

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**ANDREIS LUVIZON DA SILVA**

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE  
CARROCERIAS DE ÔNIBUS**

**CAXIAS DO SUL**

**2018**

**ANDREIS LUVIZON DA SILVA**

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE  
CARROCERIAS DE ÔNIBUS**

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**

**2018**

**ANDREIS LUVIZON DA SILVA**

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE  
CARROCERIAS DE ÔNIBUS**

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 19 / 11 / 2018**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Joel Vicente Ciapparini  
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me Vagner Grison  
Universidade de Caxias do Sul

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo buscar uma metodologia para criação de novos projetos de casulo estruturais de ônibus, utilizando técnicas de otimização estrutural, para obter uma geometria de estrutura ótima desde o desenvolvimento inicial do projeto. Definiu-se um modelo de carroceria, tendo-se o domínio de estrutura, condições de contorno e carregamentos submetidos. Com as condições definidas, foi utilizado o método de análise em elementos finitos, com auxílio do *software* Ansys, em conjunto com seu módulo de otimização presente no Ansys Mechanical, para realizar a otimização topológica sobre os diferentes subsistemas estruturais da carroceria, sendo o método final aplicado sobre as estruturas da base e teto, obtendo-se uma estrutura final do casulo com uma massa de 1726 kg, composta dentro das áreas otimizadas, por 49 tubos no teto e 103 na base do veículo.

**Palavras-chaves:** Otimização Estrutural. Análise de Elementos Finitos. Carroceria de Ônibus.

## **ABSTRACT**

The present work had as objective to find a methodology for creation of new busses structural cocoons, using structural optimization technics, to achieve a optimal structure geometry since the initial development of the project. It was defined a bus bodywork, having the structure domain, bounding conditions and stresses. With the conditions defined, there was used the finite element analysis method, with the support of the software Ansys, together with its optimization module within Ansys Mechanical, to perform the topology optimization on the different structural subsystems of the bodywork, being the final method applied over the base and roof structures, achieving a final bodyworks structure with 1726 Kg, composed within the optimized areas by 49 tubes on the roof and 103 tubes on the base of the vehicle.

**Keyword:** Structural Optimization. Finite Element Analysis. Bus Bodywork.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes modelos de uma mesma carroceria .....	11
Figura 2 - Composição de uma carroceria de ônibus .....	16
Figura 3 - Frente e traseira de uma carroceria de ônibus.....	17
Figura 4 - Lateral esquerda de uma carroceria de ônibus.....	18
Figura 5 - Teto de uma carroceria de ônibus .....	18
Figura 6 - Base de uma carroceria de ônibus.....	19
Figura 7 - Anel estrutural da carroceria.....	19
Figura 8 - Direções das principais forças atuantes na carroceria .....	20
Figura 9 - Distribuição de forças verticais na lateral.....	21
Figura 10 - Distribuição de forças longitudinais .....	22
Figura 11 - Distribuição de forças transversais .....	22
Figura 12 - Tubo de Seção quadrada 50 x 50 mm.....	23
Figura 13 - Tipos de elementos finitos .....	25
Figura 14 - Discretização de um modelo.....	26
Figura 15 - Deslocamento de elemento de casca.....	27
Figura 16 - Distribuição de cargas sobre um corpo.....	28
Figura 17 - Fluxo de desenvolvimento de projetos .....	29
Figura 18 - Diferentes tipos de otimização estrutural.....	30
Figura 19 - Otimização Dimensional.....	31
Figura 20 - Otimização de Forma.....	31
Figura 21 - Otimização Topológica.....	32
Figura 22 - Dependência de malha .....	32
Figura 23 - Etapas e iterações de uma otimização topológica.....	33
Figura 24 - Otimização topológica de uma estrutura veicular.....	34
Figura 25 - Fluxograma de atividades .....	35
Figura 26 - Ônibus modelo Torino .....	36
Figura 27 - Corte Transversal .....	37
Figura 28 - Domínio inicial de projeto .....	38
Figura 29 - Domínio do projeto.....	39
Figura 30 - Distribuição de acelerações na carroceria.....	40
Figura 31 - Carregamentos para análise de torção .....	42
Figura 32 - Otimização inicial pela primeira diagonal com 80% de restrição de volume .....	44

Figura 33 - Otimização inicial pela primeira diagonal com 70% de restrição de volume .....	45
Figura 34 - Otimização inicial pela primeira diagonal com 50% de restrição de volume .....	45
Figura 35 - Otimização inicial pela segunda diagonal com 70% de restrição de volume.....	46
Figura 36 - Otimização inicial pela rodas dianteiras com 50% de restrição de volume.....	47
Figura 37 - Esforços adicionais no teto pelas laterais .....	49
Figura 38 - Otimização no teto pela primeira diagonal com 50% de restrição de volume .....	50
Figura 39 - Otimização no teto pela primeira diagonal com 30% de restrição de volume .....	50
Figura 40 - Otimização no teto pela segunda diagonal com 50% de restrição de volume .....	51
Figura 41 - Otimização no teto pela segunda diagonal com 30% de restrição de volume .....	51
Figura 42 - Otimização no teto pelas rodas dianteiras com 50% de restrição de volume I.....	52
Figura 43 - Otimização no teto pelas rodas dianteiras com 30% de restrição de volume .....	52
Figura 44 - Esforço adicional no teto pela frente .....	53
Figura 45 - Otimização no teto pelas rodas dianteiras com 50% de restrição de volume II ...	54
Figura 46 - Padrões identificados para desenvolvimento por sobreposição.....	55
Figura 47 - Remodelamento Estrutura do Teto .....	56
Figura 48 - Pontos de apoio do chassi .....	56
Figura 49 - Esforços adicionais na base .....	57
Figura 50 - Otimização da base pela primeira diagonal com 50% .....	58
Figura 51 - Otimização da base pela segunda diagonal com 50% .....	59
Figura 52 - Otimização da base pelas rodas dianteiras com 50% .....	59
Figura 53 - Remodelamento da base para segunda etapa.....	60
Figura 54 - Condições para segunda análise da base.....	61
Figura 55 - Segunda etapa de otimização sobre o subsistema base com.....	62
Figura 56 - Remodelamento final da estrutura da base .....	63
Figura 57 - Estrutura da base pós otimização topológica.....	63
Figura 58 - Modelamento final do casulo estrutural.....	64
Figura 59 - Análise com peso próprio .....	65
Figura 60 - Pontos críticos para peso próprio.....	65
Figura 61 – Análise com aceleração em curva .....	66
Figura 62 - Pontos críticos para aceleração em curva .....	67
Figura 63 - Análise em frenagem .....	67
Figura 64 - Pontos críticos para frenagem.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas do Aço ZAR 230 e ZSTE 380 .....	37
Tabela 2 - Acelerações equivalentes sobre o modelo .....	40
Tabela 3 - Condições de contorno para análises de acelerações .....	41
Tabela 4 - Condições de contorno para análises de torção .....	41
Tabela 5 - Condições de contorno para análises de torção no eixo dianteiro.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
OT	Otimização Topológica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	12
1.2	OBJETIVO GERAL.....	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
1.4	ABORDAGEM E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE PROJETO DE ÔNIBUS .....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Casulo Estrutural .....</b>	<b>15</b>
2.1.1.1	Composição da Carroceria.....	16
<b>2.1.2</b>	<b>Distribuição de cargas .....</b>	<b>20</b>
2.1.2.1	Forças verticais .....	20
2.1.2.2	Forças longitudinais.....	21
2.1.2.3	Forças Transversais .....	22
<b>2.1.3</b>	<b>Tubos de Parede Fina.....</b>	<b>23</b>
2.2	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	24
<b>2.2.1</b>	<b>Discretização de modelos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Elementos Estruturais.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Análise Linear .....</b>	<b>27</b>
2.3	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Métodos de otimização .....</b>	<b>30</b>
2.3.1.1	Otimização Dimensional .....	30
2.3.1.2	Otimização de Forma.....	31
2.3.1.3	Otimização Topológica.....	32
2.3.1.3.1	<i>Otimização topológica aplicada em estruturas veiculares .....</i>	<i>33</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO PRODUTO.....	36
3.2	PRÉ-PROCESSAMENTO .....	37
<b>3.2.1</b>	<b>Domínio .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Carregamentos.....</b>	<b>40</b>

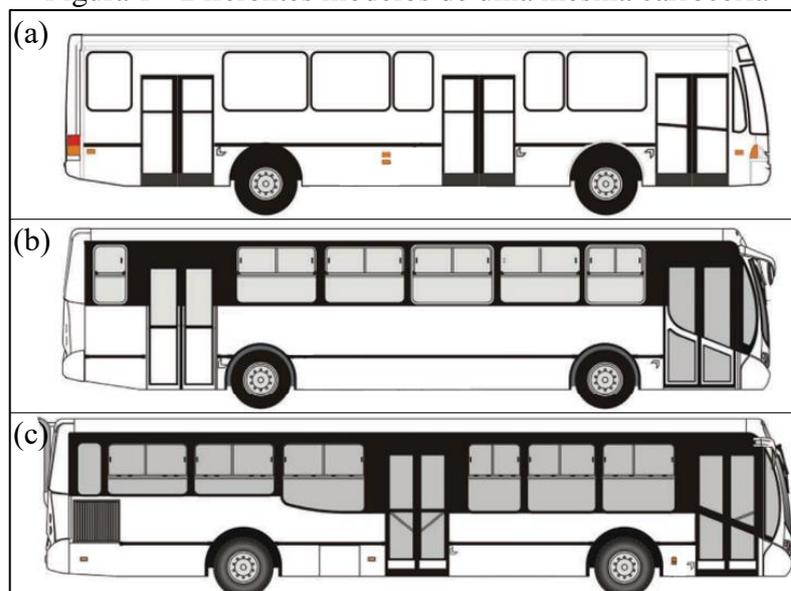
3.3	FERRAMENTAS DE ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO.....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
4.1	RESULTADOS DOS TESTES INICIAIS .....	44
4.1.1	<b>Carregamentos sobre a primeira diagonal I.....</b>	<b>44</b>
4.1.2	<b>Carregamentos sobre a segunda diagonal I.....</b>	<b>46</b>
4.1.3	<b>Carregamentos sobre as rodas dianteiras I.....</b>	<b>46</b>
4.1.4	<b>Remodelamento do domínio inicial.....</b>	<b>48</b>
4.2	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO NO SUBSISTEMA TETO .....	48
4.2.1	<b>Carregamentos sobre a primeira diagonal II.....</b>	<b>49</b>
4.2.2	<b>Carregamentos sobre a segunda diagonal II.....</b>	<b>50</b>
4.2.3	<b>Carregamentos sobre as rodas dianteiras II.....</b>	<b>52</b>
4.2.4	<b>Remodelamento da estrutura do teto.....</b>	<b>54</b>
4.3	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO NO SUBSISTEMA BASE .....	56
4.3.1	<b>Carregamentos sobre a primeira diagonal III.....</b>	<b>57</b>
4.3.2	<b>Carregamentos sobre a segunda diagonal III.....</b>	<b>58</b>
4.3.3	<b>Carregamentos sobre as rodas dianteiras III.....</b>	<b>59</b>
4.3.4	<b>Remodelamento da estrutura da base .....</b>	<b>60</b>
4.3.5	<b>Segunda etapa de carregamentos sobre a base.....</b>	<b>61</b>
4.3.6	<b>Remodelamento da estrutura da base II.....</b>	<b>62</b>
4.4	ANÁLISE FINAL .....	63
4.4.1	<b>Peso Próprio .....</b>	<b>64</b>
4.4.2	<b>Aceleração em Curva .....</b>	<b>66</b>
4.4.3	<b>Frenagem.....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico e produtivo acelerado presente no atual contexto de modernidade, observa-se facilmente a concentração cada vez maior de pessoas nos ambientes urbanos, gerando, em consequência, a necessidade de expansão das cidades. Exercendo um papel fundamental na configuração de deslocamento urbano, cita-se como um dos principais meios, o transporte coletivo de passageiros, sendo uma alternativa que reduz diversos dos graves problemas encontrados nos centros urbanos, como congestionamentos, acidentes de trânsito e impactos ambientais, tornando o ônibus um veículo de relevância nos centros urbanos.

No projeto de um ônibus trabalham-se com diversos subsistemas que são projetados paralelamente e em constante comunicação. Entre esses subsistemas pode-se identificar chassi, estrutura da carroceria, sistemas de aberturas, sistemas elétricos, dentre outros. Referindo-se a um projeto de ônibus em nível estrutural, surge a necessidade de análises de variação, justificada pela grande quantidade de possibilidades de opcionais que o mesmo pode conter, como por exemplo, uma porta no entre-eixo do ônibus, que pode estar localizada em diversas posições ao longo de determinadas faixas de valores. A Figura 1 demonstra a variabilidade em um mesmo projeto, sendo que pode-se encontrar opcionais, como porta entre-eixo (Figura 1.c) e traseira (Figura 1.b), que podem coexistir entre si (Figura 1.a), gerando mais de um modelamento possível. Devido a isso, cada modelo de carroceria deve passar por mais de uma análise, abrangendo as variações estruturais mais críticas que podem ocorrer no projeto.

Figura 1 - Diferentes modelos de uma mesma carroceria



Fonte: adaptado de ABNT 14022 (2009).

Outro fator importante que deve ser levado em consideração durante o desenvolvimento do projeto de um ônibus, refere-se à competitividade de mercado. Para ser competitivo, o projeto deve ser desenvolvido de maneira a poder transportar a maior quantidade de passageiros possível, consumir menos combustível, com menor desgaste de seus componentes e ter um preço no mínimo semelhante aos veículos concorrentes. Dessa forma, a competitividade exige, dentre outros fatores, redução da massa do veículo. Porém, em contraponto a essa redução, necessita-se também aumentar a segurança do veículo, a partir do aumento de sua rigidez estrutural, que normalmente acarreta em aumento de massa (TECH, 2009).

Em função da necessidade de produção de projetos suscetíveis à variação, utiliza-se como fonte lógica do modelamento de novas carrocerias e de novos opcionais de ônibus, a padronização de peças e componentes, com base no histórico de projetos finalizados. Nesses casos, o projeto estrutural, mesmo construído sobre conceitos pré-definidos baseados na análise de casos separados, pode não estar em sua condição ótima para operação, existindo a possibilidade de reduzir sua massa ainda mais, enquanto aumenta-se sua rigidez estrutural. Para tornar isso possível, gera-se a necessidade do uso de uma metodologia de otimização aplicável a todos os projetos.

O termo otimização está relacionado a atividades de obtenção de soluções mais eficientes e adequadas ou ainda a utilização mais racional de recursos. Matematicamente, o problema de otimização pode ser formulado como a determinação de máximos e mínimos de funções sujeitas a certas condições (SILVA, 1997).

Ao aplicar o conceito de otimização no contexto de carroceria de ônibus, que devido à sua estrutura tubular já é considerada uma estrutura quase otimizada, busca-se encontrar a melhor disposição de tubos que possibilite reduzir ainda mais sua massa e distribuir da melhor maneira possível as tensões ao longo da estrutura. Nesse contexto, o presente trabalho visa desenvolver e validar uma metodologia de desenvolvimento de novos projetos por meio do estudo e análise de caso para uma carroceria de ônibus pré-definida. Para realizar o trabalho, serão utilizadas ferramentas de otimização topológica e dimensional em conjunto com ferramentas de análise por método de elementos finitos (MEF), buscando encontrar uma estrutura ótima, atendendo aos requisitos estruturais, com menor massa possível.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O objetivo primordial de um projeto estrutural é garantir que a estrutura será capaz de cumprir satisfatoriamente as funções dela requeridas durante sua vida útil, tais como proteger

seus ocupantes de intempéries e suportar carregamentos, atingindo esses objetivos a um custo razoável. A segurança e o desempenho de um sistema estrutural são os principais objetivos técnicos de um projeto de engenharia, cumprindo a função para qual foi projetado com durabilidade e atendimento às condições de utilização. Com o uso de ferramentas de otimização em um projeto encontra-se como uma das vantagens o abandono de parâmetros baseados na intuição. A otimização também tem como destaque a sistematização de procedimentos para o dimensionamento ótimo das estruturas (MAIA, 2009).

Outro ganho encontrado no dimensionamento ótimo é a redução da massa final do produto, que reflete na redução de custo de fabricação, levando à utilização de menos matéria-prima na construção do projeto. Essa redução de custo gera, como consequência, acréscimo no valor agregado, aumentando a margem de lucro obtida sobre o produto.

No caso de projeto de ônibus, encontra-se como fator que se opõe à utilização de ferramentas de otimização, o alto nível de customização de projeto, que conseqüentemente gera uma grande demanda por fabricação de produtos diferentes em linha. Essa grande demanda exige do projetista uma entrega rápida, que geralmente impossibilita o estudo aprofundado de cada caso de ônibus, levando-o a conceber com base em experiência e histórico de projetos.

Para eliminar tal barreira, surge a necessidade da criação de uma metodologia funcional que permita a análise das diversas variações estruturais nas diferentes carrocerias de ônibus, de maneira a possibilitar o desenvolvimento de um conceito de estrutura ótima aplicável à maior quantidade de personalizações possíveis. Portanto, este trabalho busca desenvolver essa metodologia pela aplicação prática em um projeto de ônibus referência. O intuito é encontrar uma geometria estrutural que possua maior integridade estrutural e menor massa que a original.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia de criação de novos projetos utilizando, como base, ferramentas de otimização topológica, buscando uma geometria que ofereça rigidez equivalente a atual com menor massa da estrutura.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Na busca do resultado final pretendido, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) entender os conceitos aplicados nas ferramentas de otimização topológica e dimensional, para possibilitar a realização das análises de otimização em *software*;
- b) compreender as variáveis de projeto no modelamento de um ônibus para definição das condições de contorno e carregamentos na estrutura da carroceria;
- c) modelar o domínio da estrutura da carroceria e realizar a análise por MEF, que será utilizada como referência para validação da metodologia;
- d) utilizar o *software* Ansys Mechanical para fazer a análise de otimização topológica sobre o modelo;
- e) realizar a análise por MEF em *software* CAE da estrutura de carroceria de ônibus obtida pelos métodos de otimização, comparando os resultados encontrados com os limites de projeto definidos.

#### 1.4 ABORDAGEM E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Os resultados das análises realizadas neste trabalho têm finalidade estritamente acadêmica. Os mesmos devem ser utilizados com restrições, visto que não foram aplicadas análises dinâmica, modal e de fadiga sobre a estrutura tubular resultante gerada pelo método de otimização sobre o casulo estrutural do ônibus.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo encontra-se a revisão bibliográfica necessária para fundamentar a análise de otimização no projeto estrutural da carroceria de um ônibus, utilizando de métodos de elementos finitos e algoritmos de otimização topológica e dimensional.

### 2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE PROJETO DE ÔNIBUS

Segundo Ciapparini (2012), a estrutura de um ônibus é constituída basicamente de uma carroceria acoplada em um chassi. Do ponto de vista estrutural, um ônibus pode ser dividido em 3 conjuntos: suspensão, chassi e carroceria.

A função primária do sistema de suspensão é isolar a estrutura e seus ocupantes de choques e vibrações geradas pelas irregularidades da superfície da estrada, mantendo a estabilidade e controle direcional do veículo em seu comportamento dinâmico. Entre suas funções básicas, destaca-se a manutenção do contato entre rodas e superfície de rodagem, de modo que as reações normais sejam os mais constantes possíveis (AKIYAMA, 2005).

O chassi de um ônibus é construído separado de sua carroceria. Conforme Castro (2018), esse tipo de chassi é constituído de duas longarinas dispostas longitudinalmente e ligadas às travessas. Sobre elas são montados os principais componentes mecânicos (motor, transmissão, suspensão e freios). Possui como vantagens, a possibilidade de se montar diversos tipos de carrocerias sobre um mesmo chassi, podendo ainda receber pequenas modificações, e a facilidade dos cálculos da estrutura, com previsão do seu comportamento com relação à fadiga. Como desvantagens observa-se peso e custo elevado do chassi e menor rigidez torcional.

