagens e desvantagens, e a escolha do método a ser utilizado irá depender da necessidade do projeto em questão.

Em relação à retirada de material (diminuição no peso), a otimização topológica é a de melhores resultados, porém também é o método de maior complexidade de elaboração de formulação e algoritmo, além de ser a de maior custo computacional, enquanto a otimização paramétrica, apesar de, em geral, apresentar resultados mais discretos, em compensação possui estruturação mais simplificada e menor demanda computacional.

Desse modo, antes da escolha de determinado método de otimização é necessária uma avaliação do projeto, a fim de determinar-se a dimensão dos resultados esperados.

2.2.3 Estrutura

O processo de otimização envolve 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 serão descritos a seguir, que são: variáveis de projeto, função objetivo, restrição e domínios viável e inviável.

2.2.3.1 Variáveis de projeto

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.

Variáveis contínuas em geral são melhores de se trabalhar do que as variáveis discretas, por envolver menor complexidade nos algoritmos de solução. Em geral, para tratem-se variáveis discretas como contínuas devem ser utilizados algoritmos específicos, porém os resultados podem não respeitar restrições impostas ao problema caso haja muito espaçamento entre os valores da variável discreta. Já para variáveis contínuas a solução pode ser obtida com a utilização de parâmetros do tipo distribuído ou discreto. (SILVA, 2003).

Para este trabalho será utilizada a variável do tipo discreta tratada como contínua, ou seja, as variáveis de projeto (dimensões da seção transversal dos elementos) possuem valores comerciais estabelecidos (discretizados), porém serão impostas a elas restrições de desigualdade. Dessa forma, ao serem tratadas numericamente no processo de otimização, essas variáveis assumem valores pertencentes a um espaço amostral contínuo (com limites impostos pelas restrições), e então, posteriormente, é selecionado o valor comercial mais próximo da solução obtida.

2.2.3.2 Função Objetivo

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 multiobjectivo (multicritério), a depender da quantidade de variáveis que se objetiva aperfeiçoar (SILVA, 2003).

Para casos como o deste trabalho, no qual realizada uma otimização estrutural paramétrica, os mais comuns objetivos escolhidos são peso, custo, tensões, deslocamentos e/ou frequências.

Em geral procura-se evitar a utilização de mais de uma função objetivo pelo fato de formar problemas mais complexos e de maior custo computacional. Nestes casos opta-se por formular uma única função objetivo que englobe todos os objetivos do projeto ou então selecionar um objetivo principal a ser trabalhado e impor valores máximos ou mínimos aos demais objetivos (HAFTKA e GÜRDAL, 1992). Neste processo de definição de função objetivo também é comum utilizar, quando possível, equivalência de funções para simplificar problemas, tais como “maximizar a função f ” por “minimizar a função $-f$ ou $1/f$ ” (SILVA, 2003).

2.2.3.3 Restrições

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. As primeiras restringem os valores desejáveis das variáveis entre um máximo e um mínimo. Restrições de desigualdade impõe que as variáveis sejam limitadas de forma superior ou inferior a determinado valor. Por último as restrições de igualdade demandam das variáveis que sejam exatamente os valores que se desejam, estas costumam gerar complexidade em algoritmos de otimização não lineares e em geral são adaptadas para duas restrições de desigualdade, superior e inferior. Dessa forma, para um problema com variáveis de projeto $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ podem-se definir restrições:

- Laterais: $x_{min} \leq x_i \leq x_{max}$, $i = 1, 2, \dots, n$.
- Desigualdade: $g_i(x) \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, n$.
- Igualdade: $h_i(x) = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$.

2.2.3.4 Domínio viável e inviável

O conjunto de possíveis valores para as variáveis de projeto são divididos em dois conjuntos: o domínio viável e o inviável. Estes conjuntos são as possíveis

regiões de localização da solução do problema. O domínio viável contém todos os valores de solução que satisfazem as restrições impostas, enquanto o domínio inviável é composto pelos valores que não respeitam alguma restrição (SILVA, 2003).

Dentro do domínio viável, um valor de solução que seja igual a alguma restrição, faz desta uma restrição chamada ativa, enquanto um valor diferente da restrição faz dela uma restrição inativa (ou passiva). Quando o valor não respeita a restrição (pertence ao domínio inviável), esta restrição é dita violada.

Segundo Haftka e Gürdal (1992), pode ser intuitivo supor que remoção de restrições ativas aperfeiçoe a função objetivo, porém não é verdade. Vários métodos calculam os chamados Multiplicadores de Lagrange (um para cada restrição ativa), a fim de medir a sensibilidade da solução às variações de cada restrição. Este tipo de conceito em geral é aplicado em problemas com elevado número de restrições, para que não haja custo computacional desnecessário em restrições ativas que não impactam na solução e, por não se enquadrar no escopo deste trabalho, não será aprofundado.

As figuras a seguir ilustram dois casos-exemplo, onde (a) a solução ótima se encontra na intersecção de duas restrições ativas, enquanto as outras são inativas e (b) em que todas as restrições são inativas, sendo este equivalente a um problema de otimização sem restrição.

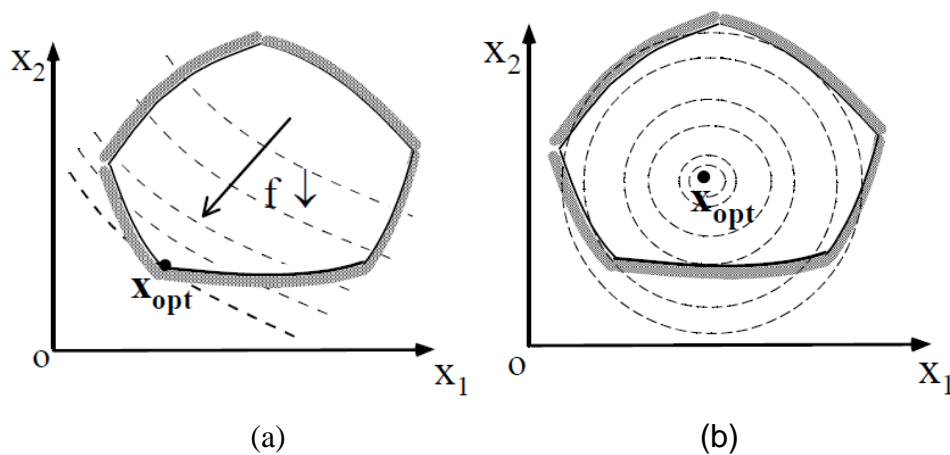


Figura 2.17 – Exemplos de solução ótima dentro de domínio viável. Fonte: Silva, 2003.

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

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(\mathbf{x}) \\ & \text{Tal que } g_j(\mathbf{x}) \geq 0, & j=1, \dots, n_g \\ & h_k(\mathbf{x}) = 0 & k=1, \dots, n_e \end{aligned}$$

Onde

$f(\mathbf{x})$: função objetivo

\mathbf{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.

2.2.3.5 Soluções

2.2.3.3.1 Analíticas

Essa abordagem costuma ser aplicada somente a problemas mais simples de otimização, porém possui relevante importância. As vantagens de elaborar uma solução analítica, segundo Silva (2003), estão no fato de avaliar importantes conceitos da otimização (tais como existência e unicidade ou condições necessárias e suficientes da solução ótima) e, principalmente, para o caso deste trabalho, a servir de validação para a solução obtida por métodos numéricos.

Para este tipo de solução existem os métodos por cálculo diferencial e cálculo variacional. A diferença entre eles consiste no tipo de incógnita a ser utilizada. Para o primeiro a incógnita é uma variável, enquanto no segundo utiliza-se uma função, trabalhando com formulação integral do problema (SILVA, 2003).

2.2.3.3.2 Gráficas

Quando se trata de um problema de duas variáveis, as soluções gráficas trazem uma abordagem interessante do ponto de vista didático, pela facilidade em

ilustrar conceitos de otimização. Os gráficos são montados a partir da função objetivo e das restrições no domínio viável (SILVA, 2003). Nessa abordagem, plota-se as funções de restrição e identifica-se o conjunto de soluções viáveis, em seguida os contornos da função objetivo são desenhados e através de inspeção visual encontra-se a solução ótima (ARORA, 2004).

