

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

RAFAEL VENDRAMIN

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE CHASSI DE UM VEÍCULO GUIADO
AUTOMATICAMENTE**

CAXIAS DO SUL

2016

RAFAEL VENDRAMIN

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE CHASSI DE UM VEÍCULO GUIADO
AUTOMATICAMENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Métodos de Síntese e Otimização Aplicados ao Projeto Mecânico

Orientador: prof. Dr. Alexandre Vieceli

CAXIAS DO SUL

2016

RAFAEL VENDRAMIN

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE CHASSI DE UM VEÍCULO GUIADO
AUTOMATICAMENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Métodos de Síntese e Otimização Aplicados ao Projeto Mecânico

Aprovado em 22 / 11 / 2016

Banca Examinadora



Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Leandro Luis Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

O presente trabalho desenvolveu um estudo de otimização estrutural do chassi de um Veículo Guiado Automaticamente (AGV), com o objetivo de encontrar uma geometria ótima do componente, visando também a redução de massa da estrutura em relação ao conceito original e atendendo aos requisitos e solicitações submetidos pela aplicação. Para isso, foi realizado o levantamento dos carregamentos e condições de contorno da aplicação do chassi, bem como a discretização para análise estrutural utilizando o *software* Abaqus 6.14, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Além disso, foram aplicadas técnicas de otimização estrutural topológica e dimensional no componente utilizando o *software* Tosca Structure, até que um resultado ótimo ou aceitável fosse encontrado. Com isso, foi possível obter uma nova proposta de geometria para a estrutura, e como resultado apresentou uma massa reduzida, além de conseguir manter seu desempenho mecânico sob as mesmas restrições de projeto, se comparado ao modelo original. Por fim, obteve-se uma redução de massa de 17,6% da estrutura, o que deve propiciar uma redução de custos no produto final, bem como no aumento da eficiência e desempenho do AGV, trazendo benefícios tanto para a empresa quanto para o cliente final.

Palavras-chave: Otimização estrutural. Método dos Elementos Finitos. Redução de massa. Geometria ótima. Chassi.

ABSTRACT

The present work developed a structural optimization study of the chassis of an Automatic Guided Vehicle (AGV). The objective is to find an optimal geometry of the component, also aiming at reducing the mass of the structure in relation to the original concept and meeting the requirements and requests submitted by the application. For this, the load and boundary conditions of the chassis application were studied, as well as the discretization for structural analysis using the software Abaqus 6.14, using the Finite Element Method (FEM). In addition, topological and dimensional structural optimization techniques were applied to the component using Tosca Structure software, until an optimal or acceptable result was found. It was possible to obtain a new geometry proposal for the structure, and the mass reduction obtained is presented. The mechanical performance under the same design constraints was maintained, compared to the original model. Finally, 17.6% of mass reduction of the structure was achieved. It should lead to a reduction of costs in the final product, as well as an increase in the efficiency and performance of the AGV, bringing benefits both for the company and for the final client.

Keywords: Structural optimization. Finite Element Method. Mass reduction. Optimal geometry. Chassis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Chassi original AGV	13
Figura 2 - Aplicação industrial de sistema composto por AGVs	15
Figura 3 - Conceito de veículo elétrico com baterias recarregáveis.....	16
Figura 4 - Diagrama estático de corpo livre do veículo	18
Figura 5 - Diagrama distribuição de cargas sobre um chassi	19
Figura 6 - Modelo de discretização (malha) com elemento de forma triangular	21
Figura 7 - Elemento unidimensional	21
Figura 8 - Elementos bidimensionais	22
Figura 9 - Elemento sólido	22
Figura 10 - Definição do problema de otimização estrutural	25
Figura 11 - Tipos de otimização estrutural.....	26
Figura 12 - Otimização dimensional	27
Figura 13 - Otimização de forma.....	28
Figura 14 - Otimização topológica	29
Figura 15 - Penalização das densidades	30
Figura 16 - Processo iterativo da otimização	33
Figura 17 - Fluxograma de atividades para análise de otimização topológica.....	37
Figura 18 - Fluxograma de atividades para análise de otimização dimensional	38
Figura 19 - Domínio inicial do projeto, carregamentos e restrições	39
Figura 20 - Discretização do modelo original	42
Figura 21 - Carregamentos e restrições impostas a estrutura original.....	42
Figura 22 - Representação das frozen areas no domínio inicial.....	44
Figura 23 – Discretização do domínio inicial.....	45
Figura 24 – Distribuição do carregamento inicial sobre a estrutura.....	45
Figura 25 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura.....	47
Figura 26 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura	48
Figura 27 - Otimização topológica com 70% de restrição de volume	48
Figura 28 - Otimização topológica com 50% de restrição de volume	49
Figura 29 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume	50
Figura 30 - Segunda distribuição de carregamentos.....	50
Figura 31 - Otimização topológica com 70% de restrição de volume	51
Figura 32 - Otimização topológica com 50% de restrição de volume	51

Figura 33 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume	52
Figura 34 - Terceira distribuição de carregamentos	52
Figura 35 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume	53
Figura 36 - Quarta distribuição de carregamentos	54
Figura 37 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume	55
Figura 38 - Modelo em CAD de chassi do AGV	56
Figura 39 - Discretização do novo design de chassi do AGV	56
Figura 40 - Distribuição de carregamentos para o novo design de chassi.....	57
Figura 41 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura.....	58
Figura 42 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura	58
Figura 43 - Exemplo de definição de faixas de espessuras no software Tosca Structure	59
Figura 44 - Resultado da otimização dimensional utilizando o software Tosca Structure	60
Figura 45 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura	62
Figura 46 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura	62
Figura 47 - Discretização do modelo final de geometria de chassi	64
Figura 48 – Carregamentos impostos a geometria final de chassi	64
Figura 49 - Geometria final da estrutura de chassi do AGV	65
Figura 50 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura.....	65
Figura 51 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura	66
Figura 52 - Energia de deformação versus iterações.....	75

LISTA DE SIGLAS

AGV	Veículo Guiado Automaticamente
BFGS	<i>Broyden Fletcher Goldfarb Shanno</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CCET	Centro de Ciências Exatas e da Tecnologia
CG	Centro de Gravidade
ESO	<i>Evolutionary Structural Optimization</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos, denominado também com FEA – <i>Finite Element Analysis</i>
MLA	Multiplicador de Lagrange Aumentado
MMA	Método das Assíntotas Móveis
OD	Otimização Dimensional
OT	Otimização Topológica
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RS	Rio Grande do Sul
SIMP	<i>Simple Isotropic Material with Penalization</i>
TSA	<i>Topological Sensitivity Analysis</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	AMBIENTE DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO	12
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	12
1.3	OBJETIVO GERAL	14
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PROJETOS DE AGVs	15
2.1.1	Veículos elétricos puros e autônomos	16
2.1.2	Princípios e análise de chassi	17
2.1.3	Distribuição de carga	17
2.2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .	19
2.2.1	Discretização do problema	20
2.2.2	Tipos de elementos	21
2.2.3	MEF - Análise Linear	22
2.3	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	24
2.3.1	Caracterização de técnicas de otimização estrutural	26
2.3.1.1	Otimização dimensional.....	27
2.3.1.2	Otimização de forma	28
2.3.1.3	Otimização topológica	28
2.3.1.3.1	<i>Minimização da flexibilidade</i>	30
2.3.2	Modelo matemático aplicado à otimização estrutural	31
2.3.2.1	Algoritmo geral de otimização estrutural.....	32
2.3.2.2	Problemas de otimização sem restrições.....	33
2.3.2.3	Problemas de otimização com restrições	33
2.3.2.4	Linearização de problemas com restrições	35
2.3.2.5	Método das Assíntotas Móveis - MMA.....	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO COMPONENTE ORIGINAL	38
3.1.1	Análise estrutural I: validação e análise do modelo original	41
3.1.1.1	Pré-processamento para análise estrutural I.....	41

3.2	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO CHASSI DE UM AGV	43
3.2.1	Otimização topológica do chassi	43
3.2.1.1	Pré-processamento da otimização topológica	44
3.2.1.1.1	<i>Carregamento inicial sobre a estrutura</i>	<i>45</i>
3.2.1.1.2	<i>Critérios para distribuição de cargas.....</i>	<i>46</i>
3.2.2	Otimização dimensional do chassi	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	RESULTADO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DO MODELO ORIGINAL	47
4.2	ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	48
4.2.1	Carregamento inicial: restrição de 70% do volume inicial.....	48
4.2.2	Carregamento inicial: restrição de 50% do volume inicial.....	49
4.2.3	Carregamento inicial: restrição de 30% do volume inicial.....	49
4.2.4	Segunda distribuição de carregamento.....	50
4.2.4.1	Segunda distribuição de carregamento: restrição de 70% do volume inicial	50
4.2.4.2	Segunda distribuição de carregamento: restrição de 50% do volume inicial	51
4.2.4.3	Segunda distribuição de carregamento: restrição de 30% do volume inicial	52
4.2.5	Terceira distribuição de carregamento.....	52
4.2.5.1	Terceira distribuição de carregamento: restrição de 30% do volume inicial.....	53
4.2.6	Quarta distribuição de carregamento	53
4.2.6.1	Quarta distribuição de carregamento: restrição de 30% do volume inicial	54
4.3	GEOMETRIA DE CHASSI OBTIDA PELA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	55
4.3.1	Análise estrutural II: validação e análise da nova geometria de chassi.....	56
4.3.1.1	Pré-processamento da análise estrutural II.....	56
4.3.1.2	Resultados da análise estrutural II	57
4.4	ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL (OD).58	
4.4.1	Pré-processamento da otimização dimensional.....	59
4.4.2	Análise de resultados para a otimização dimensional	60
4.4.3	Análise estrutural III: validação e análise do chassi após OD.....	61
4.4.4	Análise estrutural IV: validação e análise final do chassi.....	63
4.4.4.1	Pré-processamento da análise estrutural IV	63
4.4.4.2	Resultados da análise estrutural IV	65
4.4.5	Comparação de resultado entre as análises estruturais	66

5	CONCLUSÃO	68
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	APÊNDICE A – ENERGIA DE DEFORMAÇÃO VERSUS ITERAÇÕES	75

1 INTRODUÇÃO

Aumento da produtividade, diminuição dos custos operacionais, implementação de tecnologias que substituam a mão-de-obra do funcionário, estes são alguns dos termos mais trabalhados e pensados no meio industrial brasileiro e mundial. Ao longo dos anos percebe-se a tendência pela robotização e automação industrial, em uma tentativa de substituir a mão-de-obra por recursos tecnológicos, com o intuito de aumentar a competitividade das empresas, melhorar qualidade, diminuir prazos de entrega, entre outros.

Segundo Sampaio (2007), em empresas europeias é muito comum a utilização de veículos guiados automaticamente (AGV). Porém no Brasil, apesar de se ter um grande número de empresas que já utilizam esta tecnologia, este mercado apresenta grande potencial de crescimento e poderia ser melhor explorado. Mesmo sendo considerado um equipamento com elevado valor agregado, a médio prazo tem-se retorno do investimento, devido as suas vantagens.

De acordo com Fazlollahtabar e Saidi-Mehrabad (2013), o AGV é um veículo móvel guiado automaticamente, ou seja, não necessita de operador, cuja função é requerida em ambientes, internos ou externos, que necessitam de transporte de produtos na produção e em armazéns. É programado para transportar materiais através de rotas definidas de recolhimento e entrega de produtos em instalações de manufatura distribuição, ou até mesmo terminais portuários. Surgem como uma alternativa à solução clássica de ter empilhadeiras e demais sistemas convencionais, a transportar matérias-primas e produtos no *shop floor* da fábrica.

Alguns dos principais benefícios na utilização de AGVs estão na redução dos custos com mão-de-obra, apresentam maior flexibilidade no manuseio e transporte dos materiais que os meios convencionais, melhor organização da programação do processo, melhor utilização do espaço disponível, maior segurança dos sistemas, aumento da produção e controle de inventários mais eficaz (VENTURA; PAZHANI; MENDOZA, 2015).

Os AGVs são veículos elétricos e possuem como fonte de energia baterias recarregáveis, são dotados de sensores de segurança de alta confiabilidade, e sensores de localização para se locomoverem, além de outros componentes eletrônicos para controle do veículo. Possui uma estrutura mecânica capaz de suportar os carregamentos externos e esforços de movimentação, e para que isto aconteça, uma estrutura tubular soldada faz a função de chassi do veículo.

Neste contexto, o presente trabalho visa desenvolver o projeto do chassi de um AGV, utilizando ferramentas de métodos de elementos finitos (MEF) e otimização, com o intuito de

se obter uma geometria ótima, ou seja, que atenda aos requisitos de integridade estrutural quando em serviço, e ao mesmo tempo possua massa reduzida.

1.1 AMBIENTE DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

A Spark AG Software e Automação, é uma empresa desenvolvedora de soluções para a intralogística industrial e de armazéns. Localizada na cidade de Nova Prata, no estado do Rio Grande do Sul (RS), possui em seu portfólio de produtos, desde software de gerenciamento de estoque e movimentação de materiais, até equipamentos para movimentação de cargas e produtos, com alta tecnologia embarcada, acompanhando e seguindo a linha de produtos desenvolvidos na Europa e Estados Unidos. Para o modelamento e desenvolvimento dos projetos da empresa, é utilizado o SolidWorks da Dassault Systèmes, como software de *Computer Aided Design* (CAD).

A Universidade de Caxias do Sul (UCS), é uma instituição de ensino superior privado atuante na região nordeste do estado do RS, possuindo carácter comunitário e regional. Mantém unidades em nove cidades do estado, sendo que o Campus-Sede está localizado na cidade de Caxias do Sul. A UCS disponibiliza aos alunos, laboratórios nas mais variadas áreas do conhecimento, integrados ao Centro de Ciências Exatas e da Tecnologia (CCET). Nestes laboratórios estão disponíveis software de última geração para simulação virtual, na área de elementos finitos com o Abaqus da Dassault Systèmes, como software de *Computer Aided Engineering* (CAE), e otimização estrutural com o Tosca Structure da Dassault Systèmes.

Em vista disso, o desenvolvimento do trabalho será realizado em duas partes, primeiramente junto a empresa serão definidos os pré-requisitos de projeto, carregamentos, condições de contorno e modelo de AGV, bem como o desenvolvimento do modelo virtual em software CAD. Posteriormente, na Instituição de Ensino serão realizadas as análises virtuais de elementos finitos e otimização estrutural.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A busca pela redução de massa de equipamentos, peças e sistemas vem se tornando um dos pilares no desenvolvimento de produtos e em áreas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), visando a diminuição de custos de fabricação, aumento de produtividade, otimização de processos, aumento de eficiência, desempenho e autonomia dos produtos, tudo isso para alcançar um único objetivo, aumentar a competitividade das empresas.

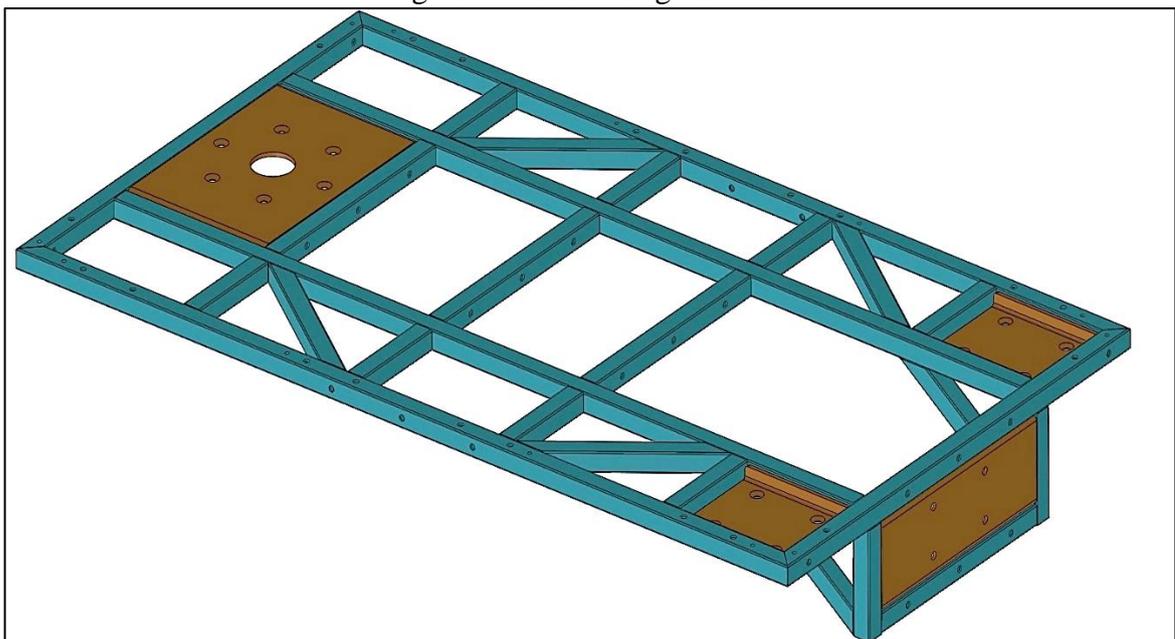
Atualmente, projetar um sistema que desempenhe sua função corretamente já não é mais suficiente, mas sim é preciso projetar o *melhor* sistema. A ideia de *melhor* submete a um sistema que seja versátil, eficiente e tenha uma boa relação custo-benefício. Para alcançar este objetivo o engenheiro deve aplicar ferramentas analíticas, numéricas e experimentais. Conceitos de otimização e minimização são empregados para implementar uma sistemática de busca por soluções ótimas (COUTINHO, 2006).

Com o desenvolvimento de projetos de AGVs isso não seria diferente, e a demanda de projetos inovadores com massa reduzida, se tornou um ponto decisivo de competitividade entre os fabricantes. Por se tratar de um veículo elétrico é necessário que se tenha a melhor relação peso *versus* potência do equipamento, e a busca pela geometria ótima é essencial para o sucesso do projeto.

Neste sentido, a utilização de software de cálculo estrutural utilizando o MEF, vem ganhando destaque e importância cada vez maior, assim como software de otimização para redução de massa, e busca pela melhor geometria.

O conjunto que será trabalhado, é o chassi do AGV, ilustrado conforme a Figura 1, pelo fato de ser a parte que representa o maior percentual de massa em comparação aos outros componentes do projeto. O intuito é buscar uma geometria que seja capaz de suportar os carregamentos e que garanta a integridade estrutural, e ao mesmo tempo tenha massa menor que o modelo original.

Figura 1 – Chassi original AGV



Fonte: Spark AG Software e Automação (2016).

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver a otimização estrutural do chassi de um AGV, visando uma redução da massa e maximização da rigidez.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para se alcançar o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) compreender os conceitos de otimização estrutural, neste caso topológica e dimensional, para realizar análises de otimização em *software*;
- b) realizar o levantamento dos carregamentos e condições de contorno aplicados ao desenvolvimento da estrutura de chassi do AGV;
- c) definir uma função objetivo e as restrições do problema, neste caso, maximização da rigidez com restrição de volume;
- d) utilizar o *software* Tosca Structure para realizar otimização topológica e dimensional;
- e) modelar em *software* CAD uma nova geometria, baseada na topologia obtida do processo de otimização;
- f) executar análise estrutural do chassi do AGV utilizando MEF em *software* CAE, comparando os resultados do modelo original com o novo modelo proposto após o processo de otimização;
- g) avaliar e discutir os resultados obtidos da análise estrutural, definindo se a nova geometria está apta a sua aplicação ou requer modificações para posterior validação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo encontra-se a revisão bibliográfica necessária para fundamentar a análise de otimização do projeto estrutural de um AGV, utilizando o método de elementos finitos e algoritmos de otimização geométrica e/ou topológica.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PROJETOS DE AGVs

O AGV é um dispositivo móvel utilizado para o transporte automático de materiais em ambientes de manufatura, desenvolvido para receber e executar instruções, seguir um caminho ou trajetória, receber e distribuir materiais. Os comandos para um AGV indicam para onde o veículo deve se dirigir, como chegar e o que deve fazer quando estiver no destino programado (ROCHA, 1998).

Para Pérez (2010), os AGVs são veículos industriais desenvolvidos nos mais variados tamanhos, de tração elétrica, sem necessidade de operador, e com diferentes tipos de dispositivos para manipulação de materiais ou cargas. A Figura 2, representa um exemplo de aplicação industrial, de um sistema de movimentação de produtos composto por AGVs em uma linha de montagem.

Figura 2 - Aplicação industrial de sistema composto por AGVs



Fonte: DS Automotion (2010).

O AGV se locomove de forma autônoma e como fonte de energia possui um sistema de baterias embarcado, ou seja, permite que o equipamento possa trabalhar até vinte e quatro horas por dia, sendo assim muito mais eficiente que o modelo convencional, realizado por

equipamentos manuais e com necessidade de intervenção humana. Além disso, tem-se um melhor controle sobre as operações, já que estas são controladas por computador, assim como dados compilados de volume de material, oferecendo uma visão muito mais real do estoque e da logística da fábrica (KIM; TANCHOCO; KOO, 1999).

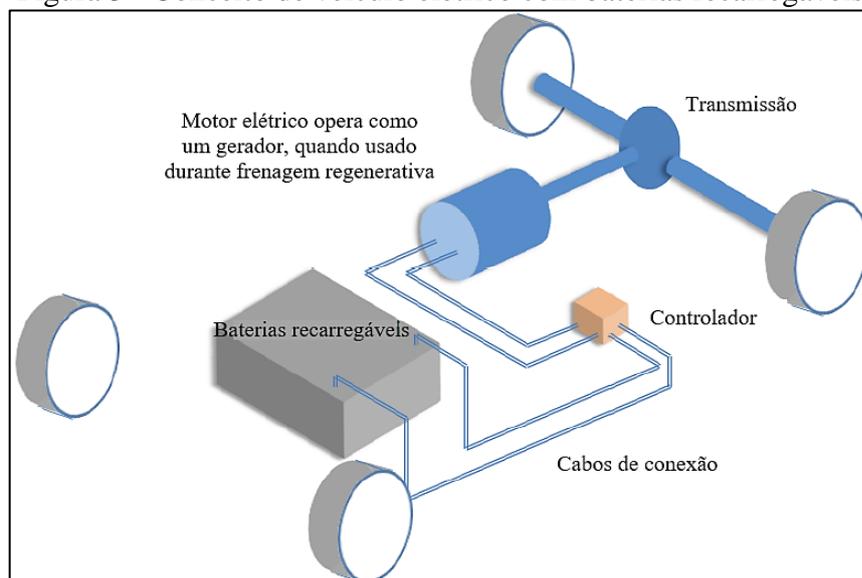
Conforme Cano (2006), um AGV é apropriado para trabalhar em ambientes industriais, nos quais diferentes tipos de materiais são movimentados de vários pontos de carga e descarga. Com os avanços tecnológicos, atualmente os AGVs são desenvolvidos com tecnologia eletrônica e computacional, possuindo sistemas de navegação sensorial, controles inteligentes, gerenciamento total do sistema e sistemas de segurança.

2.1.1 Veículos elétricos puros e autônomos

O conceito de veículo elétrico a bateria é relativamente simples. O sistema de tração é composto por baterias eletroquímicas para o armazenamento de energia, motor elétrico e um controlador/conversor de potência. A recarga é feita normalmente por meio da rede elétrica, e pode ser realizada por uma unidade de recarga transportada a bordo ou um ponto de recarga. O controlador converte a energia da bateria, adequando-se as características do motor e controlando a potência fornecida, conseqüentemente a velocidade e reabastecimento (TANAKA, 2013).

A Figura 3 representa de forma simples, esquematicamente, o projeto de um veículo elétrico.

Figura 3 - Conceito de veículo elétrico com baterias recarregáveis



Fonte: Tanaka (2013).

Veículos elétricos puros e autônomos utilizam motores elétricos como forma de tração e baterias eletroquímicas como fonte energética. Os motores elétricos comparados aos motores a combustão, possuem diversas vantagens, como: maior eficiência energética, menor produção de poluentes, podem ser utilizados em ambientes fechados, são mais silenciosos, apresentam simplicidade e facilidade de manutenção, capacidade de desenvolver elevado torque em baixas rotações, causam menos fadiga ao motorista por apresentarem menos vibração, bem como não consomem energia quando fora de operação. Porém apresentam algumas desvantagens, como: preço elevado, menor autonomia, substituição das baterias ao final do ciclo de vida e tempo de reabastecimento (TANAKA, 2013).