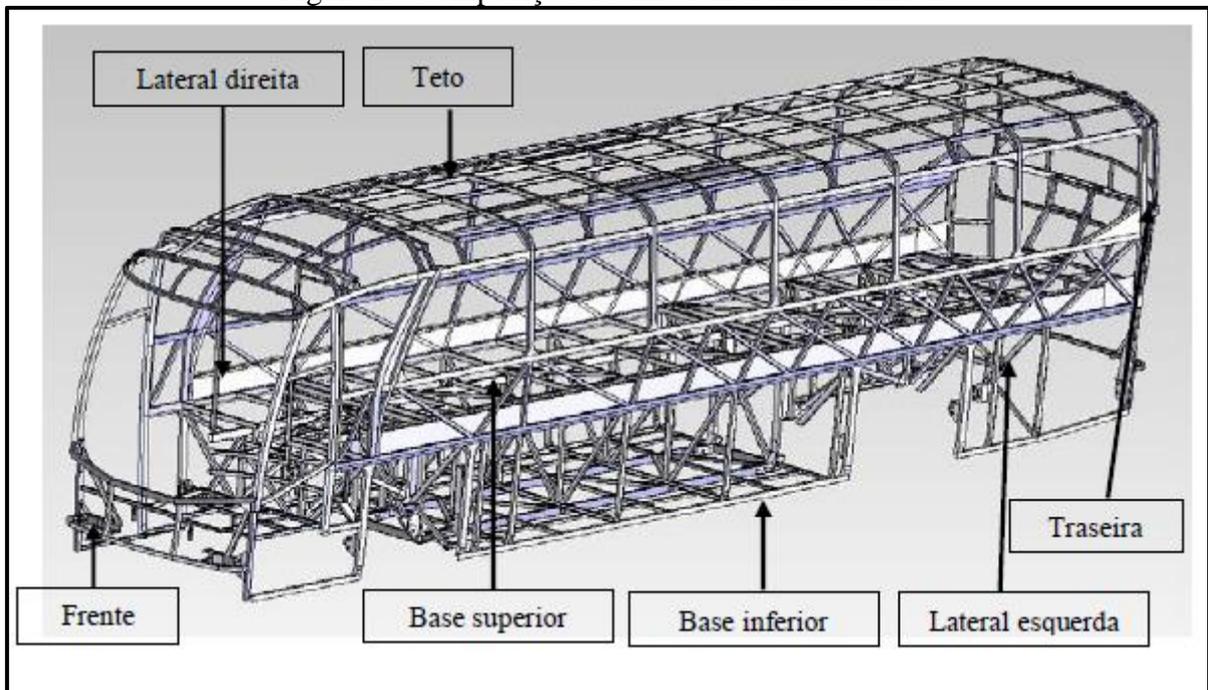
Morsch (2001) afirma que a carroceria de um ônibus é uma estrutura do tipo pórtico construída com barras retas, barras curvas, chapas de revestimento e vidro. A função estrutural dela é dar rigidez e forma ao veículo. A carroceria de um ônibus deve ser tão rígida que ela irá absorver metade da carga de trabalho mesmo que seja montada num chassi projetado para absorver toda a carga.

#### 2.1.1 Casulo Estrutural

O casulo é a estrutura resistente que dá rigidez e forma à carroceria do ônibus. Muitas vezes o casulo estrutural é chamado de "esqueleto" da carroceria pela sua aparência e função mecânica (TECH, 2009).

O casulo de uma carroceria de ônibus é formado por sete componentes estruturais: frente, traseira, lateral direita e esquerda, base inferior e superior e teto, conforme ilustra a Figura 2. Esses conjuntos são fabricados e montados separadamente, e em seguida são levados até um gabarito onde são unidos por um processo de soldagem. Inicialmente, unem-se base e laterais, seguido do teto, e por fim estruturas da frente e traseira, dessa forma completando o casulo estrutural. A carroceria tem grande responsabilidade para a segurança dos usuários, pois mediante a um impacto a mesma deverá absorver a energia proveniente da colisão. Os principais materiais utilizados em um casulo são tubos de secção retangular e quadrada (CIAPPARINI, 2012).

Figura 2 - Composição de uma carroceria de ônibus

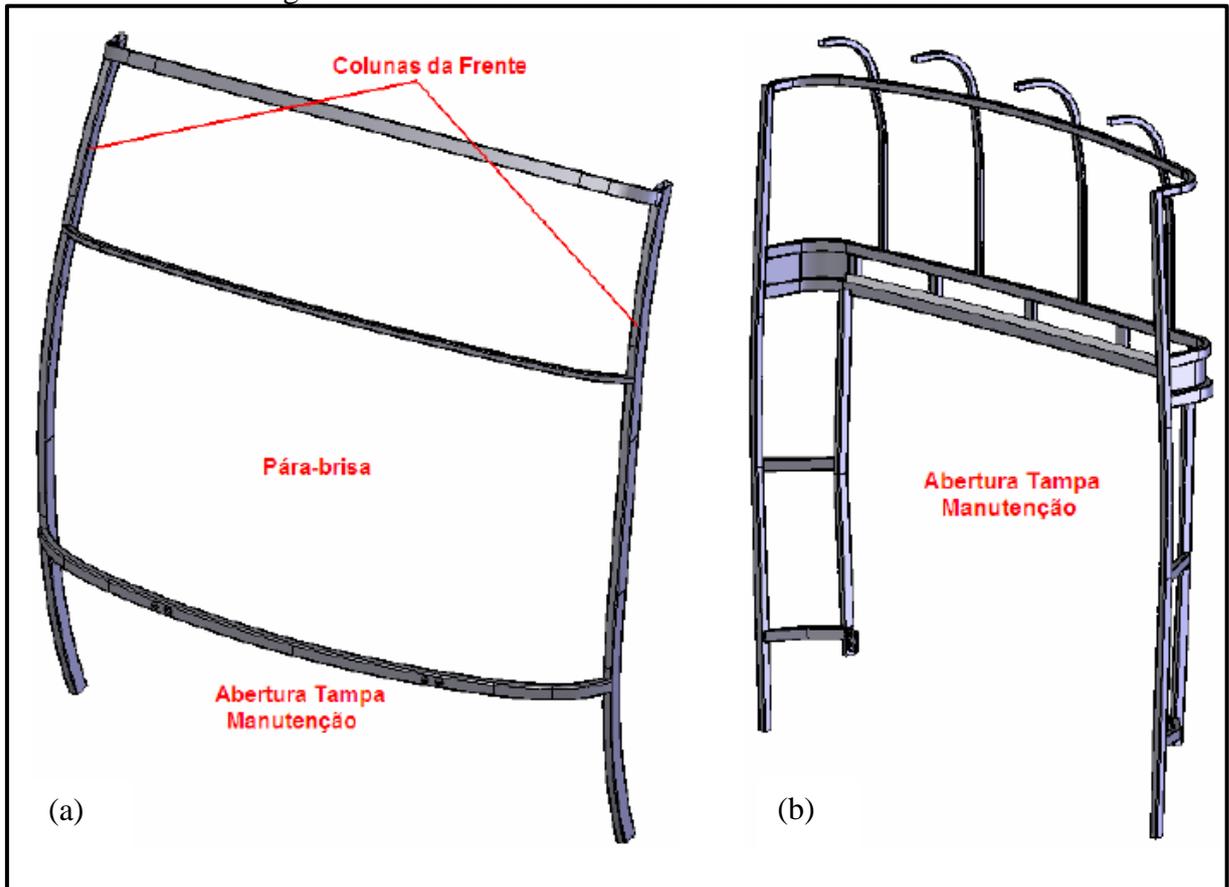


Fonte: Ciapparini (2012).

#### 2.1.1.1 Composição da Carroceria

Segundo Walber (2009), as estruturas da frente e traseira são compostas de tubos retangulares e quadrados, conformados de acordo com o formato da carroceria e design externo do veículo. Na estrutura dianteira são fixados a estrutura de fixação dos faróis, estabilizador, para-choque dianteiro e também mecanismos de articulação da tampa de manutenção frontal. Na estrutura traseira do casulo são fixados os mecanismos de abertura da tampa de manutenção e também o para-choque traseiro. Na Figura 3 podem ser observadas as estruturas da frente (Figura 3a) e traseira (Figura 3b) da carroceria.

Figura 3 - Frente e traseira de uma carroceria de ônibus

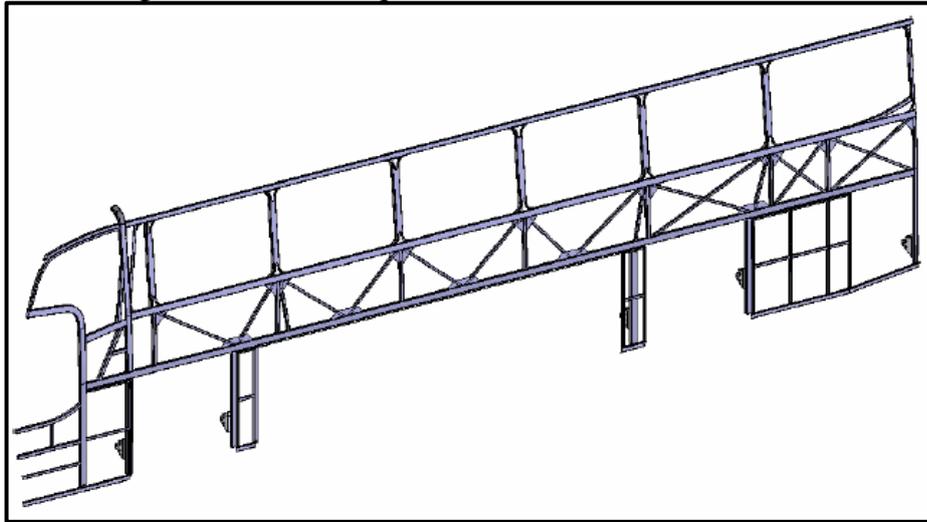


Fonte: Adaptado de Tech (2009).

Conforme Tech (2009), as laterais têm seus tubos de seções quadradas e retangulares, dobrados conforme a secção transversal do veículo. A secção transversal do veículo depende da largura e altura permitidas para o veículo e também tem função estética, sendo definida juntamente entre engenheiros e designers. Nas laterais são fixadas as janelas, chapeamento lateral externo e portinholas dos bagageiros. Também nas laterais são fixados internamente os rodapés, que são chapas de aço conformadas, soldadas no sentido longitudinal do veículo, com o objetivo de fixar poltronas e também vedar o veículo para evitar a entrada de poeira. Na Figura 4 ilustra-se a lateral esquerda de uma carroceria.

De acordo com Ciapparini (2012), as estruturas laterais são sujeitas a carga elevada, originadas pela ação do arranque, aceleração/frenagem, curva e torção. Os contraventamentos laterais servem para aumentar a rigidez na lateral, auxiliando na transmissão de esforços entre as laterais do veículo e sua base estrutural. São identificados como contraventamentos os tubos diagonais posicionados logo abaixo dos vãos de janela presentes da carroceria.

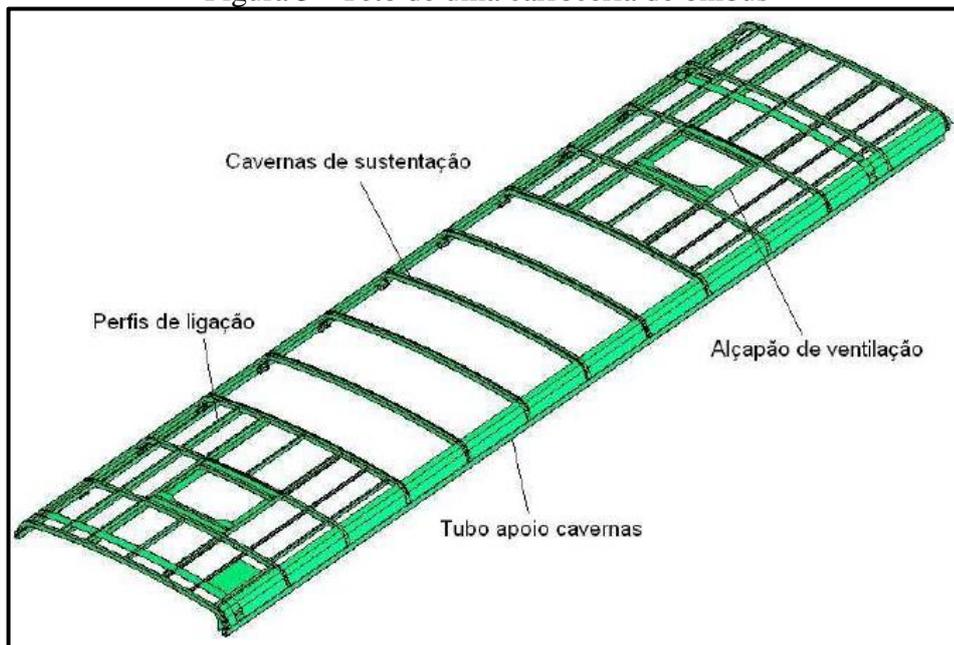
Figura 4 - Lateral esquerda de uma carroceria de ônibus



Fonte: Tech (2009).

Segundo Walber (2009), a estrutura do teto é constituída de tubos retangulares e quadrados, além de chapas de ligação. O teto é posicionado e soldado acima das laterais e é onde são fixados componentes internos da carroceria como porta-pacotes, ar condicionado e monitores de TV. O teto é montado através de dois tubos retangulares longitudinais com vários tubos transversais de ligação, chamados de cavernas do teto. Tech (2009) afirma que as estruturas das laterais e do teto são as maiores responsáveis pela absorção de energia durante um tombamento de veículo. Pode-se observar na Figura 5 um exemplo de modelo de construção do teto de uma carroceria de ônibus.

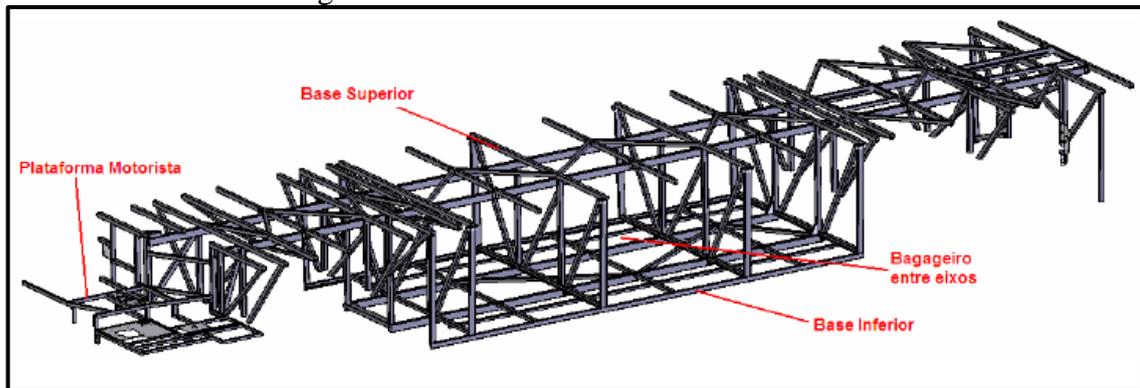
Figura 5 - Teto de uma carroceria de ônibus



Fonte: Walber (2009).

A base é ligada às laterais por meio de cordões de solda e tem como função servir de sustentação para o assoalho e poltronas. O casulo é acoplado ao chassi sobre placas de sustentação colocada ao longo das longarinas e nas extremidades das travessas. Essas placas devem ser soldadas ou parafusadas no chassi. Os tubos da base em veículos urbanos são conectados ao chassi por meio de uniões, onde chapas e perfis são soldadas nos barrotes de base e nas placas de sustentação do chassi. Assim é através da base e das laterais que as cargas são transmitidas entre chassi e carroceria (TECH, 2009).

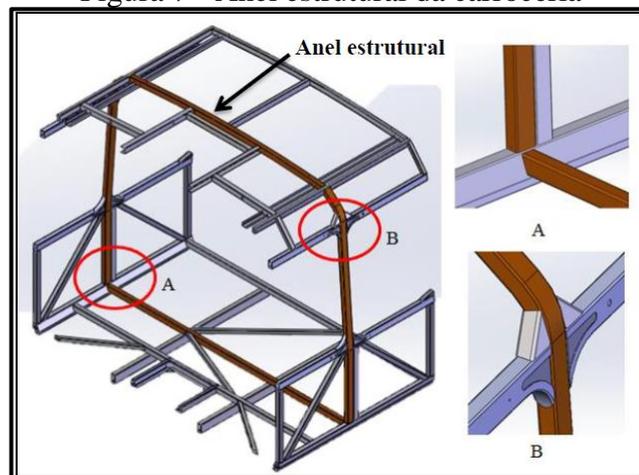
Figura 6 - Base de uma carroceria de ônibus



Fonte: Tech (2009).

Segundo Sordi (2016), a alta rigidez da estrutura é obtida através da formação de anéis estruturais no sentido transversal da carroceria e esses anéis serem conectados, uns aos outros, por tubos no sentido longitudinal. A região onde a lateral é conectada com a base, e a lateral com o teto, são exemplos de uniões estruturais conforme Figura 7. São nas proximidades das uniões estruturais que se concentram as deformações localizadas durante o tombamento do veículo.

Figura 7 - Anel estrutural da carroceria

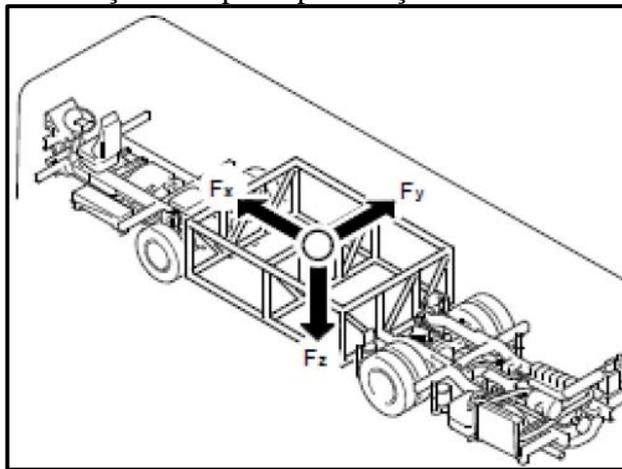


Fonte: Sordi (2016).

### 2.1.2 Distribuição de cargas

As carrocerias de ônibus são projetadas e construídas de forma que suportem todas as forças dinâmicas que surgem durante sua vida útil. A carroceria do ônibus tem que suportar uma combinação de forças dinâmicas em todas as direções, que podem ser discretizadas nas três direções principais, verticalmente ( $F_z$ ), longitudinalmente ( $F_x$ ) e transversalmente ( $F_y$ ) (PAVAN, 2015). A Figura 8 ilustra as direções dessas três forças principais: verticais no eixo z, longitudinais no eixo x e transversais no eixo y.

Figura 8 - Direções das principais forças atuantes na carroceria



Fonte: Pavan (2015).

#### 2.1.2.1 Forças verticais

Walber (2009) afirma que as forças dinâmicas verticais são originárias dos movimentos normais da suspensão, também devem ser consideradas cargas estáticas provenientes da carroceria, passageiros e bagagem. Forças verticais adicionais que afetam as laterais da carroceria ocorrem quando o ônibus transita em curvas.

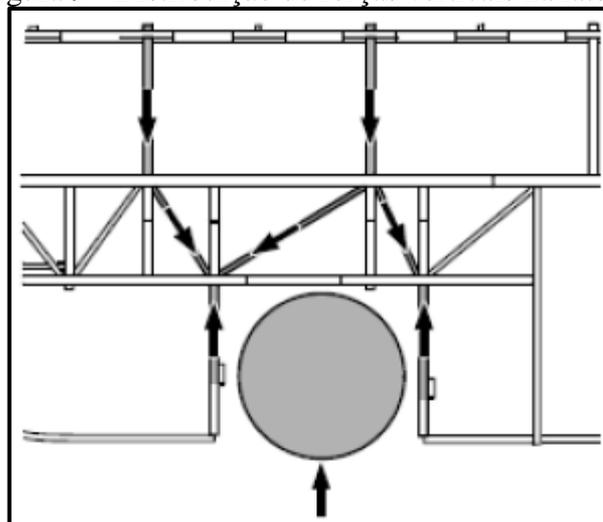
Segundo Ciapparini (2012), os esforços verticais são absorvidos pela suspensão ou pelos feixes de molas. Estes entram na região da roda do chassi amortecidas pela suspensão e são distribuídas na carroceria. As forças na parte frontal da carroceria são concentradas na região de porta dianteira, exercendo pressão elevada sobre ela. A massa dos passageiros e bagagens estão concentradas no entre-eixo, as forças seguem pelas laterais da carroceria se espalhando por todo o veículo chegando até as longarinas e suspensão do chassi.

Conforme Pavan (2015), durante a condução do veículo em estradas com condições de operação precárias, podem ocorrer casos em que uma roda dianteira de um lado do ônibus e

uma roda traseira do outro lado atinjam os batentes de fim de curso da suspensão ao mesmo tempo. Dentro dessa circunstância, grande parte dos carregamentos verticais absorvidos pelo ônibus são transmitidas pela região do entre-eixo na carroceria, principalmente na existência de uma porta posicionada nessa região, causando grande concentração de esforços.