Na Figura (2.18) está ilustrado um exemplo de otimização, onde as variáveis de projeto são x_1 e x_2 , com restrições lineares g_1, g_2, g_3, g_4 e g_5 . A região ABCDEA indica o domínio viável (onde nenhuma restrição é violada).

Sendo a função objetivo linear

$$P = x_1 + x_2 \quad (1)$$

nota-se que a solução ótima será encontrada no ponto D, onde P será maximizada através dos maiores valores viáveis de x_1 e x_2 .

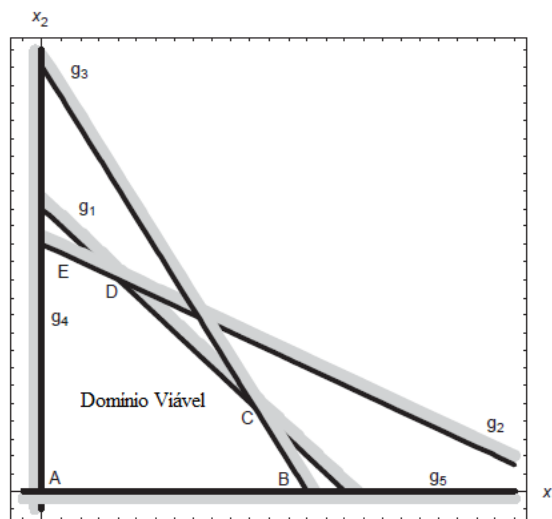


Figura 2.18 – Exemplo de solução gráfica para um problema de otimização (adaptado). Fonte: Arora, 2004.

2.2.3.3.1 Numéricas

Por último, aqui são apresentados os métodos de soluções numéricas para problemas de otimização. A proposta de otimização numérica é de auxiliar de forma racional na busca da melhor solução para o problema (VANDERPLAATS, 1984). Este tipo de solução é feito através de iterações, partindo de valores pré-

determinados das variáveis e avançam de acordo com o aperfeiçoamento da função objetivo, com o grau de conformidade com as restrições, ou ambos, e terminam quando a função objetivo não pode mais ser melhorada sem violar alguma restrição, quando o aperfeiçoamento se torna lento, ou através da aplicação de condições de término, chamadas condições de Kuhn-Tucker (HAFTKA e GÜRDAL, 1992). Há dois tipos a serem discutidos: específicos e gerais.

Os métodos específicos são aplicados de maneira que a formulação é moldada estritamente ao problema em questão (estrutural, por exemplo). Sua aplicação se torna mais restrita, porém mais efetiva no quesito custo computacional.

Os métodos gerais (ou genéricos) são algoritmos aplicáveis a diferentes áreas, baseados em programação matemática e será o tipo utilizado neste trabalho. Eles exigem cuidados especiais, tais como a escolha do software, o número de iterações, informações sobre a função objetivo, entre outros (SILVA, 2003).

Segundo Vanderplaats (1984), destaca-se para otimização através de soluções numéricas:

- Vantagens: relativa redução de tempo de trabalho; procedimento lógico sistematizado; não é baseada em intuição ou experiência em engenharia (o que aumenta a possibilidade de uma solução melhorada e não tradicional); requer pouca interação humano-máquina; a otimização praticamente sempre gera algum aperfeiçoamento das variáveis.

- Limitações: o custo computacional aumenta com o número de variáveis; se o programa não for precisamente embasado na teoria os resultados podem ser ilusórios; problemas altamente não-lineares podem convergir muito lentamente ou não convergir; depende muito de como o procedimento analítico que baseia o programa foi elaborado, caso não seja feito com automação computacional em mente, pode requerer uma significativa reprogramação das rotinas.

2.2.4 Otimizadores

Através do tópico anterior, nota-se que são diversos os aspectos que moldam um processo de otimização e, 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 existem os algoritmos genéticos e o “Simulated Annealing”. Este trabalho tem inicialmente como objetivo a utilização de um dos algoritmos presentes no Ansys 13.0, que são baseados em programação matemática e, portanto, são o grupo de maior interesse para este caso.

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. (SHZU, 2001).

Os métodos baseados em aproximações consistem em transformar um problema não linear em uma sequência de subproblemas lineares (Programação Linear Sequencial) ou quadráticos (Programação Quadrática Sequencial), através da linearização da função objetivo (no caso da PLS) ou aproximação da função objetivo para uma forma quadrática e as restrições para uma forma linear (PQS) (SHZU, 2001).

2.2.5 Aplicações

A escolha deste ou aquele pacote de otimização irá depender de todos os conceitos citados no tópico anterior. Porém vale ressaltar que a solução encontrada pelo algoritmo para algum problema em específico não pode servir de parâmetro para definir sua eficiência, visto que muitos deles são adaptáveis a tipos diferentes de problemas, de diferentes complexidades, conforme afirmam Belegundu e Arora (1985). Logo, segundo Shzu (2001), “a complexidade de um problema e o esforço computacional requerido para a sua resolução são fatores fundamentais para a escolha do método a ser usado”.

No âmbito de interação otimização-análise estrutural, existem inúmeros pacotes computacionais disponíveis. Um dos mais populares, chamado TSO, partiu do projeto de asa e cauda de aviões, baseado em otimização por método de funções de penalidade interior. Outros integram programas de MEF com algoritmos de otimização, tais como ACESS (de Schmit, Miura e Fleury), FASTOP (Wilkinson e co-autores, em 1975) e OPTIMUM (de Gellatly, Dupree e Berke, em 1976). Destacam-se também o OPTSYS (baseado nos programas de MEF ABAQUS e ASKA), ASTROS (baseado no programa NASTRAN), OPT (baseado em algoritmo de gradientes reduzidos).

Fora estes ainda existem diversos outros, de aplicação voltada a problemas ainda mais específicos, ou mesmo mais genéricos, utilizados em áreas como de produção industrial, ciências biológicas, etc.

Utilizado neste trabalho, o pacote de otimização presente no ANSYS possui dois algoritmos de programação matemática. Ambos são indiretos e transformam um problema restrito em irrestrito com funções de penalidade do tipo interna estendida. O primeiro, de ordem zero, utiliza o método randômico e técnicas de aproximação e não exige que as funções sejam diferenciáveis. O segundo, de primeira ordem, faz o uso de derivadas da função objetivo para encontrar a solução, sendo mais eficaz em casos em que é possível a obtenção do gradiente.

Sendo a função objetivo deste trabalho (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, por ser aplicável e mais eficiente em casos como este.

Neste processo de otimização é utilizado o 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. 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).

Além dos dois módulos presentes no ANSYS, outra possibilidade é a realização do processo de otimização externamente. Ele permite que a modelagem e análises nele realizadas sejam exportadas para outros softwares que realizam a otimização com diferentes métodos. Ao utilizar algoritmos de outros programas aumenta-se a possibilidade de obtenção de melhores resultados. O MATLAB da MathWorks e o modeFRONTIER da Esteco são exemplos de softwares onde algoritmos de otimização podem ser elaborado e aplicados às análises realizadas no ANSYS.

2.2.6 Procedimentos

Para a realização do processo de otimização no ANSYS, algumas etapas de elaboração devem ser seguidas, classificadas em pré-processamento, solução/análise, pós-processamento e otimização.

O primeiro passo é a modelagem, iniciado pelo comando /PREP7, irá definir a geometria da estrutura, o tipo e propriedades do elemento utilizado no refinamento, propriedades do material a ser empregue, entre outras.

Em seguida é realizada a análise do problema, com intuito de obtenção da solução, iniciada pelo comando /SOLU. Antes da execução desta etapa é necessário que as forças e restrições aplicadas aos nós ou elementos estejam devidamente definidas. Além da solução estática, é possível, através do comando ANTYPE, a seleção de diferentes tipos de solução dinâmica, tais como modal, transiente e harmônica. Esta etapa é de grande importância, pois será realizada ciclicamente, após cada iteração do loop de otimização.