2.1.2 Princípios e análise de chassi

O chassi tem como principais funções, em qualquer área de aplicação, dar suporte aos demais componentes que compõem um determinado conjunto, além de ser a estrutura responsável pela rigidez. Este elemento estrutural não tem sua utilização apenas na indústria automotiva ou de utilitários rodoviários, como também em outros segmentos, a exemplo em eletroeletrônicos. Pode ser projetado e desenvolvido nas mais variadas formas, para atender seus requisitos de funcionalidade, através da utilização de diferentes materiais, de acordo com a sua aplicação e as solicitações a que está submetido (GRISON, 2005).

Um AGV possui como principal funcionalidade o transporte de carga, e o desenvolvimento de um chassi capaz de resistir e permanecer íntegro à aplicação dos carregamentos externos e demais esforços de movimentação é imprescindível para a validação do projeto.

2.1.3 Distribuição de carga

Segundo Karaoglu e Sefa (2002), todos os veículos estão sujeitos a cargas estáticas e dinâmicas. O peso do próprio veículo, a carga que será transportada e eventualmente das cargas do sistema de acoplamento (reboque), resultam na carga estática do sistema. Cargas simétricas atuam predominantemente no sentido vertical, causando a flexão das longarinas. Cargas que agem sobre o plano do quadro ocasionam a flexão das longarinas e das travessas.

Segundo Caviraghi (2005), quando os pesos e as posições dos componentes forem conhecidas, é possível determinar o peso total e o centro de gravidade (CG) do veículo. Costumeiramente, adota-se um sistema de coordenadas, com x no sentido longitudinal e a linha

zero na linha central do eixo dianteiro ou traseiro. Sob o ponto de vista geral do veículo, a posição do centro de gravidade no sentido longitudinal, representada como a na Figura 4, pode ser determinada por exemplo, pelo somatório dos momentos em torno do eixo traseiro, semelhante ao método utilizado para o chassi, e pode ser expresso conforme a Equação 1.

$$\sum M_f = -a.W + L.N_f = 0 \quad (\text{eq.1})$$

$$W = N_f + N_r \quad (\text{eq.2})$$

Onde:

a é a distância do CG do veículo à linha zero (eixo traseiro);

N_r é a reação no eixo traseiro;

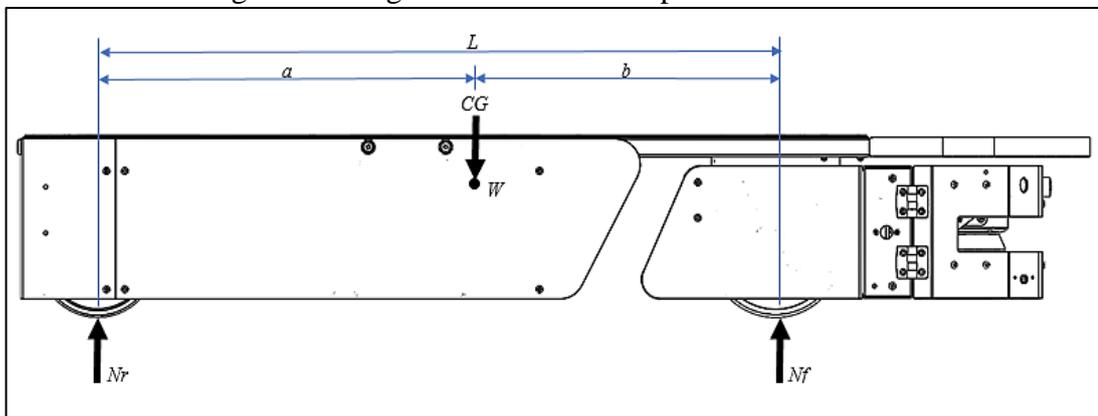
N_f é a reação no eixo dianteiro;

W é o peso total do veículo;

L é a distância entre eixos;

M_f é o momento em torno do eixo traseiro.

Figura 4 - Diagrama estático de corpo livre do veículo



Fonte: adaptado de Caviraghi (2005).

A Figura 4 ilustra o peso W do veículo localizado no CG e as reações nos eixos. Para um corpo livre como o da Figura 4, que se encontra em equilíbrio, a Equação 2 é verdadeira e satisfatória para esta aplicação, isto é, com força vertical igual a zero.

Fazendo a soma das contribuições de cada componente é possível determinar o momento total de forças em torno da linha zero, e isso pode ser expresso conforme a Equação 3 e o diagrama de cargas segundo a Figura 5 (CAVIRAGHI, 2005).

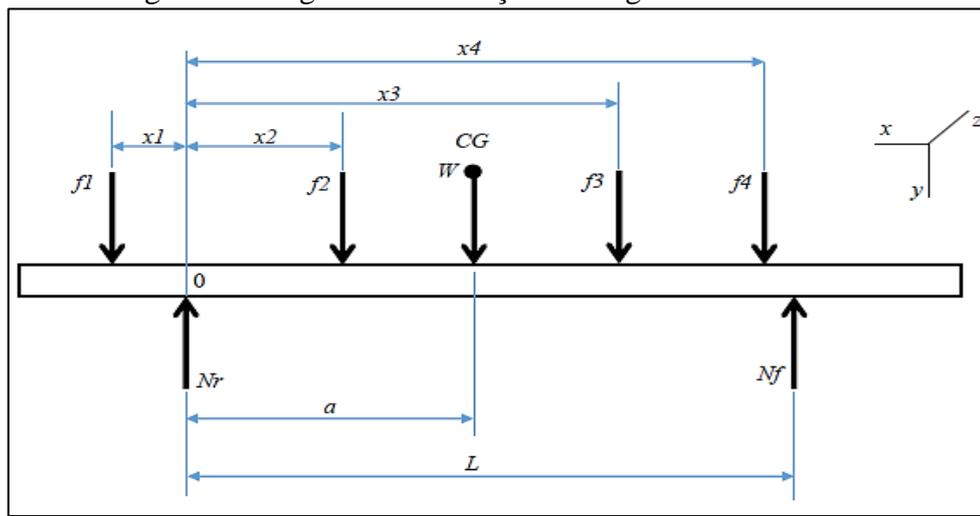
$$a = \frac{\sum x_k \cdot f_{ky} + N_f \cdot L}{W} \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

f_{ky} é a força peso do componente k , no sentido de y ;

x_k é a distância do CG do componente k à linha zero (eixo traseiro).

Figura 5 - Diagrama distribuição de cargas sobre um chassi



Fonte: adaptado de Caviraghi (2005).

2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Utilizando métodos analíticos clássicos, é possível desenvolver cálculos de resposta exata para deslocamentos, deformações e tensões em qualquer ponto de uma estrutura. Porém este tipo de solução é adequada somente em alguns casos, que possuem geometria, carregamento e condições de apoio simples, pois não é possível adaptar os métodos analíticos para estruturas complexas. Por isso, o Método de Elementos Finitos (MEF) é um caminho alternativo aos procedimentos analíticos, possuindo um caráter mais generalizado e com procedimentos aproximados, independente de forma e condições de carregamento da estrutura, mas mantendo uma precisão aceitável do problema de engenharia (ALVES FILHO, 2012).

Hearn (1997) sugere três passos para a formulação e implementação computacional de uma análise de elementos finitos independente do problema, sendo eles:

- a) pré-processamento - etapa que compete ao analista (usuário) responsável pela análise, que deve determinar os seguintes aspectos: identificação de possibilidade de análise pelo método dos elementos finitos, identificação do tipo de análise (plano de tensão, linear elástica, dinâmica, não-linear, etc.), idealização e escolha

do tipo de elemento (viga, casca, sólido, etc.), discretização através da criação da malha de elementos finitos, criação do modelo de comportamento do material, aplicação das condições de contorno, criação de arquivos de dados e determinação do tipo de saídas necessárias;

- b) processamento - etapa realizada pelo solver do software CAE, onde são definidos aspectos como: formulação das matrizes características dos elementos, montagem das matrizes dos elementos para produzir as equações da estrutura, solução das equações de equilíbrio para fornecer valores das variáveis de campo (deslocamentos), computação de elementos resultantes (deformações);
- c) pós-processamento - etapa que compete ao analista (usuário) responsável pela análise, que deve: interpretar e validar os resultados, e caso seja necessário modificar e rodar a análise novamente.

Sob o ponto de vista de Azevedo (2003), para a resolução de problemas de análise de estruturas através do MEF, deve-se levar em conta alguns aspectos como: a definição da geometria, o tipo de material, a aplicação do carregamento e o estabelecimento das condições de contorno. Além disso, antes de iniciar a análise, é necessário definir se a análise será estática ou dinâmica, linear ou não linear, o uso de algoritmo implícito ou explícito, dentre outros.

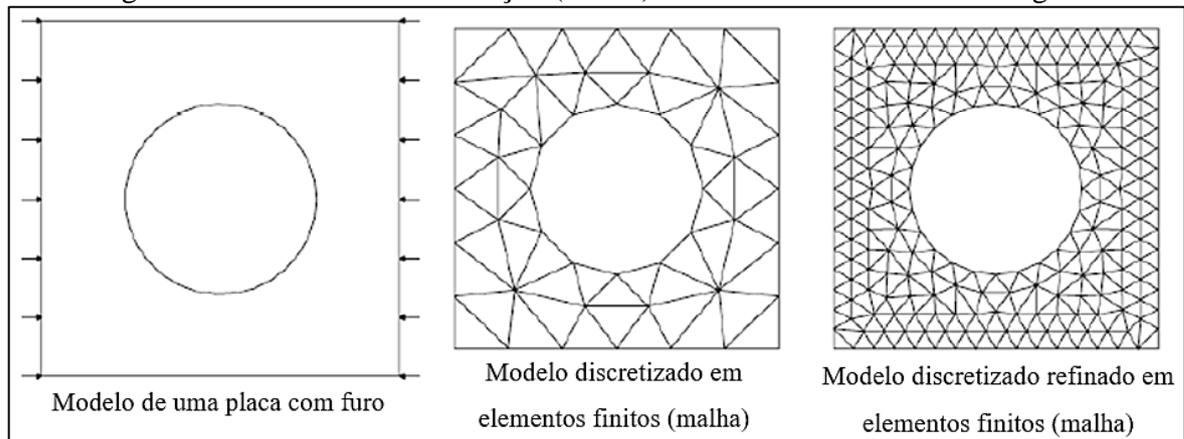
2.2.1 Discretização do problema

Segundo Silva (2001), o MEF é uma metodologia de aproximação numérica utilizada para a resolução de equações diferenciais por integração. Esse método é aplicado pela divisão de um sistema ou domínio, em partes discretas menores (subdomínios), de forma a ser chamado simplesmente de “elementos”.

Quando o domínio possui apenas uma dimensão, os elementos são necessariamente, segmentos de reta. No caso de duas e três dimensões, a divisão em subdomínios forma a chamada malha, formando polígonos e poliedros, respectivamente (LUBLINER, 1990).

Para Souza (2003), os elementos que representam o sistema físico são interligados entre si por meio dos chamados pontos nodais (nós), os quais podem existir também internamente ao elemento e não somente nas conexões. O conjunto dos elementos finitos e pontos nodais formam a malha, a qual pode ser representada conforme mostra a Figura 6, no caso de elementos triangulares, com dois níveis de refinamento, ou seja, há um aumento do número de elementos em tamanhos menores, possibilitando uma melhor representação da peça.

Figura 6 - Modelo de discretização (malha) com elemento de forma triangular



Fonte: adaptado de Fish e Belytschko (2007).

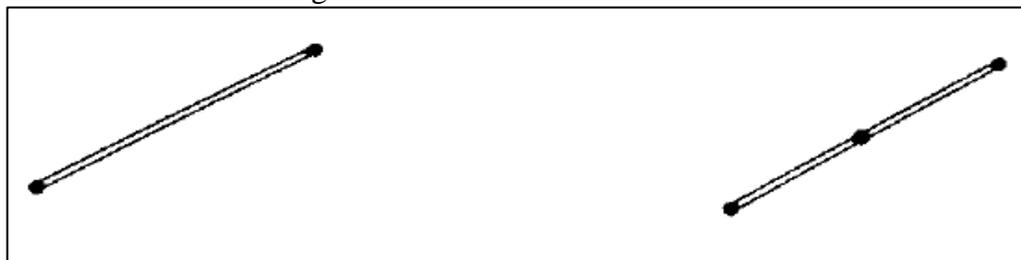
Segundo Perini (2008), há a possibilidade de se modelar problemas de aplicações em MEF de diversas maneiras, visando se obter um resultado confiável e uma análise simples. É necessário evitar a aplicação de elementos com elevado refinamento, pois isso pode fazer com que o modelo fique excessivamente complexo ou distorcer os resultados.

2.2.2 Tipos de elementos

Sob o ponto de vista de Shigley, Budynas e Nisbett (2011), os elementos mais comuns para aplicações em MEF, são: elemento linear, elemento de superfície e elemento sólido.

Conforme Fish e Belytscho (2007), elementos lineares ou elementos de viga, conforme ilustra a Figura 7, são utilizados quando a geometria é unidimensional.

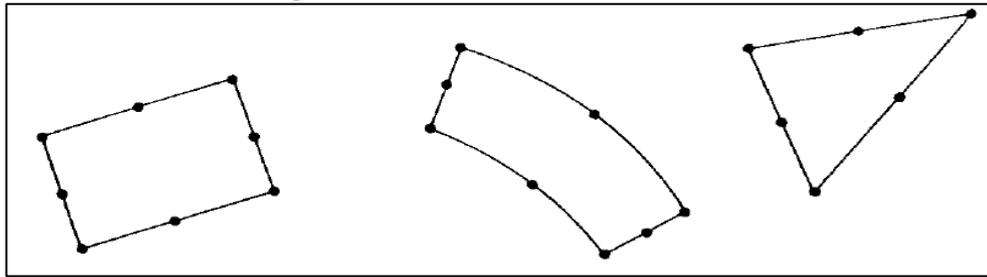
Figura 7 - Elemento unidimensional



Fonte: Bathe (1982).

Conforme Sousa (2011), elementos do tipo casca são utilizados quando a espessura da estrutura modelada for muito menor que as outras dimensões, podendo ser triangulares ou quadrangulares de primeira, de segunda ou terceira ordem, conforme ilustra a Figura 8.

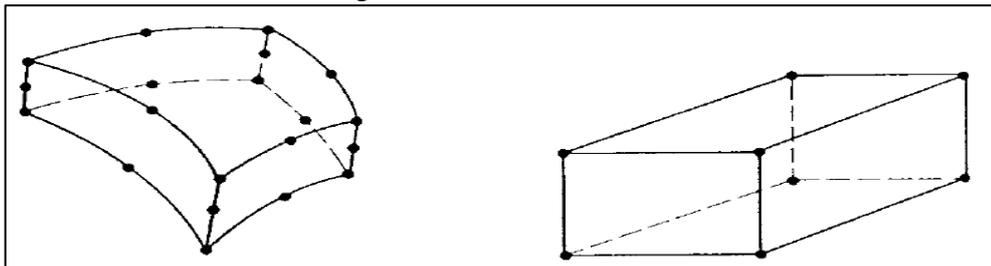
Figura 8 - Elementos bidimensionais



Fonte: Bathe (1982).

Segundo Sousa (2011), normalmente quando se deseja fazer análises de tensão e deslocamento, em uma estrutura com geometria complexa, utilizam-se elementos sólidos, conforme representa a Figura 9. Esse tipo de elemento pode ser de primeira, de segunda e terceira ordem, e do tipo prismático com forma triangular, hexaédrico ou também sólido tetraédrico.

Figura 9 - Elemento sólido



Fonte: Bathe (1982).

2.2.3 MEF - Análise Linear

De acordo com Bathe (1996), a fundamentação teórica que envolve a análise linear de elementos finitos, descreve que os deslocamentos oriundos dos carregamentos a qual a estrutura está submetida, são infinitesimalmente pequenos e as propriedades mecânicas dos materiais da estrutura em questão apresenta somente as características lineares elásticas. Além disso, considera-se que as condições de contorno permanecem inalteradas durante a aplicação dos carregamentos no modelo de elementos finitos da estrutura. Utilizando equações de equilíbrio de um sistema de elementos finitos, é possível chegar a uma formulação matricial, conforme Equação 4.

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (\text{eq.4})$$

Onde:

$\{F\}$ é o vetor de forças nodais;

$[K]$ é a matriz de rigidez do sistema;

$\{u\}$ é o vetor de deslocamentos nodais.

A rigidez da estrutura ou de um elemento individual da estrutura, pode ser determinada pela relação força-deslocamento, ou seja, é possível determinar a rigidez através da relação entre a força aplicada e o deslocamento medido, produzindo assim uma razão quantitativa, denominada constante elástica. Sendo assim, conhecendo a rigidez da estrutura, é possível definir previamente a relação força-deslocamento. Ou seja, conhecendo a força necessária para realizar um deslocamento unitário, é possível saber para qualquer outro deslocamento, a força resultante no regime linear. Em se tratando de uma análise linear, a rigidez da estrutura se mantém constante, à medida que é aplicado o carregamento, ou seja, a rigidez se mantém inalterada durante o processo de carregamento, independente dos deslocamentos (ALVES FILHO, 2012).

De acordo com Hearn (1997), admitindo um sistema ortogonal de coordenadas, o equilíbrio estático define que as forças de reação e momentos devem equilibrar os carregamentos externos aplicados. No MEF este argumento estende-se a todos os nós do modelo, ou seja, os carregamentos externos ou reações devem ser igual ao somatório dos carregamentos internos dos elementos, conforme mostra a Equação 5.

$$\{P_j\} = \sum_{e=1}^m \{S^e\} \quad (\text{eq.5})$$

Onde, $\{S^e\}$ representa o vetor de carregamentos internos do nó j , para todos os elementos m , ligados ao nó j e $\{P_j\}$ representa o vetor de carregamentos externos.

O deslocamento, u , dentro do elemento é regido por meio de uma função contínua, em função de uma determinada posição, x , e pode ser expressa por uma condição de compatibilidade, segundo a Equação 6 (HEARN, 1997).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{eq.6})$$

Onde:

ε_{xx} é a deformação para a posição x .

Da mesma forma para as outras direções, conforme Bathe (1996), a Equação 7, representa as deformações ε^T , correspondentes aos deslocamentos.

$$\varepsilon^T = [\varepsilon_{XX} \ \varepsilon_{YY} \ \varepsilon_{ZZ} \ \gamma_{XY} \ \gamma_{YZ} \ \gamma_{ZX}] \quad (\text{eq.7})$$

Conforme Bathe (1996), o método dos deslocamentos é utilizado como formulação padrão, para o cálculo das soluções de elementos finitos em sólidos. Por meio da adição da rigidez de cada elemento é possível determinar a rigidez total da estrutura, e é representada pela Equação 8.

$$K = \sum_i K_i^e \quad (\text{eq.8})$$

Onde, K representa a rigidez total da estrutura, e K_i^e representa a parcela de rigidez de cada elemento i que compõe a estrutura.

Por meio do produto da rigidez do elemento K_i^e com os deslocamentos, é possível determinar as forças atuantes nos nós. A Equação 9, segundo Hearn (1997), representa as tensões associadas conforme a Lei de Hooke, para o caso em que não há tensões iniciais.

$$\sigma_{XX} = \varepsilon_{XX} E \quad (\text{eq.9})$$

Onde:

σ_{XX} é a tensão associada aos deslocamentos na direção x ;

E é o módulo de elasticidade.

2.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

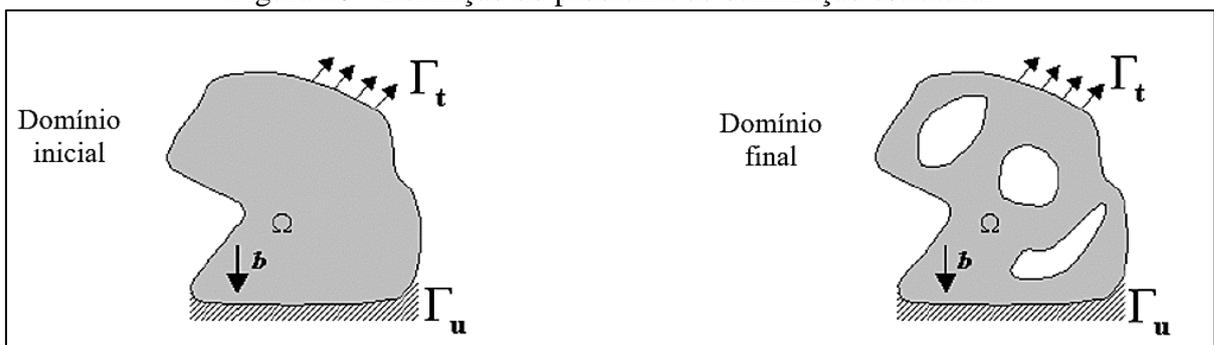
Todo o ímpeto da engenharia moderna de uma empresa, tem se concentrado no desenvolvimento de produtos altamente confiáveis, eficientes e com massa reduzida, tudo isso com o menor tempo de desenvolvimento possível. Para lidar com todos estes requisitos de projeto, as empresas estão adotando ferramentas de otimização estrutural, em suas atividades de desenvolvimento de projeto e design de produto. Ferramentas de otimização estrutural compreendem várias aplicações no design e desenvolvimento das atividades, por causa da crescente exigência de se ter produtos leves e com integridade estrutural garantida durante a sua aplicação (SALEEM; LU; YUQING, 2008).

Segundo Silva (2002), a otimização estrutural aplicada ao projeto de componentes mecânicos, consiste em utilizar-se de métodos computacionais para a obtenção de dimensões, forma ou topologia ótima do problema em questão. Atualmente esta técnica tem sua importância inegável na redução de custos, e não se limita somente à otimização do projeto mecânico do componente, mas se estende a toda a cadeia produtiva da empresa, pois tem-se uma economia de material utilizado na fabricação, aumento de produtividade, facilita o transporte, entre outros. As reduções de peso e aumento de desempenho dos componentes mecânicos obtidos com a aplicação de técnicas de otimização, tem-se tornado decisivo para definir a competitividade das indústrias da área metal-mecânica, a nível mundial.

A solução de problemas de otimização estrutural é extremamente importante na busca de concepções estruturais com baixo custo, alto desempenho, de fácil execução e manutenção, e além disso, mais recentemente, incorporando aspectos ambientais, desde sua construção até sua utilização. Na quase totalidade dos casos, estes problemas apresentam restrições de várias naturezas que devem ser satisfeitas de modo que se obtenha uma solução candidata viável (VARGAS et al., 2016).

Na Figura 10, é ilustrado um objeto sob a influência de sua força-peso (b) com um domínio inicial (Ω) e sujeito a condições de carregamento (Γ_t) e restrições (Γ_u). Após sofrer um processo de otimização, este mesmo objeto é mostrado sob a forma do domínio final alterado.

Figura 10 - Definição do problema de otimização estrutural



Fonte: adaptado de Costa Jr. e Alves (2002).

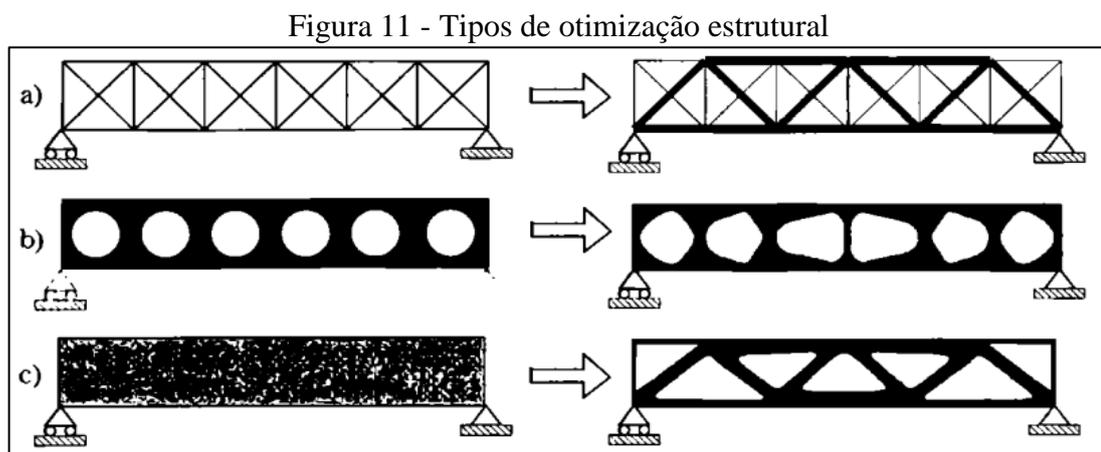
Sob o ponto de vista de Perini (2008), a aplicação da metodologia de otimização estrutural, tem se tornado cada vez mais comum no auxílio ao desenvolvimento de novos produtos. As premissas de projeto de se ter baixo custo e elevada qualidade em um espaço de tempo reduzido para o desenvolvimento, tem se tornado uma rotina na maioria das empresas. Com isso, a aplicação de metodologias em análises estruturais por elementos finitos e otimização, tem se difundido rapidamente no projeto de novos produtos. Com a combinação

das duas ferramentas, elementos finitos e otimização, é possível reduzir custos evitando o superdimensionamento, aumentar o desempenho dos produtos e diminuir o tempo de desenvolvimento do projeto.