As laterais da carroceria formam um conjunto resistente quando são construídas por meio de estruturação de perfis diagonais, os quais criam a impressão de painéis triangulares na estrutura lateral. A estrutura é projetada de modo que as cargas sejam transmitidas aos pontos apropriados do chassi. Os perfis diagonais sempre se encontram onde as forças entram na lateral da carroceria, sendo que estas são ocasionadas pelas reações vindas do piso, conforme pode ser observada na Figura 9 (PAVAN, 2015).

Figura 9 - Distribuição de forças verticais na lateral



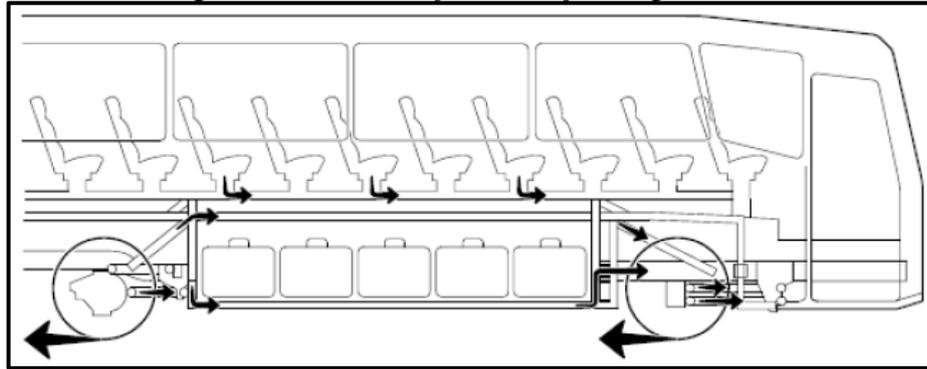
Fonte: Scania (2013).

#### 2.1.2.2 Forças longitudinais

Walber (2009) afirma que as forças longitudinais ocorrem normalmente durante frenagem e quando o ônibus passa por desnível na estrada. O peso do teto cria forças nas laterais da carroceria durante a frenagem, que são absorvidas pelos tubos verticais das janelas. A carga atuante de passageiros e bagagem também é responsável pela geração de esforços longitudinais, resultando em forças atuantes na estrutura do assoalho e módulo central da base.

As forças são absorvidas nas laterais da carroceria, pelas juntas de reforço, janelas e assoalho, que se combinam na parte inferior das laterais da carroceria, no assoalho e módulo central, passando pela armação do chassi, barras estabilizadoras e chegando até as rodas (PAVAN, 2015).

Figura 10 - Distribuição de forças longitudinais



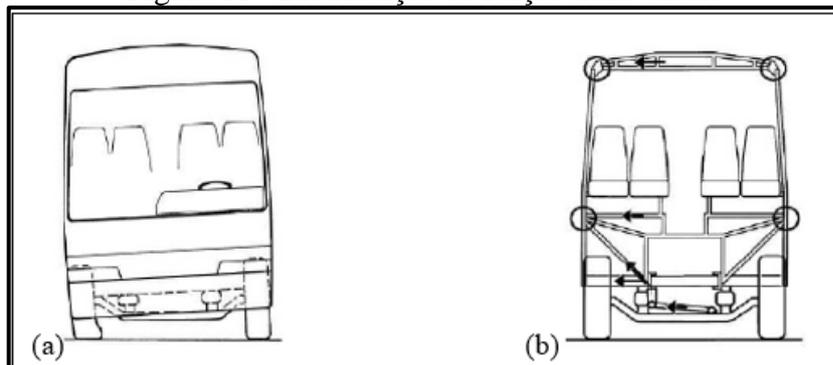
Fonte: Scania (2013).

### 2.1.2.3 Forças Transversais

Segundo Ciapparini (2012) as forças transversais ocorrem quando o veículo é submetido a estradas com grandes torções, mudanças de marchas severas, ou a curvas em médias ou altas velocidades. As forças para essa condição movem de dentro para fora do veículo, na direção das extremidades dos barrotos da base. O teto é pressionado para fora do veículo, mas é impedido pelas ligações inferiores da carroceria, tubos verticais e rodas do chassi.

Essas forças tentam curvar a carroceria em torno das fixações do eixo, e criam pressões nos cantos, entre as juntas de reforço da lateral e as juntas de reforço do teto. Essas forças também criam pressões na seção inferior de reforço da lateral e em suas uniões. A Figura 11b representa as forças transversais na carroceria, indicando através das seções transversais os locais que sofrem maiores concentrações de carregamentos, sendo estes identificados como as uniões referentes aos anéis estruturais do veículo. O fechamento da traseira da carroceria, que ocorre por meio de peças de fibra de vidro e vidro, reforça a traseira da carroceria, enquanto na parte dianteira, tal reforço é obtido pela utilização do para-brisa, sendo que o projeto dessas partes tem fundamental importância num eventual caso de capotamento (PAVAN, 2015).

Figura 11 - Distribuição de forças transversais



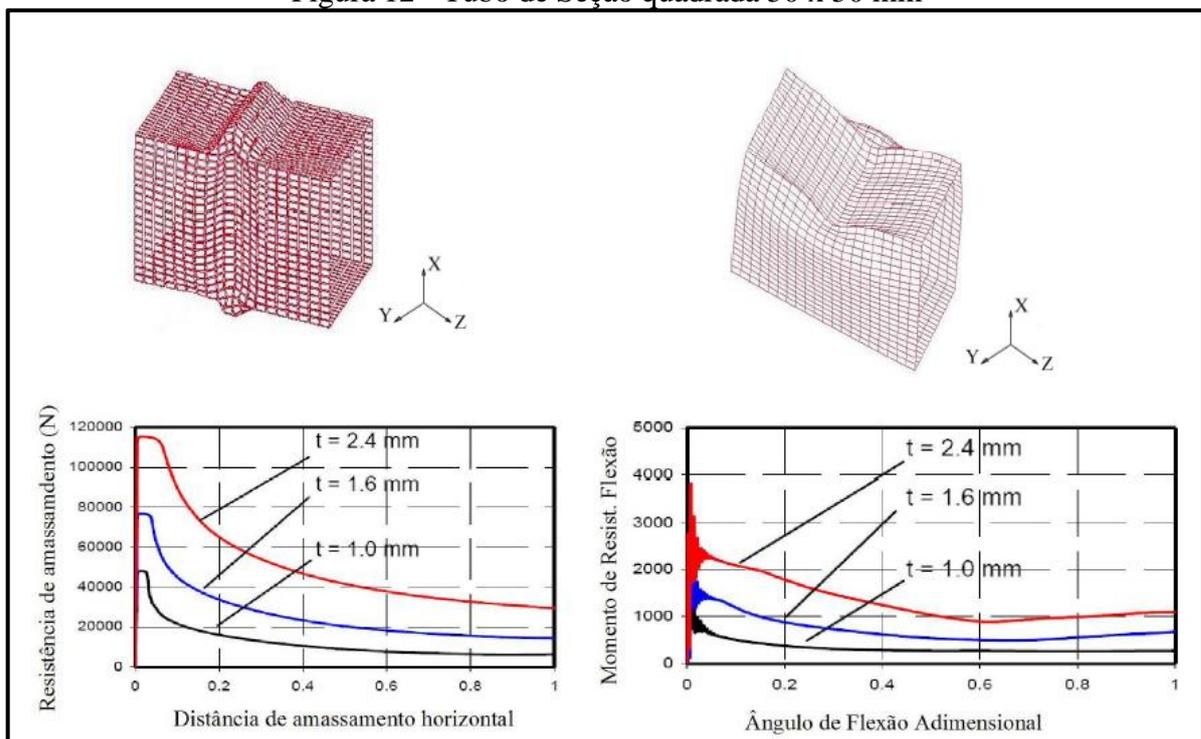
Fonte: Scania (2013).

### 2.1.3 Tubos de Parede Fina

A carroceria do ônibus é constituída basicamente por tubos de parede fina. O modo de falha de elementos estruturais de parede fina em eventos de impacto pode ocorrer de duas formas: amassamento e flexão. O amassamento ocorre quando a carga principal sobre o elemento está atuando na direção axial e excede a tensão de flambagem em alguma parte da estrutura do elemento. Após o limite de tensão de flambagem ter sido excedido, o elemento estrutural começa a se deformar mais rapidamente na direção axial, enquanto sua resistência à deformação diminui devido à deformação plástica e ao crescimento de imperfeições geométricas e distorções. O colapso por flexão ocorre quando o momento fletor sobre o elemento estrutural causa uma tensão sobre o lado comprimido da seção de parede fina que excede a tensão de flambagem (GOEDEL, 2013).

As curvas características da resistência à deformação tanto para amassamento quanto para flexão possuem a mesma forma geral, que é caracterizada por um rápido pico de resistência à deformação seguido por uma queda até um patamar onde permanece estável. Na Figura 12 são apresentadas curvas de resistência ao amassamento versus comprimento de amassamento adimensional e resistência à flexão versus ângulo de flexão adimensional para um tubo de seção transversal 50x50 mm (JUNIOR et al, 2006).

Figura 12 - Tubo de Seção quadrada 50 x 50 mm



Fonte: Hanza & Saitou (2004) apud Meira Junior (2010).

## 2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Alves Filho (2003) afirma que os métodos analíticos clássicos permitem cálculo da resposta exata de deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus infinitos pontos, porém essas soluções, conhecidas para apenas alguns casos, fogem da maioria das aplicações do dia a dia. Dessa forma busca-se um método mais generalizado, que possa ser aplicado independente de geometria e condições de carregamento da estrutura, como resposta à isso, tem-se o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. (AZEVEDO, 2003).

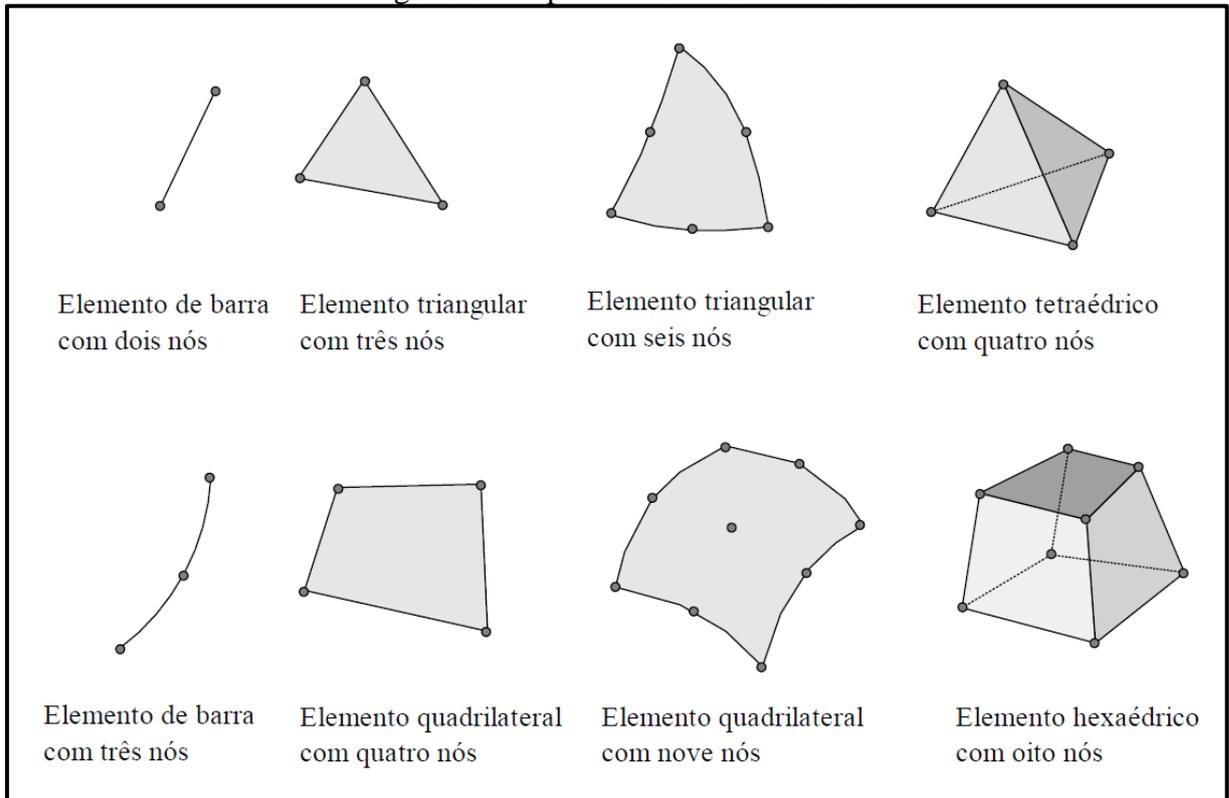
Segundo Hearn (1997), MEF é uma técnica numérica onde as equações governantes são representadas em forma matricial. As regiões de solução são representadas por malhas de pequenas regiões chamadas de elementos finitos. Esses elementos são conectados por pontos, também conhecidos como nós. Quando aplicada na análise de um componente, a discretização se torna a malha de um determinado número de elementos limitados por condições de contorno.

Além dos conceitos de "elementos finitos" e "nós", o conceito de grau de liberdade também demonstra importância. O comportamento de um elemento é definido pelo número e posicionamento dos nós e pela quantidade de graus de liberdade por nó. Em problemas de análise de tensões, os graus de liberdade dos nós correspondem aos possíveis movimentos que estes podem sofrer. Estes movimentos ou deslocamentos dos nós são as incógnitas principais da análise pelo MEF do problema geral da mecânica dos sólidos (SOUZA, 2003).

### 2.2.1 Discretização de modelos

O MEF se baseia na discretização do meio contínuo, através da divisão do sistema estrutural em pequenas regiões de geometria simples. A partir dessa divisão pode-se estudar o comportamento de cada região e sintetizar todas as soluções em um sistema global. O princípio básico do método é o pela partição do domínio em elementos sobre os quais as variáveis do problema são aproximadas por combinações lineares de funções de interpolação, ponderadas por parâmetros. Obtidas tais funções, o comportamento de cada elemento é determinado em termos de uma relação entre valores nodais das variáveis (Silva *et al*, 2001). Podem ser observados na Figura 13 alguns dos tipos de elementos finitos utilizados.

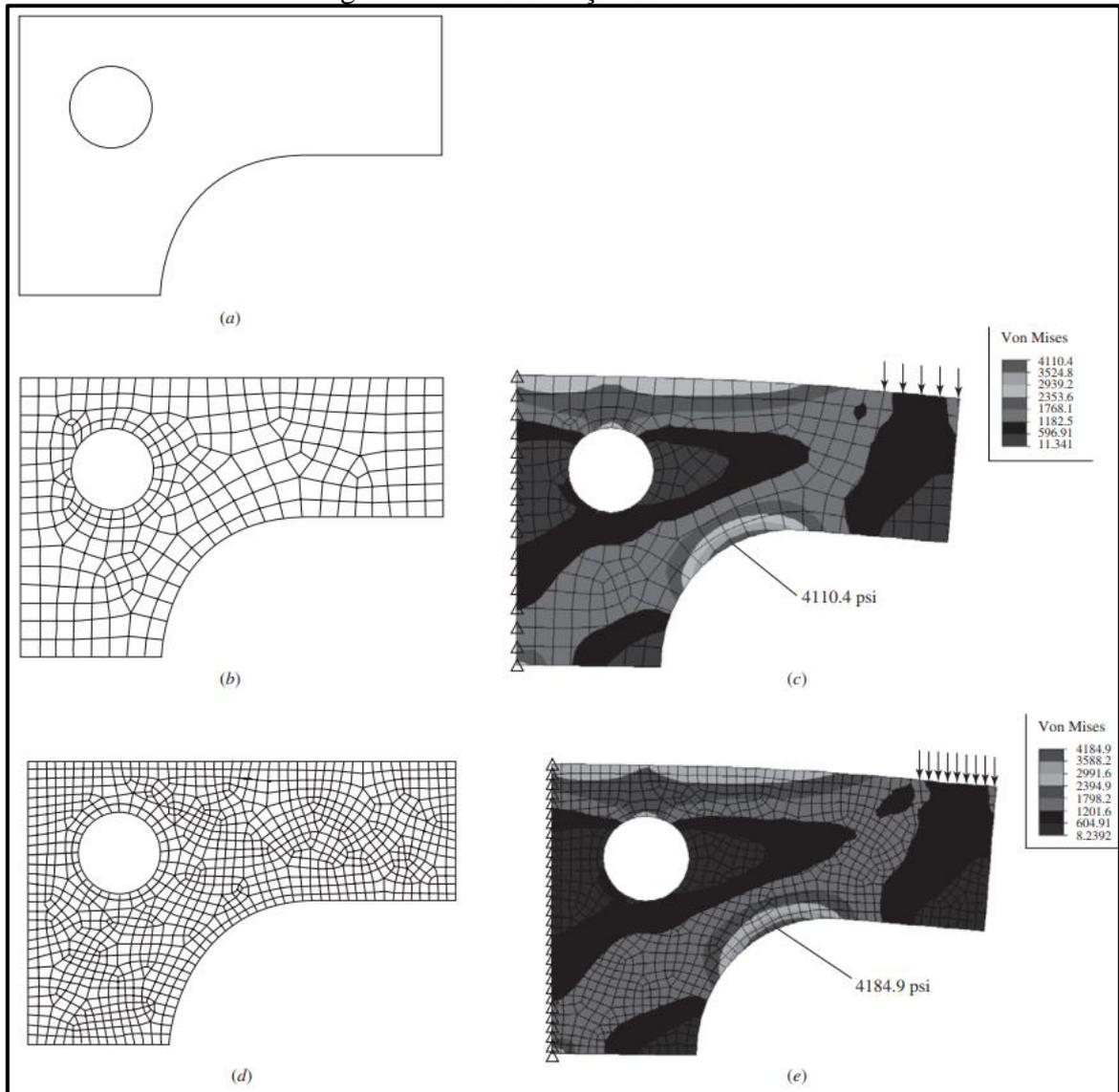
Figura 13 - Tipos de elementos finitos



Fonte: Souza, (2003).

Shigley, Budynas e Nisbett (2011) afirmam que a rede de elementos e nós que discretiza uma região é conhecida por malha. A densidade de malha aumenta à medida que forem colocados mais elementos no interior de uma região. Quando se buscam melhores resultados, a malha deve ser alterada, recebendo maior densidade de elementos em áreas com gradientes de tensão elevados e malhas mais suaves em zonas de transição. Esse procedimento poder ser referido como refinamento de malha. Para avaliar se realmente ocorreu melhoria a partir do refino, a estrutura pode ser dividida novamente nas regiões de tensões elevadas, identificando-se uma variação mínima entre os refinamentos, pode-se supor que houve convergência no resultado. A Figura 14a ilustra o modelo de uma peça a ser discretizada, na Figura 14b pode ser vista a malha inicial da peça e na Figura 14c o resultado de sua análise. A partir do refino de malha obtêm-se o ilustrado na Figura 14d, possuindo o resultado de sua análise demonstrado na Figura 14e. Comparando as imagens Figura 14c e Figura 14e é possível identificar uma pequena variação no resultado de ambos os modelos, apresentando a convergência de resultados.

Figura 14 - Discretização de um modelo



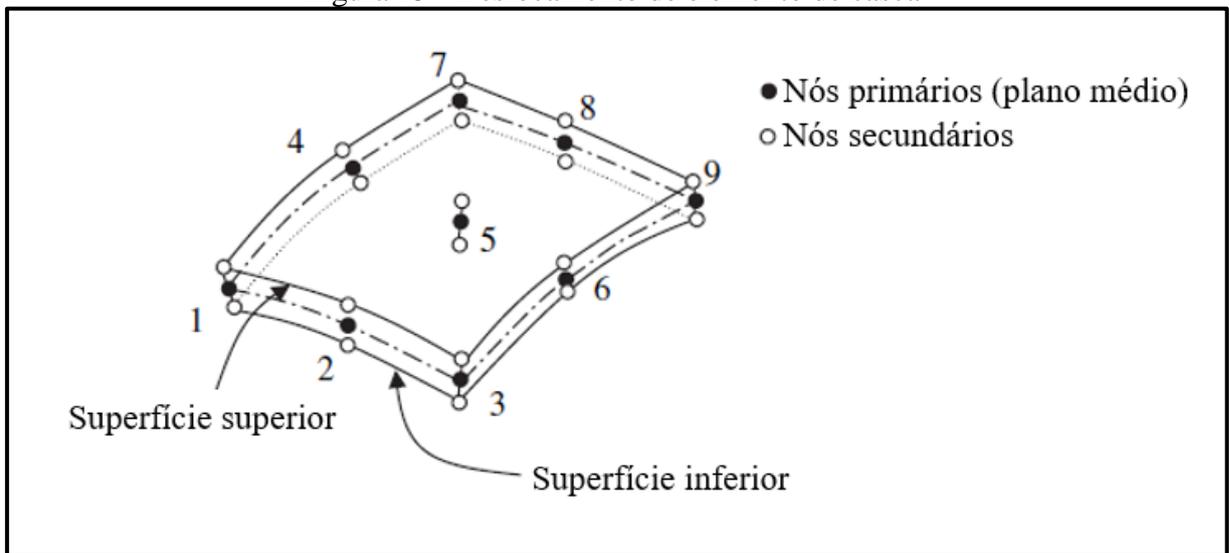
Fonte: Shigley, Budynas e Nisbett (2011).