No pós-processamento são realizados comandos sob as soluções obtidas. A depender do tipo de análise realizada, esforços, deslocamentos, tensões e frequências que são encontrados podem ser indicados em formato de tabelas ou gráficos. Também se podem optar por plotagem das soluções sob a estrutura. Este passo é iniciado pelo comando /POST1

No próximo passo a etapa de otimização é realizada. Através do comando /OPT inicia-se a definição dos parâmetros do processo. O comando OPVAR define as variáveis de projeto, as restrições e a função objetivo (ao incluir-se na linha de comando DV, SV ou OBJ, respectivamente). O comando OPTYPE define se o método de otimização será de ordem zero ou primeira ordem. OPFRST é então utilizado para definir um limite máximo de iterações realizadas e OPEXE dá início ao processo. O comando OPLIST pode ser utilizado para listar os resultados obtidos e PLVAROPT para plotar os gráficos dos valores obtidos da função objetivo ou das variáveis de projeto. FINISH é o comando necessário para encerrar cada etapa e permitir o início da próxima.

2.3 ESTADO DA ARTE

Na atualidade, são diversos os estudos que projetam, desenvolvem e analisam estruturas e componentes automotivos e buscam através de engenharia do produto obterem os melhores resultados possíveis.

Silva et al (2001) e Oliveira (2006) desenvolveram estudos estruturais de chassis automotivos, tipo *ladder* e *space frame*, respectivamente, através da aplicação de conceitos de MEF. Chandra et al (2012) realizou estudos de modelagem e análise estrutural de chassis de veículos pesados com fabricação em compósitos poliméricos. Singh et al (2014) realizou semelhante análise com emprego de ligas de aço.

Pinto Filho (2004) realizou um trabalho de concepção, projeto e otimização de estrutura automotiva com utilização de vários conceitos relacionados a este trabalho. Chen (2000) integrou o uso do Ansys com tecnologias de otimização numérica, enquanto Cristello e Kim (2006) e Pazian (2010), aplicaram tais conceitos ao desenvolvimento da otimização de componentes automotivos (juntas e suportes universais, respectivamente). Com intuito semelhantes ao deste trabalho, Cagliari et al (2008), desenvolveram um trabalho de redução de material na preparação de um chassi na indústria automobilística e Shzu (2001) minimizou o custo de grelhas, composta de elementos em formato “T” de concreto armado.

O presente trabalho toma como principal base para realização de otimização o trabalho de conclusão de curso realizado por Furtado (2013), onde realizou uma análise estrutural estática e dinâmica de um chassi tipo *ladder*, modelo Cargo C-816, com emprego do software Ansys e comparativo de diferentes elementos de sua biblioteca.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

3.1 VALIDAÇÃO DO MODELO SIMPLES (TRELIÇA)

a) Cálculos Analíticos

A primeira etapa do trabalho foi a elaboração de um modelo de estrutura no qual o processo de otimização fosse aplicável, de forma obter-se uma validação do projeto previamente a sua aplicação. Para isto, primeiramente, foi realizada a análise estática em um modelo de treliça de três barras com dimensões conforme ilustração a seguir:

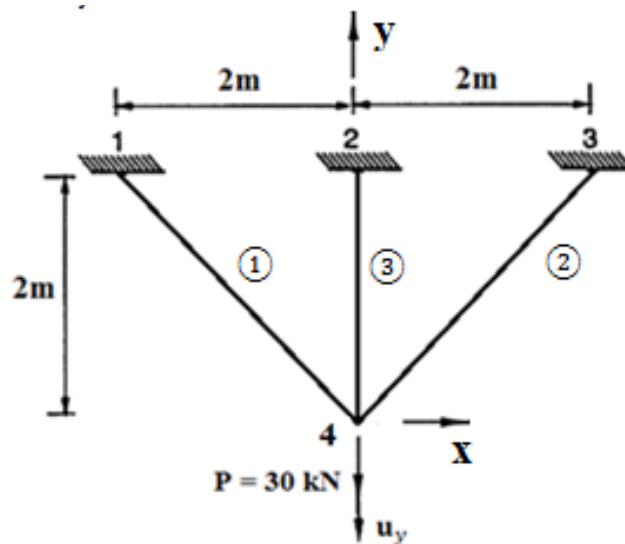


Figura 3.1 – Treliça de três barras (adaptado). Fonte: Haftka e Gürdal, 1992.

Tabela 1 – Descrição dos elementos.

Elemento	Ligação (nós)	Ângulo com o eixo y
①	1 – 4	45°
②	3 – 4	0°
③	2 – 4	-45°

Com seção transversal circular de raio 0,05m, área de 0.00785398 m² e módulo de elasticidade de 210 GPa (aço).

O modelo, submetido à força horizontal de 30kN no ponto 4 e restringido em todos os graus de liberdade nos pontos 1, 2 e 3, foi utilizado para que fossem encontrados o deslocamento u (de direção y e negativa) e as tensões geradas.

Primeiramente, para obtenção dos valores a serem validados, foram aplicados à treliça os conceitos de resistência dos materiais, que visam, através das equações de equilíbrio, a obtenção dos deslocamentos (translacionais ou rotacionais). Primeiramente a equação de equilíbrio será dada, conforme indicado na figura, por:

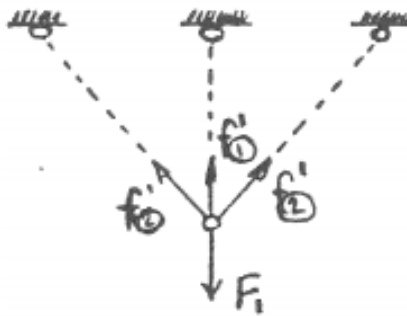


Figura 3.2 – Esforços internos da treliça.

$$f'_1 + 2 \cdot f'_2 \cdot \cos\theta = F_1 \quad (2)$$

Onde θ é o ângulo entre a barra central e as barras laterais, f_1 e f_2 são os esforços internos gerados nos elementos devido à força F_1 aplicada. Os deslocamentos podem então ser equacionados conforme a figura, por:

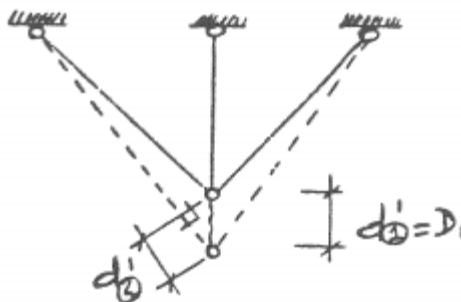


Figura 3.3 – Deslocamentos da treliça.

$$d'_2 = d'_1 \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Utilizando do conceito de tensão e admitindo-se a hipótese de pequenos deslocamentos, obtém-se para as barras:

$$f'_1 = \frac{EA}{L} d'_1 \quad (4)$$

e

$$f'_2 = \frac{EA}{L} \cdot \cos\theta \cdot d'_2 = \frac{EA}{L} \cdot \cos^2\theta \cdot d'_1 \quad (5)$$

Substituindo na Eq. (2)

$$\frac{EA}{L_1} d'_1 + 2 \frac{EA}{L_2} \cdot \cos^3\theta \cdot d'_1 = F_1 \quad (6)$$

E, portanto, a solução para deslocamento será

$$d'_1 = \frac{F_1}{EA} \frac{L_1 L_2}{L_2 + 2 \cos^3\theta \cdot L_1} \quad (7)$$

Substituindo os valores assumidos para a força aplicada F, módulo de elasticidade E, área de seção transversal A, comprimentos de barra L_1 e L_2 e ângulo entre as barras θ , obtém-se:

$$d'_1 = d_{max} = 0,024252m$$

$$d'_2 = 0,017149m$$

Sabendo-se que

$$\sigma = \frac{f}{A} \quad (8)$$

E isolando-se $\frac{f_1}{A}$ e $\frac{f_2}{A}$ nas Eq. (4) e (5) são encontradas as tensões, respectivamente, na barra 3:

$$\sigma_3 = 2,5465 MPa$$

E nas barras 1 e 2:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 1,2732 \text{ MPa}$$

b) Simulação

Para realização da simulação computacional, foram definidas as seguintes entradas, utilizando aço como material:

Tabela 2 - Entradas do algoritmo.