2.3.1 Caracterização de técnicas de otimização estrutural

Em um problema de engenharia, conforme o parâmetro que se quer maximizar ou minimizar por meio da otimização, faz-se relação a uma função objetivo. No caso de um componente mecânico, a função objetivo pode ser, por exemplo, a rigidez, a frequência de ressonância, o volume, a massa, entre outros. As restrições são os limites impostos à solução da otimização, e pode ser representado por exemplo, pela máxima massa ou volume que a peça pode apresentar, deslocamento máximo, ou o valor máximo de tensão que pode ocorrer em um ponto específico. Ou seja, as restrições impõem uma solução de compromisso na melhora da função objetivo. Com relação as variáveis do projeto, são os parâmetros que podem sofrer alterações na otimização, podendo ser por exemplo, as dimensões ou razões de dimensões, parâmetros matemáticos de uma curva ou superfície que representam a forma do componente, ou a distribuição do material no domínio da peça, entre outros (HAFTKA; GÜRDAL, 1992).

Conforme o grau de complexidade do problema, existem três classificações diferentes quanto ao tipo de otimização estrutural. A Figura 11 mostra os três tipos de otimização, que podem ser: otimização dimensional (a), otimização de forma (b) e otimização topológica (c).



Fonte: Bendsoe e Sigmund (2003).

Com relação aos problemas em que é aplicada a otimização dimensional, não há modificações na topologia da estrutura ou na sua forma. As propriedades da rigidez do elemento são as variáveis do projeto, como: área da seção transversal, espessura da placa, momento de

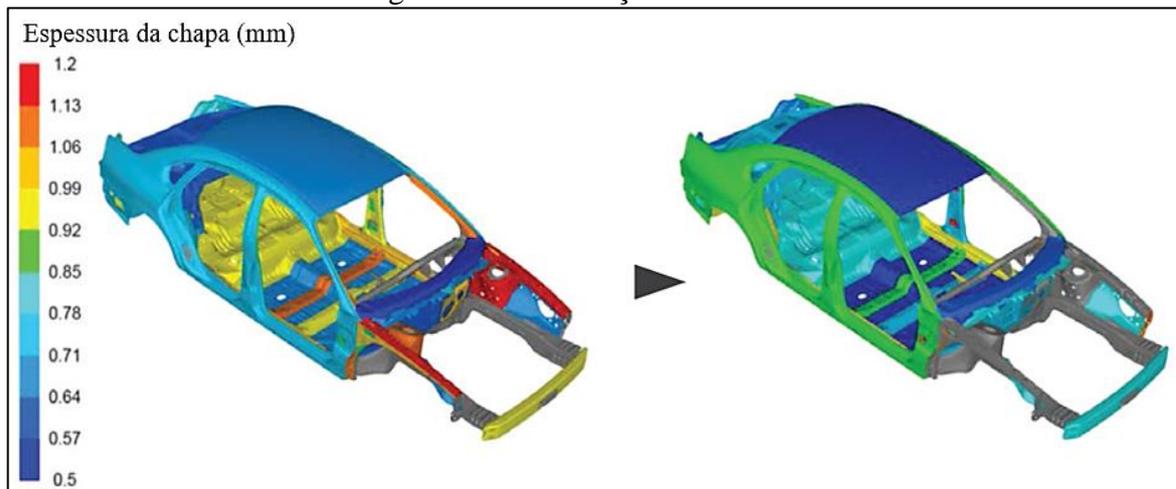
inércia ou propriedades do material. Em problemas com otimização de forma, o formato do contorno dos furos e suas posições são modificadas para atender a uma função objetivo. A otimização de forma requer técnicas sofisticadas para geração da malha automatizada e para a determinação da sensibilidade são necessárias derivadas bastante precisas. Já para a otimização topológica, uma estrutura base de elementos é introduzida e é escolhido a melhor distribuição dentro deste universo (COUTINHO, 2006).

2.3.1.1 Otimização dimensional

Segundo Perini (2008), neste tipo de otimização as variáveis de projeto são as dimensões ou razões de dimensões do componente. Por apresentar algumas limitações em sua aplicação, é costumeiramente utilizada em tarefas que necessitam de apenas um ajuste fino na sua geometria, e também onde não seja necessário alterar a malha de elementos finitos durante as iterações.

A Figura 12, ilustra um exemplo de aplicação de otimização dimensional no desenvolvimento do projeto estrutural de um veículo, onde é possível perceber uma diminuição na espessura das chapas, após o processo de otimização, mantendo as mesmas formas das peças.

Figura 12 - Otimização dimensional



Fonte: adaptado de Simulia Tosca Structure (2014).

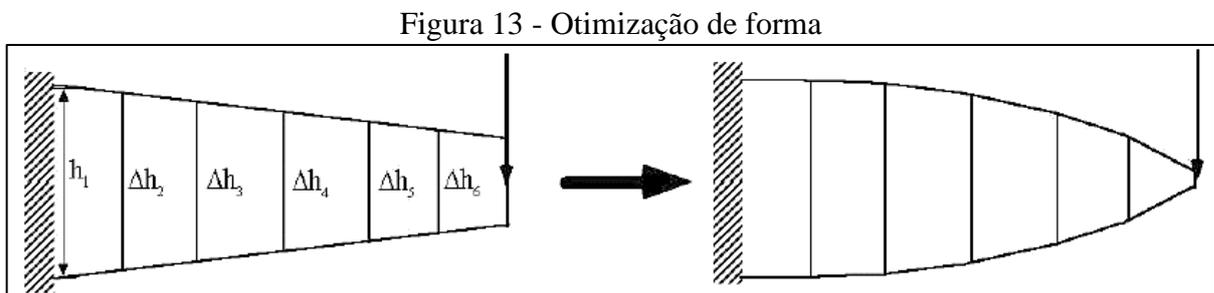
A otimização dimensional, também chamada de otimização geométrica de tamanho, é um tipo de otimização paramétrica onde as variáveis de projeto são caracterizadas por algumas propriedades dos elementos da estrutura, como por exemplo: espessura, propriedades de seção

transversal, rigidez, massa, entre outros. Durante o processo de otimização, estes parâmetros são alterados pelo algoritmo até que o objetivo final seja atingido (CASCINI et al., 2011).

2.3.1.2 Otimização de forma

A otimização de forma, é semelhante a otimização dimensional, contudo permite que possam ocorrer variações no contorno da geometria do componente. Os contornos podem ser representados como curvas suaves, desde que um contorno irregular não gere problemas na exatidão do elemento finito que está sendo analisado, ou provoque uma instabilidade no algoritmo que gerencia o processo de otimização. Durante a otimização podem ocorrer mudanças significativas na geometria, requerendo que a discretização do domínio seja redefinida (PERINI, 2008).

A Figura 13, ilustra um exemplo da utilização das variáveis de projeto, neste caso designadas pela altura h da estrutura, resultando em uma geometria final, diferente da inicial, mantendo as mesmas condições de contorno e carregamento externo.



Fonte: Silva (2001).

Segundo Cascini et al. (2011), a forma da estrutura discretizada pelo MEF, sofre uma mudança nas coordenadas dos nós do modelo de elementos finitos ou elementos de conectividade, que são definidos como variáveis de projeto. Essa alteração nas coordenadas, ocorre por meio do algoritmo de otimização, de acordo com os carregamentos e condições de contorno aplicadas ao modelo. Sendo assim, como resultado do ciclo desta técnica de otimização, tem-se uma geometria final diferente da geometria inicial do modelo.

2.3.1.3 Otimização topológica

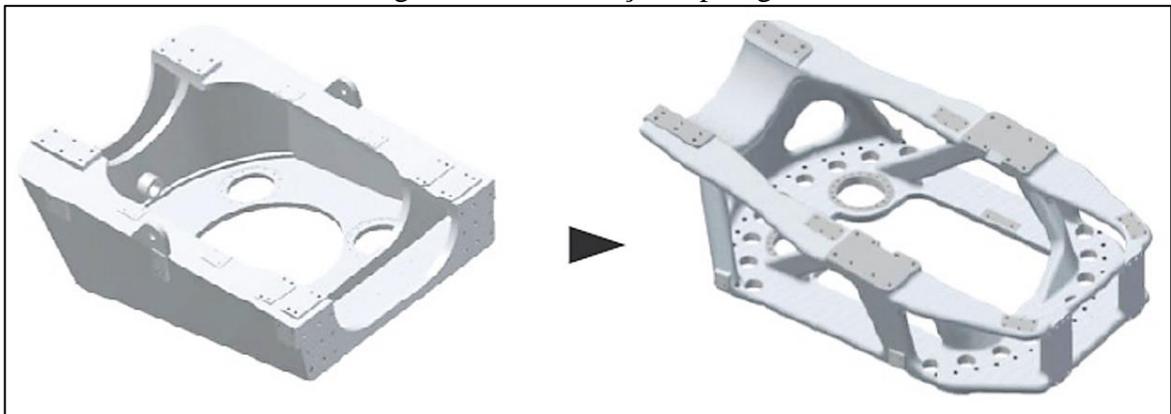
Segundo Bendsoe (1995), a otimização topológica consiste em um método computacional que possibilita projetar a topologia ótima de uma determinada estrutura,

conforme um critério de custo estabelecido, a exemplo, máxima rigidez e menor peso. O método de otimização topológica tem por objetivo distribuir o material no interior de um domínio fixo de forma a maximizar ou minimizar uma função objetivo especificada.

Para encontrar a distribuição ótima de material é utilizado uma forma iterativa, por meio de um algoritmo de otimização. Como forma de aceleração do processo de busca pela distribuição ótima de material, as técnicas de otimização utilizam-se da informação dos gradientes, ou derivadas, e da função objetivo em relação à quantidade de material em cada elemento. Como exemplo, a forma de representação da distribuição do material pode ser feita associando um valor de densidade a cada elemento (subdomínio), oriundo da discretização do domínio inicial. Deste modo, a otimização topológica faz a combinação de duas técnicas, métodos de otimização com o método dos elementos finitos (BENDSOE, 1995).

A Figura 14, ilustra a aplicação da técnica de otimização topológica, onde fica clara a distribuição ótima do material ao longo do domínio, deixando o componente com menor peso e com um desempenho satisfatório, atendendo a função objetivo e as restrições.

Figura 14 - Otimização topológica



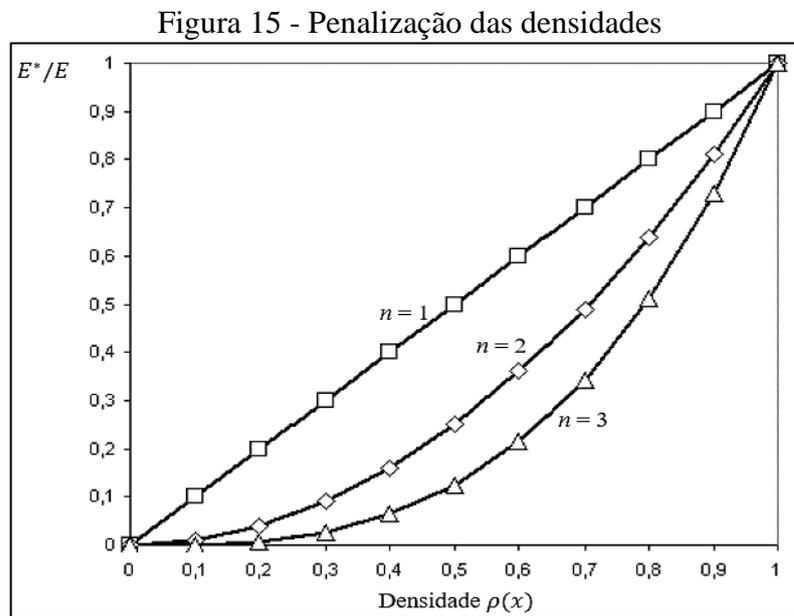
Fonte: Simulia Tosca Structure (2014).

A técnica de otimização topológica, é dividida em duas metodologias de abordagem. A abordagem micro, baseada no material, e a abordagem macro, baseada na geometria. Na abordagem microestrutural, o processo de otimização topológica se baseia no estabelecimento de uma relação entre rigidez e a densidade associada ao domínio, podendo assumir qualquer valor entre 0 (vazio) e 1 (material sólido), sendo que os valores intermediários caracterizam um material poroso. O método *Simple Isotropic Material with Penalization* (SIMP) proposto por Bendsoe, é utilizado na abordagem micro para encontrar a melhor disposição de material, de forma a minimizar ou maximizar a função objetivo. Na abordagem macro, a estrutura é alterada por meio da inserção de furos no domínio. Dois métodos são utilizados, o *Evolutionary*

Structural Optimization (ESO), baseado no cálculo da função objetivo quando um elemento é removido da malha de elementos finitos, e o *Topological Sensitivity Analysis* (TSA), que avalia a sensibilidade de uma função quando um furo é criado no componente analisado (SIMONETTI; ALMEIDA; NETO, 2014).

2.3.1.3.1 Minimização da flexibilidade

Segundo Coutinho (2006), o processo de otimização tem por objetivo encontrar geometrias competitivas e com definição proporcional ao tamanho médio do elemento utilizado, de maneira a minimizar a flexibilidade e atender a um pré-requisito limite de volume material. A otimização topológica utiliza uma microestrutura intermediária artificial do tipo SIMP, onde a equação constitutiva homogeneizada é função apenas da densidade relativa do material, definida por ρ . Com o intuito de estabilizar a solução e evitar problemas de tabuleiro, impõem-se restrições de estabilidade, de forma controlar as variações de densidade em cada direção. A Figura 15, ilustra a penalização das densidades intermediárias à medida que n aumenta, admitindo $n > 1$.



Fonte: adaptado de Simulia Tosca Structure (2014).

Por meio deste modelo, o módulo de Young efetivo (E^*), é definido em termos da densidade relativa intermediária ρ , conforme a Equação 10.

$$E^* = \rho^n E_0 \quad (\text{eq.10})$$

Onde E_0 caracteriza o módulo de Young do material sólido e n representa o parâmetro de penalização.

2.3.2 Modelo matemático aplicado à otimização estrutural

Sob o ponto de vista matemático, a otimização é constituída por um conjunto de funções que além de expressar restrições, determinam objetivos de funções. As funções são constituídas por variáveis, que podem ser divididas em dois grupos, podendo ser, contínuas ou discretas, onde as discretas assumem valores estabelecidos dentro de um conjunto finito de possibilidades, enquanto que as contínuas podem assumir qualquer valor dentro de uma faixa previamente determinada. A escolha das variáveis está diretamente relacionada com a eficiência do processo de otimização, pois no caso de um número de variáveis muito elevado, o problema poderá ter sua solução numérica inviabilizada (ARORA, 2004).

Para problemas de otimização estrutural tem-se diversas variáveis de projeto, podendo caracterizar por exemplo, as dimensões do componente, propriedades mecânicas ou físicas do material, e até outros aspectos qualitativos envolvidos no problema. Em problemas de otimização estrutural, tem-se diversas possibilidades de escolhas da variável de projeto, a exemplo: espessura da placa, momento de inércia, dimensões do elemento, entre outros. A função objetivo tem o intuito de definir a característica que se pretende alcançar ou melhorar no projeto (PERINI, 2013).

Tem-se um problema sem restrição, quando as variáveis do projeto puderem assumir qualquer valor no processo de otimização. Caso as variáveis assumam valores predefinidos, ou devam ficar entre uma faixa de valores, tem-se um problema com restrição (HERZER, 2012).

As restrições podem ser divididas em dois tipos: restrições de igualdade e de desigualdade. Como exemplo para as restrições de igualdade, os deslocamentos do componente devem atingir um valor máximo predefinido, já um exemplo para as restrições de desigualdade, a tensão máxima do componente oriunda de carregamentos externos não poderá ultrapassar a tensão de escoamento do material (PERINI, 2008).

Segundo Arora (2004), o modelo matemático geral do processo de otimização, tem como objetivo encontrar um vetor $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, com variáveis de projeto que minimizem ou maximizem a função objetivo $f(\vec{x})$. A Equação 11, representa a função objetivo e as Equações 12 e 13, representam as restrições, de igualdade e desigualdade, respectivamente.

$$f(\vec{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{eq.11})$$

Sujeito a p restrições de igualdade e m restrições de desigualdade:

$$h_j(\vec{x}) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; j = 1, 2, \dots, p \quad (\text{eq.12})$$

$$g_j(\vec{x}) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0; i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{eq.13})$$

Onde, $h_j(\vec{x})$ representa a j -ésima restrição de igualdade, enquanto $g_i(\vec{x})$ representa a i -ésima restrição de desigualdade, j representa o número de restrições de igualdade e i representa o número de restrições de desigualdade.

2.3.2.1 Algoritmo geral de otimização estrutural

Para a implementação de técnicas de otimização, um método numérico é adotado, com o intuito de realizar iterações até que se consiga obter uma estrutura que atenda às condições pré-estabelecidas. Os algoritmos iniciam o processo de otimização, com uma estimativa de valores para a solução ideal, que aos poucos são aprimorados por meio das iterações do processo (ARORA, 2004). A forma expressa na Equação 14, representa o comportamento geral do processo de otimização.

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)}; k = 0, 1, 2 \dots \quad (\text{eq.14})$$

Onde, k representa o número de iterações, i representa o número de variáveis do projeto, $x_i^{(k)}$ expressa o ponto inicial e $\Delta x_i^{(k)}$ representa a pequena mudança no projeto atual. As iterações continuam sendo realizadas até que se obtenha uma condição de otimização conforme as condições do problema sejam satisfeitas.

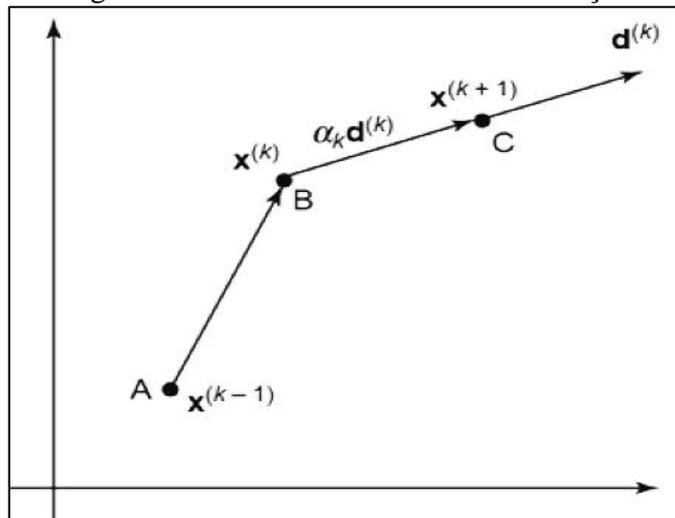
Segundo Arora (2004), para o método de otimização, a parcela $\Delta x_i^{(k)}$ pode ser decomposta em duas partes, conforme a Equação 15.

$$\Delta x_i^{(k)} = \alpha_{(k)} d^k \quad (\text{eq.15})$$

Onde, d^k representa a direção de busca desejável (direção de descida) e $\alpha_{(k)}$ representa o tamanho do passo na direção de busca desejável.

Na Figura 16, é ilustrado o processo iterativo do método de otimização, onde é demonstrado o processo de deslocamento do ponto atual de projeto para um novo ponto.

Figura 16 - Processo iterativo da otimização



Fonte: Arora (2004).

Na Figura 16, o ponto inicial do projeto é representado pelo ponto B, e o ponto C é encontrado a partir do momento que é adicionado o termo $\alpha_{(k)}d^k$ no projeto. As variáveis e restrições são avaliadas neste novo ponto, onde a função objetivo é reduzida e deslocada. Enquanto as condições ótimas não são atingidas, o processo é repetido (ARORA, 2004).

2.3.2.2 Problemas de otimização sem restrições

O modelo de otimização sem restrição, não é comumente encontrado em aplicações práticas de otimização na engenharia, no entanto, é imprescindível que seja entendido para que a lógica seja estendida e adaptada a problemas de otimização com restrição. Um problema desse tipo, segundo Arora (2004), pode ser caracterizado pela minimização de uma função $f(\vec{x})$ sem qualquer restrição sobre \vec{x} , com $\vec{x} \in R^n$.

Segundo Perini (2008), existem duas formas usuais para as condições ótimas em casos de otimização com ou sem restrição, sendo elas: checar se o ponto dado é um ótimo local para o problema ou encontrar o ótimo local para o problema.

2.3.2.3 Problemas de otimização com restrições

Utilizando-se o método de otimização sem restrição, podem ser resolvidos os problemas de otimização com restrição. Para isso, a função objetivo passa a ser composta pelas restrições e parâmetros de penalização, que penalizará a função quando as restrições forem

violadas. Os métodos de otimização sem restrição, podem ser aplicados a partir do momento em que a função objetivo composta for definida (RAO, 2009).

Em vista disso, Arora (2004), define este modelo matemático conforme as Equações 16 e 17, de modo a minimizar $f(\vec{x})$.

$$h_j(\vec{x}) = 0; j = 1, 2, \dots, p \quad (\text{eq.16})$$

$$g_j(\vec{x}) = g_j(x) \leq 0; i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{eq.17})$$

Respeitando os limites da variável, representados respectivamente pelos menores (x_{il}) e maiores (x_{iu}) valores admitidos para as variáveis da função x_i , conforme Equação 18.

$$x_{il} \leq x_i \leq x_{iu}; i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{eq.18})$$

Conforme Rao (2009), é possível transformar problemas de otimização com restrições em problemas de otimização sem restrições, por meio do método Multiplicador de Lagrange Aumentado (MLA). Este método combina os multiplicadores Lagrangeanos e métodos de função penalidade. Admitindo um problema de igualdade com restrição, tem-se $f(\vec{x})$ e a Equação 16. A função Lagrangeana correspondente a este problema é dado pela Equação 19.

$$L(\vec{x}, \lambda) = f(\vec{x}) + \sum_{j=1}^p \lambda_j h_j(\vec{x}) \quad (\text{eq.19})$$

Onde, $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, p$, representam os multiplicadores Lagrangeanos. As condições necessárias para um ponto estacionário do vetor gradiente $L(\vec{x}, \lambda)$ incluem as restrições de igualdade da Equação 17. A abordagem por meio de função de penalidade exterior, é utilizada para definir uma nova função objetivo $A(\vec{x}, \lambda, r_k)$, denominada como Lagrangeano aumentado, representado conforme a Equação 20.

$$A(\vec{x}, \lambda, r_k) = f(\vec{x}) + \sum_{j=1}^p \lambda_j h_j(\vec{x}) + r_k \sum_{j=1}^p h_j^2(\vec{x}) \quad (\text{eq.20})$$

Onde, r_k é o parâmetro de penalidade. Este método possui uma taxa de convergência mais rápida, se comparado aos outros métodos. O método também converge para um mínimo local a partir de qualquer ponto.

2.3.2.4 Linearização de problemas com restrições

Arora (2004), afirma que para a obtenção de solução para problemas de otimização, a partir de algumas iterações, a grande maioria dos métodos de otimização por restrições podem ser resolvidos por aproximação. Estas aproximações podem ser realizadas, subdividindo as equações obtidas pelo método da Expansão Linear de Taylor. Para resolver problemas de otimização com restrições, os métodos numéricos calculam a mudança da geometria pela resolução de pedaços menores do problema geral. Esse método também é chamado de linearização, e possui o objetivo de dividir o desenvolvimento da resolução em várias otimizações numéricas, para facilitar o seu entendimento.