### 2.2.2 Elementos Estruturais

A utilização de elementos sólidos na discretização de malhas para análise de situações de maiores proporções, como por exemplo, um veículo automotivo ou asas de um avião, produziriam uma grande quantidade de elementos contínuos na modelagem, exigindo uma enorme capacidade computacional. Tendo como objetivo aumento de eficiência computacional busca-se outras alternativas, sendo elas encontradas nos denominados elementos estruturais. Os elementos estruturais são classificados como: vigas, onde o movimento descrito como função de uma única e independente variável; cascas, onde o movimento é descrito como função de duas variáveis independentes; e placas, consideradas cascas planas (BELYTSCHKO, LIU E MORAN, 2000).

Segundo Bathe (1996) os conceitos de geometria e interpolações de deslocamento empregados na formulação de elementos de duas e três dimensões também podem ser empregados na avaliação de matrizes de elementos estruturais de vigas, placas e cascas. Contudo, enquanto na formulação de elementos contínuos os deslocamentos são interpolados em termos de deslocamentos de pontos nodais de mesmo tipo, na formulação de elementos estruturais os deslocamentos das superfícies superior e inferior, considerados nós secundários, são interpolados em termos de deslocamentos e rotações de superfícies centrais, considerados nós primários, conforme pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Deslocamento de elemento de casca



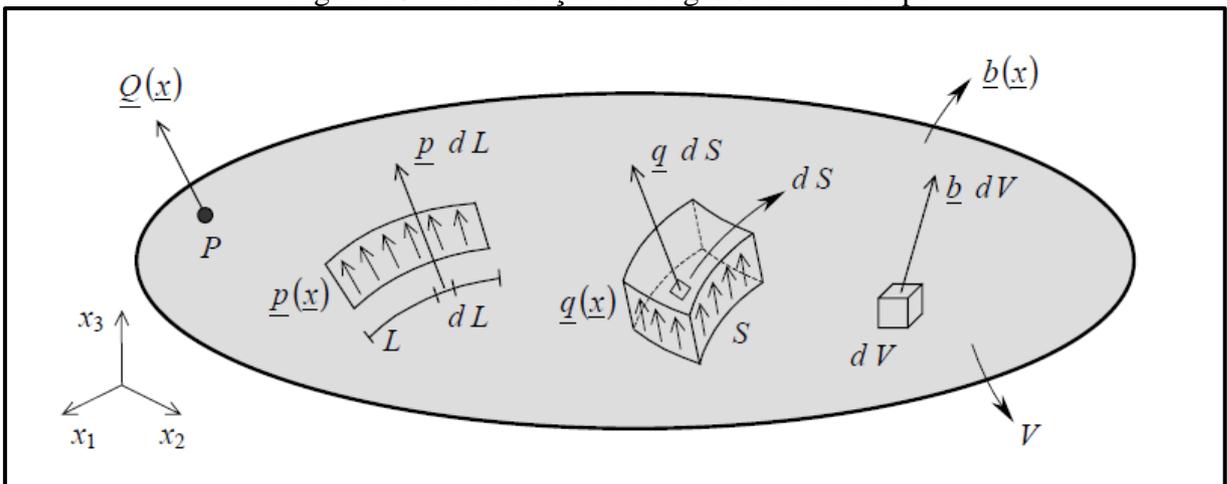
Fonte: Adaptado de Fish, e Belytscho (2007).

### 2.2.3 Análise Linear

Existem duas maneiras básicas de especificar cargas em uma estrutura: carregamentos nodais e de elementos. A força e/ou momento resultante comumente podem ser aplicados a um único nó, desde que o elemento admita o grau de liberdade associado ao mesmo. Durante a aplicação de carregamento em elementos, os mesmos são convertidos em cargas nodais equivalentes. Momentos concentrados podem ser aplicados aos nós de elementos de viga a para maioria dos elementos de casca, entretanto não podem ser aplicados a elementos que não admitam graus de liberdade rotacionais. As cargas de elementos podem incluir cargas estáticas devido à gravidade, cargas superficiais como pressão hidrostática e cargas dinâmicas devido à aceleração. Tais cargas serão convertidas em cargas nodais equivalentes e tratadas como cargas concentradas aplicadas aos nós (SHIGLEY, BUDYNAS E NISBETT, 2011).

De acordo com Azevedo (2003), quando um elemento finito se encontra sujeito a ações exteriores genéricas, é necessário proceder ao cálculo das forças nodais equivalentes à solicitação exterior. A Figura 16 representa um corpo tridimensional onde se aplicam diversos tipos de carregamentos externos, sendo:  $\underline{Q}(x)$ , uma força generalizada concentrada no ponto  $P$ , tendo como componentes três forças e três momentos;  $\underline{p}(x)$ , um carregamento distribuído por unidade de comprimento atuando ao longo da linha  $L$ , tendo como componentes, três forças e três momentos por unidade de comprimento;  $\underline{q}(x)$ , um carregamento distribuído por unidade de superfície atuando sobre a superfície  $S$ , tendo como componentes três forças e três momentos por unidade de superfície; e  $\underline{b}(x)$ , uma força que atua sobre o volume  $V$ , podendo ser apenas uma parte do volume total do corpo, tendo como componentes três forças e três momentos para cada unidade de volume. Todos as forças e momentos definidos para cada tipo de carregamento são definidos referentes ao plano de coordenadas cartesianas. Nas aplicações habituais de MEF existem diversos exemplos de cada tipo de carga distribuídos ao longo do modelo.

Figura 16 - Distribuição de cargas sobre um corpo



Fonte: Azevedo (2003).

Segundo Bathe (1997), ao se considerar o problema de condições de contorno, identifica-se duas classes distintas, chamadas de condições de contorno naturais e condições de contorno essenciais. Condições de contorno essenciais, também conhecidas como geométricas, possuem deslocamentos e rotações pré-definidos, enquanto as condições de contorno naturais, também conhecida como condição de contorno de forças, correspondem à forças e momentos pré-definidos. As condições de contorno de forças são levadas em conta na avaliação de vetores de forças nodais aplicadas externamente.

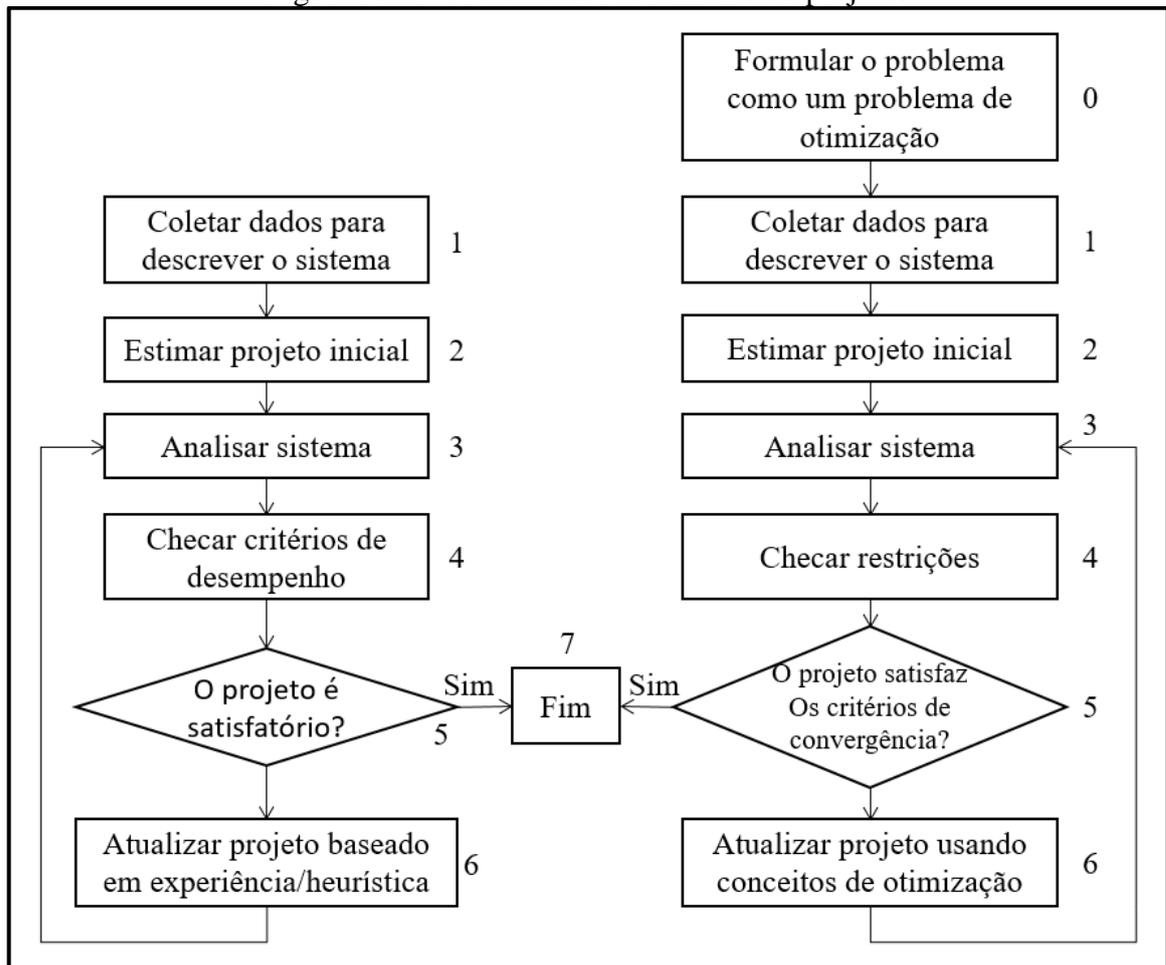
Equações com restrições em vários pontos são bastante usadas para modelar condições de contorno ou conexões rígidas entre elementos elásticos. Quando usadas nesta última forma,

as equações estão atuando como elementos e, portanto, são conhecidas como elementos rígidos. Pode-se citar também o conceito de elementos de contorno, que são usados para forçar deslocamentos específicos nulos em uma estrutura. Os elementos de contorno também podem ser úteis na modelagem de condições de contorno que estão desalinhadas em relação ao sistema global de coordenadas (SHIGLEY, BUDYNAS E NISBETT, 2011).

### 2.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A solução de problemas de otimização estrutural é de grande aplicabilidade na busca por concepções estruturais com baixo custo, alto desempenho, de fácil execução e manutenção e, também, mais recentemente, incorporando aspectos ambientais, desde sua construção até à sua utilização. Na sua quase totalidade, estes problemas apresentam restrições de várias naturezas que devem ser satisfeitas para que se obtenha uma solução candidata viável (Vargas *et al*, 2016).

Figura 17 - Fluxo de desenvolvimento de projetos

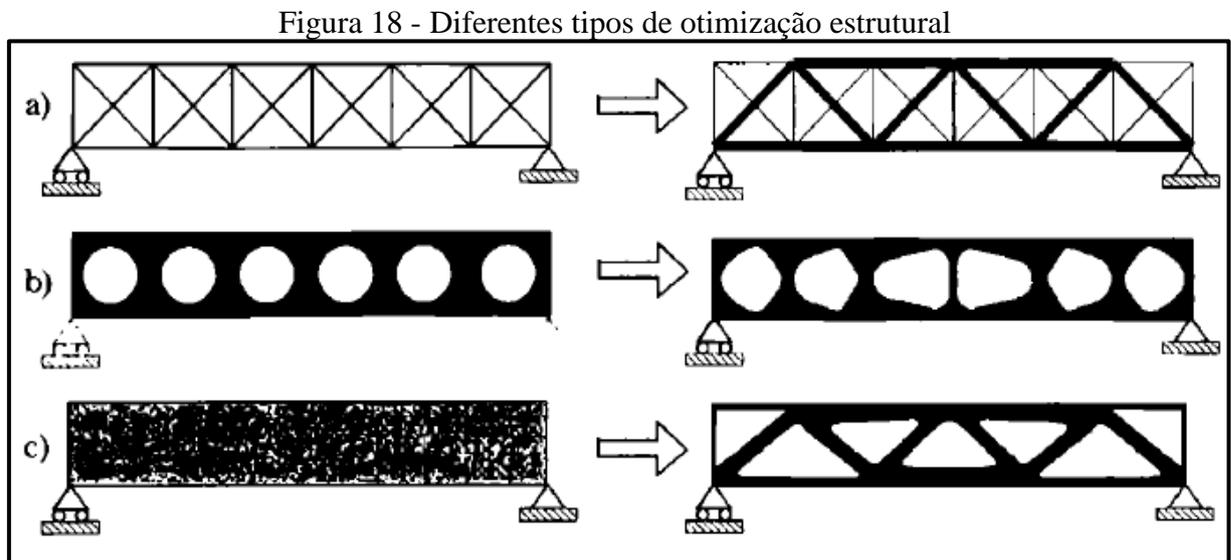


Fonte: Adaptado de Arora (2011).

Segundo Arora (2011), o projeto de muitos sistemas de engenharia podem ser processos complicados, premissas devem ser definidas para desenvolver modelos realísticos que possam ser submetidos a análises matemáticas. O projeto de um sistema pode ser formulado como um problema de otimização onde o desempenho medido é otimizado, enquanto os requerimentos são satisfeitos. Qualquer problema onde os parâmetros precisam ser determinados para satisfazer restrições podem ser formulados como problemas otimizáveis. A Figura 17 apresenta, por meio de um fluxograma simplificado, a diferença entre o projeto convencional (Figura 17a) e o projeto baseado em otimização (Figura 17b).

### 2.3.1 Métodos de otimização

Conforme Bendsoe e Sigmund (2003), pode-se assumir três diferentes aspectos no modelamento de problemas de otimização, sendo eles otimização dimensional, de forma e topológica. A Figura 18 ilustra o funcionamento de cada tipo de otimização, sendo que: a Figura 18a representa o processo de otimização dimensional; a Figura 18b representa o processo de otimização de forma; e a Figura 18c representa o processo de otimização topológica.



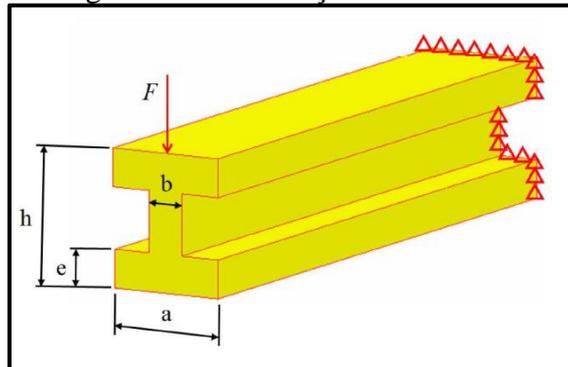
Fonte: Bendsoe e Sigmund (2003).

#### 2.3.1.1 Otimização Dimensional

A otimização dimensional altera as dimensões que são responsáveis por definir a geometria do produto a partir de um modelo com forma pré-definida. A Figura 19 apresenta uma viga "I" com algumas características geométricas definidas como suas variáveis de projeto,

sendo elas as dimensões “a”, “b”, “e” e “h”, que podem ser alteradas durante a otimização. Desta forma, por meio de um algoritmo otimizador, pode-se buscar a combinação das dimensões que minimize o volume da viga submetida a um determinado carregamento  $F$  e sujeita a uma restrição de deslocamento da viga e\ou tensão (PERINI, 2008).

Figura 19 - Otimização Dimensional

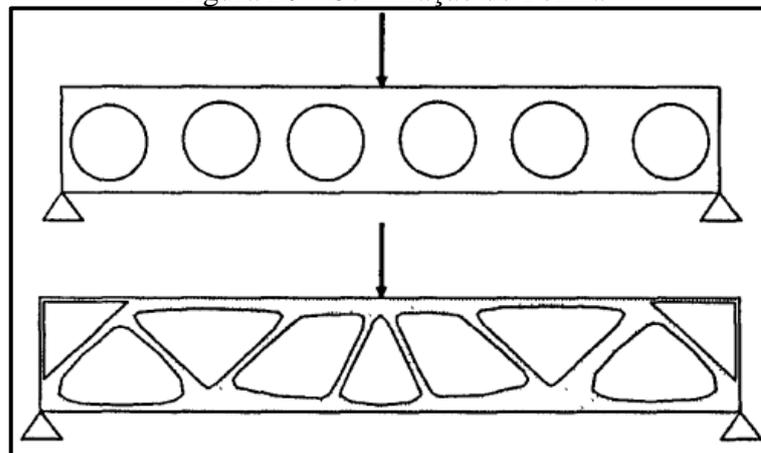


Fonte: Perini (2008).

### 2.3.1.2 Otimização de Forma

Segundo Haftka e Gurdal (1992), considera-se um problema de otimização de forma, qualquer problema onde existe a necessidade de alterar as posições dos nós de um modelo de elementos finitos ou de suas conexões. Otimizações de forma tem contraste com otimização dimensional onde pode-se alterar apenas propriedades de rigidez do material, como seção transversal ou espessuras. O termo otimização de forma é frequentemente usado referindo-se ao projeto ótimo dos formatos de contorno de componentes estruturais de duas e três dimensões. A Figura 20 ilustra os passos inicial e final de uma estrutura que sofreu otimização de forma.

Figura 20 - Otimização de Forma

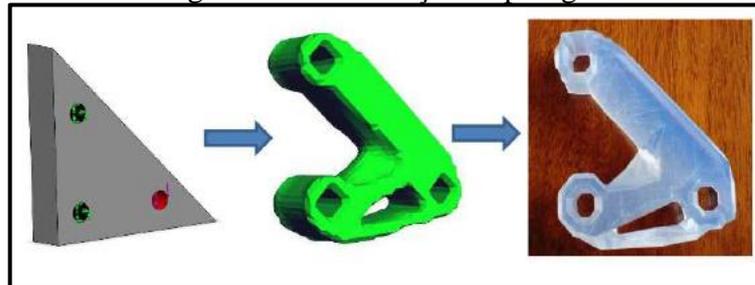


Fonte: Haftka e Gurdal (1992).

### 2.3.1.3 Otimização Topológica

A otimização topológica (OT) é um campo de pesquisa da engenharia que tem o objetivo de projetar a topologia ótima de estruturas segundo determinado conjunto de critérios de projeto. Tais critérios podendo ser definidos como menor peso de estrutura, ou restrição a um dado valor limite de tensão, deslocamento ou de frequência do projeto, a partir da definição de valores máximos possíveis. Em outras palavras, o objetivo é encontrar o projeto ótimo dentro de um espaço limitado, removendo material e satisfazendo restrições. Objetivos incluem redução da fração de volume e restrições incluem deslocamentos, tensões, flambagem e possíveis restrições de fabricação (ALMEIDA, SIMONETTI e NEVES, 2014; MISZENDEHDEL e SURESH, 2016). A Figura 21 ilustra um modelo de componente onde aplicou-se OT.

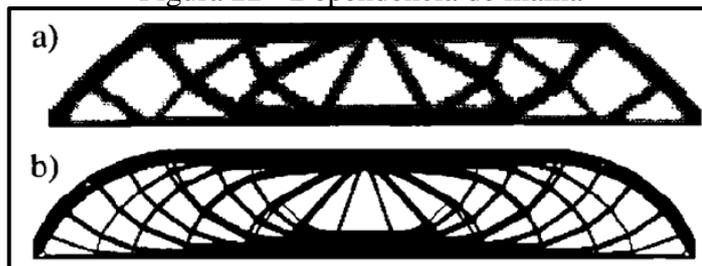
Figura 21 - Otimização Topológica



Fonte: Miszendehdel e Suresh (2016).

Segundo Coutinho (2006), durante a aplicação da discretização no domínio projetado surge o problema da dependência da malha, resultado da utilização de diferentes tipos e quantidades de elementos, resultando assim em diferentes soluções finais ótimas. Conforme utiliza-se malhas mais refinadas na discretização do domínio, obtêm-se topologias de estruturas mais complexas (Figura 22b), qualitativamente diferentes de um modelo resultante de uma malha mais grosseira (Figura 22a), conforme apresentado na Figura 22.