Módulo de elasticidade	210 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade	7850 [kg/m ³]
Área da Seção Transversal	0.00785398 [m ²]

A aplicação desses valores foi realizada no software ANSYS Mechanical APDL, onde se utilizou o elemento 3-D de treliça LINK180. Ele é definido como um elemento de tensão-compressão uniaxial com três graus de liberdade por nó: translações nodais em x, y e z (ANSYS Help). A opção análise estática foi utilizada para realização da solução do problema. O script utilizado para obtenção dos dados está em anexo ao final deste trabalho.

Os resultados obtidos para deslocamento e tensões máxima e mínima foram plotados na estrutura, conforme indicado na Fig. (3.4).

Onde o valor de máximo deslocamento ocorreu na barra central sob o ponto de aplicação da força (ponto 4) de valor:

$$d_{max} = 0,021321 \text{ m}$$

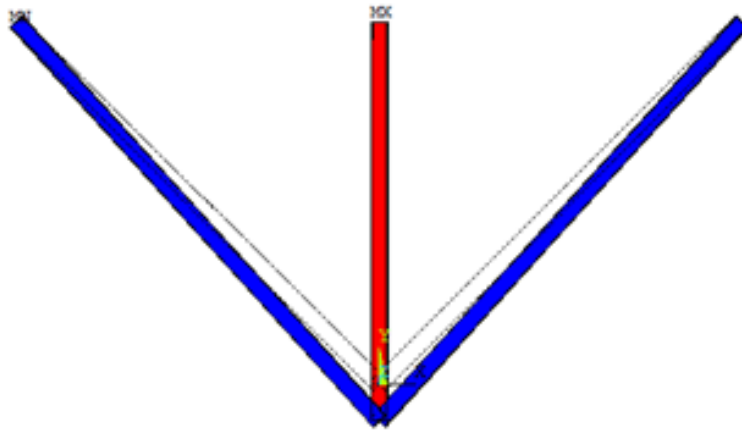


Figura 3.4 – Tensões geradas na treliça.

A seguir são indicados os valores gerados para as tensões em cada elemento:

Tabela 3 – Tensões nos elementos.

Elemento	Tensão σ [MPa]
1	1,1193
2	1,1193
3	2,2387

Portanto, em coordenadas globais da estrutura:

$$\sigma_{max} = 2,2387 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = 1,1193 \text{ MPa}$$

Sendo o valor máximo encontrado na barra central, e o valor mínimo nas barras laterais, conforme indicado na Fig. (3.4).

Tabela 4 – Resultados das tensões e deslocamento máximo.

Variáveis	Resultado Analítico	Resultado da Simulação
σ_1 e σ_2 [MPa]	1,2732	1,1193
σ_3 [MPa]	2,5465	2,2387
d_{max} [m]	0,024252	0,021321

Obtida análise estática para a estrutura da treliça simplificada, o passo seguinte é a aplicação do processo de otimização. Nesta etapa do trabalho foi utilizado o otimizador de primeira ordem do próprio ANSYS.

Durante a modelagem as áreas de seção transversal das três barras foram intencionalmente declaradas como função dos raios R_1 , R_2 , e R_3 , (barra esquerda, direita e central, respectivamente), a fim de que esses sejam os parâmetros variáveis da otimização da treliça. Com a otimização dos valores de raio (ou área da seção transversal, conseqüentemente), sendo as restrições dadas pelos valores de máxima tensão, a saída do programa será o volume total da estrutura otimizada.

A formulação matemática da otimização será:

$$\text{Minimizar } V(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^3 A_i \cdot L_i = \sum_{i=1}^3 (\pi R_i^2) \cdot L_i$$

Tal que

$$0,1 \text{ MPa} \leq \sigma_{max} \leq 3,1 \text{ MPa}$$

$$0,04\text{m} \leq \mathbf{R} \leq 0,1\text{m}$$

Decorridos 5 minutos e 21 segundos, após realização de 21 iterações, o programa retornou os resultados obtidos para a estrutura otimizada com redução de volume. O computador utilizado para as simulações possui processador Intel® Core™ i5 3210M de 2.5Ghz e memória RAM de 4GB. O melhor conjunto de valores foi obtido na 19ª iteração, que será considerado como valor final. Os dados obtidos para a primeira e a melhor iteração foram inseridos na tabela a seguir:

Tabela 5 – Dados iniciais e finais (19ª iteração).

Parâmetro	Etapa Inicial	Etapa Final
σ_{max} [Mpa]	2,2387	3,078
R_1 [m]	0,05	0,04
R_2 [m]	0,05	0,04
R_3 [m]	0,05	0,044414
Volume [m ³]	0,060106	0,040808

As Figuras (3.5) e (3.6) ilustram, respectivamente, a mudança nas variáveis de projeto (R_1 , R_2 e R_3) e do volume (V_f) ao longo das iterações.

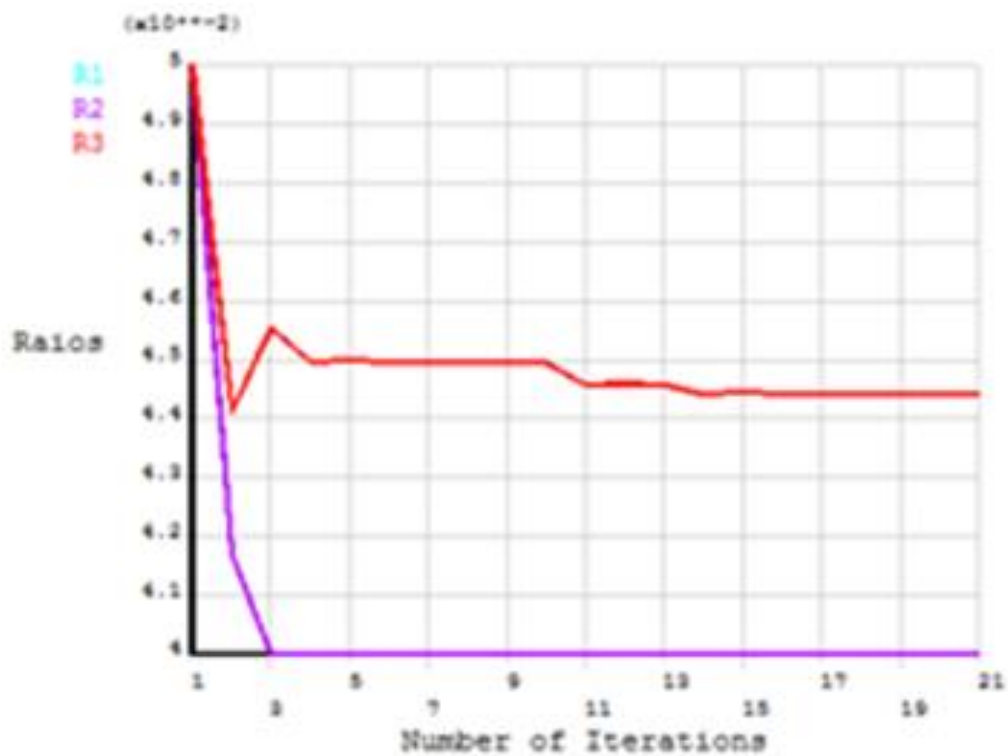


Figura 3.5 – Variação dos raios no decorrer das iterações.

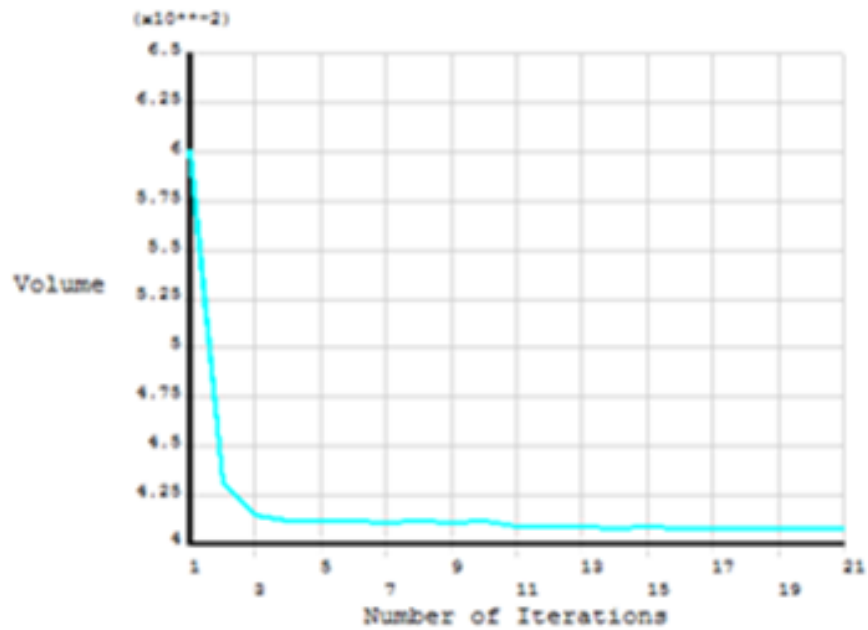


Figura 3.6 – Variação do volume total no decorrer das iterações.