2.3.2.5 Método das Assíntotas Móveis - MMA

Nesta seção será apresentado o algoritmo padrão utilizado pelo software Tosca Structure, baseado no Método das Assíntotas Móveis (MMA) de Krister Svanberg.

O Método das Assíntotas Móveis é baseado em um tipo especial de aproximação convexa. Idealmente, um método para otimização estrutural deve ser flexível e geral. Deve ser capaz de manipular, não apenas elementos de tamanho e formatos variados, mas também, por exemplo, formas variadas e ângulos de orientação do material. Também deve ter a capacidade de manipular todo tipo de restrição, dado somente que as derivativas das funções de restrição, com relação as variáveis do projeto, possam ser calculadas (analiticamente ou numericamente). Logo, o método deve ser capaz de manipular problemas não-lineares em geral, e levar em consideração as características dos problemas de otimização estrutural, como exemplo, usualmente avaliações de funções muito dispendiosas, mas ainda assim possibilitar o cálculo de gradientes. Além disso, o método deve ser estável e gerar uma sequência de soluções viáveis melhoradas (ou quase viáveis) do problema considerado. Esses requisitos, em grande parte, são alcançados pelo Método das Assíntotas Móveis, além de ser fácil de implementar e utilizar (SVANBERG, 1987).

Svanberg (1987), sugere como descrição geral do método, considerar a minimização de um problema de otimização estrutural P , considerando $f(\vec{x})$, com $\vec{x} \in R^n$, conforme as Equações 21 e 22.

$$f_i(\vec{x}) \leq \bar{f}_i; i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{eq.21})$$

$$x_{il} \leq x_i \leq x_{iu}; i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{eq.22})$$

Onde, as funções f_i representam as restrições, lembrando que os limites das variáveis são representados respectivamente pelos menores (x_{il}) e maiores (x_{iu}) valores admitidos para as variáveis da função x_i . As funções implícitas f_i são aproximadas pelas funções explícitas $\bar{f}_i(k)$ que são caracterizadas por serem separáveis e convexas.

De acordo com Svanberg (1987), uma abordagem geral bem estabelecida para resolução de tais problemas, é o de gerar e resolver uma sequência de subproblemas explícitos de acordo com o seguinte esquema iterativo:

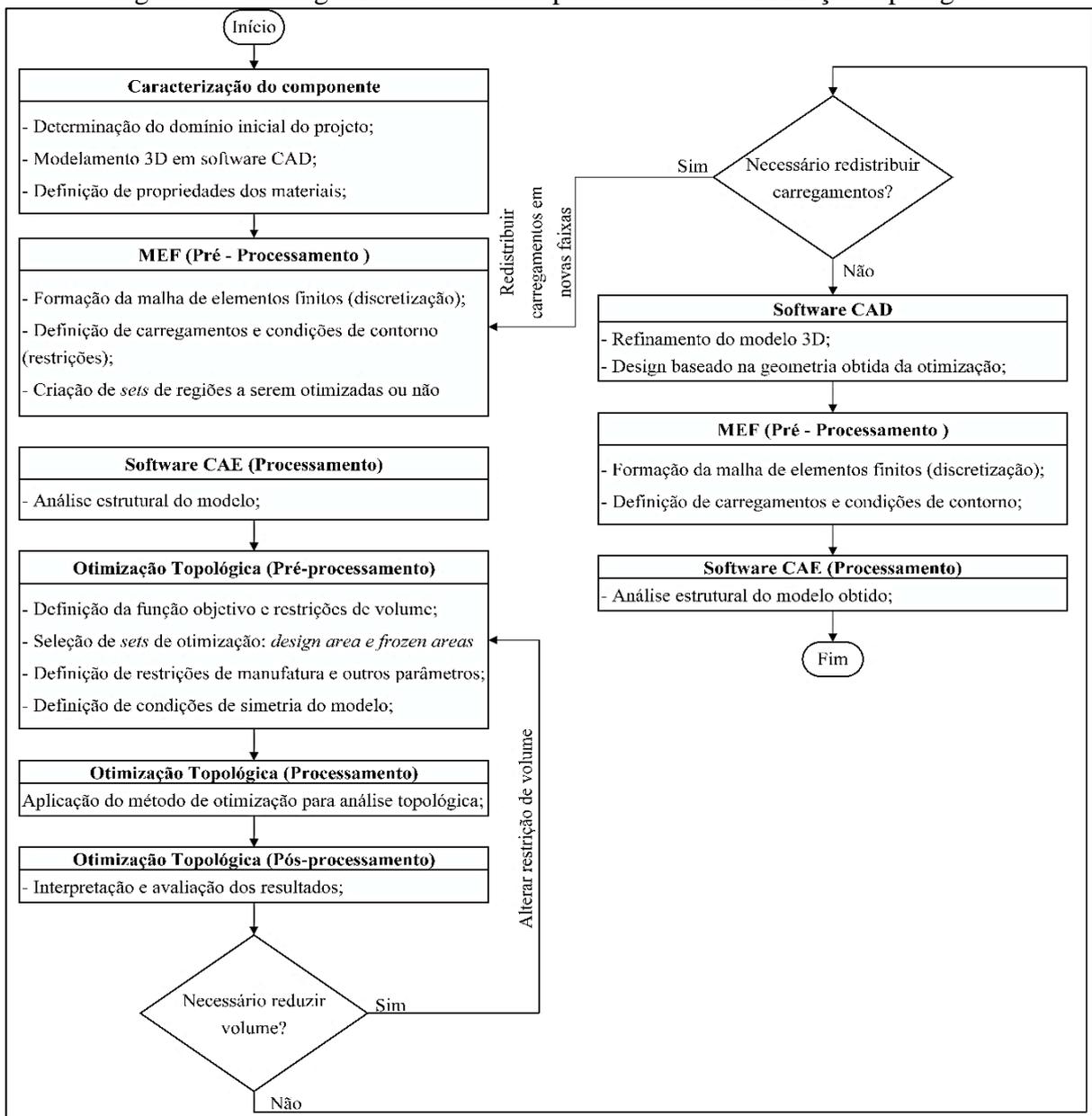
- a) passo 1 - para a função objetivo, estima-se um ponto de partida $x^{(0)}$ com o contador das iterações em $k = 0$;
- b) passo 2 - dado um ponto de iteração $x^{(k)}$, calcula-se $f_i(x^{(k)})$ e o gradiente $\nabla f_i(x^{(k)})$ para $i = 1, 2, \dots, m$;
- c) passo 3 - gerar um subproblema $P^{(k)}$ para substituição, em P , as funções f_i (normalmente implícitas) são aproximadas de funções explícitas $\bar{f}_i^{(k)}$, baseado no cálculo do passo 2;
- d) passo 4 - resolver $P^{(k)}$, fazendo com esta solução mais adequada para o subproblema seja o próximo ponto de iteração $x^{(k+1)}$. Definir o contador das iterações em $k = k + 1$ e retornar ao passo 2.

O processo é interrompido quando os critérios de convergência são atingidos, ou simplesmente quando o usuário estiver satisfeito com a solução atual $x^{(k)}$.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia e os dados utilizados para a elaboração de uma análise de otimização estrutural do chassi de um AGV. Para isso, o procedimento ocorreu em duas etapas. Inicialmente foi realizado a otimização topológica, e os passos para realizar esta primeira etapa estão representados na Figura 17.

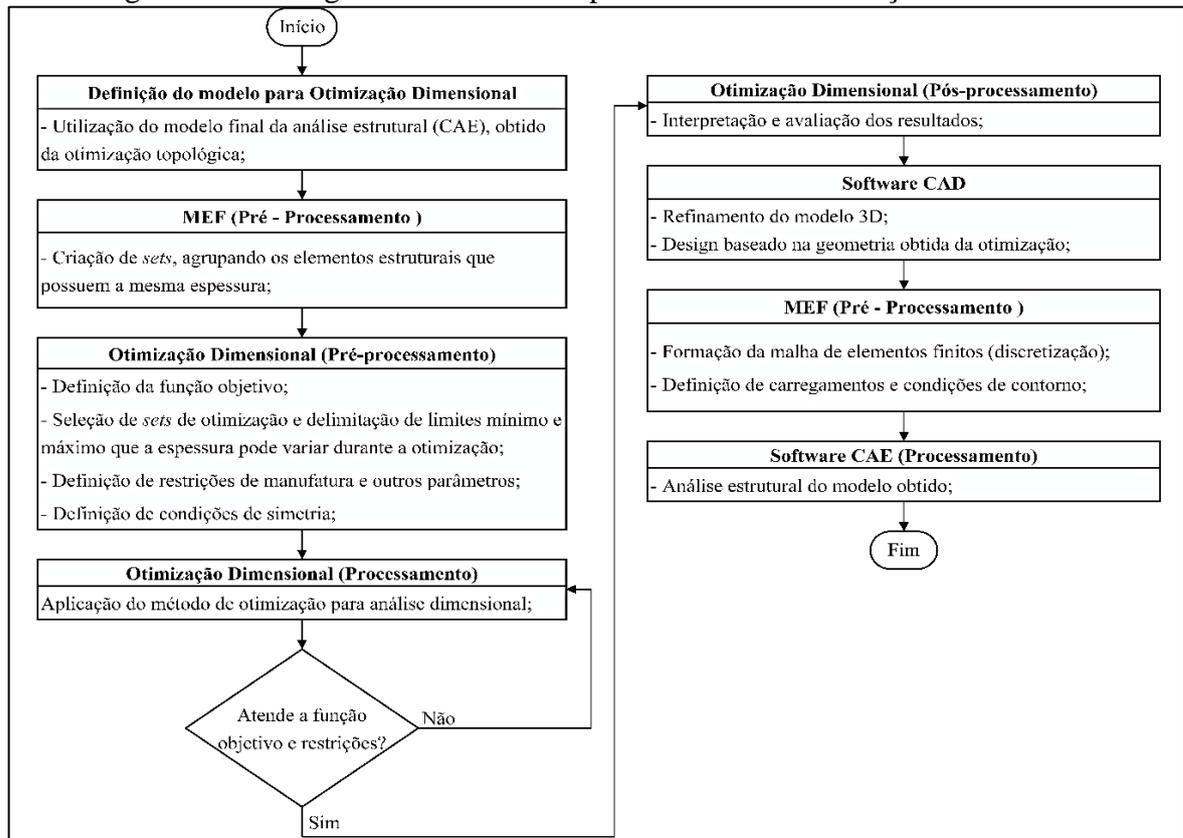
Figura 17 - Fluxograma de atividades para análise de otimização topológica



Fonte: o autor (2016).

Posterior à otimização topológica, foi realizado uma análise de otimização dimensional, seguindo os passos elencados na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma de atividades para análise de otimização dimensional



Fonte: o autor (2016).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO COMPONENTE ORIGINAL

O componente selecionado para o estudo, originalmente é uma estrutura tubular soldada, utilizada como chassi, sendo que esta tem a função de sustentar os carregamentos externos, tanto verticais quanto horizontais, servir como sustentação aos outros componentes do AGV e garantir a integridade do equipamento durante a operação.

A estrutura original é fabricada com tubos de seção quadrada de 30 mm de lado e espessura de 2,65 mm, sendo o material de sua fabricação aço-carbono Grau A, conforme Norma NBR 8261. A Tabela 1, apresenta as propriedades mecânicas do tubo mecânico.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do tubo mecânico Grau A

Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Coefficiente de Poisson	Densidade (g/cm ³)
269	310	210	19	0,3	7,85

Fonte: adaptado de NBR 8261 (1983).

Além disso, são utilizadas chapas dobradas de espessura 6,3 mm e 4,75 mm, fabricadas em aço-carbono estrutural LNE-230, conforme norma NBR 6656. A Tabela 2, ilustra as propriedades mecânicas do aço utilizado na fabricação das chapas.

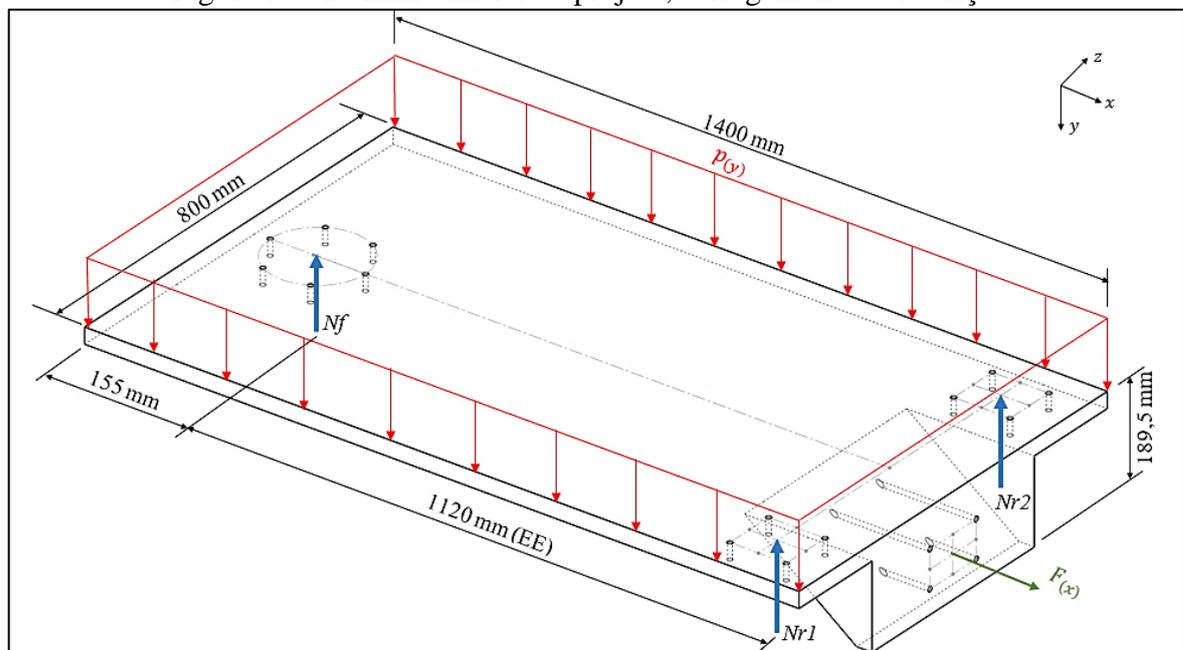
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço LNE - 23

Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Coefficiente de Poisson	Densidade (g/cm ³)
≥ 230	330 - 470	210	30	0,3	7,85

Fonte: adaptado de NBR 6656 (1992).

A Figura 19 ilustra as delimitações do domínio original da estrutura, bem como condições de contorno (restrições) e carregamentos a que a estrutura está sujeita. O componente possui um formato retangular, de 1400 mm de comprimento por 800 mm de largura, com uma massa de aproximadamente 37 kg, além disso possui um entre eixos (EE) de 1120 mm e todos os elementos são unidos entre si por meio de processo de soldagem.

Figura 19 - Domínio inicial do projeto, carregamentos e restrições



Fonte: o autor (2016).

A estrutura possui três pontos de apoio, sendo dois deles nas rodas traseiras (fixas), representados na Figura 19 por $Nr1$ e $Nr2$, e também um terceiro ponto de reação Nf , no eixo

de giro dianteiro, onde por meio deste eixo dá-se a direção do AGV a partir da diferença de rotação dos motores.

O componente está sujeito a três tipos de carregamentos, podendo ser: apenas um carregamento uniforme distribuído sobre a estrutura, caracterizado por $p_{(y)}$, um carregamento concentrado apenas de tração de uma carga, caracterizado por $F_{(x)}$, ou um carregamento combinado de $p_{(y)}$ com $F_{(x)}$. Por meio de ensaios experimentais, observou-se que o carregamento concentrado apenas de tração de uma carga, não é satisfatório sob o ponto de vista de desempenho do equipamento, já que a capacidade de tração se torna muito reduzida, devido à perda de aderência das rodas de tração com o piso. Sendo assim, o carregamento apenas de tração de uma carga, foi desconsiderado para este estudo de otimização estrutural.

Para determinação dos carregamentos externos foram realizados cálculos analíticos, por meio de diagrama de corpo livre, sob condições estáticas, visto que o equipamento opera em velocidades reduzidas, fazendo com que as acelerações impostas ao movimento sejam muito baixas e por isso, podem ser desconsideradas. Além disso, este tipo de equipamento opera sob condições ótimas de piso, ou seja, a amplitude de tensão para análise de fadiga é muito pequena e também pode ser desconsiderada. Visto que este tipo de equipamento é desprovido de qualquer espécie de suspensão, faz-se necessário que o piso seja extremamente plano e sem irregularidades, garantindo assim que não haja deslocamentos no quadro do chassi devido a torção. Os deslocamentos que a estrutura apresenta, são apenas de flexão dos elementos estruturais, oriundos dos carregamentos externos impostos ao componente.

Outro ponto para a determinação dos carregamentos externos, é a limitação mecânica dos motores elétricos utilizados, sendo que os motores possuem capacidade de carga sobre o seu eixo de 500 kg e torque de tração nominal de 54 Nm cada um.

A Tabela 3, representa os valores máximos de carregamentos externos calculados, referente às duas condições de carregamento citadas anteriormente: superior e combinado.

Tabela 3 - Condições de carregamento

Condição de carregamento	Tipo	$P_{(y)}$ (N)	$F_{(x)}$ (N)
Superior	$p_{(y)}$	17658	0
Combinado	$p_{(y)} + F_{(x)}$	10005	395

Fonte: o autor (2016)

Para o cálculo analítico, o carregamento distribuído uniforme superior $p_{(y)}$, foi transformado em um carregamento concentrado, caracterizado como $P_{(y)}$ na Tabela 3, localizado no centro de gravidade (CG) do veículo. Enquanto que para os cálculos virtuais realizados no *software* Abaqus 6.14, o carregamento concentrado $P_{(y)}$, foi dividido pela área total (mm^2) de contato dos tubos que recebem o carregamento, resultado em uma entrada de pressão (MPa) no *software*.

Para a determinação da condição mais crítica de carregamento, foi realizado um estudo comparativo entre o carregamento superior ($p_{(y)}$) e o carregamento combinado ($p_{(y)} + F_{(x)}$), baseado na análise de elementos finitos da estrutura, sob o ponto de vista de tensão (MPa) e deslocamento (mm), em cada condição de carregamento isoladamente. Além disso, nas duas condições de carregamentos, considera-se que a estrutura sofra apenas deformação elástica, e jamais deformação plástica. Por meio deste estudo, concluiu-se que a condição que apresenta maior severidade durante a aplicação, é a condição de carregamento do tipo superior $p_{(y)}$, mas para realização da otimização estrutural, levou-se em consideração a parcela $F_{(x)}$ do carregamento combinado.

3.1.1 Análise estrutural I: validação e análise do modelo original

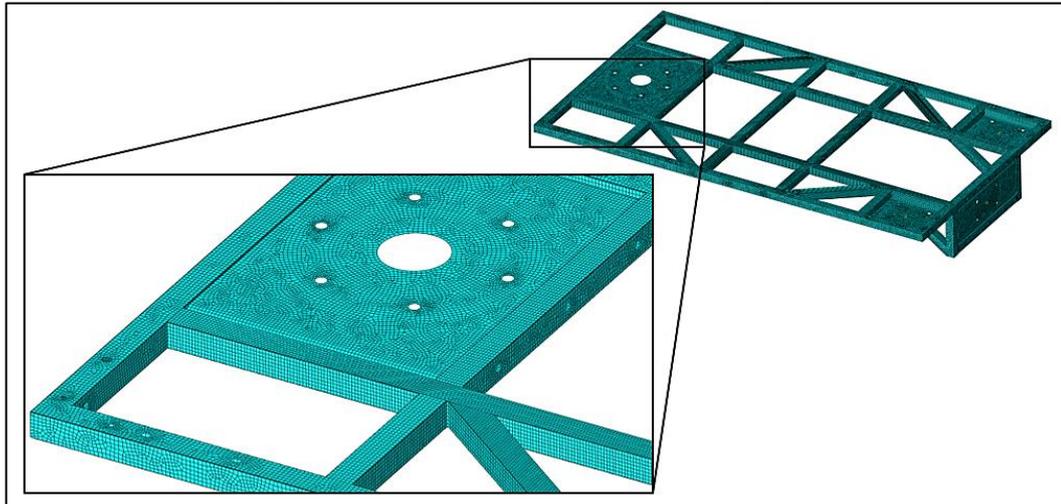
O objetivo desta etapa do trabalho foi fazer uma análise inicial de tensões e deslocamentos da estrutura, sob a sua forma original, utilizando o MEF. Para isso, foi considerado o critério de falha de von Mises, já que este critério determina que se as tensões encontradas na análise estrutural forem iguais ou maiores que o limite de escoamento do material, o elemento estrutural passa a sofrer deformação plástica. Neste caso, definiu-se uma tensão máxima de von Mises de 230 MPa, baseada no limite de escoamento das chapas, conforme Tabela 2. O intuito desta análise inicial foi avaliar o comportamento da estrutura original, bem como servir de base para realizar um comparativo com o posterior modelo otimizado.

3.1.1.1 Pré-processamento para análise estrutural I

Para realização da análise estrutural foi utilizado o *software* Abaqus 6.14, onde inicialmente foi realizado o pré-processamento da análise. A Figura 20, mostra a discretização (malha) do componente, e pela estrutura ser composta por perfis tubulares e chapas, que

possuem a espessura menor que as outras dimensões da peça, utilizou-se elementos do tipo bidimensional *shell* (casca). A malha apresenta uma mistura de elementos na forma de quadriláteros S4R e triângulos S3, totalizando 163.267 elementos.

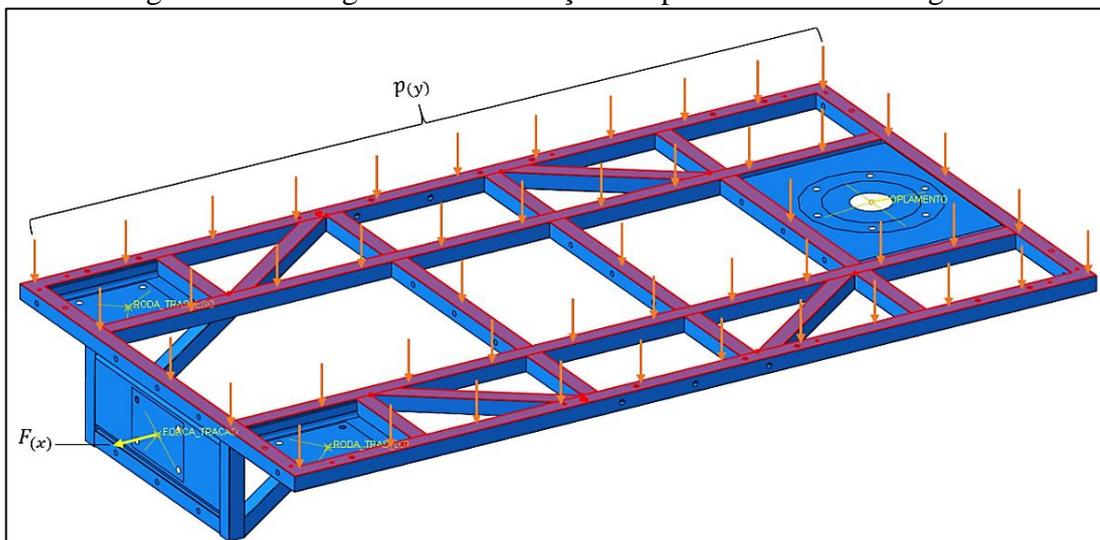
Figura 20 - Discretização do modelo original



Fonte: o autor (2016).

Também dentro da etapa de pré-processamento foram aplicadas as condições de contorno referentes ao componente. A Figura 21, mostra tanto o carregamento do tipo superior $p(y)$, quanto a parcela da força concentrada de tração $F(x)$, com seus respectivos valores citados conforme a Tabela 3. Também estão representados na Figura 21, as restrições, ou seja, os pontos de apoio da estrutura.

Figura 21 - Carregamentos e restrições impostas a estrutura original



Fonte: o autor (2016).