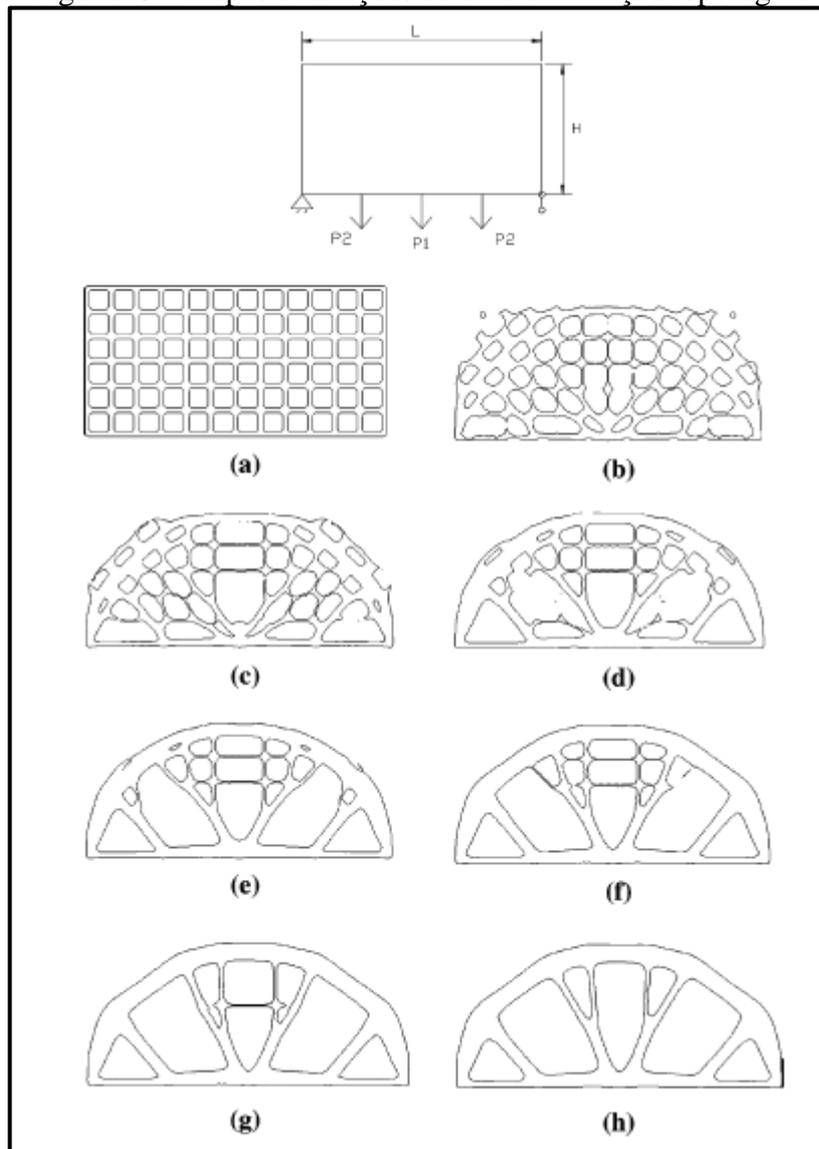
Figura 22 - Dependência de malha



Fonte: Adaptado de Bendsoe e Sigmund (2003).

A Figura 23 ilustra as etapas relacionadas ao processo de otimização. Partindo-se de um domínio inicial (Figura 23a) que contém valores pré-determinados de esforços e condições de contorno, o algoritmo otimizador irá realizar a remoção de material buscando a estrutura ótima. O processo se desenvolverá com base em iterações subsequentes (Figura 23b-g), convergindo até a solução otimizada com base nas restrições aplicadas ao modelo, gerando ao final das iterações a estrutura ótima desejada (Figura 23h) (WANG, WANG e GUO, 2002).

Figura 23 - Etapas e iterações de uma otimização topológica



Fonte: Wang, Wang e Guo (2002).

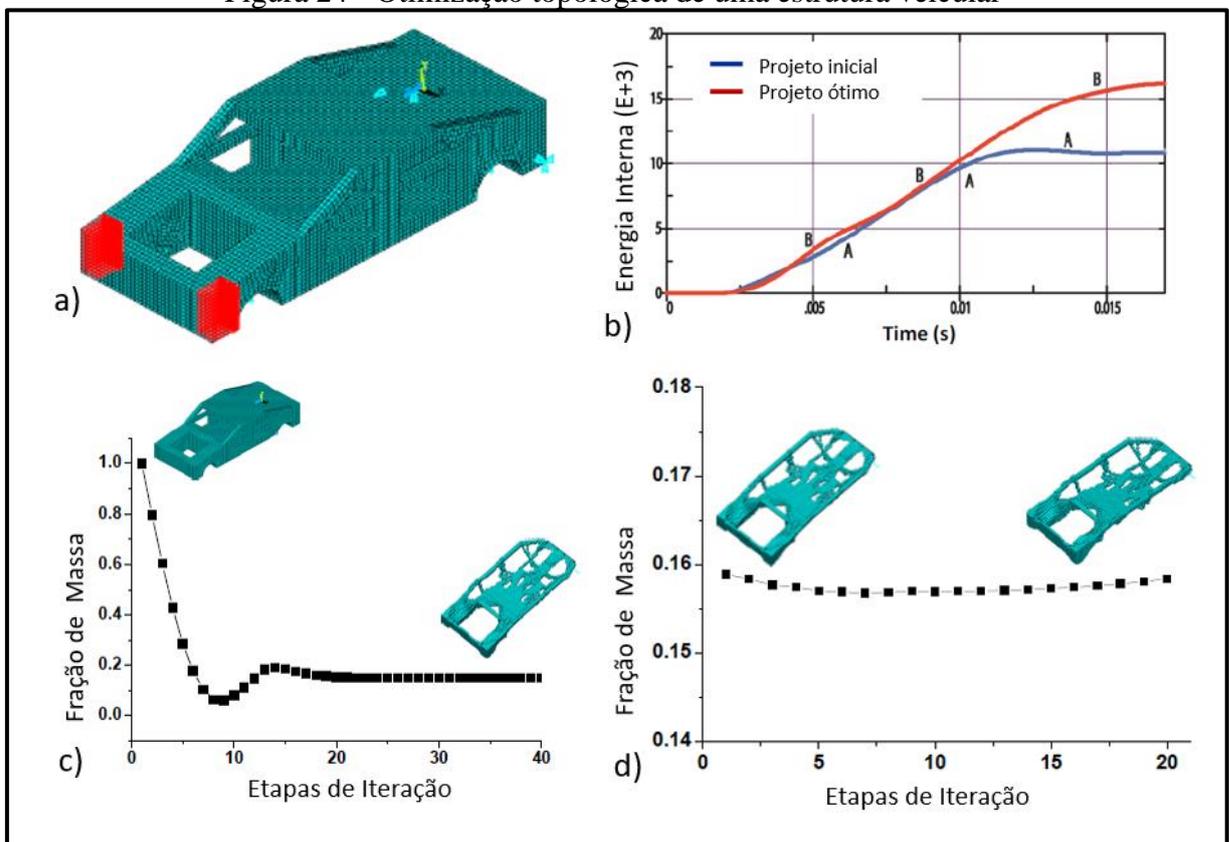
#### 2.3.1.3.1 Otimização topológica aplicada em estruturas veiculares

Bujny *et al* (2016) afirma que realizar OT em estruturas veiculares sobre carregamentos dinâmicos pode ser um desafio, que requer desenvolvimento de métodos eficientes e acurados.

No método de cargas estáticas equivalentes, as cargas dinâmicas são substituídas por forças estáticas, possibilitando a utilização de técnicas de OT padrões. Utilizando o método topológico, o domínio evolui de uma condição estrutural elementar, para uma condição estrutural ótima resultante da carga dinâmica simplificada. A maioria das técnicas de OT utilizam de elementos finitos sólidos.

No trabalho de Yan e Cheng (2013), é apresentado um método de aplicação de OT em uma estrutura veicular simplificada, onde o domínio do corpo do automóvel foi criado considerando os espaços vazios internos necessários, preenchendo o restante do volume com elementos discretizados hexaédricos de 8 nós (Figura 24a). Para desenvolvimento do projeto estrutural foi definido como critério de análise a busca da estrutura ótima para uma fração mássica de 0,16 do modelo otimizado para o modelo inicial, sendo aplicados dois laços de iteração consecutivos, sendo o primeiro laço apresentado na Figura 24c e o segundo na Figura 24d. Em seus resultados apresenta que a capacidade de absorção de energia do modelo otimizado supera em 45% a capacidade do modelo inicial (Figura 24b). Também cita que a partir de uma certa quantidade de passos, o resultado do algoritmo de otimização tende a convergir para um resultado, gerando uma diferença quase nula entre os dois laços calculados.

Figura 24 - Otimização topológica de uma estrutura veicular

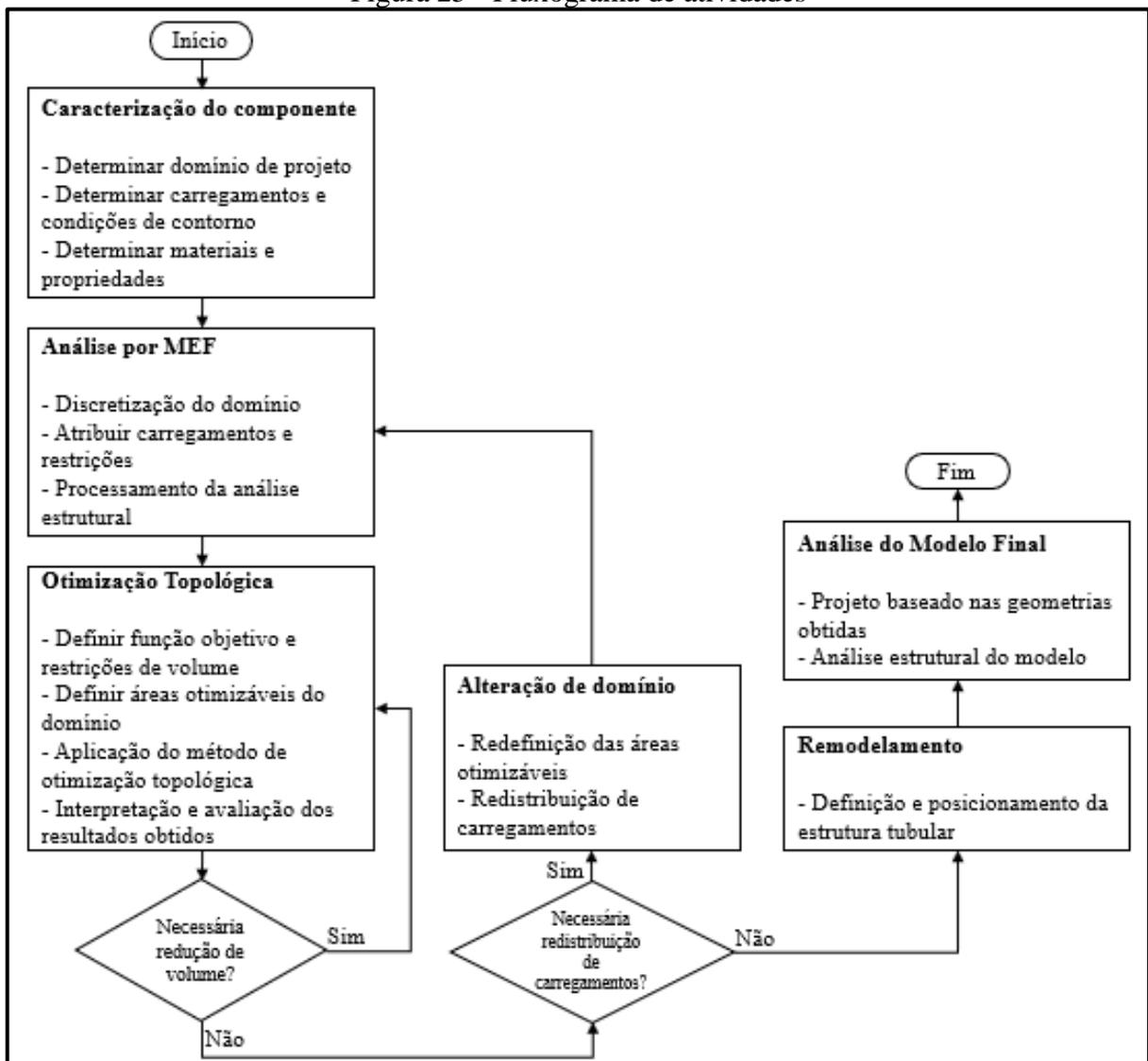


Fonte: Adaptado de Yan e Cheng (2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo está descrita a metodologia utilizada para a elaboração da análise de otimização estrutural sobre o domínio de uma carroceria de ônibus, buscando o modelo estrutural ótimo, ou seja, visando atingir menor massa da estrutura dentro dos parâmetros de tensões definidos. Considerando os objetivos específicos deste trabalho, o desenvolvimento foi subdividido em quatro etapas, sendo elas: (1) Definição do domínio e carregamentos atuantes sobre a carroceria; (2) Modelamento da carroceria, inserção de cargas e condições de contorno para cálculo em MEF; (3) Aplicação do método de otimização topológica; (4) Análise e avaliação dos resultados obtidos. A descrição mais detalhada das etapas pode ser analisada conforme o fluxograma na Figura 25.

Figura 25 - Fluxograma de atividades



Fonte: o autor (2018).

### 3.1 DESCRIÇÃO DO PRODUTO

O veículo utilizado como referência de estudo para este trabalho trata-se do modelo Torino G6, encarroçado pela empresa Marcopolo S.A. O modelo de ônibus teve o seu lançamento em 1999 e encerramento de sua linha em 2007, quando foi lançado um novo modelo da carroceria, denominado Torino G7. A linha Torino é utilizada para serviços de transporte urbano. Sua estrutura consiste na união, por meio de soldagem, de chapas e perfis tubulares. A carroceria é fabricada sobre chassis de montadoras como Mercedes Benz e Volkswagen. A Figura 26 ilustra um modelo de veículo de referência estudado.

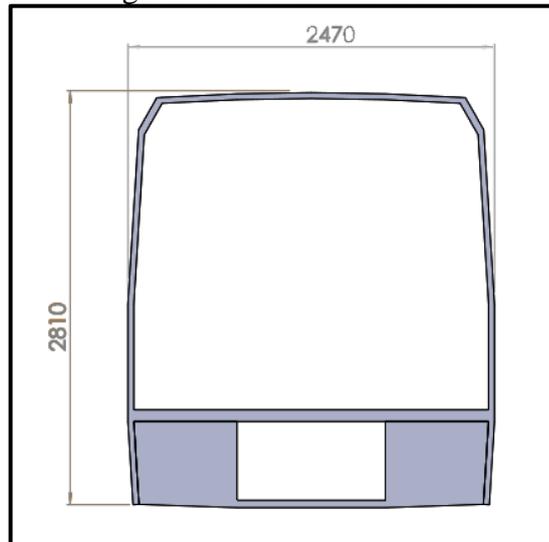
Figura 26 - Ônibus modelo Torino



Fonte: Ônibus Brasil (2018).

Para possibilitar a aplicação da metodologia proposta por este trabalho, foi tido como base para construção do domínio o corte transversal de carroceria, delimitando a área de atuação da estrutura. No modelo trabalhado, por tratar-se de um modelo de ônibus urbano, define-se que a estrutura da carroceria produzida no domínio possui apenas uma base, essa estando em contato direto com as longarinas do chassi. A visão geral do modelo de corte transversal utilizado pode ser observada na Figura 27, contando com largura máxima de 2470 mm e altura máxima desde o ponto mais baixo até o ponto mais alto da estrutura de 2810 mm. Também pode ser observado que abaixo da base do veículo haverá uma zona com e uma sem material. A zona onde há ausência de material refere-se à área ocupada pelas longarinas e travessas do chassi do ônibus, já as áreas que contêm material se dão devido à necessidade de uma ligação estrutural mais robusta entre base da carroceria e chassi.

Figura 27 - Corte Transversal



Fonte: o autor (2018).

A estrutura da carroceria de um ônibus é composta principalmente por tubos soldados, dentre os quais pode-se possuir diferentes seções, espessuras e materiais de tubo. Para desenvolvimento do trabalho será considerado apenas um tipo de material sobre o domínio definido, sendo este o aço ZAR 230, conforme Norma NBR 7008. No projeto de um casulo estrutural, também, comumente encontram-se chapas utilizadas para reforçar as zonas mais críticas do veículo, bem como utilização de tubos com materiais de resistências mecânicas mais elevadas. Em virtude dessa necessidade define-se como segundo tipo de material a ser utilizado o aço ZSTE 380, conforme norma SEW 093. As propriedades mínimas dos materiais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas do Aço ZAR 230 e ZSTE 380

Material	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Coefficiente de Poisson	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
<b>ZAR 230</b>	230	310	190	22	0,3	7,85
<b>ZSTE 380</b>	380	460	210	18	0,3	7,85

Fonte: adaptado de NBR 7008 (2003) e SEW 093.

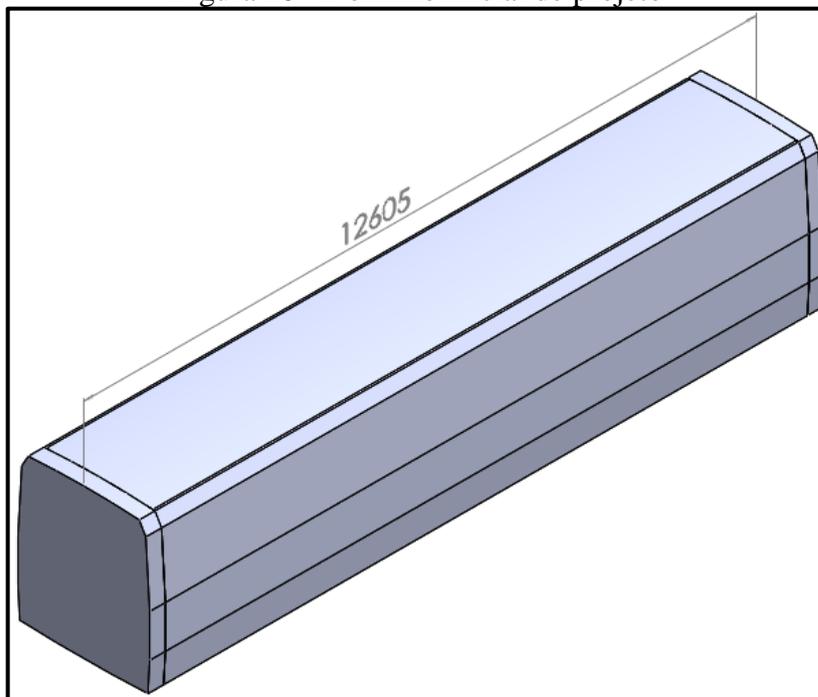
### 3.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Como primeira etapa de desenvolvimento, define-se o modelo da carroceria, sendo necessário determinar o domínio de projeto, condições de contorno e carregamentos aplicados.

### 3.2.1 Domínio

O domínio de projeto referente ao estudo foi produzido baseado no modelo de corte transversal de carroceria definido na Figura 27, dessa maneira delimitando o volume de trabalho e possíveis localizações de material para a base, laterais, teto e uniões. A partir desse corte foi extrudada a carroceria buscando um dimensionamento que contivesse um comprimento máximo de veículo de 12605 mm. A Figura 28 representa o modelo inicial baseado na seção do casulo estrutural.

Figura 28 - Domínio inicial de projeto



Fonte: o autor (2018).

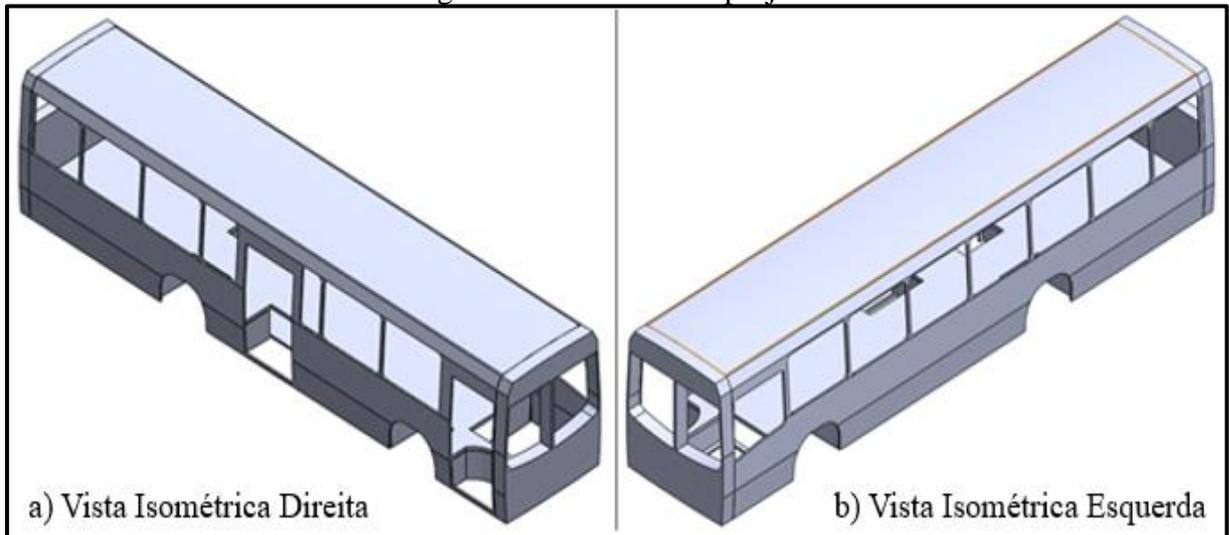
Com o domínio inicial definido devem ser consideradas as aberturas obrigatórias na estrutura. Tais aberturas referem-se especificadamente aos vãos de porta, de janela, de aro de roda, plataforma do motorista e motor, sendo os dois primeiros referentes a restrições de projeto, devido às necessidades funcionais do produto ônibus, enquanto os três últimos referenciados diretamente ao espaço utilizado pelo chassi do veículo.