Sendo o volume antes da otimização

$$V_i = 0,060106\text{m}^3$$

E o volume obtido ao final da otimização:

$$V_f = 0,0408081\text{m}^3$$

O percentual de redução do volume foi:

$$RV = 1 - \frac{V_f}{V_i} \tag{9}$$

$$RV = 1 - \frac{0,0408081}{0,0601063} = 0,321 = 32,1\%$$

Dessa maneira nota-se que a metodologia foi validada, onde o processo de otimização aplicado à treliça gerou resultados condizentes com o esperado, e possibilitou a continuidade do trabalho.

3.2 OTIMIZAÇÃO DO CHASSI

Validado o método de otimização a ser utilizado, o próximo passo é aplicação deste ao chassi tipo escada, modelo Cargo C-816.

Segundo o Manual do Implementador (2014), o modelo de chassi escolhido para análise 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 Tab. (6) e (7).

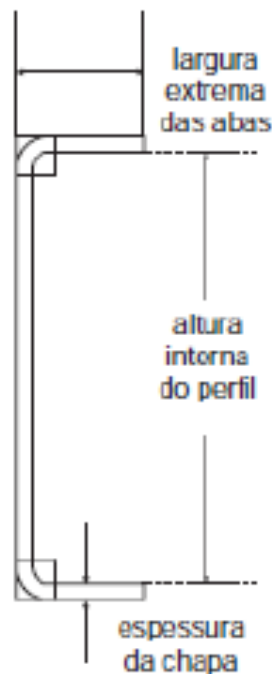


Figura 3.7 – Perfil da seção transversal do modelo. Fonte: Manual do Implementador (2013)

Tabela 6 – Dimensões da seção transversal (adaptado). Fonte: Manual do Implementador (2013)

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

Tabela 7 – Propriedades do aço LNE 60. Fonte: Adaptado de Furtado, 2013.

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade	207 [GPa]
Densidade	7789 [kg/m ³]
Coeficiente de Poisson	0,31
Tensão de Escoamento	600 a 720 [MPa]
Resistência a Tração	680 a 810 [MPa]

Neste caso, 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) quadrático por padrão, tridimensional, de 3 nós com 6 graus de liberdade cada. Possui opção de sétimo grau de liberdade, referente a empenamento (ANSYS TUTORIALS). A este elemento foi aplicada, através dos comandos SECTYPE e SECDATA, a seção transversal de perfil “C” e dimensões conforme Tabela (8).

Definindo o tipo de perfil através do comando CHAN (“channel”) na linha de comando de SECTYPE, os valores requeridos para este tipo de seção transversal como entrada são as dimensões da alma e abas, conforme Fig. (3.8).

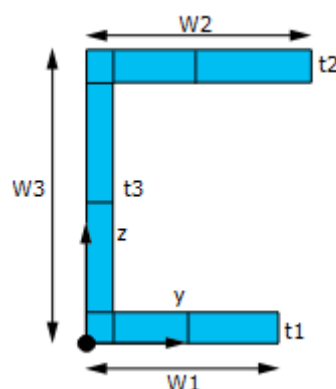


Figura 3.8 – Dimensões da seção transversal de perfil “C”. Fonte: Ansys Tutorials.

Para a realização do processo de otimização, os valores dessas 6 dimensões serão os parâmetros variáveis de projeto a serem alterados. Seguindo os dados do Manual do Implementador (2013), os valores iniciais serão:

Tabela 8 – Dimensões iniciais (variáveis de projeto).

Parâmetro	Valor de Entrada [m]
W_1	0,0709
W_2	0,0709
W_3	0,186
t_1	0,0064
t_2	0,0064
t_3	0,0064

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:

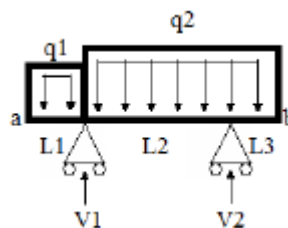


Figura 3.9 – Vista lateral dos carregamentos distribuídos aplicados às longarinas. Fonte: Furtado, 2013.

Onde

$$q_1 = 5,25 \text{ KN/m}$$

$$q_2 = 7,1 \text{ KN/m}$$

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.

Com estes valores e as dimensões indicadas na Fig. (2.13) foi elaborada a modelagem do chassi, conforme ilustrado na Fig. (3.10).

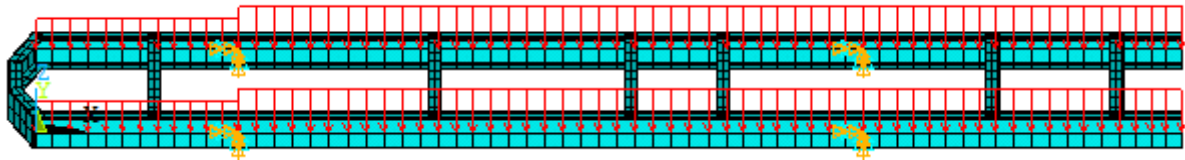


Figura 3.10 – Chassi modelado no Ansys.

A análise estática, com o carregamento (ilustrado em vermelho na Fig. (3.10)) e com restrições dos graus de liberdade impostas nos quatro pontos que simulam o apoio da estrutura nas rodas (em amarelo), foi feita para gerar os seguintes resultados para tensão e deslocamento, respectivamente ilustrados nas Fig. (3.11) e (3.12):

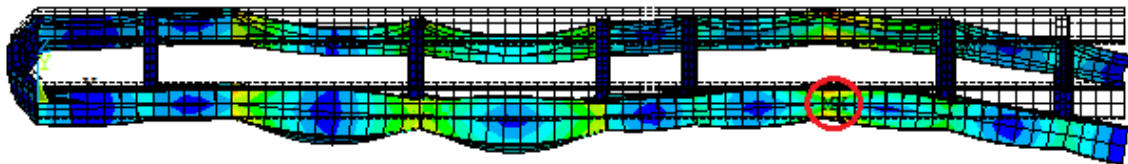


Figura 3.11 – Tensões no chassi.

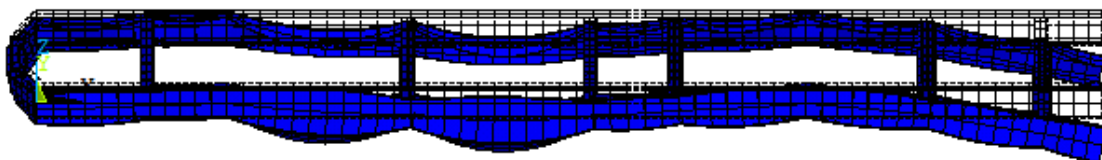


Figura 3.12 – Deslocamentos no chassi.

Os valores máximos obtidos foram:

$$\sigma_{max} = 107 \text{ MPa}$$

$$d_{max} = 0.004297 \text{ m}$$

Baseando-se nesses resultados, foram definidas as restrições impostas à função objetivo, de forma que a formulação matemática do problema de otimização do chassi escada será:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } V(\mathbf{R}) &= \sum_{i=1}^{23} A_i \cdot L_i \\ &= \sum_{i=1}^{23} [(W_1 \cdot t_1) + (W_2 \cdot t_2) + ((W_3 - t_1 - t_2) \cdot t_3)] \cdot L_i \end{aligned}$$

Tal que

$$90 \text{ MPa} \leq \sigma_{max} \leq 120 \text{ MPa}$$

$$0.065\text{m} \leq W_1, W_2 \leq 0.075\text{m}$$

$$0.166\text{m} \leq W_3 \leq 0.206\text{m}$$

$$0.0054\text{m} \leq t_1, t_2, t_3 \leq 0.0074\text{m}$$

Realizando a simulação, depois de decorridos 6 minutos e 7 segundos e 18 iterações, o programa retornou o conjunto de parâmetros otimizados, conforme indicado na Tab. (9).