3.2 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO CHASSI DE UM AGV

A proposta deste estudo visou a obtenção de uma estrutura de chassi otimizada, aplicado em AGV, ou seja, a busca por uma geometria ótima que seja capaz de resistir e se manter íntegra, atendendo aos requisitos de sua aplicação. Além disso, o intuito deste estudo foi a obtenção de uma estrutura com massa reduzida, em comparação com o modelo original, atentando para a minimização da flexibilidade, consequentemente maximização da rigidez da estrutura.

O componente a ser otimizado representa o maior percentual de massa, em torno de 33,9%, comparado com os outros componentes manufaturados do equipamento. Por ser um veículo que possui como fonte de energia, a energia elétrica, faz-se necessário a melhor relação peso *versus* potência, para que se aumente a autonomia, eficiência e a capacidade de carga do veículo. Além disso, a busca por um equipamento mais leve é essencial para tornar o produto competitivo, tornando-se um diferencial diante dos concorrentes.

Inicialmente, o modelamento tridimensional da estrutura foi realizado na empresa Spark AG Software e Automação, utilizando o software de CAD SolidWorks 2015. A análise estrutural pelo método de elementos finitos do componente, foi realizada na Universidade de Caxias do Sul, utilizando o software CAE Abaqus 6.14. E por fim, a análise de otimização estrutural foi realizada na Universidade de Caxias do Sul, utilizando o software Tosca Structure.

3.2.1 Otimização topológica do chassi

Primeiramente, após definido todas as condições de contorno num domínio de projeto pré-estabelecido, foi realizado uma otimização topológica do componente. A otimização topológica teve como objetivo buscar a definição de uma geometria ótima do chassi, orientando quais os locais que necessitam de elementos estruturais, e os locais que gerarão vazios no domínio.

Para a realização das análises no software Tosca Structure, foi utilizado o algoritmo denominado *controller*, sendo este, o método mais agressivo de retirada de material, se comparado com o algoritmo *sensitivity*. O algoritmo *controller* basicamente elimina a densidade intermediária, entre o ter e não ter material, ou seja, na topologia final após a otimização, fica mais claro e perceptível a presença de material e a criação dos espaços vazios, orientando melhor onde devem ser distribuídos os elementos estruturais. O algoritmo

controller, necessita de apenas 15 iterações para definir uma topologia, enquanto o algoritmo *sensitivity* demanda de 30 a 45 iterações para definir a topologia final.

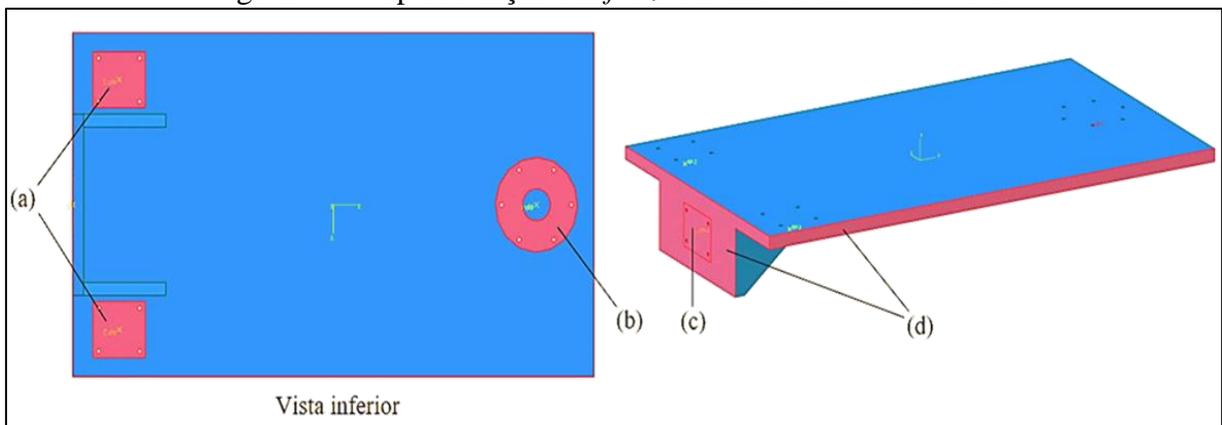
3.2.1.1 Pré-processamento da otimização topológica

Para que esta otimização acontecesse, antes de mais nada foi necessário definir a *design area*, ou seja, quais as delimitações do domínio inicial que poderiam sofrer o processo de otimização. Após a definição da *design area*, foram criados *sets*, ou seja, partições dentro das delimitações do domínio inicial. Estas partições ou *sets*, podem ser por exemplo, as áreas que permanecerão “congeladas” na estrutura, ou seja, áreas que manterão sua geometria fixa durante o processo de otimização. Estas áreas congeladas, também denominadas de *frozen areas*, são áreas que possuem interface com outras peças ou outro tipo de contato, portanto, de maneira alguma poderão sofrer alterações na sua geometria. Tanto a definição da *design area*, quanto a definição das *frozen areas*, acontecem na etapa de pré-processamento, ainda dentro do software estrutural Abaqus 6.14.

A Figura 22, ilustra o domínio pré-estabelecido, representado por um bloco rígido, caracterizando as delimitações externas da estrutura, e em vermelho, as áreas que permaneceram congeladas durante o processo de otimização.

Para a otimização topológica do chassi do AGV, as áreas que permaneceram congeladas, conforme a Figura 22, foram: as regiões de interface com o suporte das rodas traseiras (a), a região de acoplamento do rolamento (b), região de fixação do suporte para tração de uma carga (c) e as áreas de contorno externo (d), já que as dimensões do chassi devem ser mantidas.

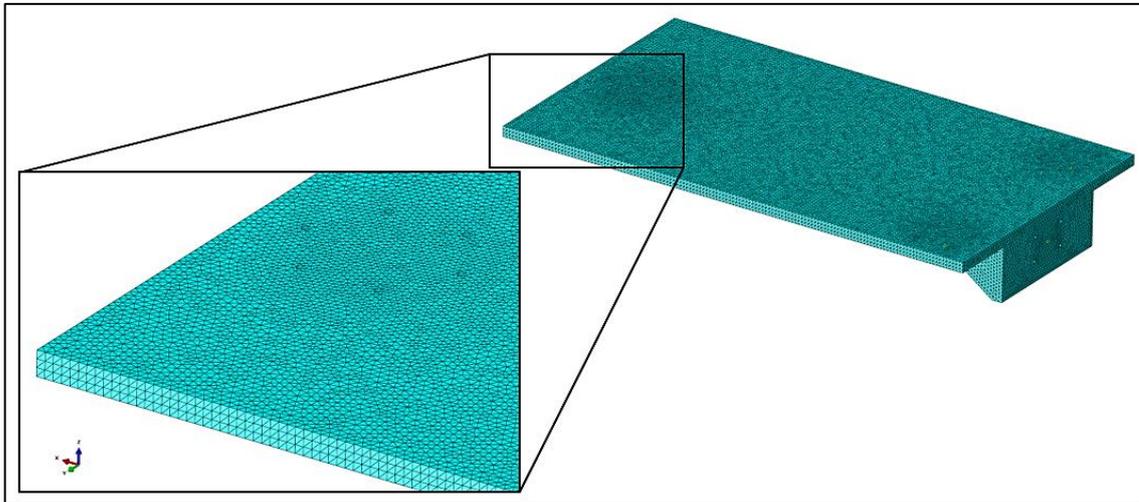
Figura 22 - Representação das *frozen areas* no domínio inicial



Fonte: o autor (2016).

Na Figura 23, é apresentada a discretização (malha) do domínio, utilizando elemento sólido tetraédrico do tipo C3D10, totalizando 144.155 elementos.

Figura 23 – Discretização do domínio inicial

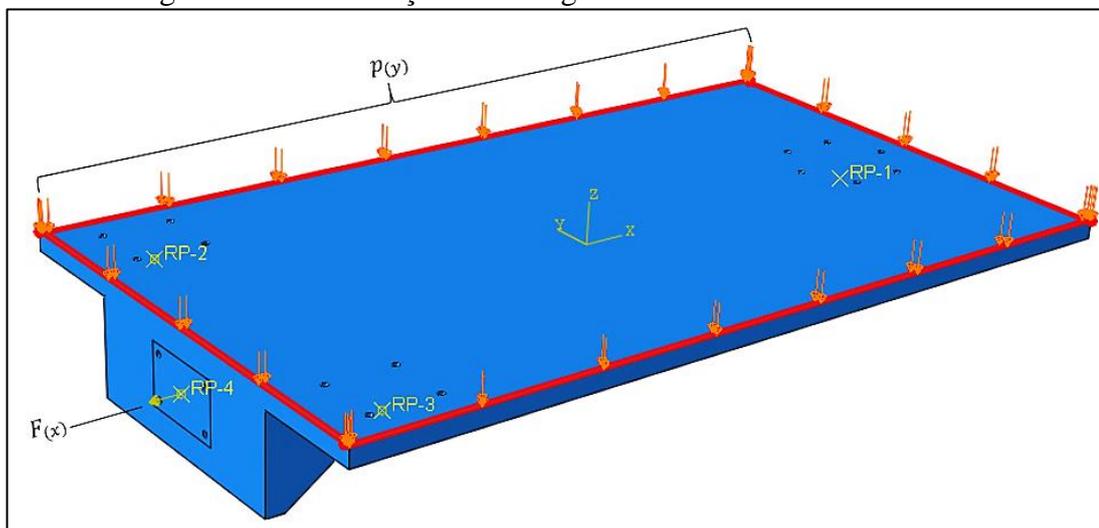


Fonte: o autor (2016).

3.2.1.1.1 Carregamento inicial sobre a estrutura

Como parte do pré-processamento da otimização topológica, também foram definidos os carregamentos a que a estrutura está sujeita. Inicialmente, o carregamento do tipo superior $p(y)$, foi distribuído na forma de contorno do domínio inicial, ilustrado na Figura 24 pela área em vermelho, visto que as delimitações do domínio inicial permaneceram inalteradas durante a otimização. Também foi levado em conta a parcela da força concentrada de tração $F(x)$.

Figura 24 – Distribuição do carregamento inicial sobre a estrutura



Fonte: o autor (2016).

Para o carregamento inicial, representado na Figura 24, foram realizadas três análises admitindo três percentuais de restrição de volume em relação ao volume inicial, sendo eles: 30%, 50% e 70%. O intuito de utilizar estas faixas, é verificar como o processo de otimização se comporta, quais são as equivalências e as diferenças na topologia da estrutura, para as três faixas, e a partir dos resultados definir de que maneira serão realizadas as análises subsequentes, com relação aos carregamentos e aos percentuais de restrições de volume.

3.2.1.1.2 Critérios para distribuição de cargas

A partir do resultado da análise de otimização topológica foi proposta a redistribuição de carregamento superior sobre a estrutura, a qual serviu de entrada para uma nova análise de otimização topológica. A estratégia para realizar este procedimento foi baseada na intervenção humana, o que conduziu para a criação e definição da melhor distribuição do carregamento, não sendo de forma automatizada por meio de *software*. Para efetuar a redistribuição de carregamento, foram criadas faixas em regiões próximas aos vazios obtidos na otimização topológica, cuja intenção era de posicionar posteriormente os elementos tubulares estruturais.

Como cada análise contemplou uma forma de carregamento superior e ao chegar a cerca de 30% em restrição de volume, fez-se uma nova distribuição de carga, tendo-se como critério a introdução de faixas contínuas limitadas por outras faixas de carregamento, dentro do domínio preliminarmente especificado.

3.2.2 Otimização dimensional do chassi

Posterior a otimização topológica e após a definição de uma nova geometria de chassi, foi aplicado o método de otimização dimensional, com o objetivo de se obter uma redução de massa ainda maior da estrutura, por meio da busca de espessuras ideais dos elementos estruturais. O intuito da aplicação da técnica de otimização dimensional é exclusivamente encontrar as espessuras dos tubos e chapas que compõem a estrutura, auxiliando a definir espessuras realmente necessárias à aplicação.

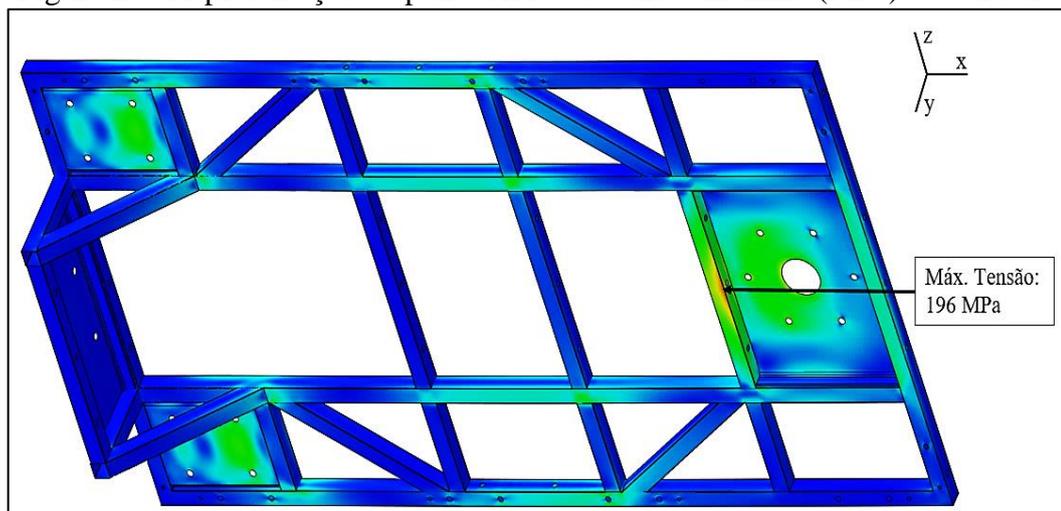
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão mostrados todos os resultados das análises e estudos realizados, bem como todas as considerações que foram adotadas. O objetivo foi obter uma estrutura de chassi de um AGV, que tenha massa reduzida em relação ao projeto original e que mesmo assim consiga atender aos requisitos do projeto, garantido que a estrutura se mantenha íntegra durante a sua aplicação. Para isso, com base nos resultados obtidos, um estudo comparativo foi realizado, avaliando a massa da nova de geometria de chassi, e a rigidez da estrutura sob aspectos de tensão (MPa) e deslocamento (mm).

4.1 RESULTADO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DO MODELO ORIGINAL

Como resultado da análise estrutural I, a Figura 25 ilustra o ponto crítico onde está localizada a máxima tensão na estrutura. O ponto possui uma magnitude de tensão de aproximadamente 196 MPa, ou seja, abaixo do limite definido para tensão máxima segundo o critério de von Mises, mostrando que a estrutura atende aos requisitos de sua aplicação, sob o ponto de vista de tensão. Neste caso, o ponto de tensão máxima está localizado na parte inferior dianteira da estrutura, na região central do tubo, conforme Figura 25.

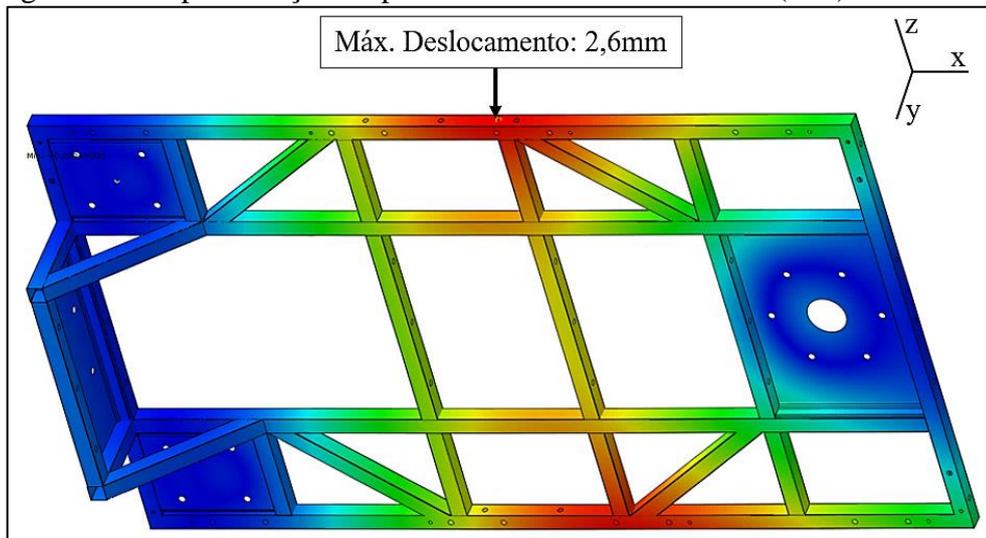
Figura 25 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura



Fonte: o autor (2016).

A Figura 26, mostra o ponto crítico de maior deflexão da estrutura, aproximadamente 2,6 mm. O deslocamento encontrado sob carregamento máximo foi avaliado e analisado, e como resultado definiu-se que a estrutura está apta a sua aplicação.

Figura 26 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura



Fonte: o autor (2016).

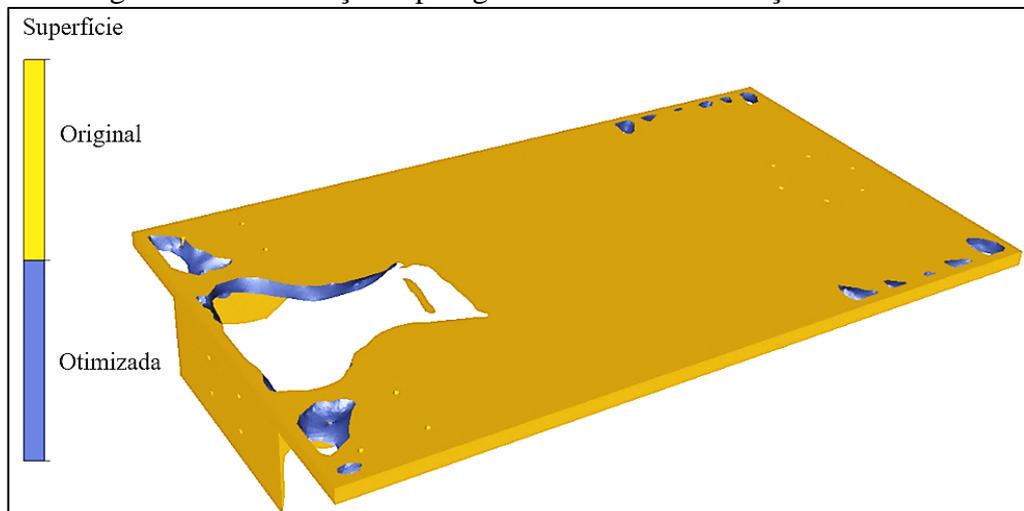
4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Esta etapa do trabalho contempla os resultados obtidos ao aplicar a técnica de otimização topológica na estrutura de chassi de um AGV, por meio da utilização do *software* Tosca Structure encadeado com o *solver* do Abaqus 6.14.

4.2.1 Carregamento inicial: restrição de 70% do volume inicial

A Figura 27 representa os resultados obtidos do processo de otimização topológica com restrição de 70% do volume inicial.

Figura 27 - Otimização topológica com 70% de restrição de volume



Fonte: o autor (2016).

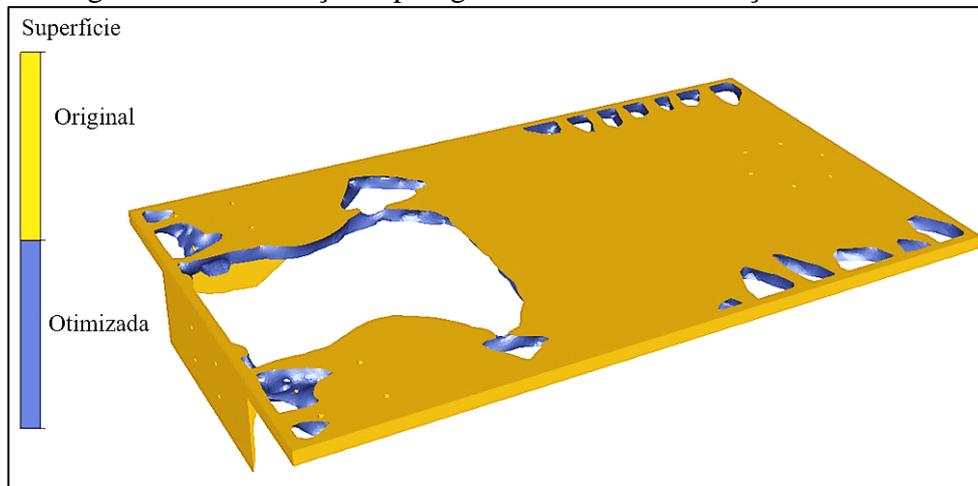
Nota-se no resultado que todas as condições de contorno definidas no pré-processamento foram mantidas, como por exemplo: as áreas congeladas de delimitação do domínio e de interface com outros componentes do conjunto, além de condições de simetrias da estrutura. Também, percebe-se com clareza os locais que houve a retirada do material desnecessário, criando espaços vazios na estrutura.

Esta análise mostrou-se excessivamente conservadora, sob o ponto de vista de retirada de material, a criação dos espaços vazios foi mínima, impossibilitando a interpretação da topologia obtida para a distribuição de elementos estruturais dentro do domínio.

4.2.2 Carregamento inicial: restrição de 50% do volume inicial

A Figura 28 representa os resultados obtidos do processo de otimização topológica com restrição de 50% do volume inicial. Observa-se uma continuidade uniforme na retirada do material e criação dos espaços vazios, se comparado com a condição de restrição de volume anterior.

Figura 28 - Otimização topológica com 50% de restrição de volume

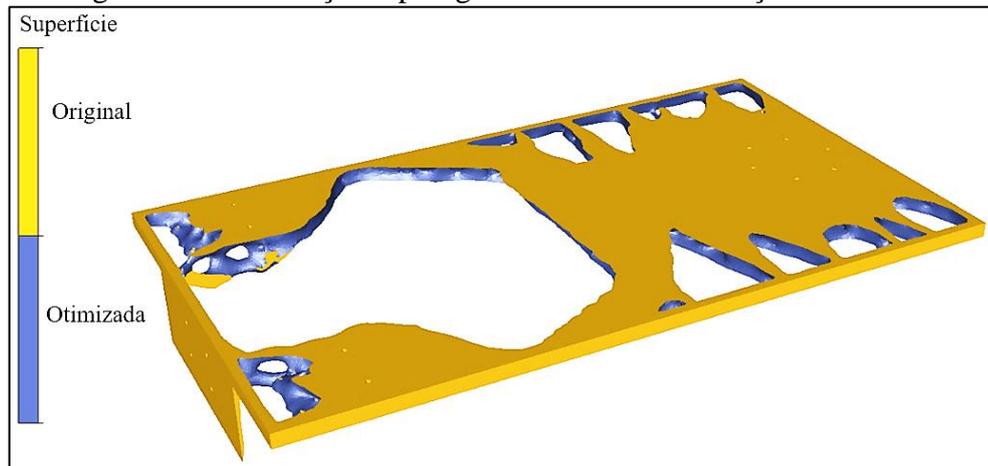


Fonte: o autor (2016).

4.2.3 Carregamento inicial: restrição de 30% do volume inicial

A Figura 29 representa os resultados obtidos do processo de otimização topológica com restrição de 30% do volume inicial. Percebe-se um aumento considerável dos espaços vazios, mostrando-se uma otimização mais agressiva, consequentemente possibilita uma melhor interpretação da topologia obtida, quanto a organização e possíveis formas de elementos estruturais que poderiam compor a estrutura.

Figura 29 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume

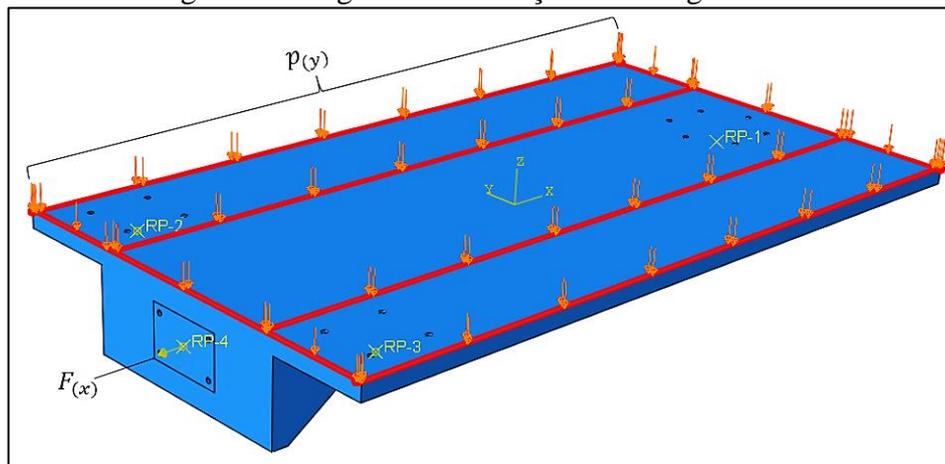


Fonte: o autor (2016).