Para dimensionamento de vãos de janela definiu-se um comportamento padrão, trabalhando-se com uma dimensão fixada de comprimento de vão, com espaçamento entre janelas também constante. As únicas regiões que não possuem os valores padrões definidos são as regiões localizadas nas extremidades e onde existe interferência de portas na estrutura.

O posicionamento das portas de serviço se deu em duas regiões, sendo a primeira localizada na parte dianteira do veículo e a segunda localizada no entre-eixo. Os valores utilizados para dimensionar os vãos relativos às portas se deram em função da altura da base do domínio até o limite superior do vão e de sua largura.

As aberturas relativas ao chassi localizam-se nas regiões dos eixos dianteiro e traseiro, criando espaços na estrutura tanto na base quanto na lateral do domínio onde estarão posicionados pneus e suspensão. Também abre-se espaços na região do motorista, devido ao fato de a plataforma onde o mesmo se localiza estar acoplada ao chassi do ônibus. Com todos os posicionamentos de vãos necessários à construção do modelo, define-se o domínio inicial de projeto, ilustrado na Figura 29a e Figura 29b.

Figura 29 - Domínio do projeto



Fonte: o autor (2018).

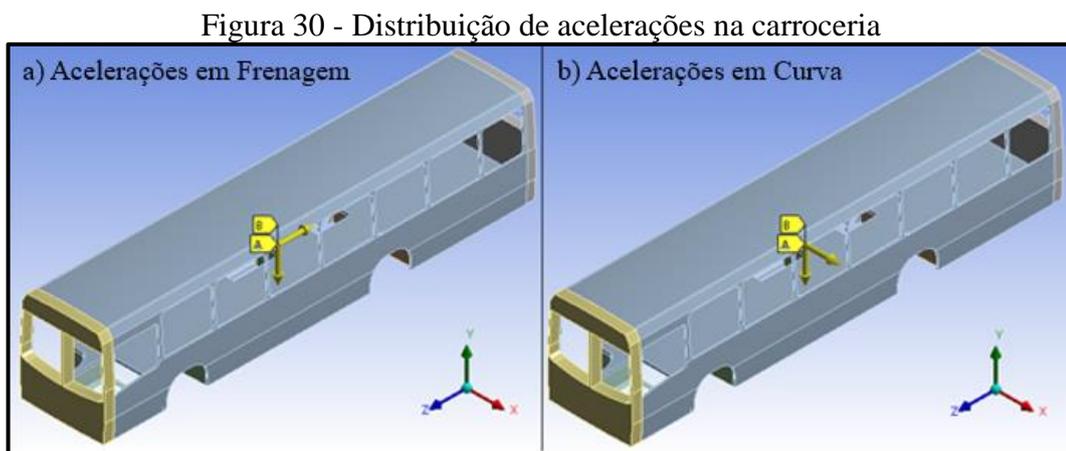
Para a otimização topológica da carroceria, utilizam-se áreas congeladas, termo este proveniente do inglês *frozen areas* e utilizado dentro dos *softwares* de otimização para definir lugares onde não deve ocorrer a remoção de material. Tais áreas estão referenciadas principalmente aos contornos das aberturas obrigatórias, como vãos de janela, devido à existência de outros componentes do ônibus que necessitam dessas áreas de contato para fixação. Deve-se considerar também como áreas congeladas os pontos localizados na união entre lateral e base, bem como na união entre lateral e teto, essas áreas podem ser definidas nas posições das longarinas da lateral e nas longarinas do teto.

### 3.2.2 Carregamentos

Em virtude da complexidade estrutural, das dimensões do veículo, e da constante variação de posição e esforços das cargas, os carregamentos na estrutura são definidos com base em análises e leituras de dados coletados durante o comportamento do produto em campos de testes. Para realização da análise linear, definem-se carregamentos estáticos relativos aos valores resultantes dos testes para aplicação sobre o modelo da carroceria em CAE.

Nesse trabalho são utilizadas quatro análises com definição prévia de carregamentos estáticos equivalentes, sendo elas referentes a: peso próprio, considerando o veículo carregado, simulando os esforços verticais; comportamento em curva, com carregamento equivalente aos máximos esforços transversais, com o veículo carregado em trajetória circular; comportamento em frenagem, considerando o veículo carregado em desaceleração, criando esforços longitudinais; e análise de torção, recriando a condição crítica de haver uma roda dianteira de um lado e uma roda traseira do outro atingindo os fins de curso da suspensão simultaneamente.

Os carregamentos estáticos se dão em função da aplicação de uma aceleração equivalente conforme ilustra a Figura 30, onde a Figura 30a representa as acelerações referente frenagem e a Figura 30b representa a curva. As acelerações resultantes serão inseridas na análise com base em fração de aceleração gravitacional, conforme indicado na Tabela 2.



Fonte: o autor (2018).

Tabela 2 - Acelerações equivalentes sobre o modelo

<b>Eixo</b>	<b>Peso Próprio</b>	<b>Curva</b>	<b>Frenagem</b>
X	-	0,6g	-
Y	1g	1g	1g
Z	-	-	0,5g

Fonte: o autor (2018).

Para reprodução em MEF das análises relacionadas a peso próprio, curva e frenagem, são utilizadas como condições de contorno a fixação das áreas no chassi referente ao posicionamento das junções do chassi com a suspensão, bloqueando o movimento tanto nas três direções cartesianas quanto em suas rotações, conforme Tabela 3

Tabela 3 - Condições de contorno para análises de acelerações

<b>Deslocamento</b>	<b>Roda Dianteira Esquerda</b>	<b>Roda Dianteira Direita</b>	<b>Roda Traseira Esquerda</b>	<b>Roda Traseira Direita</b>
X	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
Y	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
Z	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
RX	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
RY	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
RZ	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo

Fonte: o autor (2018).

Para as análises envolvendo torção da carroceria, será realizada uma sequência de iterações aplicando condições de contorno sobre os conjuntos de suspensão conforme Tabela 4, que representa as condições para uma das diagonais do veículo. As iterações serão realizadas invertendo a diagonal simulada para cada etapa de análise.

Tabela 4 - Condições de contorno para análises de torção

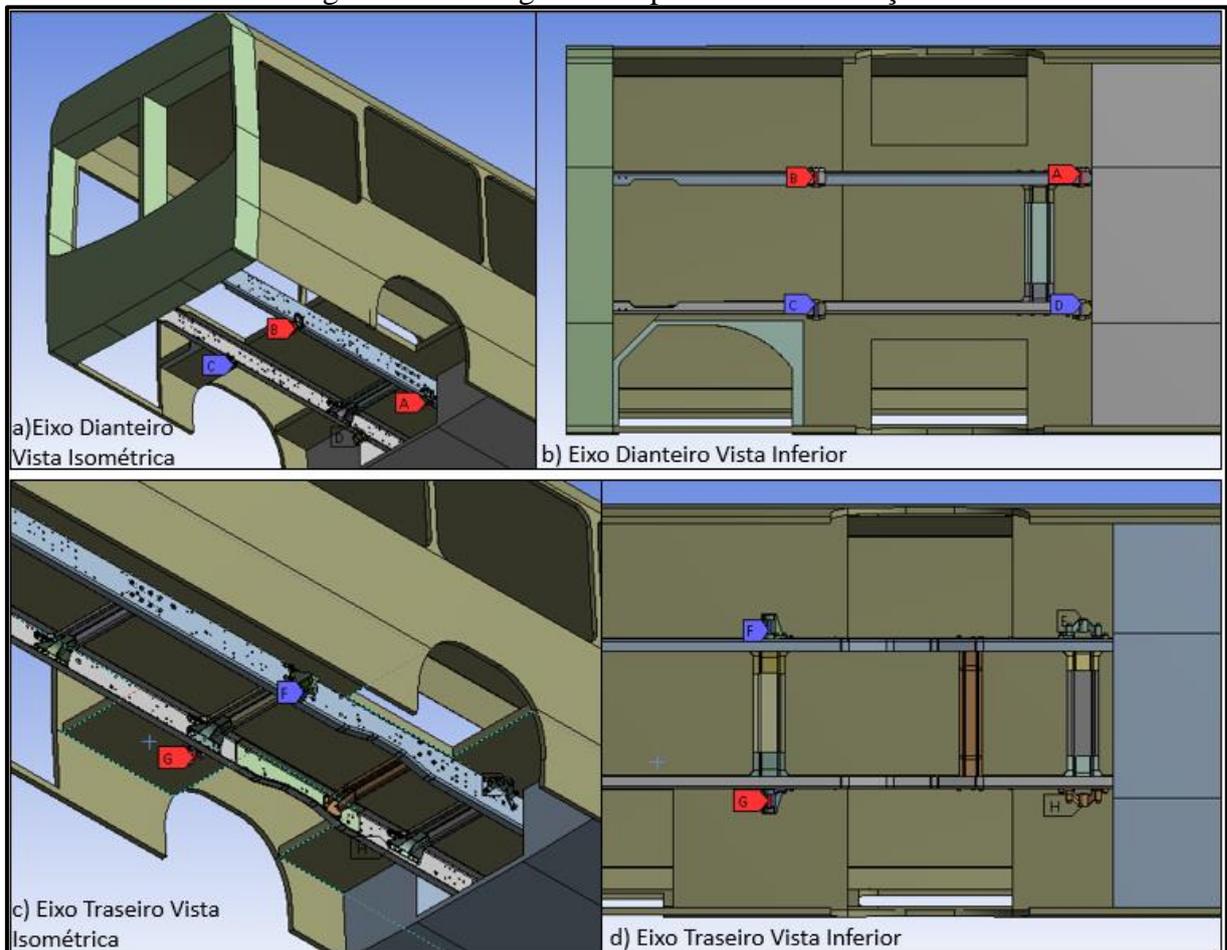
<b>Deslocamento</b>	<b>Roda Dianteira Esquerda</b>	<b>Roda Dianteira Direita</b>	<b>Roda Traseira Esquerda</b>	<b>Roda Traseira Direita</b>
X	Livre	Fixo	Fixo	Livre
Y	Livre	Fixo	Fixo	Livre
Z	Livre	Fixo	Fixo	Livre
RX	Livre	Fixo	Fixo	Livre
RY	Livre	Fixo	Fixo	Livre
RZ	Livre	Fixo	Fixo	Livre

Fonte: o autor (2018).

Os carregamentos aplicados para análise de torção serão dispostos no conjunto de suspensão oposto à aplicação da condição de contorno em cada eixo do chassi. A Figura 31 ilustra a configuração das análises, onde as Figuras Figura 31a e Figura 31b demonstram as condições para o eixo dianteiro, sendo que as indicações “A” e “B” representam os carregamentos e “C” e “D” as condições de contorno, e as Figura 31c e Figura 31d demonstram

as condições para o eixo traseiro, sendo que as indicações “G” e “H” representam os carregamentos e “E” e “F” as condições de contorno.

Figura 31 - Carregamentos para análise de torção



Fonte: O autor (2018).

Considerando a necessidade das ferramentas de otimização topológica de trabalho apenas com esforços estáticos, a análise de torção foi escolhida como referência para desenvolvimento do método, sendo as análises de peso próprio, aceleração em curva e frenagem utilizadas ao final do trabalho para análise da estrutura otimizada. Com relação a forma de funcionamento do algoritmo otimizador, também se afirma que as intensidades das forças aplicadas sobre as condições não são o fator mais relevante, sendo este vinculado as proporções entre os carregamentos aplicados, assim aplicou-se uma proporção de esforços de 1 para 1,2, do eixo dianteiro para o eixo traseiro respectivamente.

### 3.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO

Para desenvolvimento do trabalho tornam-se necessárias ferramentas que possibilitem a análise da estrutura, desde os domínios iniciais, que sofrerão otimização topológica, passando pelos modelos intermediários até o modelo final, onde será realizada análise para validação. O *software* selecionado para utilização foi o *software* CAE ANSYS Workbench, sendo utilizado o ANSYS Mechanical para análises de MEF e seu módulo “Topology Optimization” para realização da otimização topológica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises realizadas, contemplando as observações sobre cada etapa adotada e mostrando as necessidades e soluções visualizadas em cada otimização. O objetivo final foi desenvolver um casulo estrutural de um ônibus utilizando o método de otimização topológica, buscando uma estrutura que atenda aos requisitos e tensões máximas de projeto para cada análise estática presente no capítulo 3.2.2.

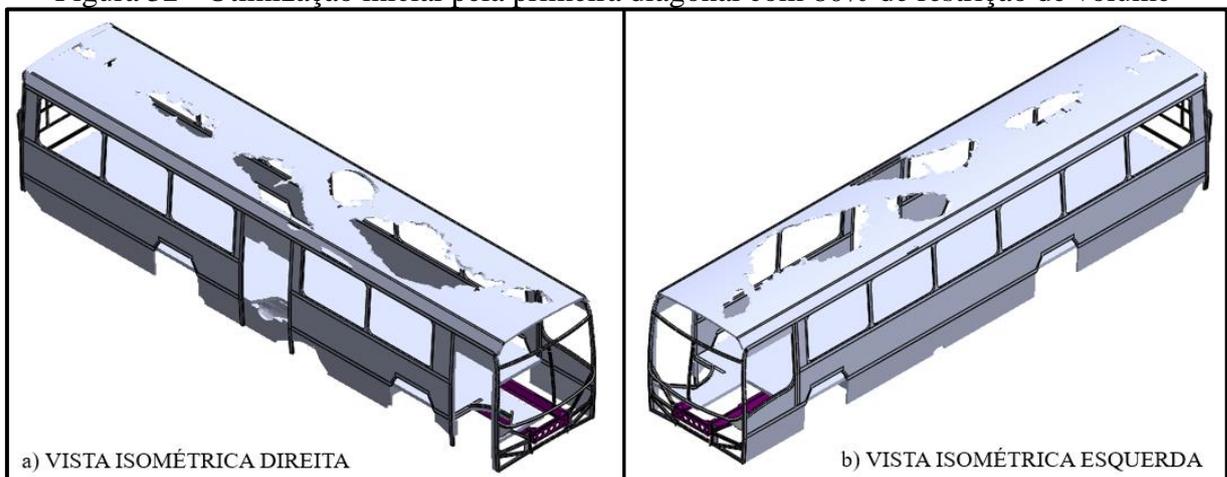
### 4.1 RESULTADOS DOS TESTES INICIAIS

Nesta etapa são mostrados os resultados provenientes dos primeiros testes de otimização, utilizando como base apenas carregamentos torcionais aplicados nos eixos do chassi. Estes esforços foram inseridos nas diagonais do chassi, sendo aplicados na roda dianteira esquerda e roda traseira direita, condição considerada como primeira diagonal, e posteriormente nas rodas dianteira direita e traseira esquerda, condição considerada como segunda diagonal.

#### 4.1.1 Carregamentos sobre a primeira diagonal I

Para compreensão do comportamento da estrutura do ônibus perante o método de otimização topológica foram utilizados 3 diferentes valores de restrição de volume sobre o primeiro teste na primeira diagonal, nomeado carregamentos sobre a primeira diagonal I, sendo estes de 80%, 70% e 50%. Os resultados foram tomados como base para decisão das condições das análises posteriores e desenvolvimento das análises subsequentes.

Figura 32 - Otimização inicial pela primeira diagonal com 80% de restrição de volume

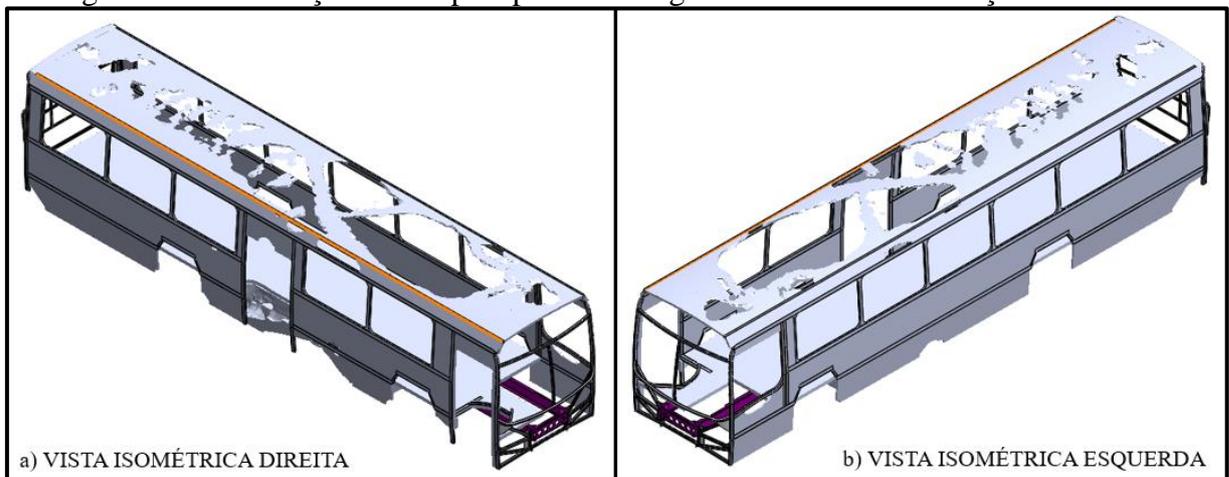


Fonte: O autor (2018).

A Figura 32 representa os formatos obtidos para restrição de 80% de volume do domínio inicial. Foi observada uma grande remoção de material no teto do veículo, sendo que o restante do domínio se manteve sem quase nenhuma perda de material, apresentando vãos apenas próximo à abertura de porta e à estrutura traseira.

Durante a condição de restrição de 70% de volume, conforme ilustra Figura 33, notou-se que a tendência observada de remoção de material da estrutura do teto se mantém. Foi possível visualizar a expansão dos sulcos gerados, principalmente na região logo acima do eixo dianteiro do chassi e no centro do teto na região do balanço traseiro.

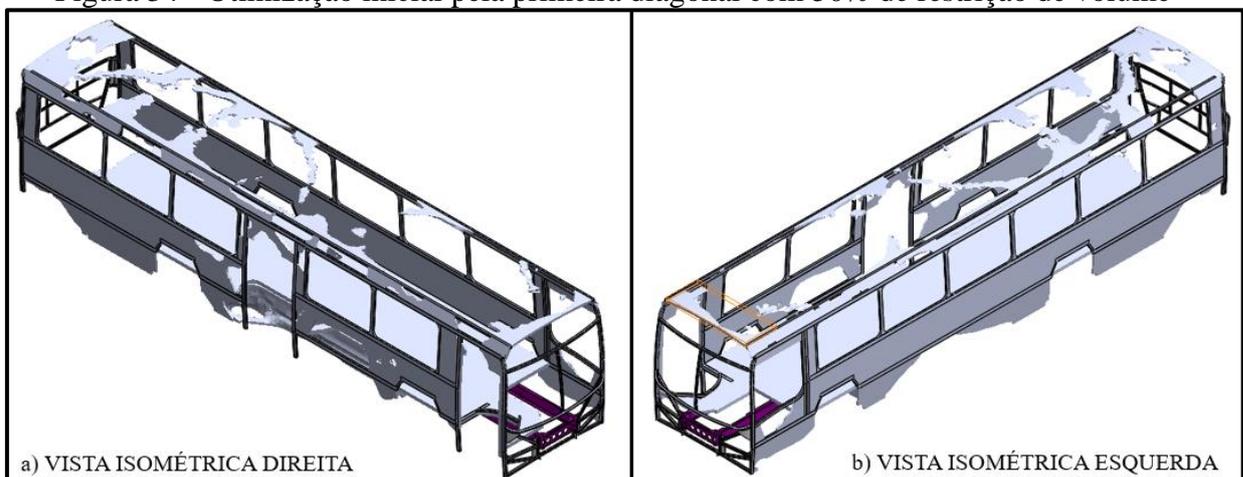
Figura 33 - Otimização inicial pela primeira diagonal com 70% de restrição de volume



Fonte: O autor (2018).