Tabela 9 - Dados iniciais e finais (18ª iteração).

Parâmetros	Etapa Inicial	Etapa Final
σ_{max} [MPa]	107,00	119,46
W_1 [m]	0,0709	0,069837
W_2 [m]	0,0709	0,066467
W_3 [m]	0,186	0,17195
t_1	0,0064	0,005902
t_2	0,0064	0,0054
t_3	0,0064	0,0054
Volume [m ³]	0.0368245	0,029931

As Figuras (3.13), (3.14) e (3.15) ilustram os gráficos de comportamento das variáveis de projeto (W_1 , W_2 , W_3 , t_1 , t_2 e t_3) e da função objetivo ($V(\mathbf{x})$) ao longo das iterações.

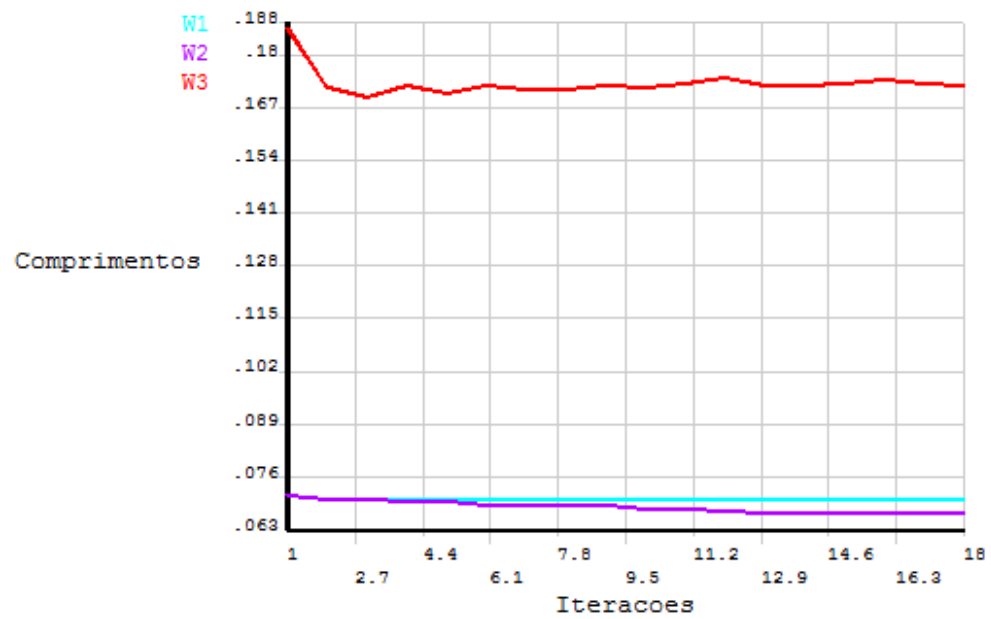


Figura 3.13 – Variação dos comprimentos do perfil no decorrer das iterações.

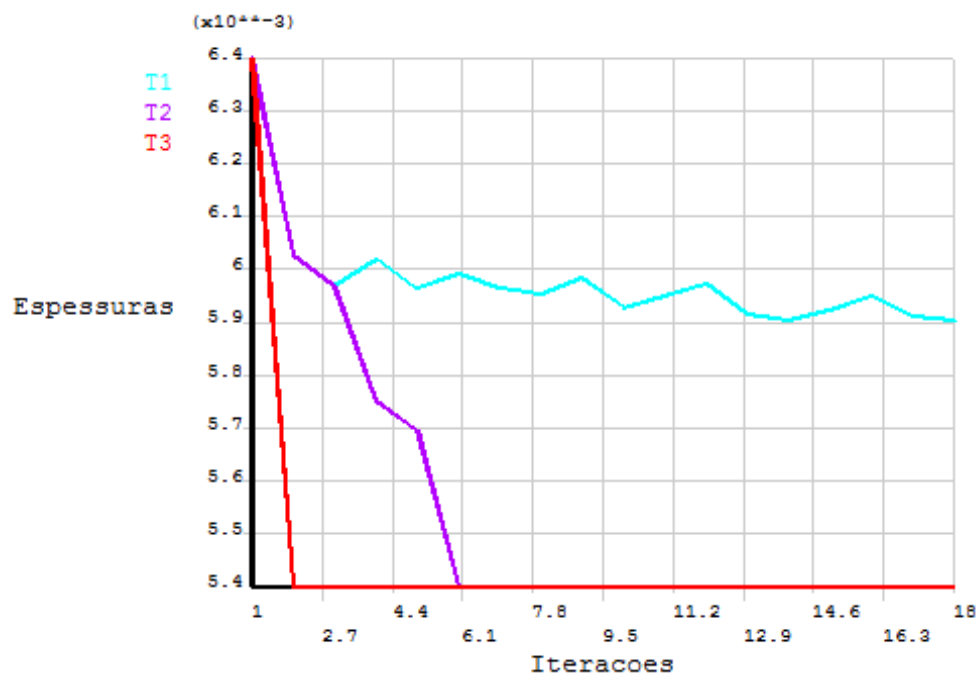


Figura 3.14 – Variação das espessuras do perfil no decorrer das iterações.

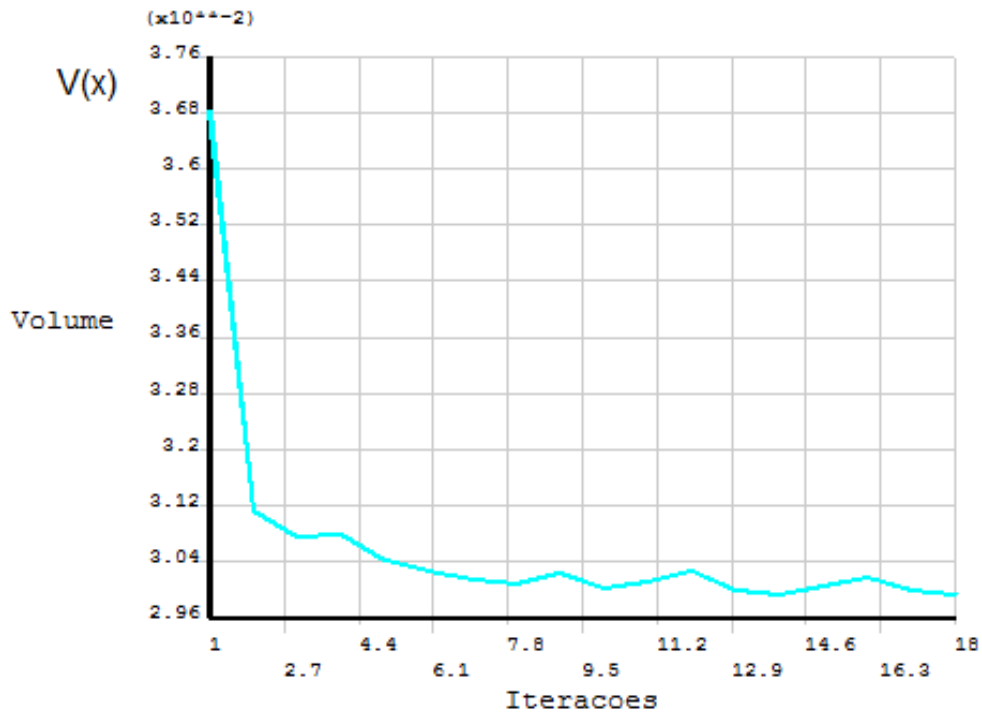


Figura 3.15 – Variação do volume total da estrutura no decorrer das iterações.