4.2.4 Segunda distribuição de carregamento

Como evolução da primeira análise do carregamento inicial, foi realizado uma segunda distribuição de carregamento superior $p(y)$, conforme ilustrado na Figura 30, onde manteve-se o carregamento de contorno, porém houve a adição de duas faixas de carregamento sob a forma de “longarinas”, dividindo o domínio inicial. Para fins comparativos foram mantidos os mesmos valores de restrições de volume definidos na primeira análise, sendo eles: 30%, 50% e 70%.

Figura 30 - Segunda distribuição de carregamentos



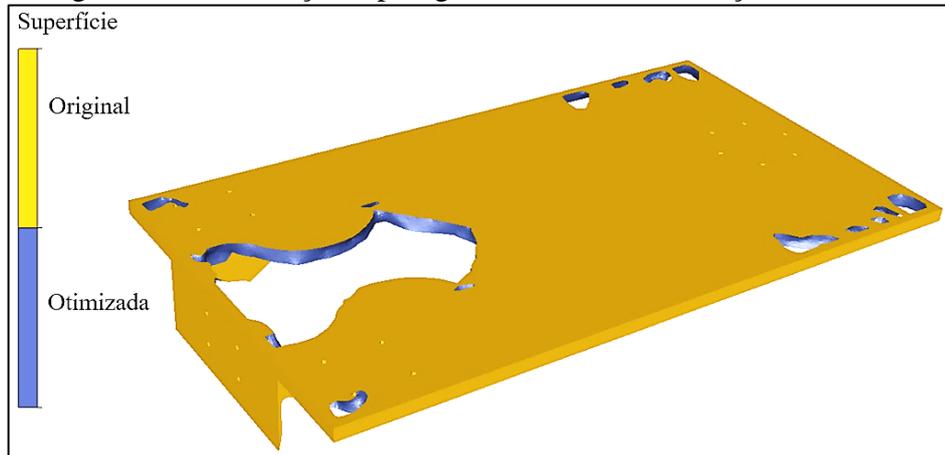
Fonte: o autor (2016).

4.2.4.1 Segunda distribuição de carregamento: restrição de 70% do volume inicial

A Figura 31, ilustra a topologia obtida após o processo de otimização sob a segunda forma de carregamento, com uma restrição de volume de 70% em relação ao volume inicial. A

topologia obtida se mostra muito similar a restrição de 70% do volume inicial da condição de carregamento inicial, impossibilitando a interpretação sobre a forma e a organização de elementos estruturais.

Figura 31 - Otimização topológica com 70% de restrição de volume



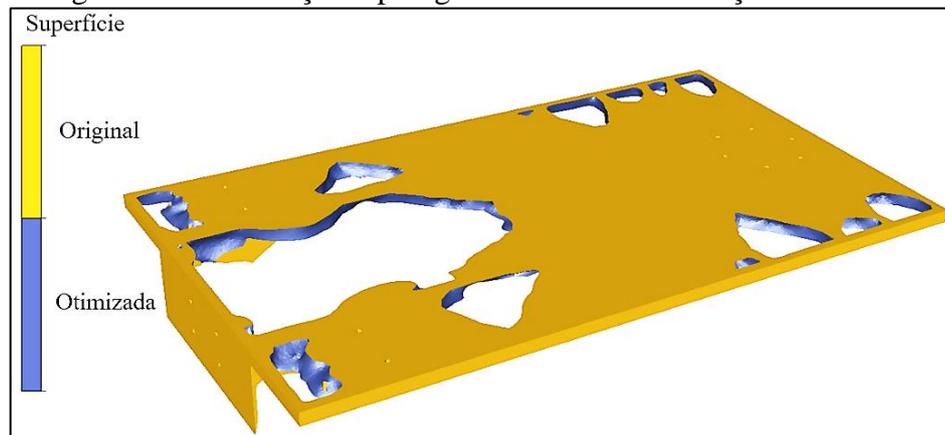
Fonte: o autor (2016).

Através desta topologia é possível perceber a manutenção das regiões congeladas e regiões que recebem o carregamento, bem como condições de simetria da estrutura. É perceptível a criação dos espaços vazios, onde houve a retirada do material, mas não é possível definir uma geometria ideal, relacionada a diminuição de massa e aspectos de manufatura.

4.2.4.2 Segunda distribuição de carregamento: restrição de 50% do volume inicial

A Figura 32, ilustra a topologia obtida obedecendo a restrição de 50% do volume inicial.

Figura 32 - Otimização topológica com 50% de restrição de volume

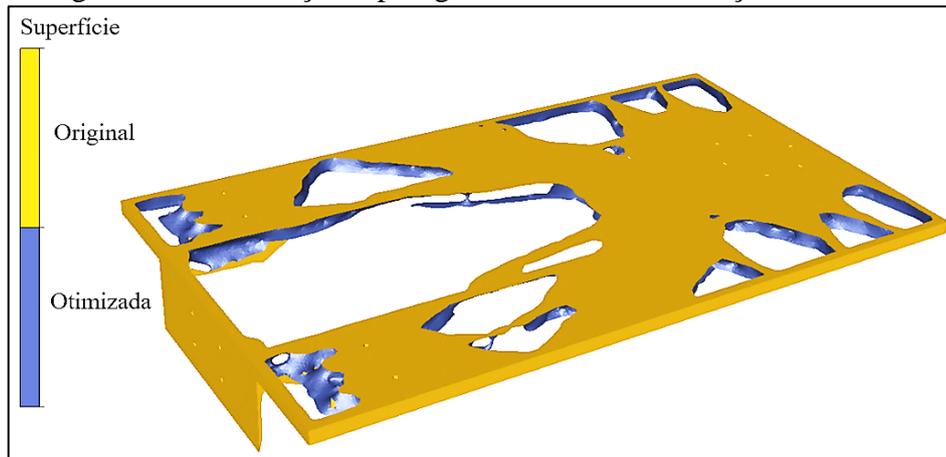


Fonte: o autor (2016).

4.2.4.3 Segunda distribuição de carregamento: restrição de 30% do volume inicial

A Figura 33, representa o resultado do processo de otimização com restrição de 30% do volume inicial. A topologia obtida se mostra muito promissora quanto a definição de uma geometria para a estrutura, onde é possível definir uma localização aproximada dos elementos estruturais, definindo um *layout* preliminar para a estrutura de chassi do AGV.

Figura 33 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume

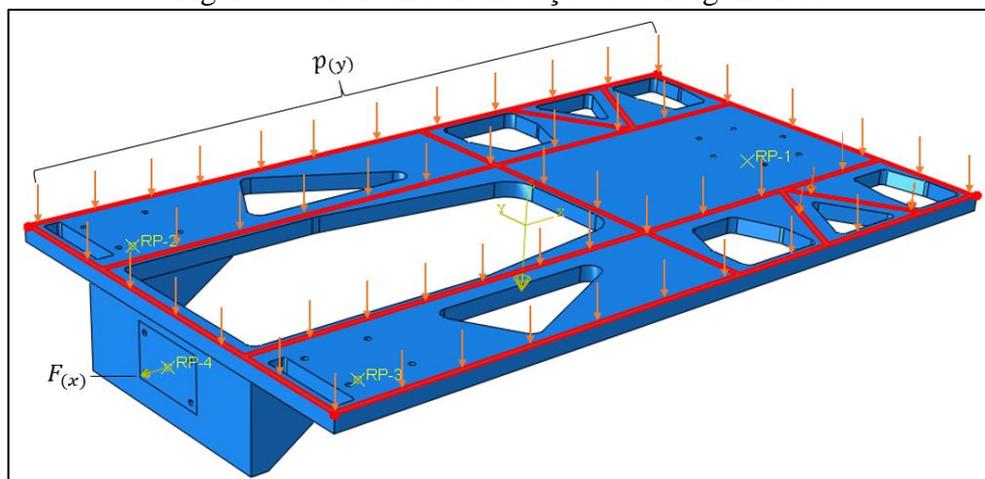


Fonte: o autor (2016).

4.2.5 Terceira distribuição de carregamento

Com o intuito de refinar ainda mais o processo de otimização topológica, uma terceira forma de carregamento foi criada, onde novas regiões de carregamento superior $p(y)$ foram adicionadas, mantendo as regiões já criadas nas análises anteriores.

Figura 34 - Terceira distribuição de carregamentos



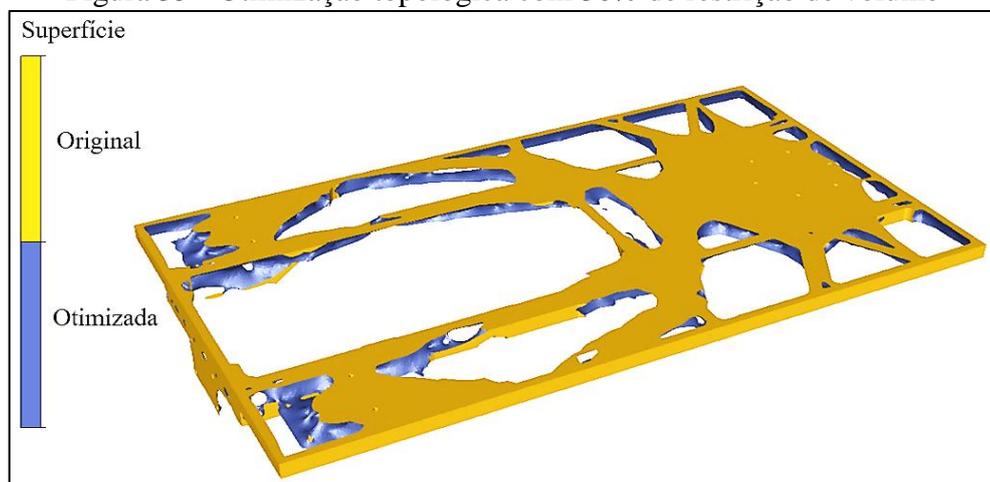
Fonte: o autor (2016).

Essas novas regiões foram criadas, representadas neste caso por “travessas” e uma estrutura de treliça, baseadas nos resultados das análises anteriores, levando em conta os locais que não houve a retirada de material e obedecendo ao critério de distribuição de cargas, conforme ilustrado Figura 34. Além disso, para esta próxima análise, alguns espaços que se mostravam vazios nos resultados das análises de otimização anterior, também já foram criados no modelo representado na Figura 34.

4.2.5.1 Terceira distribuição de carregamento: restrição de 30% do volume inicial

A Figura 35, ilustra o resultado para a otimização sob a terceira distribuição de carregamento superior, obedecendo à restrição de 30% do volume inicial. Por meio deste resultado, é possível perceber uma continuidade na criação dos espaços vazios em relação as análises anteriores, além disso a interpretação de uma geometria, e um *layout* dos elementos estruturais se mostra muito mais clara e objetiva.

Figura 35 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume



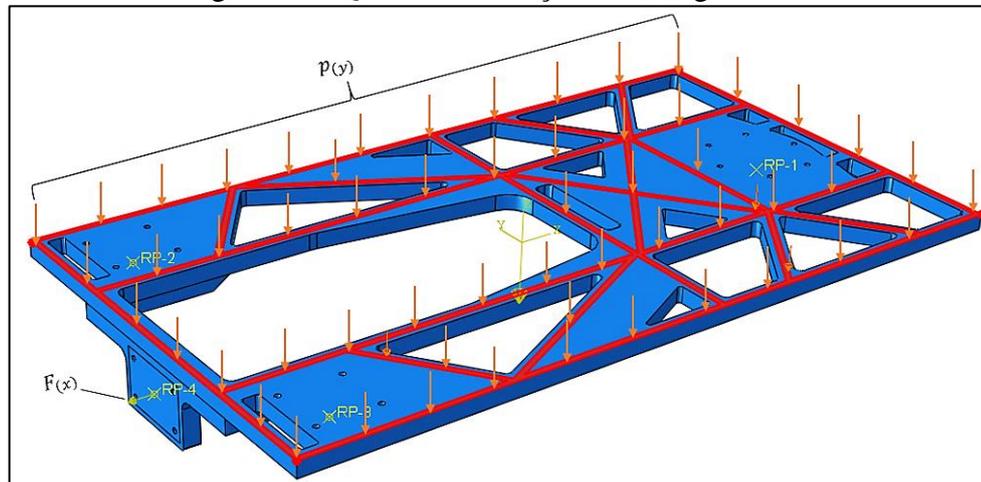
Fonte: o autor (2016).

4.2.6 Quarta distribuição de carregamento

Observando os resultados da análise anterior, representada na Figura 35, foi determinada a quarta etapa de distribuição de carregamento superior na estrutura. Para isso, levou-se em consideração as faixas que permaneceram com material, e assim realizou-se uma nova distribuição de regiões para receber o carregamento superior $p_{(y)}$, mantendo as áreas já definidas nas análises anteriores. Essa nova redistribuição do carregamento superior, está ilustrada na Figura 36, nas regiões em vermelho.

Além disso, espaços vazios criados nas otimizações anteriores se mostram constantes ao longo das análises, e por isso já foram incorporados a esse novo modelo da Figura 36.

Figura 36 - Quarta distribuição de carregamentos



Fonte: o autor (2016).

4.2.6.1 Quarta distribuição de carregamento: restrição de 30% do volume inicial

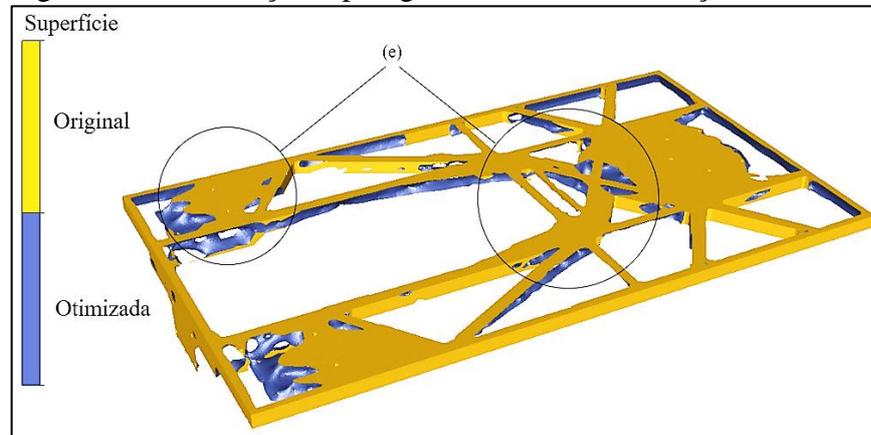
A Figura 37, ilustra o resultado obtido para a otimização topológica sob a quarta distribuição de carregamento, atendendo a restrição de 30% do volume inicial. Este resultado se mostrou muito promissor quanto a definição de uma organização dos elementos estruturais, e a partir da obtenção desta topologia, foi modelada uma nova proposta para a estrutura de chassi do AGV em *software* CAD.

Por meio do resultado obtido da otimização, e fazendo um comparativo com os resultados da análise estrutural do modelo original, representados nas Figuras 25 e 26, observa-se uma coerência significativa nos resultados e na topologia obtida da otimização. Isso fica evidenciado justamente nas regiões de transição da estrutura, representadas na Figura 37 por (e), onde estas regiões críticas mostram-se mais reforçadas, ou seja, com um volume maior de material. Os resultados da análise estrutural do modelo original indicam que estas regiões de transição, são as que apresentam maiores magnitudes de tensão e deslocamento, portanto deveriam ser mais robustas a fim de minimizar estes efeitos.

Sendo assim, observou-se que no método tradicional intuitivo para desenvolvimento da estrutura de chassi do AGV, as regiões críticas da estrutura que deveriam ser mais robustas, foram identificadas somente depois da análise estrutural, enquanto por meio do método de desenvolvimento por otimização topológica, as regiões críticas foram identificadas antes de iniciar o modelamento em *software* CAD.

Assim como na análise anterior, para a quarta distribuição de carregamento, foi levado em consideração apenas o resultado para restrição de 30% do volume inicial.

Figura 37 - Otimização topológica com 30% de restrição de volume



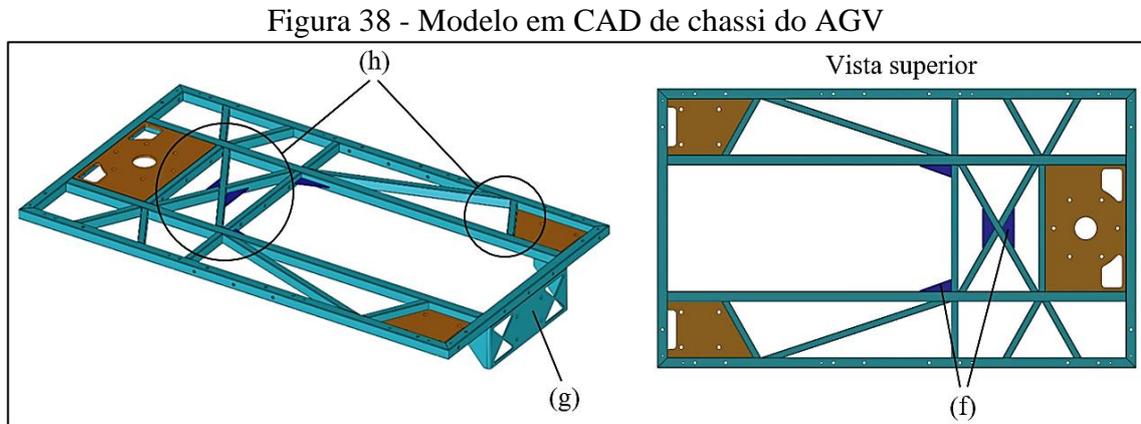
Fonte: o autor (2016).

4.3 GEOMETRIA DE CHASSI OBTIDA PELA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A partir da topologia obtida, ilustrada na Figura 37, foi desenvolvida uma nova estrutura de chassi para o AGV, seguindo rigorosamente o *layout* obtido da otimização topológica. Como pré-requisito de projeto, também foram mantidas as características de manufatura da estrutura em relação à estrutura original, ou seja, manteve-se uma estrutura composta por tubos e chapas, unidos entre si pelo processo de soldagem. Os elementos estruturais, no caso tubos e chapas, foram dispostos de forma a representar da maneira mais semelhante possível à topologia obtida, mantendo os espaços vazios e alocando os elementos estruturais onde o material foi requerido.

Para este novo desenvolvimento, foram mantidas as mesmas espessuras para os tubos e chapas utilizadas no modelo original, assim como as propriedades mecânicas dos materiais dos tubos e chapas. A Figura 38, representa a proposta da nova geometria para a estrutura de chassi do AGV, possuindo uma massa de 32 kg. Por meio da Figura 38, é possível perceber que o novo *design* passou a contar com reforços estruturais (f) no formato de triângulo, com o intuito de reforçar a estrutura nesta região de transição, conforme demanda a otimização topológica. Também desenvolveu-se um novo componente (g), o qual tem a função de servir de suporte para receber o carregamento concentrado de tração, sendo que este se apresenta mais simples que o modelo original. Originalmente, o componente (g) era composto por seis peças, e a nova geometria foi projetada com apenas uma peça, neste caso uma única chapa dobrada com furos passantes para alívio de massa, que facilita a sua manufatura e montagem no quadro de chassi.

Os pontos (h), representados na Figura 38, ilustram as regiões críticas da estrutura, que neste caso se mostram mais reforçadas e seguem a topologia da otimização estrutural da Figura 37.



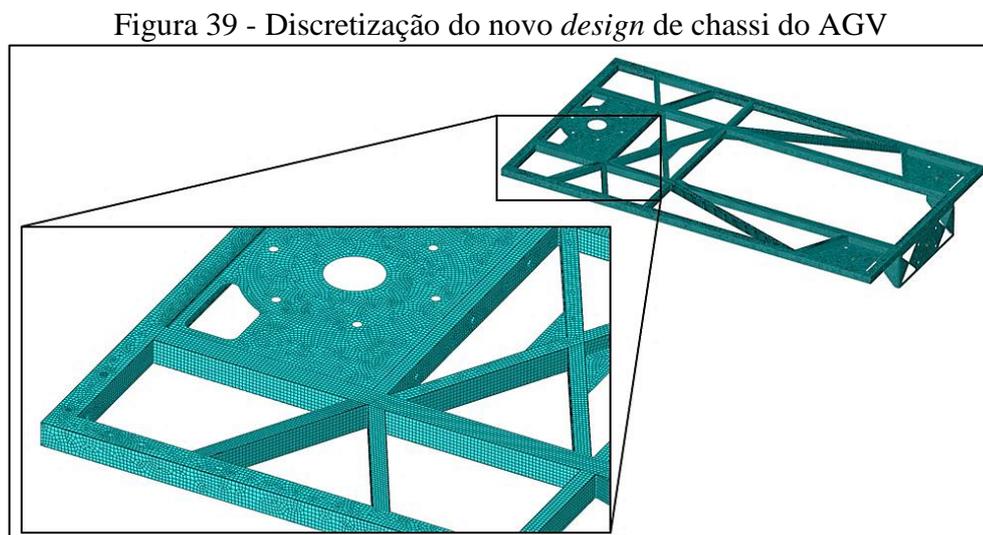
Fonte: o autor (2016).

4.3.1 Análise estrutural II: validação e análise da nova geometria de chassi

Posterior ao modelamento em *software* CAD, fez-se necessário realizar uma análise estrutural utilizando o MEF, com o intuito de avaliar os pontos de tensão máxima, e deslocamentos que a estrutura está sujeita.

4.3.1.1 Pré-processamento da análise estrutural II

Para realizar a análise estrutural por meio do MEF, inicialmente realizou-se a discretização, conforme Figura 39, desta nova proposta no *software* CAE Abaqus 6,14.

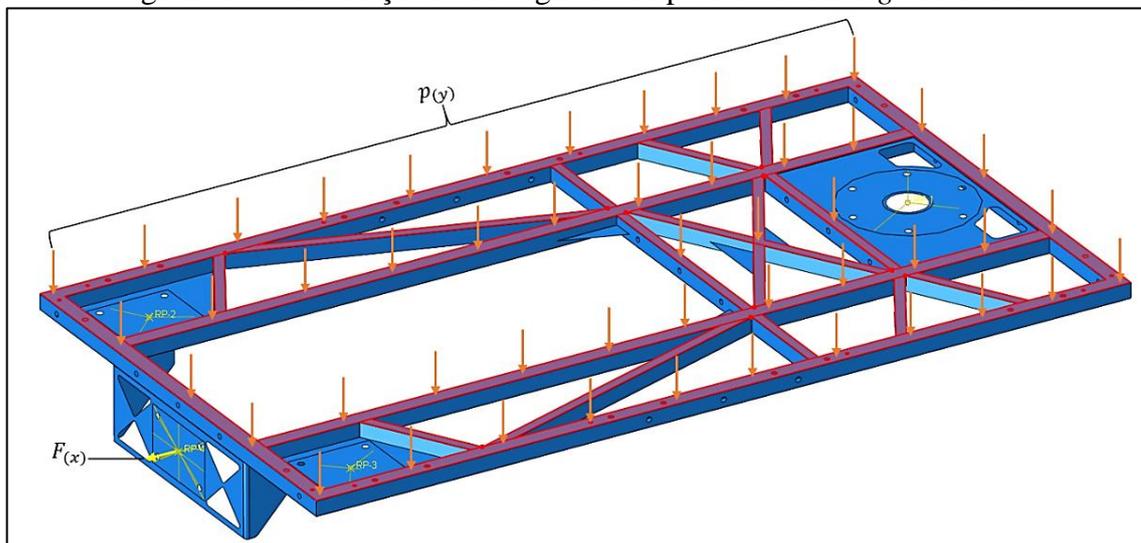


Fonte: o autor (2016).

A Figura 39, mostra a idealização da malha utilizando elemento *shell* (casca), pelo fato da estrutura ser composta por perfis tubulares e chapas, onde a espessura é menor que as outras dimensões. Os elementos que compõem a malha são do tipo S4R (quadrilátero) combinado com S3 (triangular). Para esta discretização foram criados 144.165 elementos.