A Figura 34 ilustra o resultado da análise considerando 50% de restrição de volume. Esta condição de otimização ocasionou uma remoção muito elevada de material na parte superior do domínio e remoção completa na região traseira da base e união.

Figura 34 - Otimização inicial pela primeira diagonal com 50% de restrição de volume



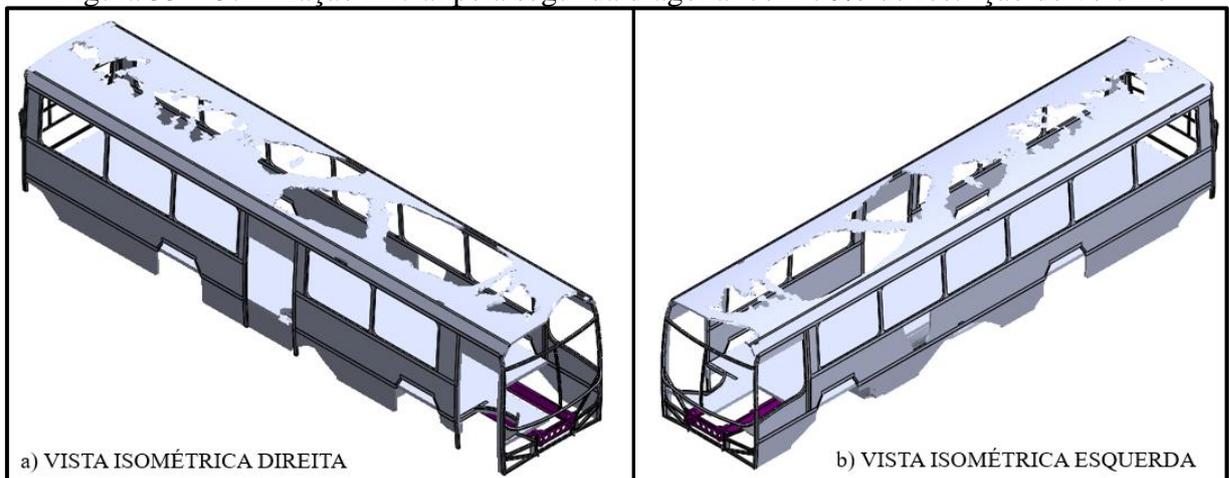
Fonte: O autor (2018).

Com base nos resultados obtidos comparando as três análises seleciona-se como porcentagem ideal de remoção de material o valor de 70% de restrição de volume. A escolha da porcentagem para a análise torcional em questão deve-se principalmente ao comportamento observado de material na estrutura do teto, onde, para maiores retenções os resultados para a definição da topologia da estrutura mostram-se inconclusivos e para maiores remoções a tendência da estrutura leva à sulcos não admissíveis tanto para o teto quanto para a região traseira da base.

#### 4.1.2 Carregamentos sobre a segunda diagonal I

Tendo em vista o comportamento na etapa anterior, optou-se por realizar a otimização sobre a segunda diagonal apenas com restrição de 70%, conforme ilustra a Figura 35. Identificou-se certa similaridade entre as formas geradas nas condições de primeira e segunda diagonal, onde ambas criaram maiores aberturas estruturais no teto sobre o eixo dianteiro e aberturas centrais no balanço traseiro. Outro traço relevante refere-se a aparente simetria da estrutura na região da porta, onde cada diagonal gerou um formato “V” oposto ao outro.

Figura 35 - Otimização inicial pela segunda diagonal com 70% de restrição de volume



Fonte: O autor (2018).

#### 4.1.3 Carregamentos sobre as rodas dianteiras I

Em virtude da remoção elevada de material apenas em regiões referentes ao teto do veículo, se julgou necessário a inserção de um terceiro método de análise, buscando representar mais assertivamente as condições sofridas pela carroceria. Para tal definiu-se a aplicação de

carregamentos apenas no eixo dianteiro do ônibus, fixando a região do eixo traseiro. A condição de contorno utilizada para essa terceira análise está descrita conforme Tabela 5.

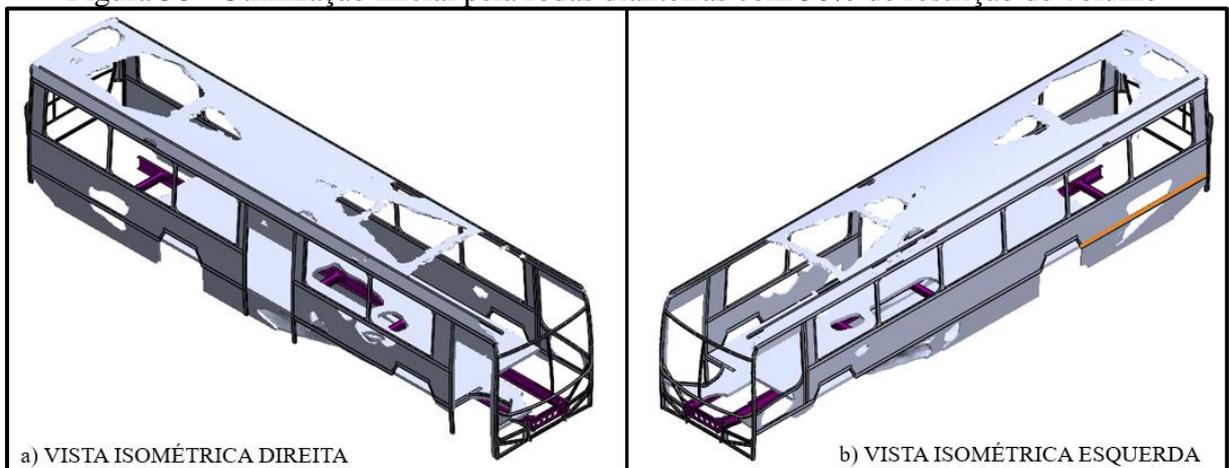
Tabela 5 - Condições de contorno para análises de torção no eixo dianteiro

Deslocamento	Roda Dianteira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Traseira Direita
X	Livre	Livre	Fixo	Fixo
Y	Livre	Livre	Fixo	Fixo
Z	Livre	Livre	Fixo	Fixo
RX	Livre	Livre	Fixo	Fixo
RY	Livre	Livre	Fixo	Fixo
RZ	Livre	Livre	Fixo	Fixo

Fonte: o autor (2018).

Para a análise de otimização dessa condição foi utilizada uma restrição de 50% de volume em virtude de sua remoção de material atingir também outros subsistemas da carroceria. A Figura 36 ilustra o resultado obtido para a condição analisada, sendo possível observar a abertura de sulcos nos balanços dianteiro e traseiro do teto e a formação de uma estrutura similar a um “X”, começando na primeira coluna de janela após o eixo dianteiro e terminando na primeira coluna de janela após o eixo traseiro, bem como o posicionamento de topologias similares às cavernas de teto no meio dos vãos de janela. Também se identificou a criação de um grande espaço vazio na região traseira da base e um princípio de remoção de material localizado no centro do entre eixo.

Figura 36 - Otimização inicial pela rodas dianteiras com 50% de restrição de volume



Fonte: O autor (2018).

#### 4.1.4 Remodelamento do domínio inicial

Tomando como referência as análises com 70% de restrição na primeira e segunda diagonal e a análise com 50% de restrição baseada nos esforços no eixo dianteiro concluiu-se a inviabilidade do desenvolvimento da estrutura da carroceria utilizando apenas as três condições de esforços aplicadas. Para possibilitar o avanço do método torna-se necessária a inserção de carregamentos adicionais que induzam comportamentos sobre o casulo. Com objetivo de gerar essas tendências foi remodelado o domínio, definindo mais áreas de contorno como congeladas, sendo referentes à frente e traseira do teto e contornos da saia.

Como segunda ação para a geração de tendências que levem para uma estrutura viável alterou-se a forma de aplicação do método de otimização. Essa mudança se dá sobre a definição de áreas otimizáveis por análise, sendo descartada a ideia de realizar o processo em todo o casulo estrutural de uma única vez e focando-se em um subsistema por etapa.

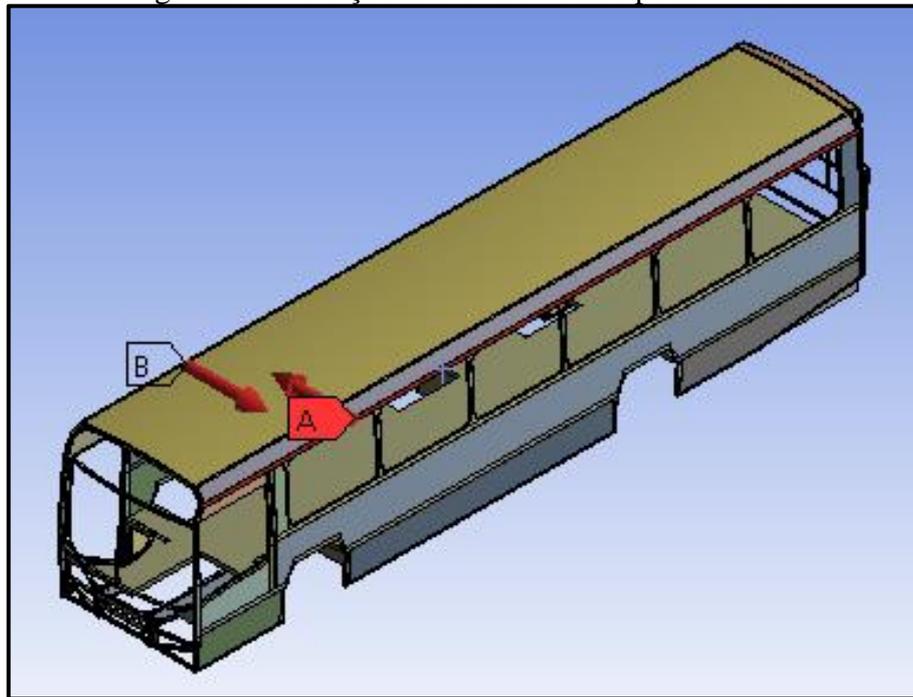
Os subsistemas foram ordenados visando que ao término de cada etapa sua estrutura esteja completamente definida, auxiliando na geração de tendências para as áreas otimizáveis próximas. O primeiro a sofrer otimização foi definido como o teto, por ter possuído melhores respostas quando comparado aos demais subsistemas nas análises anteriores e por estar mais distanciado das condições de contorno, separado por uma estrutura bem definida constituída pelos vãos de janela. A base foi a segunda a ser escolhida para otimização, por estar vinculada a todos os subsistemas restantes e com interferência direta do chassi.

Para critério de definição de viabilidade da metodologia de otimização topológica sobre o casulo estrutural, se optou por realizar o procedimento apenas sobre teto e base. Os demais subsistemas sendo produzidos sem o auxílio do algoritmo otimizador.

#### 4.2 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO NO SUBSISTEMA TETO

Buscando gerar tendências de distribuição sobre a estrutura do teto foram adicionados carregamentos laterais em ambas as longarinas superiores da lateral, sendo estes esforços direcionados para o meio da estrutura. O intuito destes esforços é revelar topologias necessárias para o desenvolvimento do casulo do ônibus que não puderam ser observados nos resultados considerando as condições e carregamentos inicialmente impostos sobre o modelo. A Figura 37 demonstra a direção do carregamento, sendo este aplicado ao longo de toda a área lateral das longarinas com proporção 1 para 1 com relação ao esforço aplicado sobre o eixo traseiro.

Figura 37 - Esforços adicionais no teto pelas laterais



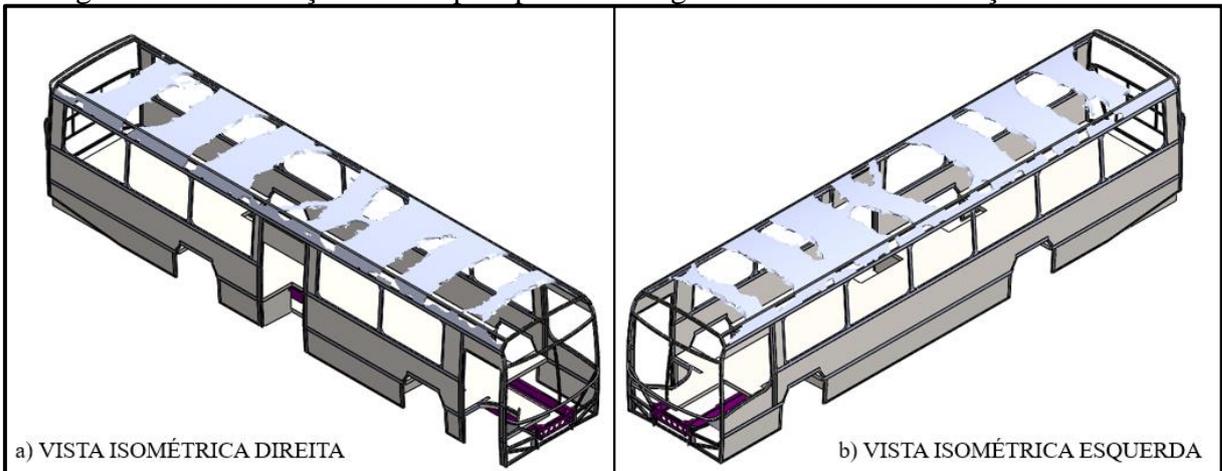
Fonte: O autor (2018).

#### 4.2.1 Carregamentos sobre a primeira diagonal II

Seguindo o novo padrão de análise, buscou-se identificar a porcentagem ideal de restrição de volume para avaliação do teto da estrutura sob as novas condições. Sendo assim foram definidos os novos valores de 50% e 30%, sendo replicados para as demais condições de análise desse subsistema apenas os resultados com melhores representações de topologia.

A Figura 38 representa a análise utilizando 50% como referência de remoção de volume. Para este caso é possível uma interpretação inicial da topologia requerida para os esforços aplicados. O material demonstrou tendência a se manter localizado no meio dos vãos de janela. O padrão citado sofre variação na região de porta entre eixo, onde foi identificada uma alteração no comportamento, ligando o meio do vão de janela no lado esquerdo com uma das colunas laterais da porta no lado direito; observou-se também a concentração de material sobre a coluna de porta dianteira, ligando as longarinas de ambos os lados de forma bem definida.

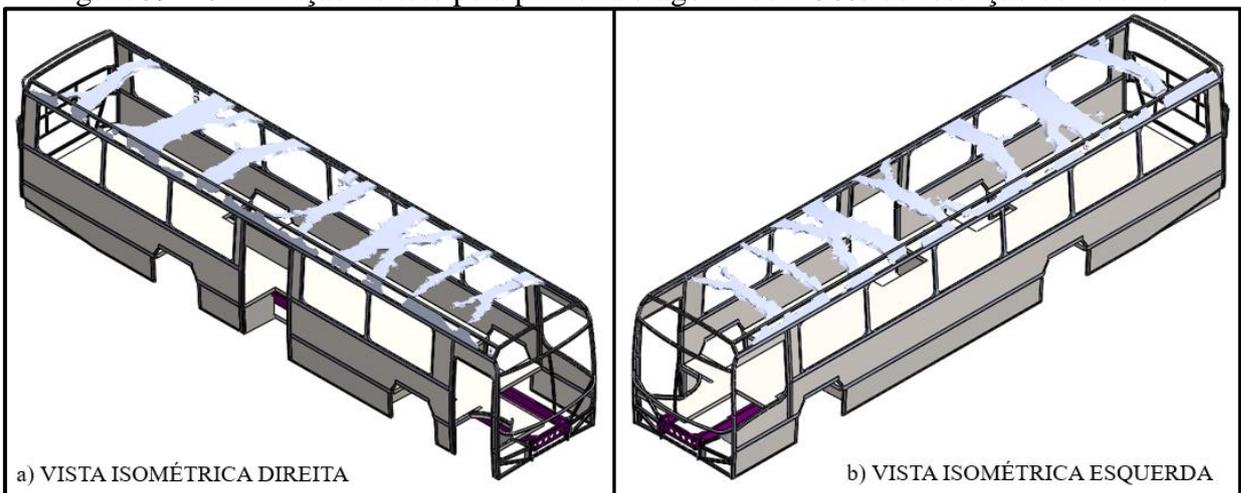
Figura 38 - Otimização no teto pela primeira diagonal com 50% de restrição de volume



Fonte: O autor (2018).

Para a condição de 30% de restrição de volume, conforme ilustrado na Figura 39, a tendência da topologia manteve-se sobre o meio dos vãos de janela e seguindo as exceções sobre porta entre eixo e dianteira. Comparando as análises com 50% e 30% de restrição, refere-se à maior diferença como a revelação de uma estrutura em “X” ao meio da região localizada entre o eixo dianteiro e a porta entre eixo. Os resultados dessa análise foram selecionados para produção da correspondência final da estrutura do teto na condição de carregamento da primeira diagonal.

Figura 39 - Otimização no teto pela primeira diagonal com 30% de restrição de volume



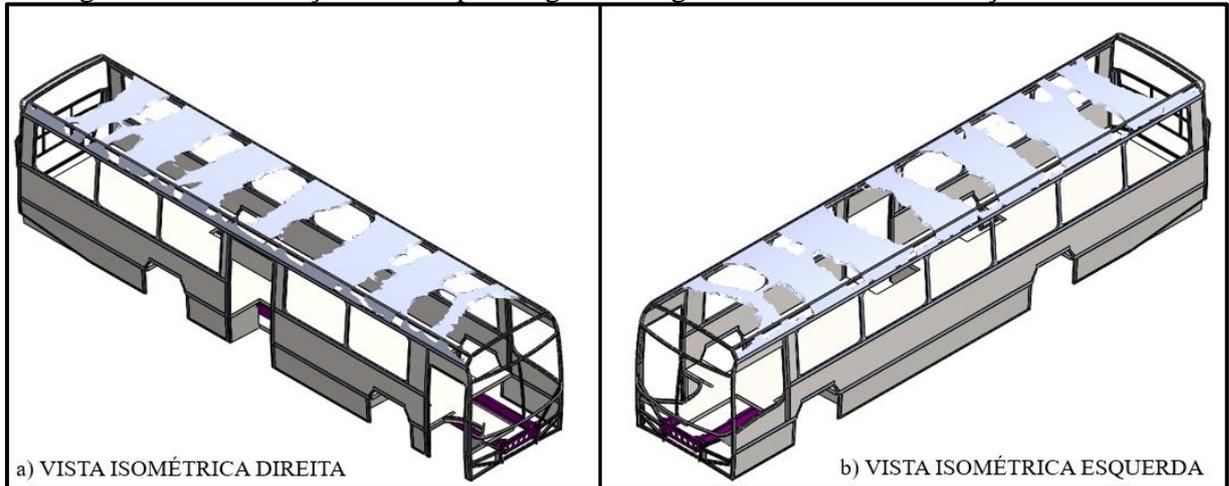
Fonte: O autor (2018).

#### 4.2.2 Carregamentos sobre a segunda diagonal II

A Figura 40 ilustra a condição de 50% de remoção de material, sendo observado um comportamento similar ao da análise correspondente na primeira diagonal. Em contraponto,

algumas alterações foram observadas, como o posicionamento de estrutura ao meio da porta entre eixo e o início da revelação de topologias ligando as colunas de janela às topologias observadas.

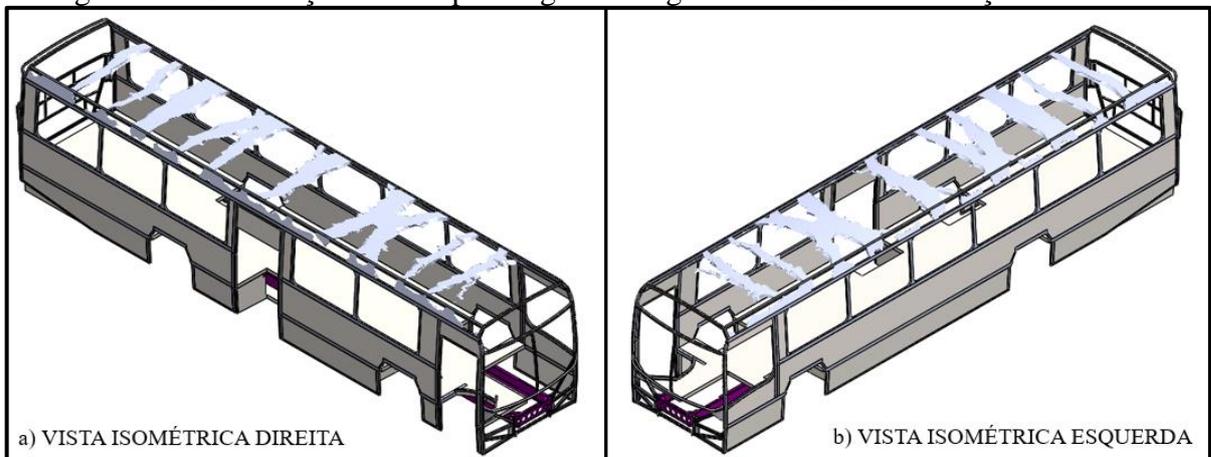
Figura 40 - Otimização no teto pela segunda diagonal com 50% de restrição de volume



Fonte: O autor (2018).