Utilizando os valores inicial e final da função objetivo (volume) na Eq. (9), calcula-se o percentual de redução como:

$$RV = 1 - \frac{V_f}{V_i} = 1 - \frac{0,029931}{0,0368245}$$

$$RV = 18,72\%$$

4 CONCLUSÕES PRELIMINARES

O objetivo deste trabalho de realizar um processo de otimização estrutural através do pacote computacional de primeira ordem do Ansys gerou resultados plausíveis e conformes com o esperado.

O procedimento de validação da metodologia, que foi realizado através da aplicação em uma estrutura mais simples que o objeto de estudo trouxe grande benefício ao desenvolvimento deste trabalho. Através desta primeira etapa, foi possível compreender de forma mais clara os conceitos pesquisados durante a fase de revisão bibliográfica. Por meio dela a otimização através do pacote computacional escolhido pode ser realizado de forma mais didática e compreensível.

Após a validação do processo de otimização, a aplicação dele ao chassi tipo escada modelo Cargo C-816 pode ser feita de maneira direta e eficiente, de forma que os resultados obtidos puderam ser analisados e avaliados.

Com a otimização foi obtida a redução do volume total da estrutura, através da minimização das variáveis de projeto (comprimento e espessura das abas e da alma da seção transversal uniforme de perfil "C"), onde o algoritmo gerou somente valores da função objetivo pertencentes ao domínio viável, ou seja, não desrespeitaram as restrições de tensão máxima impostas. Dessa forma, o *loop* de otimização continuou até que o resultado da função objetivo convergisse e chague a um valor abaixo da tolerância selecionada para o problema.

Notou-se que os resultados foram muito dependentes dos valores escolhidos para as restrições da função objetivo. Estes valores foram intencionalmente selecionados com um espaço amostral relativamente pequeno, visto que o intuito do trabalho era a realização da otimização baseada, inicialmente, em resultados obtidos a partir de uma análise estrutural puramente estática.

A elaboração da continuação deste trabalho proverá restrições baseadas em análises dinâmicas, nas quais outras tensões são geradas a partir de situações de uso em que o veículo é submetido, como acelerações, frenagens, curvas, irregularidades do solo e impactos. Tal análise poderá trazer resultados mais reais e aplicáveis a um projeto de concepção de chassi automotivo.

5 PLANO DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 PERSPECTIVAS TCC2

A proposta de continuação deste trabalho consiste na elaboração da análise estrutural completa do chassi tipo escada, onde serão abordados os aspectos dinâmicos de esforços aos quais este tipo de estrutura costuma ser submetido, através de análises modal, harmônica e transiente, a fim de que no processo de otimização possam ser considerados aspectos limitantes da redução de volume, tais como frequências naturais, resistência a forças pontuais elevadas (impactos/capotamentos), entre outros.

Em outra frente, também objetiva-se a construção da otimização do chassi escada por meio de pacotes otimizadores externos ao Ansys, que utilizem das análises por ele realizado. Tais pacotes podem ser exemplificados como o modeFRONTIER e ou algoritmos elaborados através do MatLab, e tornam possível a realização de um estudo comparativo entre os diferentes métodos de otimização e os referentes resultados obtidos.

5.2 CRONOGRAMA

Etapa 1: Revisão bibliográfica de análises dinâmicas.

Etapa 2: Revisão bibliográfica de algoritmos otimizadores compatíveis com modelagem do Ansys.

Etapa 3: Realização das análises.

Etapa 4: Realização das otimizações.

Etapa 5: Análise de resultados e conclusões .

	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho
Etapa 1	X	X	X				
Etapa 2		X	X	X			
Etapa 3				X	X		
Etapa 4				X	X	X	
Etapa 5					X	X	X

Referências Bibliográficas

- ARORA, J. S. **Introduction to Optimum Design**. 2 ed. Iowa City: The University of Iowa. Elsevier Academic Press, 2004.
- BARATA, J. K. **Monocoque e monobloco – você sabe a diferença?** Jalopnik, 2012. Disponível em: < <http://www.jalopnik.com.br/>>. Acesso 20 de setembro de 2015.
- BELEGUNDU, A. D.; AROROA, J. S. **A study of mathematical programming methods for structural optimiation. Part I: Theory**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 21, p. 1583-1599, 1985.
- BELEGUNDU, A. D.; AROROA, J. S. **A study of mathematical programming methods for structural optimiation. Part II: Numerical Results**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 21, p. 1601-1623, 1985.
- CAGLIARI, J.; TEIXEIRA, C. E.; CONTO, S. M. **Minimização e reutilização de resíduos na etapa de preparação de chassi em uma indústria automobilística**. Estudos Tecnológicos, v. 4, n° 3, p. 188-203, set-dez, 2008.
- CASTRO, M. S. **Uma metodologia para melhoria da rigidez torcional de componentes estruturais automotivos**. 2008, 129f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- 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, v. 2, issue. 4, p. 2594-2600, jul-ago., 2012.
- CHEN, Shen-Yeh. **Integrating ANSYS with Modern Numerical Optimization Technologies**. ANSYS Solutions Magazine, Phoenix, winter issue, oct. 2000.
- CRISTELLO, N.; KIM, I. Y. **Design optimization of an automotive universal joint considering manufacturing cost**. In: IASTED International Conference. 17, 2006, Montreal: Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, 2006. p. 499-504.
- EDGAR'S CARS'N'FUN. **Come fly with me: Why gull wing doors are the best solution for car doors?** 2014. Disponível em: <<https://edgarscarsnfun.wordpress.com>> Acesso em: 22 de outubro de 2015.
- FÓRUM 4X4 BRASÍL. **Tópico: Tração tracker**, 2008. Disponível em <<http://www.4x4brasil.com.br/>> Acesso em 18 de setembro de 2015
- FURTADO, D. C. **Análise estrutural de chassi de veículos automotivos**. 2013. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- GALLAGHER, R. H. **Finite Element Analysis: Fundamentals**. Prentice-Hall, 1975.
- 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.

HERNANDES, D. **Traction Avant: os 80 anos do Citroën que inventou o futuro**. FlatOut, 2014. Disponível em: <<http://www.flatout.com.br>> Acesso em 25 de outubro de 2015.

KART SPORT NEWS. **Hyper Response To Roll Bars & Seat Belts**. Disponível em: <<http://kartsportnews.com>> Acesso em: 23 de outubro de 2015.

KIBSGAARD, S.; OLHOFF, N.; RASMUSSEN, J. **Concept of an optimization system**. First International Conference on Computer Aided Optimum Design of Structures Application, Southampton, United Kingdom, jun. 1989 (edited by C.^a Brebbia and S. Hernandez), p. 79-88, Computational Mechanics Publications na Springer, Berlin, 1989.

LEIA ECO CENTRAL – CURITIBA. **Volks inaugura linha de produção do up!** 2014. Disponível em: <<http://www.leiaecocentral.com.br/>> Acesso em 30 de outubro de 2015.

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.

MARTHA, L. F. **O Método da Rigidez Direta sob um Enfoque Matricial**. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, 1993.

MAXWELL, J. C. **On reciprocal figures, frames, and diagrams of force**, Scientific Papers, 2, University of Press, Cambridge, 174-177, 1872.

MITCHELL, A. G. M. **The limits of economy of material in frame-structures**. Phil Mag. 8, 47, 589-597, nov. 1904.

OLIVEIRA, E. J. **Biomecânica básica para ortodontistas**. Belo Horizonte: UFMG, 2000.

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**. 2007, 158 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

OLIVEIRA, F. C. G.; BORGES, J. A. F. **Avaliação da rigidez torsional de uma estrutura veicular tipo space frame pelo método de elementos finitos com estudo de caso**. 16^o POSMEC – Uberlândia: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

PAZIAN, A. **Proposta de procedimentos de desenvolvimento de suportes aplicados em chassi veicular**. 2010. 118f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

PINTO FILHO, R. R. **Concepção, projeto e otimização de uma estrutura para aplicação em veículo de uso misto**. 2004, 187f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J.W. **The Automotive Chassis: Engineering Principles**. 2 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.

ROCKAFELLAR, R. T. **Fundamentals of Optimization**. Seattle: Dept. of Mathematics, University of Washington, 2007. Lecture Notes.