A Figura 40, representa outra etapa do pré-processamento, a etapa de carregamentos que a estrutura está sujeita. Neste caso, os carregamentos externos impostos à estrutura, foram os mesmos da condição original, sendo um carregamento distribuído na parte superior $p(y)$ e a parcela do carregamento combinado $F(x)$ que representa o carregamento concentrado de tração de uma carga, cujos valores estão definidos na Tabela 3.

Figura 40 - Distribuição de carregamentos para o novo *design* de chassi



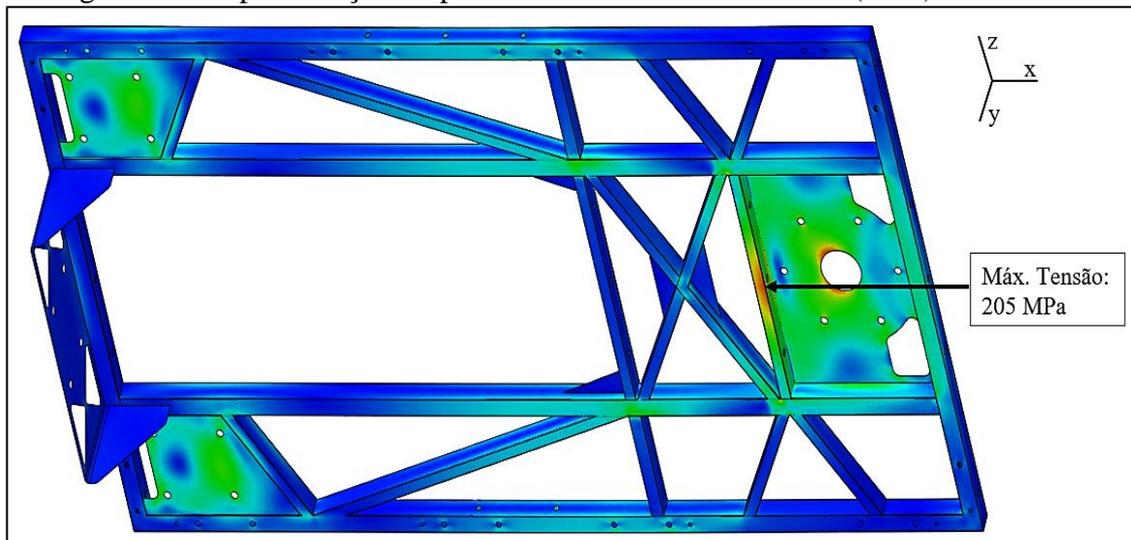
Fonte: o autor (2016).

4.3.1.2 Resultados da análise estrutural II

A interpretação dos resultados obtidos, bem como a validação ou não do resultado, levaram em conta aspectos de tensão máxima (MPa) de um ponto, baseado no critério de von Mises, e o outro aspecto é a deflexão (mm) da estrutura.

A Figura 41, representa o resultado de tensão obtido da análise estrutural, onde foi identificado o ponto crítico de tensão máxima, segundo o critério de von Mises. Para o ponto crítico foi identificada uma tensão máxima de 205 MPa, sendo assim, mesmo apresentando um elevado nível de tensão, a estrutura suportará aos carregamentos externos, já que a tensão máxima encontrada se encontra abaixo do limite de escoamento do material, que é de 230 MPa. Portanto, o material sofrerá apenas deformação elástica durante a aplicação, atendendo ao requisito de projeto, de trabalhar apenas no regime elástico do material.

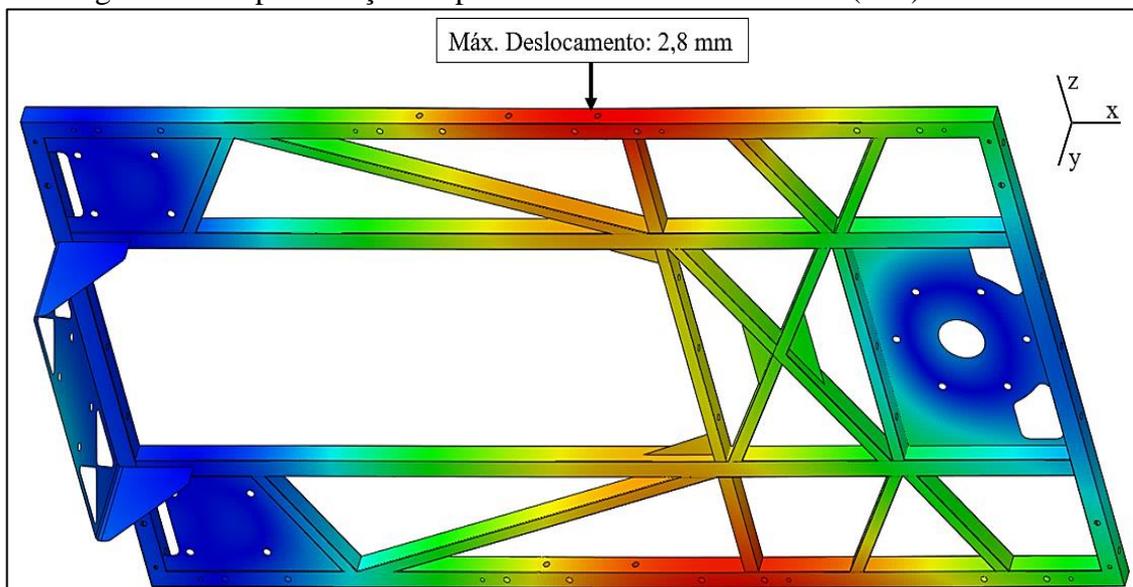
Figura 41 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura



Fonte: o autor (2016).

A Figura 42, mostra o resultado de deflexões (deslocamento) no sentido do eixo Y, que a estrutura está sujeita. O ponto crítico encontrado como resultado apresenta um deslocamento de 2,8mm.

Figura 42 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura



Fonte: o autor (2016).

4.4 ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL (OD)

Nesta seção são apresentados os resultados da otimização dimensional realizada na nova proposta de geometria de chassi do AGV. Posterior a otimização topológica, foi realizada a otimização dimensional na estrutura, com o objetivo de reduzir ainda mais a massa da

estrutura e que mesmo assim consiga atender aos requisitos da aplicação. Isso pode ser feito, por meio da busca pela melhor espessura dos elementos estruturais.

4.4.1 Pré-processamento da otimização dimensional

O pré-processamento da otimização dimensional (OD) foi realizado no *software* Abaqus 6.14, com o modelo obtido da análise estrutural da geometria otimizada de chassi. Primeiramente, foram abertos subgrupos no modelo CAE, também denominados *sets*, os quais foram criados com o intuito de agrupar elementos estruturais, como tubos e chapas, que possuam a mesma espessura. Estes *sets* têm a função de representar a *design area* da otimização dimensional, ou seja, definir quais as espessuras originais dos tubos e chapas que compõem a estrutura.

Já dentro do pré-processador do *software* Tosca Structure, os *sets* criados no modelo CAE foram utilizados para definir quais as regiões que poderiam ser otimizadas, e quais as suas espessuras originais. Para fazer com que a espessura varie entre as iterações do processo de otimização, foi estabelecida uma faixa de variação do *set*, ou seja, especificou-se um limite mínimo e um limite máximo de espessura, sendo que o limite máximo é a própria espessura original. Sendo assim, as espessuras dos tubos e chapas foram variadas em relação à sua dimensão original, até uma espessura de dimensão menor e que realmente fosse necessária. Além disso, parâmetros de simetria da estrutura foram levados em conta.

A Figura 43, mostra a etapa do pré-processamento no *software* Tosca Structure, responsável pela definição do limite máximo e mínimo que a espessura pode variar.

Figura 43 - Exemplo de definição de faixas de espessuras no *software* Tosca Structure

The image shows a software interface titled "DVCON_SIZING Constraints for Sizing Optimization". It contains the following fields and options:

- ID_NAME:** SIZING_DESIGN_630
- Element Group:** DESIGN_630
- Type:**
 - Frozen
 - Link Sizing
 - Minimum Cluster Width
 - Thickness Bounds
- Limite inferior (Lower Bound):** 0.1
- Limite superior (Upper Bound):** 6.30
- Magnitude:** ABS
- Limite espessura (Thickness Bounds):**
 - ALL_ELEMENTS
 - DESIGN_300
 - DESIGN_630

Fonte: o autor (2016).

Como exemplo, foi utilizado o *set* que contempla chapas com espessura original de 6,3 mm. A Figura 43, ilustra a faixa de variância dos elementos estruturais, podendo variar neste caso de 0,1 mm até no máximo 6,3 mm.

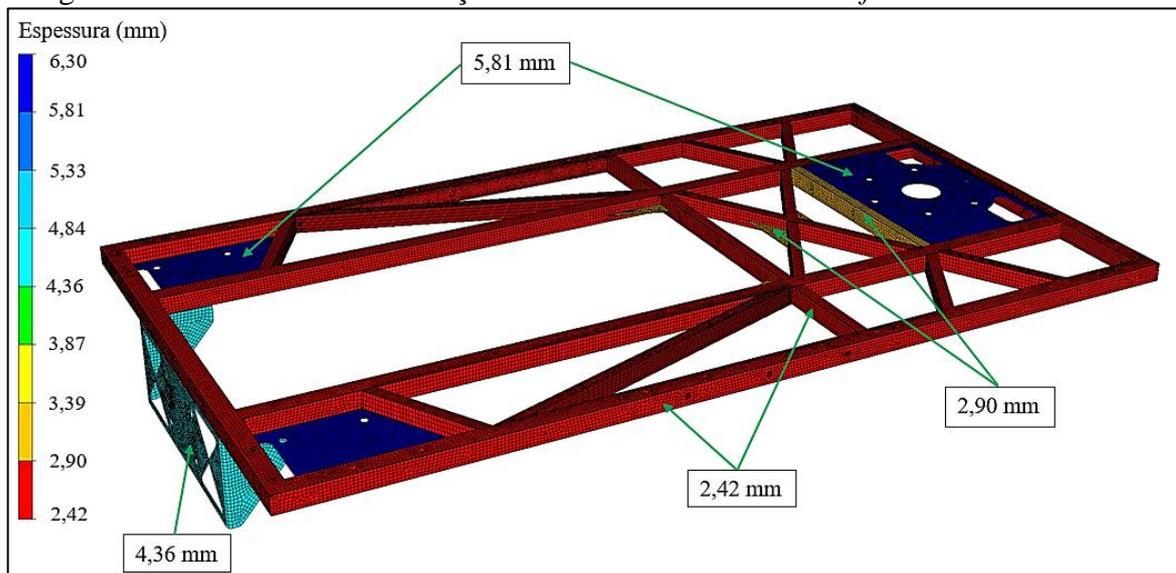
A estratégia adotada foi a minimização da energia de deformação, conseqüentemente a maximização da rigidez da estrutura. Com relação ao volume, este manteve-se constante para a otimização dimensional.

4.4.2 Análise de resultados para a otimização dimensional

Como resultado da otimização dimensional, obteve-se uma topologia sem alteração de forma dos componentes da estrutura. Uma escala de cores é gerada pelo *software* Tosca Structure como saída para interpretação dos resultados obtidos, após as iterações do processo de otimização dimensional. Na geometria gerada como resultado da otimização dimensional, os elementos estruturais são apresentados com uma coloração, conforme ilustra a Figura 44. Uma escala de cores contém faixas que delimitam a espessura mínima e máxima para cada cor, e para definir a espessura de cada componente que compõe a estrutura, deve ser feita uma comparação de cores entre o componente e a escala.

Como o objetivo foi reduzir a massa da geometria, mantendo a rigidez dentro dos critérios de projeto, a espessura definida para os componentes em todos os casos, foi a mínima espessura possível na escala de cor, ou seja, para cada faixa de cor foi utilizado o limite inferior. Com isso, a estrutura chegou a uma massa de aproximadamente 29,85 kg.

Figura 44 - Resultado da otimização dimensional utilizando o *software* Tosca Structure



Fonte: o autor (2016).

No Apêndice A deste trabalho, encontra-se um gráfico que mostra a minimização da energia de deformação com o passar das iterações do processo de otimização dimensional.

A Tabela 4, mostra um comparativo de dimensões de espessura entre a condição original e o resultado obtido com a otimização dimensional, utilizando o limite inferior da faixa de cor, bem como o percentual de redução para cada espessura.

Tabela 4 - Comparativo de espessuras

Cor (Figura 44)	Espessura original (mm)	Espessura pós OD (mm)	%
Azul escuro	6,3	5,81	- 7,7
Azul claro	4,75	4,36	- 8,2
Vermelho	2,65	2,42	- 8,6
Amarelo queimado	3,0	2,90	- 3,1

Fonte: o autor (2016).

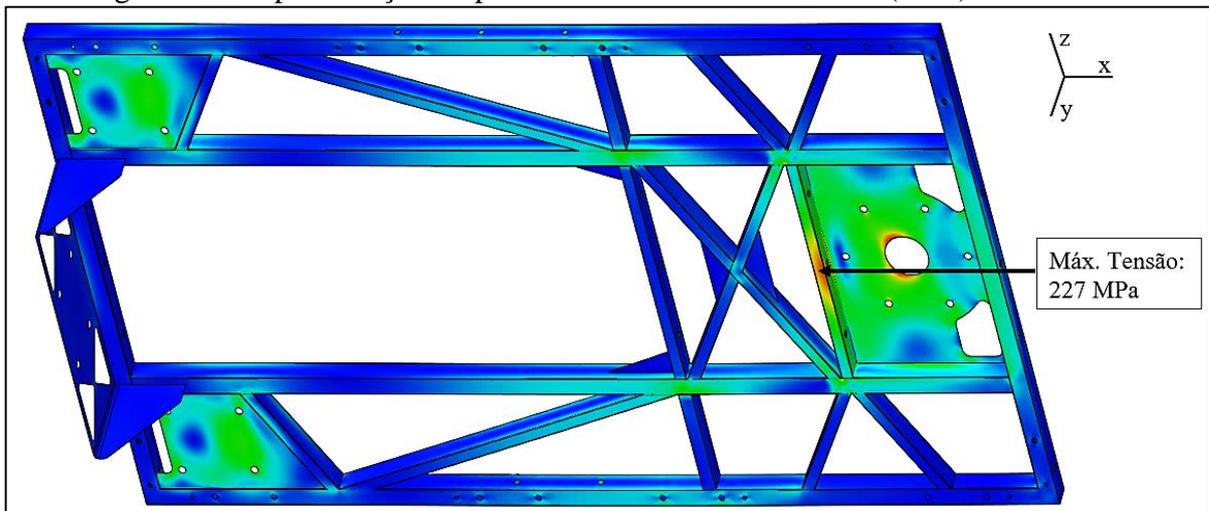
4.4.3 Análise estrutural III: validação e análise do chassi após OD

Com o objetivo de avaliar e validar a nova geometria de chassi, contemplando as espessuras encontradas na otimização dimensional, realizou-se uma análise estrutural utilizando MEF. Para isso, foi utilizado o software Abaqus 6.14, baseado no critério de von Mises para tensão máxima (MPa) no ponto crítico e o deslocamento (mm) que a estrutura está sujeita, quando aplicado o carregamento externo.

O pré-processamento da análise para otimização dimensional utilizando o MEF, foi semelhante ao realizado para a análise estrutural II. Sendo assim, com relação à discretização, o número de elementos e a configuração da malha permanecem exatamente igual ao representado na Figura 39, bem como condições de carregamento e restrições, ilustrados na Figura 40. O que diferencia o pré-processamento de uma análise para outra, são as diferentes espessuras de materiais. No caso da análise estrutural III, as espessuras utilizadas para fazer o pré-processamento foram as mesmas encontradas como resultado da otimização dimensional.

Como resultado, observando o aspecto de tensão máxima (MPa), de acordo com o critério de von Mises, para o ponto crítico encontrou-se uma magnitude de tensão de 227 MPa, conforme mostra a Figura 45. O valor de tensão encontrado está próximo do valor admissível definido como critério de projeto, que é de 230 MPa, contudo este valor atende ao critério de tensão.

Figura 45 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura

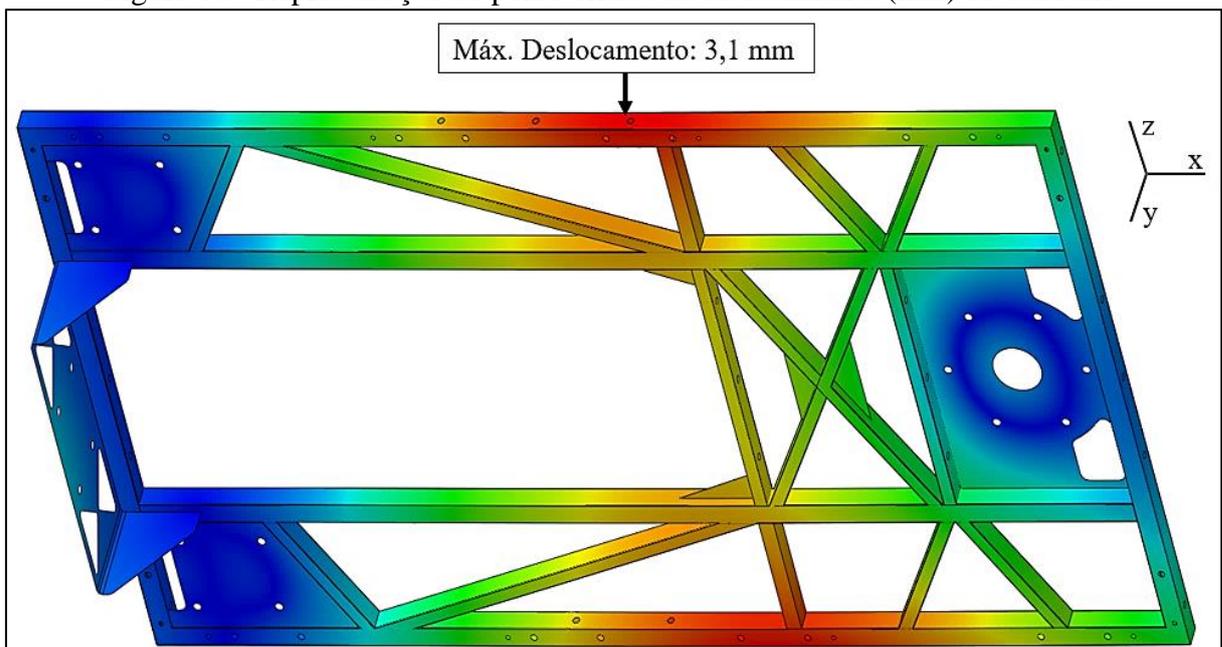


Fonte: o autor (2016).

Com relação ao deslocamento que a estrutura está sujeita, encontrou-se um deslocamento de 3,1 mm, para o ponto crítico, conforme ilustra a Figura 46.

Por meio destes resultados, é possível perceber que os pontos críticos, tanto de tensão quanto de deslocamento, encontram-se nos mesmos locais que as análises anteriores, mostrando assim uma coerência nos resultados, bem como grandezas de tensão e deslocamento similares ao longo das análises.

Figura 46 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura



Fonte: o autor (2016).

4.4.4 Análise estrutural IV: validação e análise final do chassi

Para dar condições de manufatura e produção da nova estrutura de chassi, foi necessário enquadrar as espessuras dos tubos e chapas, de acordo com dimensões de espessuras encontradas comercialmente. Sendo assim, no caso dos tubos buscou-se um valor de espessura comercial que mais se aproximava de 2,42 mm, e o valor encontrado foi de 2,3 mm. Outro componente que teve sua espessura adaptada às dimensões comerciais, foi a chapa que serve como suporte de tração de uma carga, cujo valor obtido na otimização dimensional foi de 4,36 mm, enquanto comercialmente o valor mais próximo fabricado é de 4,25 mm. Após realizou-se uma nova análise estrutural utilizando o MEF, com o objetivo de avaliar os valores de tensão e deslocamento nos pontos críticos. O restante dos elementos estruturais teve seu valor de espessura definido novamente com o valor original.

A Tabela 5, mostra os valores de espessura encontrados como resultado na otimização dimensional, e para cada valor a espessura mais próxima encontrada comercialmente, bem como o percentual de acréscimo ou redução em cada caso.

Tabela 5 - Comparativo de espessuras

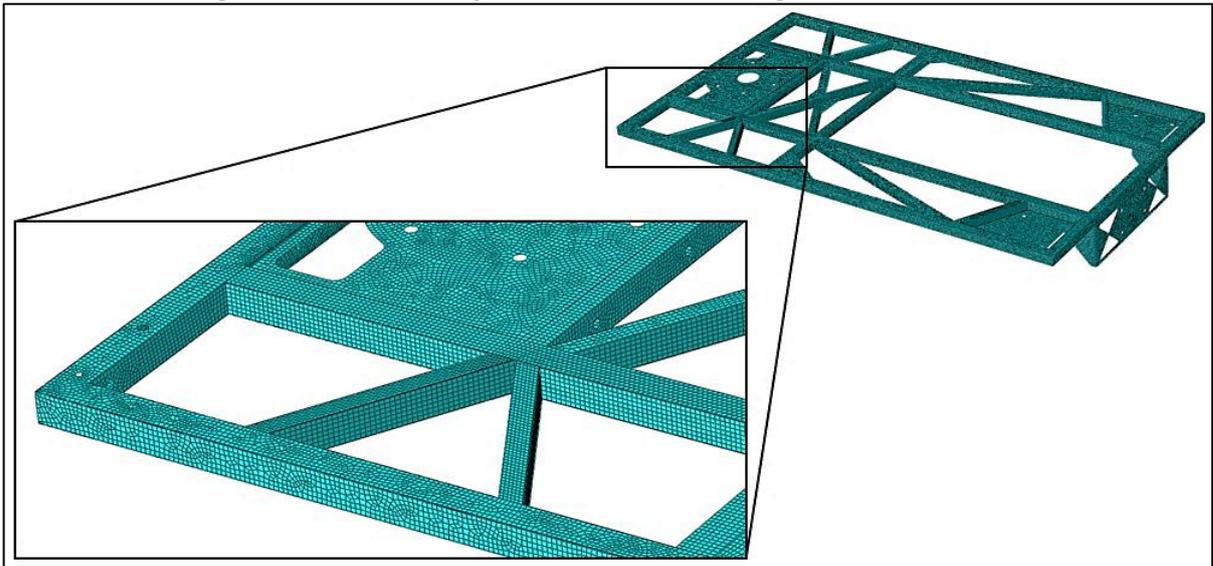
Cor (Figura 44)	Espessura pós OD (mm)	Espessura comercial (mm)	%
Azul escuro	5,81	6,30	+ 7,7
Azul claro	4,36	4,25	- 2,6
Vermelho	2,42	2,30	- 5,2
Amarelo queimado	2,90	3,00	+ 3,1

Fonte: o autor (2016).

4.4.4.1 Pré-processamento da análise estrutural IV

O pré-processamento da análise foi realizado no *software* Abaqus 6.14. Algumas alterações no modelo precisaram ser feitas, e estão descritas na sequência, no item que diz respeito aos resultados da análise estrutural. A Figura 47, ilustra a discretização do modelo posterior às alterações realizadas, e assim como para as análises anteriores, a malha é composta por uma combinação de elementos triangulares S3 e quadriláteros S4R. O modelo da Figura 47 apresenta um total de 147.777 elementos.

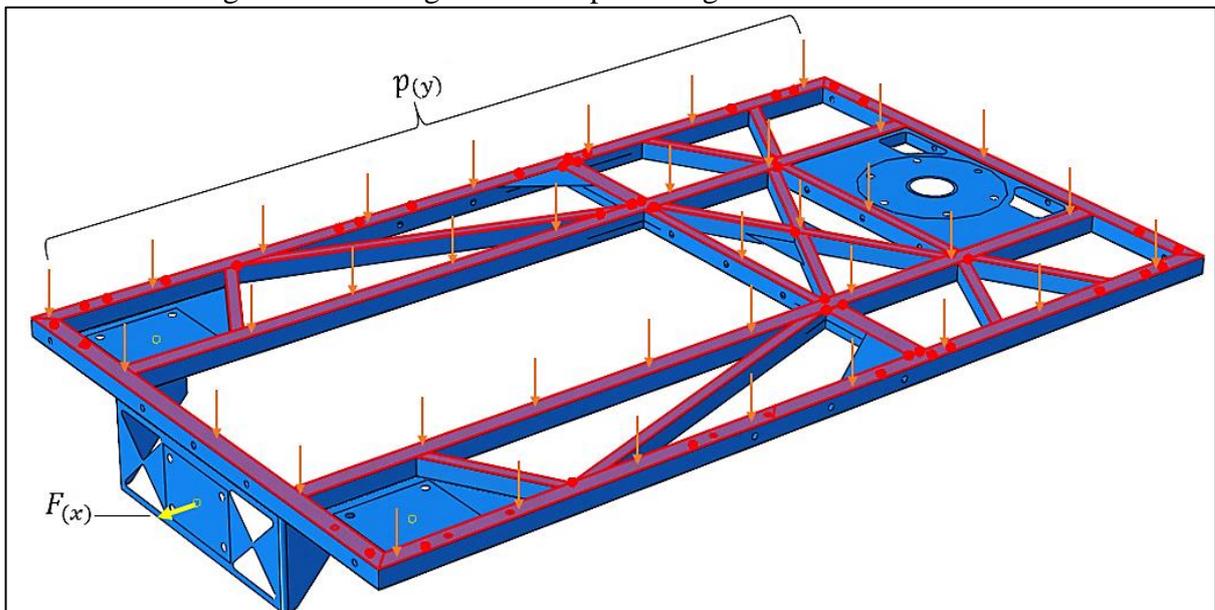
Figura 47 - Discretização do modelo final de geometria de chassi



Fonte: o autor (2016).

A Figura 48 mostra os carregamentos que a estrutura está sujeita na etapa de pré-processamento da análise. Neste caso, foi aplicado o carregamento $p(y)$ e a parcela do carregamento combinado $F(x)$, que representa o carregamento concentrado de tração de uma carga, cujos valores podem ser encontrados na Tabela 3.

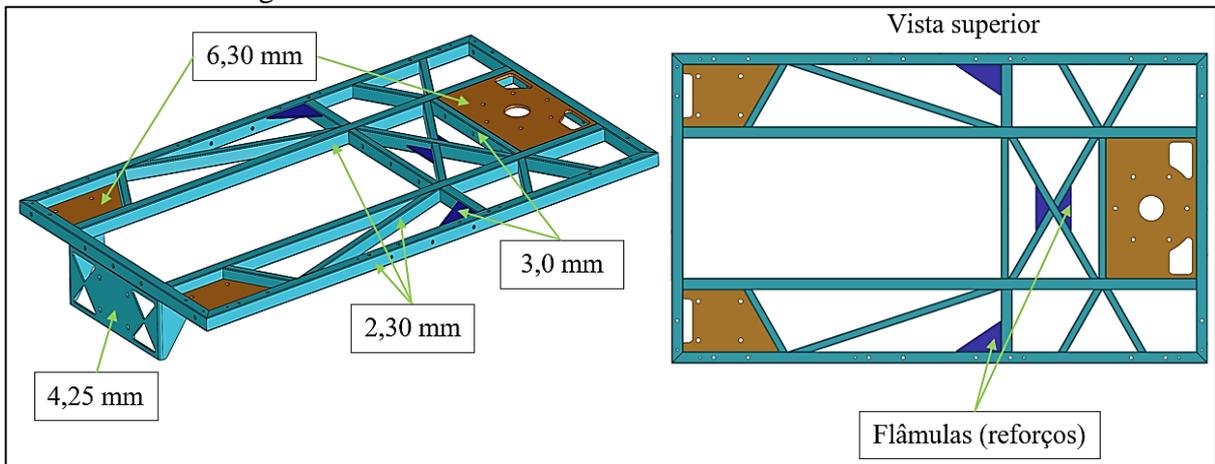
Figura 48 – Carregamentos impostos a geometria final de chassi



Fonte: o autor (2016).

A Figura 49, mostra o modelamento final da geometria em *software* CAD, apresentando uma massa de 30,5 kg.

Figura 49 - Geometria final da estrutura de chassi do AGV

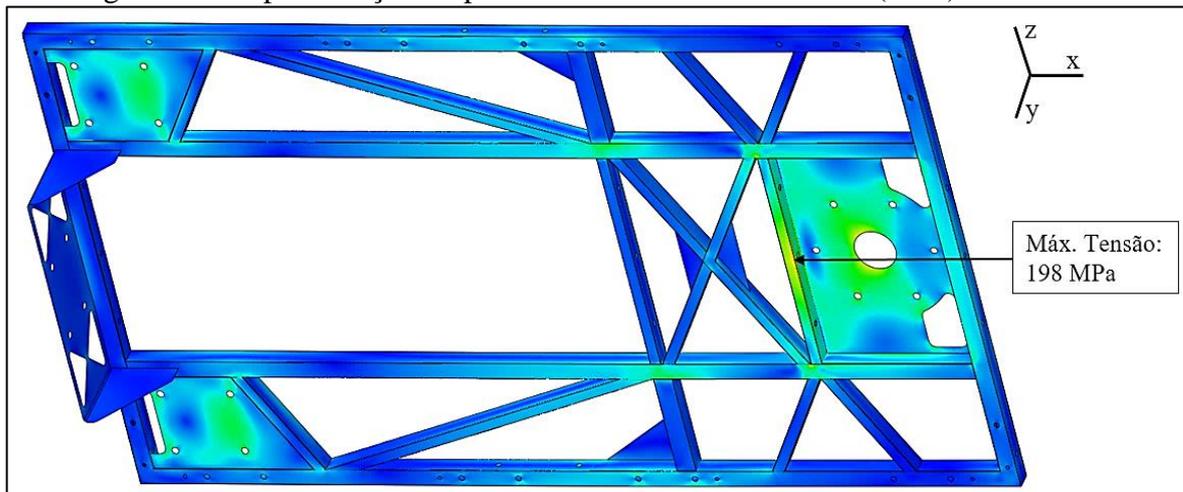


Fonte: o autor (2016).

4.4.4.2 Resultados da análise estrutural IV

Como resultado da análise estrutural IV e avaliando sob o aspecto de tensão máxima (MPa), segundo o critério de von Mises, encontrou-se uma magnitude de tensão máxima de 198 MPa no ponto crítico para a geometria final, conforme mostra a Figura 50. Este valor de tensão encontrado no ponto crítico, está abaixo do valor admissível de 230 MPa, definido como requisito de projeto. Com este resultado é possível definir que a estrutura está apta à sua aplicação, sob o critério de tensão.

Figura 50 - Representação do ponto crítico de tensão máxima (MPa) da estrutura

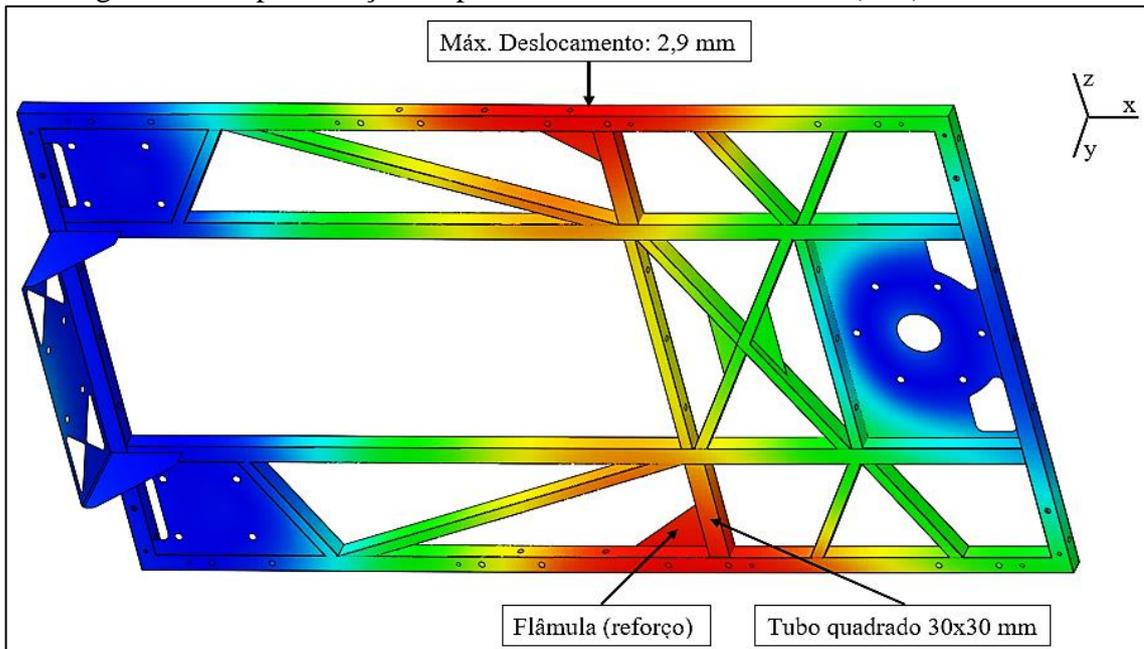


Fonte: o autor (2016).

Tendo como base o mesmo modelo da análise estrutural III, porém com uma espessura de tubos de 2,3 mm, observou-se que após realizar uma primeira análise, houve deflexão excessiva nos tubos laterais, ocasionada pela diminuição do momento de inércia dos tubos.

Portanto, foi necessário realizar uma alteração no modelo, a qual contempla a adição de uma flâmula (reforço) na região do ponto crítico de deslocamento, bem como a alteração do tubo de ligação, passando de um tubo de seção retangular 30 x 20 mm da análise anterior, para um tubo de seção quadrada de 30 x 30 mm, conforme mostra a Figura 51.

Figura 51 - Representação do ponto crítico de deslocamento (mm) da estrutura



Fonte: o autor (2016).

A Figura 51, ilustra o efeito causado pelos carregamentos externos na estrutura sob o ponto de vista de deslocamento (mm). Como resultado encontrou-se um deslocamento de 2,9 mm para o ponto crítico, representado na Figura 51. Este resultado mostrou-se coerente, pois o local de maior deslocamento é exatamente na mesma região de maior deflexão do modelo original, e com uma magnitude bem próxima ao da análise estrutural do modelo original.

4.4.5 Comparação de resultado entre as análises estruturais

Após o término das análises estruturais, foi possível desenvolver uma tabela, comparando os resultados obtidos de: tensão máxima (MPa), deslocamento (mm) e massa da estrutura em cada análise. Com estes resultados foi possível perceber que a estrutura original (análise estrutural I), encontrava-se em um estado razoavelmente próximo de seus limites de projeto, porém mesmo assim conseguiu-se reduzir a massa do componente, dentro dos limites de tensão máxima e deslocamento. A Tabela 6, mostra os resultados obtidos de cada grandeza, respectivamente.

Tabela 6 - Tabela comparativa de resultados

Modelo	Tensão máxima de von Mises (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Massa (kg)	Observações
Análise I	196	2,6	37	Modelo original
Análise II	205	2,8	32	Após OT
Análise III	227	3,1	29,85	Após OT e OD
Análise IV	198	2,9	30,5	Esp. comerciais

Fonte: o autor (2016).

Sob o ponto de vista de flexibilidade da estrutura, percebe-se que a geometria final apresenta uma rigidez um pouco menor, se comparado com o modelo original, visto que houve um pequeno aumento na deflexão, bem como um acréscimo na tensão máxima, porém estes valores acrescidos encontram-se dentro dos limites definidos de projeto.

5 CONCLUSÃO

Neste relatório foi desenvolvido um estudo virtual de otimização estrutural para concepção da estrutura de chassi de um AGV. Para isso, foram aplicadas técnicas de otimização topológica e dimensional, visando uma diminuição da massa da estrutura em relação ao modelo original e a minimização da energia de deformação, conseqüentemente maximização da rigidez. Ou seja, desenvolver uma estrutura mais leve e que mesmo assim permaneça íntegra durante a sua aplicação, atendendo aos requisitos de projeto.

Para isso, foram utilizadas ferramentas computacionais de otimização estrutural como o *software* Tosca Structure, além de ferramentas tradicionais como o Abaqus para análises de MEF e o SolidWorks como ferramenta de CAD. Por meio deste relatório, percebeu-se a importância e os benefícios que ferramentas computacionais, como a de estudo de otimização estrutural podem trazer ao desenvolvimento de novos projetos e na pesquisa. Benefícios como: redução de custos para as empresas, no que diz respeito a diminuição do tempo de execução de projetos, diminuição de custos com matéria-prima e fabricação, otimização de tempo de manufatura, minimização de efeitos sobre o meio ambiente, aumento da competitividade e eficiência do produto, dentre outros.

Sendo assim, isto não poderia ser diferente para o desenvolvimento de uma estrutura de chassi de um Veículo Guiado Automaticamente, surgindo assim a demanda por uma solução mais eficiente, com custo reduzido e que tornasse o produto mais competitivo. A motivação para a execução deste estudo, pelo fato do chassi fazer parte de um veículo elétrico, foi conceber uma geometria ótima, ou seja, uma estrutura mais leve e capaz de resistir aos esforços externos. O intuito de desenvolver esta geometria ótima foi propiciar um aumento da autonomia do veículo, admitindo a relação peso *versus* potência, possibilitando também um aumento da capacidade de carga do veículo, uma redução do custo de fabricação do componente, diminuição da quantidade de *part number* para administração, maior facilidade de manuseio do equipamento, diminuição da quantidade de peças, evitar superdimensionamento, entre outros.

Inicialmente, o chassi havia sido concebido com uma massa de 37 kg, e uma tensão máxima de 196 MPa, sendo o máximo de 230 MPa por critério de projeto, enquanto o deslocamento máximo que o componente apresentava era de 2,6 mm. Por meio da aplicação de técnicas de otimização, chegou-se a uma geometria otimizada, apresentando como resultado final, uma massa de 30,5 kg, uma tensão máxima de 198 MPa e um deslocamento de 2,9 mm. Desta maneira, houve uma redução da massa de aproximadamente 17,6%, enquanto que o

acrécimo de tensão (2 MPa) e deslocamento em Y (0,3 mm) são considerados irrelevantes para a aplicação.

A partir destes resultados, pode-se dizer que o objetivo deste trabalho foi alcançado, pois encontrou-se uma geometria ótima para o componente estudado, apresentando uma massa reduzida se comparado com o modelo intuitivo original, e garantindo a integridade do chassi do AGV para a aplicação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas possibilidades para trabalhos futuros incluem:

- a) desenvolver metodologia para automatizar o processo de redistribuição de carregamento após cada etapa do processo de otimização;
- b) utilização de materiais mais resistentes como aço de alta resistência mecânica e baixa liga (ARBL) ou liga de alumínio;
- c) realizar ensaios experimentais com o material dos elementos estruturais (tubos e chapas), com o objetivo de avaliar as reais propriedades mecânicas;
- d) construir protótipo utilizando a nova geometria de chassi, e realizar análise experimental de tensões e deslocamento utilizando *strain gauges*;
- e) modelar as juntas soldadas na união dos tubos e chapas no novo quadro de chassi;
- f) realizar análise de desempenho do AGV com o novo chassi, relacionado a eficiência e autonomia, aplicando as mesmas condições do conceito original, para fins comparativos;
- g) realizar análise modal da nova estrutura de chassi;
- h) realizar uma análise de custos contemplando a redução de massa obtida na nova geometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2012.

ARORA, Jasbir S. **Introduction to Optimum Design**. 2. ed. Iowa: Elsevier Inc., 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6656: Chapas e bobinas de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8261: Perfil tubular de Aço-Carbono Formado a Frio**. Rio de Janeiro, 1983.

AZEVEDO, Álvaro. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Porto: [s.n.], 2003.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. New Jersey: Prentice Hall Regents, 1996.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. New Jersey: Prentice Hall Regents, 1982.

BENDSOE, M. P. **Optimization of Structural Topology, Shape and Material**. New York: Springer, 1995.

BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology Optimization: Theory, Methods and Applications**. Alemanha: Springer, 2003.

CANO, Carlos Enrique Villanueva. **Técnica de navegação de um robô móvel baseado em um sistema de visão para entregá-lo a uma célula flexível de manufatura**. 2006. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Programa de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Brasília, 2006.

CASCINI, Gaetano et al. **Systematic Design Through the Integration of TRIZ and Optimization Tools**. Elsevier, 2011.

CAVIRAGHI, Luiz Dirceu. **Metodologia de desenvolvimento de um anteprojeto para veículos leves e médios**. 2005. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Porto Alegre, 2005.

COSTA JR, J.C; ALVES, M.K. Topology optimization with H-Adaptivity of thick plates. In: GIMC – Third Joint Conference of Italian Group of a Computational Mechanics and Ibero-Latin American Association of Computational Methods in Engineering, Italy, CDRom media, 2002.

COUTINHO, Karilany Dantas. **Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

DS AUTOMOTION. **Case Studies**. Áustria, 2010. Disponível em: <http://www.ds-automotion.com/uploads/pics/LMS_32.jpg>. Acesso em: 13 abr. 2016.

FAZLOLLAHTABAR, Hamed; SAIDI-MEHRABAD, Mohammad. Methodologies to Optimize Automated Guided Vehicle Scheduling and Routing Problems: **A Review Study Journal of Intelligent & Robotic Systems**, vol. 77, p. 525-545, 2013.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **A First Course in Finite Elements**. Chichester, England: John Wiley & Sons Inc., 2007.

GRISON, Vagner. **Ferramenta para análise dinâmica e estrutural de um reboque de linha leve**. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, 2005.

HAFTKA, Raphael T.; GÜRDAL, Zafer. **Elements of Structural Optimization**. 3. ed. Blacksburg: Kluwer Academic Publishers, 1992.

HEARN, E. J. **Mechanics of Materials 2: the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials**. 3. ed. Johannesburg: Elsevier, 1997.

HERZER, Rafael. **Otimização Topológica em Estruturas Bidimensionais**. 2012. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2012.

KARAOGLU, C.; SEFA, K. **Stress analysis of a truck chassis with riveted joints**. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia DEU, Turquia: Elsevier, 2002.

KIM, C. W.; TANCHOCO, J.; KOO, P. H. AGV Dispatching Based on Workload Balancing. **International Journal of Production Research**, vol. 37, n. 17, nov. 1999.

LUBLINER, J. **Plasticity Theory**. New York: Macmillan Publishing Company, 1990.

PÉREZ, Omar Lengerke. **Uma arquitetura mecatrônica de navegação para veículos com reboques guiados automaticamente em ambientes de sistemas flexíveis de manufatura**. 2010. 229f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2010.

PERINI, Gustavo. **Otimização paramétrica de um suporte do estepe objetivando a minimização da massa utilizando software pro/Mechanica**. 2008. 81f. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

PERINI, Gustavo. **Estudo de Caso: Aplicação de Otimização Topológica no Desenvolvimento do Projeto de um Cubo de Roda**. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

RAO, Singiresu S. **Engineering Optimization: theory and practice**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2009.

ROCHA, Rui Paulo Pinto da. **Desenvolvimento de um Sistema de Gestão de AGVs**. 1998. 648f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Programa de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Porto, 1998.

SALEEM, Waqas; LU, Hu; YUQING, Fan. **Topology Optimization- Problem Formulation and Pragmatic Outcomes by integration of Tosca and CAE tools**. In: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2008. Artigo. San Francisco, 2008, p. 1-2.

SAMPAIO, Fernanda. Veículos guiados automaticamente: tecnologia sem condução. **Jornal Logweb**, São Paulo, 65 ed, p. 12-14, jul. 2007.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Tradução de João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

SIMULIA TOSCA STRUCTURE. **Documentation**. Karlsruhe, 2014. Disponível em: <<http://www.3ds.com/tosca>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

SILVA, Emílio Carlos Nelli. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas**. São Paulo, abr. 2002.

SILVA, José Guilherme Santos, et. al. **Análise Estrutural de Chassis de Veículos Pesados com Base no Emprego do Programa Ansys**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

SIMONETTI, H.L.; ALMEIDA, V.S.; NETO, L. O. A influência do peso próprio na otimização topológica de estruturas elásticas 2D – via técnica numérica Smooth Evolutionary Structural Optimization (SESO). **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, vol.30, p. 271-280, out-dez. 2014.

SOUSA, T. L. C. D. **Análise estrutural estática e dinâmica de ventilador industrial**. 2011. 79 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SOUZA, Remo Magalhães. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

SPARK AG SOFTWARE E AUTOMAÇÃO LTDA. **Acervo interno**. Nova Prata, 2016.

SVANBERG, Krister. The method of moving asymptotes – A new method for structural optimization. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Stockholm, vol. 24, p. 359-373, 1987.

TANAKA, Carlos Naomi. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. 2013. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São

Paulo, Programa de Mestrado do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2013.

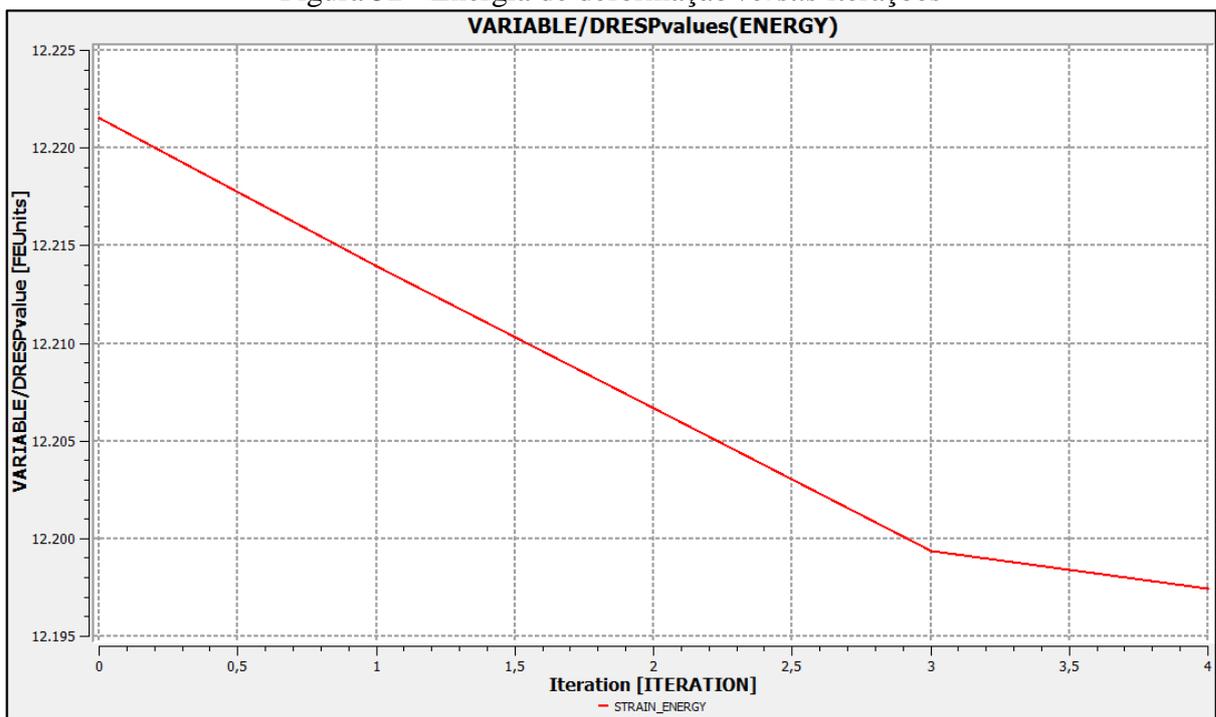
VARGAS, D.E.C et al. Um algoritmo baseado em evolução diferencial para problemas de otimização estrutural multiobjetivo com restrições. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, vol. 32, p. 91-99, abr – jun. 2016.

VENTURA, José A.; PAZHANI, Subramanian; MENDOZA, Abraham. Finding optimal dwell points for automated guided vehicles in general guide-path layouts. **International Journal of Production Economics**. Elsevier, p. 850-861, 2015.

APÊNDICE A – ENERGIA DE DEFORMAÇÃO *VERSUS* ITERAÇÕES

O gráfico abaixo representa o comportamento da energia de deformação da estrutura, à medida que foram acontecendo as iterações do processo de otimização dimensional. Por meio deste gráfico, é possível perceber que houve a minimização da energia de deformação, consequentemente, a maximização da rigidez do componente durante o processo de otimização dimensional. O gráfico da Figura 52, foi retirado como resultado no *software* Tosca Structure.

Figura 52 - Energia de deformação *versus* iterações



Fonte: o autor (2016).