RODRIGUES, E. A. **Análise exploratória do desenvolvimento de novos produtos e produção em empresas do segmento automotivo que adotam a estratégia modular.** 2010, 98f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RONVEAUX. **Archi Expo.** Disponível em: <<http://www.archiexpo.com>>. Acesso em: 15 de setembro de 2015.

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.

SANTOS, F. R.; FERREIRA, S. C.; PIAIA, J. **Computer Aided Engineering (CAE).** Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.

SHZU, M. A. M. **Otimização de grelhas de edifícios utilizando o sistema computacional Ansys.** 2001, 144f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociência, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001.

SILVA, E. C. N. **PMR 5215 - Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos.** São Paulo: Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP, 2003. Apostila.

SILVA, J. G. S.; SOEIRO, F. J. C. P.; TRIGUEIRO, G. S.; ROBERTO, M. A. R. **Análise estrutural de chassis de veículos pesados com base no emprego do programa Ansys.** Cobenge - Rio de Janeiro: Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2001.

SINGH, A.; SONI, V.; SINGH, A. **Structural Analysis of Ladder Chassis for Higher Strength.** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, India, v. 4, issue 2, feb. 2014.

TECHNICAL F1 DICTIONARY. **Chassis explained.** 2014. Disponível em <<http://www.formula1-dictionary.net>> Acesso em: 23 de outubro de 2015.

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.

ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Script de Análise e Otimização da Treliça	61
Anexo II	Script de Análise e Otimização do Chassi Escada	65

ANEXO I: Script de Análise e Otimização da Treliça

FINISH

/CLEAR

/title, trelica_tcc

/filename, trelica_tcc,0

d=7850

E = 210000000

P = 0.3

*DIM,R,ARRAY,3

R1=0.05

R2=0.05

R3=0.05

*do,i,1,3,1

R(i)=R%i%

*enddo

/prep7

/ESHAPE,1

ET,1,LINK180

MP, EX, 1, E

MP, PRXY, 1, P

MP, DENS, 1, d

*do,i,1,3,1

SECTYPE,i,LINK

SECDATA,3.14*(R(i))**2

*enddo

n, 1, -2, 2, 0

n, 2, 0, 2, 0

n, 3, 2, 2, 0

n, 4, 0, 0, 0

e,1,4

secnum,2

e,3,4

secnum,3

e,2,4

*do,i,1,3,1

D,i,ALL

*enddo

F,4,FY,-30000

FINISH

```
/SOLU
```

```
ANTYPE,0
```

```
SOLVE
```

```
FINISH
```

```
/POST1
```

```
ETABLE,EVOLUME,VOLU,
```

```
SSUM
```

```
*GET,Volume,SSUM,,ITEM,EVOLUME
```

```
ETABLE,ETENS,LS,1
```

```
*GET,STRS1,ELEM,1,ETAB,ETENS
```

```
*GET,STRS2,ELEM,2,ETAB,ETENS
```

```
*GET,STRS3,ELEM,3,ETAB,ETENS
```

```
!*STATUS,STRS1
```

```
!*STATUS,STRS2
```

```
!*STATUS,STRS3
```

```
smax=0
```

```
*do,i,1,3,1
```

```
*if,abs(smax),Ge,abs(strs%i%),then
```

```
smax=abs(smax)
```

```
*else
```

```
smax=abs(strs%i%)
```

```
*endif
```

```
*enddo
```


*status,smax

LGWRITE,optimize,txt,C:\Users\MichelAlba\Dropbox\TCC\ANSYS

finish

/OPT

OPANL,'optimize','txt','C:\Users\MichelAlba\Dropbox\TCC\ANSYS'

OPVAR,R1,DV,0.04,0.1,0.00001

OPVAR,R2,DV,0.04,0.1,0.00001

OPVAR,R3,DV,0.04,0.1,0.00001

OPVAR,SMAX,SV,1000000,3100000,0.0001

OPVAR,VOLUME,OBJ,,0.00001

OPTYPE,FIRST

OPFRST,30

OPEXE

OPLIST,ALL

PLVAROPT,Volume

/AXLAB,X,Number of Iterations

/AXLAB,Y,Volume

/REPLOT

ANEXO II: Script de Análise e Otimização do Chassi Escada

FINISH

/CLEAR

/title, chassi_tcc

/filename, trelica_tcc,0

d = 7798

P = 0.31

E = 2.07E11

W1=0.0709

W2=0.0709

W3=0.186

t1=0.0064

t2=0.0064

t3=0.0064

/prep7

/ESHAPE,1

ET,1,BEAM189

MP,EX,1,E

MP,PRXY,1,P

MP,DENS,1,d

SECTYPE,1,BEAM,CHAN

SECDATA,W1,W2,W3,t1,t2,t3

!SECPLOT,1

k,1, 0, 0

k,2, 0.649,0

k,3, 2.134,0

k,4, 3.175,0

k,5, 3.664,0

k,6, 5.094,0

k,7, 5.749,0

k,8, 6.078,0

k,9, 6.078,0.865

k,10, 5.749,0.865

k,11, 5.094,0.865

k,12, 3.664,0.865

k,13, 3.175,0.865

k,14, 2.134,0.865

k,15, 0.649,0.865

k,16, 0, 0.865

k,17, -0.129, 0.577

k,18, -0.129, 0.288

k,100, 1.079, 0

k,200, 4.389, 0

k,300, 4.389, 0.865

k,400, 1.079, 0.865

l,1,2

l,2,100

l,100,3

l,3,4

l,4,5

l,5,200

l,200,6

l,6,7

l,7,8

l,9,10

l,10,11

l,11,300

l,300,12

l,12,13

l,13,14

l,14,400

l,400,15

l,15,16

l,16,17

l,17,18

l,18,1

l,2,15

l,3,14

l,4,13

I,5,12

I,6,11

I,7,10

TYPE,1

REAL,1

LESIZE, ALL, 0.1

LMESH,ALL

DK,100,ALL

DK,200,ALL

DK,300,ALL

DK,400,ALL

!CARGAS DISTRIBUIDAS NAS LONGARINAS

ESEL,S,ELEM,,13,120,1

SFBEAM,ALL,I,PRES,7200,,,,,0

ESEL,ALL

ESEL,S,ELEM,,121,132,1

ESEL,A,ELEM,,1,12,1

SFBEAM,ALL,I,PRES,5250,,,,,0

ESEL,ALL

FINISH

/SOLU

ANTYPE,0

SOLVE

FINISH

/POST1

!PRNSOL,U,Y !lista deslocamentos

!PRESOL,S,PRIN !lista tensões

!PLESOL,S,INT,1,1.0 !plota tensões

!PLDISP,1 !plota deslocamentos

!PLNSOL, S,EQV, 0,1.0 !TENSAO VON MISSES

!OTIMIZACAO

ETABLE,EVOLUME,VOLU,

SSUM

*GET,Volume,SSUM,,ITEM,EVOLUME

ETABLE,STRS,LS,1

*GET,STRS,ELEM,1,ETAB,STRS

!pretab,STRS

ESORT,ETAB,STRS,0,1

*GET,SMAX,sort,,max

*SET,SMAX_ABS,ABS(SMAX)

!*STATUS,SMAX_ABS

LGWRITE,optimize2,txt,C:\Users\MichelAlba\Dropbox\TCC\ANSYS

/OPT

OPANL, 'optimize2','txt','C:\Users\MichelAlba\Dropbox\TCC\ANSYS'

OPVAR,W1,DV,0.065,0.075,0.00001

OPVAR,W2,DV,0.065,0.075,0.00001

OPVAR,W3,DV,0.166,0.206,0.00001

OPVAR,t1,DV,0.0054,0.0074,0.00001

OPVAR,t2,DV,0.0054,0.0074,0.00001

OPVAR,t3,DV,0.0054,0.0074,0.00001

OPVAR,SMAX_ABS,SV,90000000,120000000,0.001

OPVAR,VOLUME,OBJ,,,0.0001

OPTYPE,FIRST

OPFRST,30

OPEXE

OPLIST,ALL

PLVAROPT,t1,t2,t3

/AXLAB,X,Iteracoes

/AXLAB,Y,Espessuras/REPLOT