Conforme Figura 41, a utilização de 30% de restrição apresentou o posicionamento de material tanto no meio dos vãos de janela, seguindo a análise sobre a primeira diagonal, como também sobre as colunas de janela. O maior ponto de intersecção entre as análises aplicadas para ambas diagonais foi na topologia apresentada entre o eixo dianteiro e a porta entre eixo. Para esta região as duas análises produziram uma topologia em “X”. Com base nos resultados, a análise de 30% de restrição foi a selecionada como representante da segunda condição.

Figura 41 - Otimização no teto pela segunda diagonal com 30% de restrição de volume

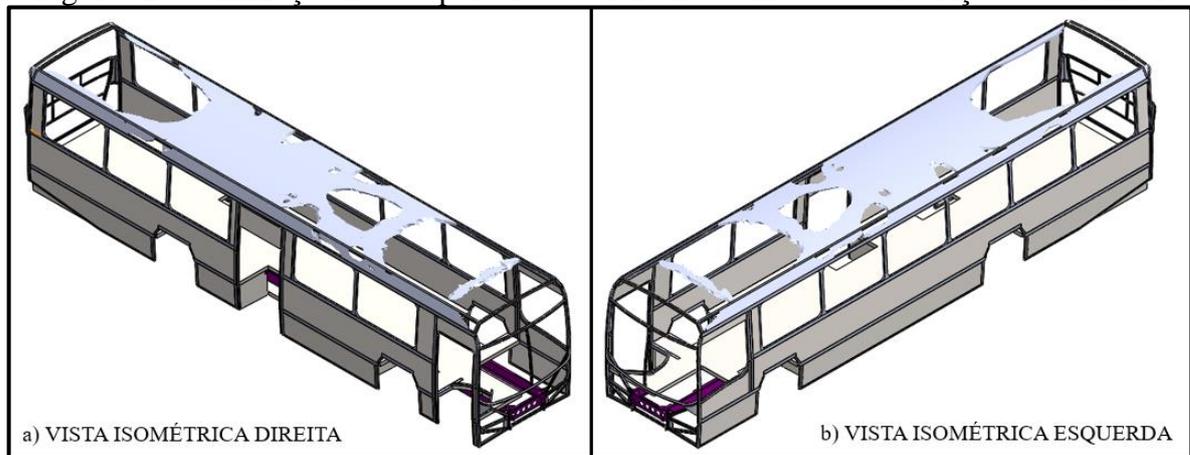


Fonte: O autor (2018).

### 4.2.3 Carregamentos sobre as rodas dianteiras II

A Figura 42 ilustra o resultado atingido pela aplicação de esforços sobre as rodas dianteira com uma restrição de 50% em volume. Para essa situação foi observado uma remoção agressiva de material tanto nas regiões dianteira e traseira do teto, porém mantendo uma otimização conservadora sobre o eixo traseiro e porta entre eixo. Alguns outros fatores também foram observados, como a aparição de reforços ligando as longarinas na coluna de porta dianteira e primeira coluna de janela, também se identificou uma possível estrutura em “X” partindo dessa mesma coluna até a última coluna de janela.

Figura 42 - Otimização no teto pelas rodas dianteiras com 50% de restrição de volume I



Fonte: O autor (2018).

Para a análise trabalhada com 30% de restrição foi possível revelar mais sobre a topologia apresentada na região que se manteve mais conservada na etapa anterior, conforme Figura 43.

Figura 43 - Otimização no teto pelas rodas dianteiras com 30% de restrição de volume

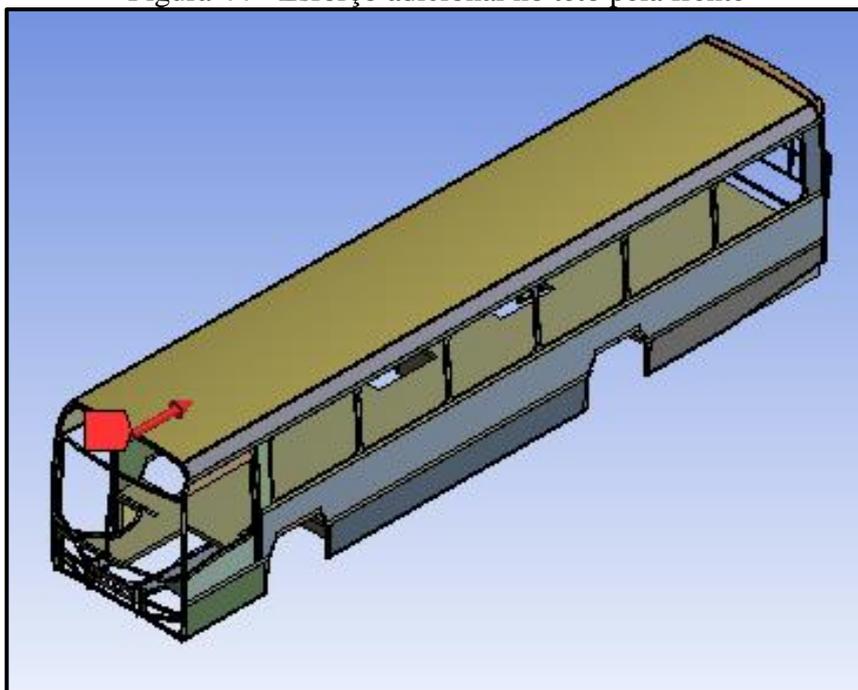


Fonte: O autor (2018).

A comparação entre as otimizações realizadas com 50% e 30%, mostrou a tendência da estrutura em manter material ligando as longarinas em regiões de coluna de janela, com exceção à região posicionada na porta entre eixo, onde foi gerada uma estrutura centralizada com a porta. O “X” observado na análise de 50% de restrição ligando a primeira e última coluna de janela em cada lateral não foi identificado na análise com parâmetro de 30%, tendo sido revelado um formato menor ligando a última coluna de janela em cada lado com a topologia exposta no meio da estrutura de porta. Destaca-se também a variação obtida no resultado devido a adição dos carregamentos laterais sobre as longarinas superiores, mantendo uma topologia similar à uma caverna de teto logo após a porta dianteira, sendo esse resultado não observado na seção 4.1.3, onde os únicos esforços aplicados referiam-se aos carregamentos torcionais sobre as rodas dianteiras do veículo.

Reavaliando todos os resultados obtidos com as três condições propostas de carregamentos, observou-se a ausência de topologias que representassem a ligação entre as estruturas que configuram as uniões das longarinas laterais. Tendo em vista esse fator, foi definido uma quarta análise, específica para o subsistema do teto, adicionando um carregamento frontal que pudesse forçar a aparição de um padrão de material paralelo às longarinas. A Figura 44 demonstra o posicionamento do carregamento adicional, sendo este aplicado ao longo de toda a superfície da caverna da frente do teto com proporção de 1 para 1 com relação aos esforços aplicados sobre o eixo traseiro.

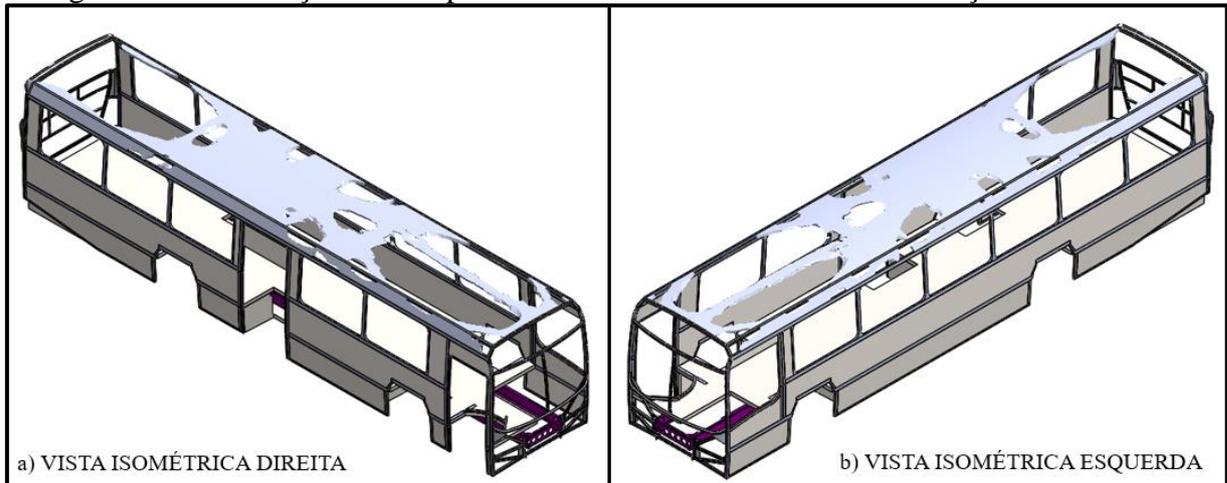
Figura 44 - Esforço adicional no teto pela frente



Fonte: O autor (2018).

Para realização da quarta condição foi utilizada como referência a análise com aplicação de carregamentos nas rodas dianteiras, tendo essa sido a análise com remoção mais agressiva na região dianteira do teto. A Figura 45 ilustra os resultados atingidos através da adição do novo esforço, onde foi gerado um comportamento estrutural contínuo, ao longo do balanço dianteiro e entre eixo, através da inclusão de uma faixa de material levemente deslocada do centro da carroceria. Também se observou o posicionamento de reforços laterais na frente do teto.

Figura 45 - Otimização no teto pelas rodas dianteiras com 50% de restrição de volume II

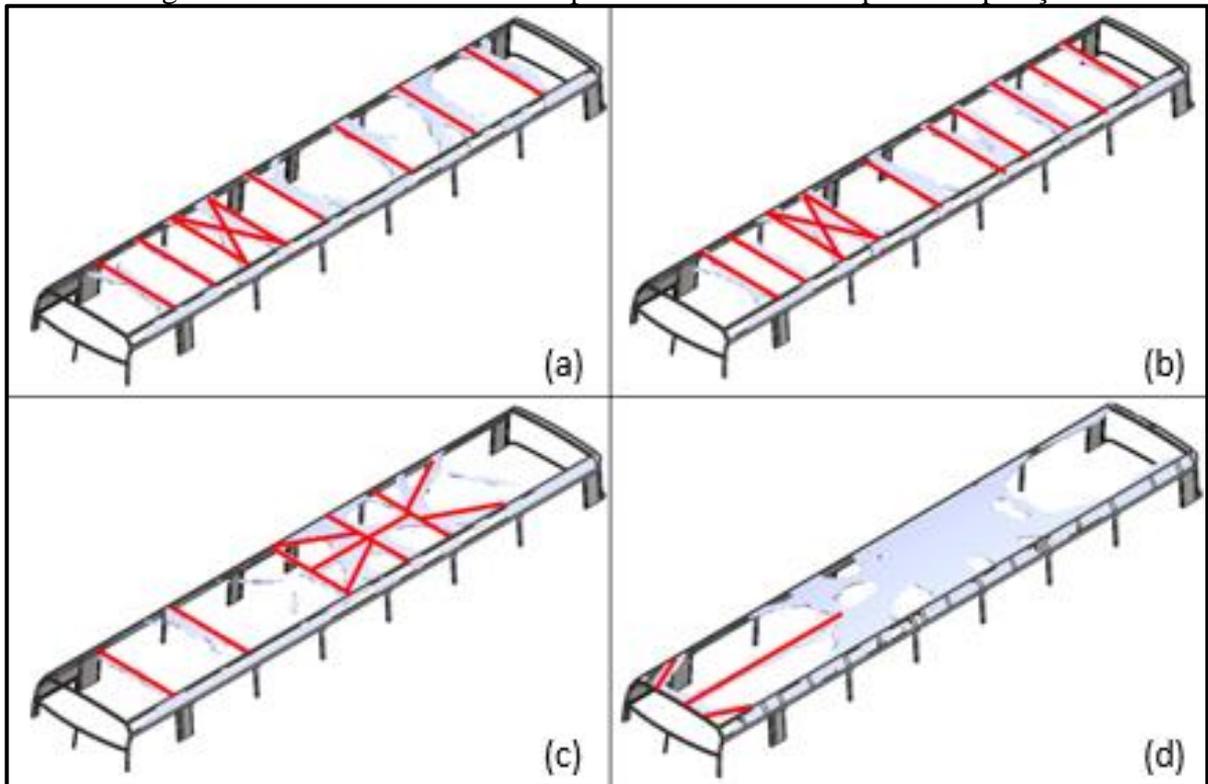


Fonte: O autor (2018).

#### 4.2.4 Remodelamento da estrutura do teto

Para possibilitar o remodelamento da estrutura do teto foi realizada a sobreposição dos resultados das três análises iniciais, conforme Figura 46, sendo referentes à aplicação de carregamentos na primeira diagonal (Figura 39a), segunda diagonal (Figura 39b) e no eixo dianteiro (Figura 39c) com e sem aplicação de carregamentos frontais (Figura 39d), com restrição de 30% de volume. A combinação das três otimizações resultou no posicionamento das cavernas do teto e na adição de estruturas em “X” em determinados pontos do teto. A quarta análise, com aplicação de carregamentos frontais foi utilizada para estruturar a união entre os tubos do teto.

Figura 46 - Padrões identificados para desenvolvimento por sobreposição

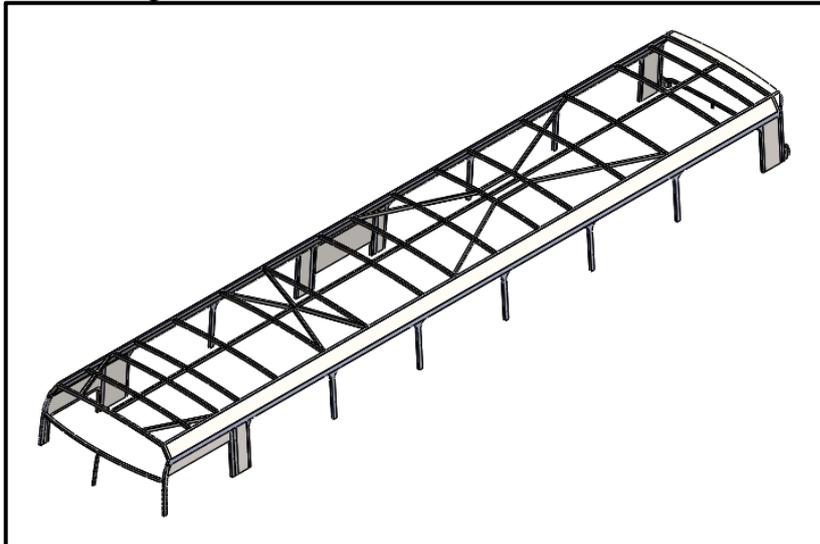


Fonte: O autor (2018)

A Figura 47 representa o teto reestruturado pós otimização topológica. Dentre os comportamentos produzidos sobre as cavernas destacam-se: o padrão de distribuição, onde foram gerados posicionamentos buscando colunas de janela e o meio dos vãos de janela; a variação do padrão na região da porta entre eixo, onde algoritmo otimizador buscou manter material sobre a coluna em frente à porta e no meio de seu vão, assim gerando cavernas deslocadas do padrão; o deslocamento da caverna de teto sobre o eixo traseiro, onde o comportamento da estrutura priorizou inserir material alinhado ao eixo, deslocando o tubo do centro do vão de janela; a variação da posição da caverna no último vão, que foi centralizada entre a última coluna de janela e a estrutura traseira e não sobre o meio do vão.

Referindo-se às estruturas em “X” foram posicionados tubos seguindo os resultados das análises em ambas diagonais, posicionando reforços no módulo de teto localizado no meio entre a região do rodado dianteiro e porta entre eixo. Seguindo a lógica produzida pela análise com esforços no eixo dianteiro foi definida uma estrutura em “X” iniciando na caverna ao meio da porta seguindo até a última coluna de janela. Por fim, baseado na quarta análise, com carregamentos adicionais na frente do teto, foram posicionados tubos de ligação ao meio de todas as cavernas, apesar do resultado da otimização ter gerado um comportamento com leve deslocamento, foi optado pelo posicionamento centralizado, visando simetria do modelo. A

Figura 47 - Remodelamento Estrutura do Teto

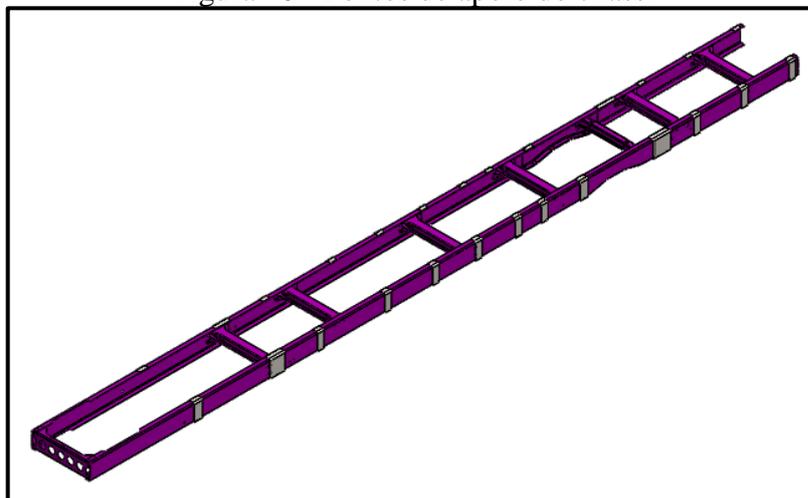


Fonte: O autor (2018)

#### 4.3 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO NO SUBSISTEMA BASE

Considerando a base como o elemento com maior contato com o chassi, foram necessárias alterações sobre o domínio inicial, buscando inferir tendências sobre a otimização resultante em cada uma das três análises utilizadas. Para isso foram posicionadas chapas de preparação que irão operar como pontos de contato entre chassi e casulo, conforme ilustrado na distribuição apresentada na Figura 48. A segunda medida tomada para assegurar um comportamento viável da estrutura foi a remoção prévia dos domínios de união do modelo, sendo que os mesmos serão utilizados como apoio estrutural conforme necessidade perante a distribuição de tubos final da base.

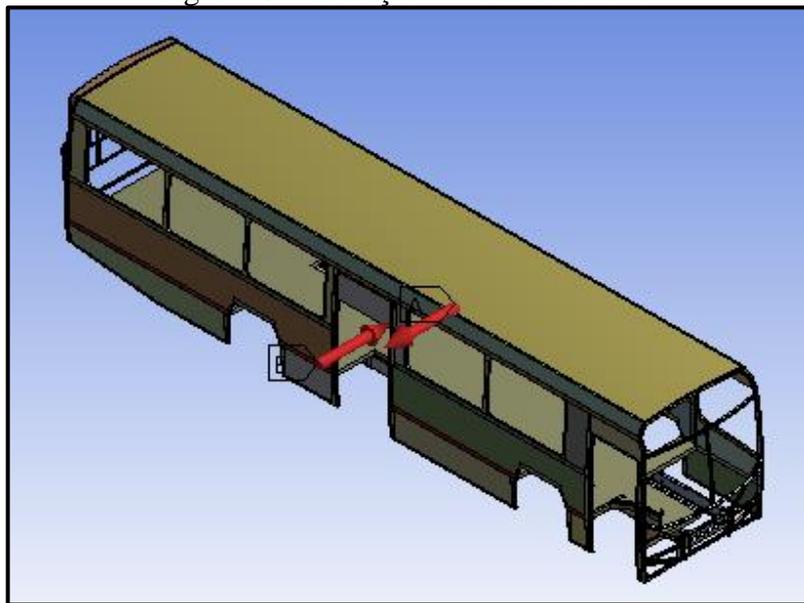
Figura 48 - Pontos de apoio do chassi



Fonte: O autor (2018)

Visto a funcionalidade produzida pela inserção de esforços laterais durante a etapa de otimização do teto, aplicou-se a mesma condição adicional para análise da base, sendo inseridos carregamentos ao longo de toda a extensão das longarinas inferiores em ambos os lados da carroceria, conforme Figura 49, com proporção 1 para 1 relacionando com os esforços sobre o eixo traseiro. O intuito inicial dessa aplicação é buscar a ligação entre longarinas, e em conjunto com a definição dos apoios provenientes da preparação do chassi, encontrar posições e formatos dos barrotos de base.

Figura 49 - Esforços adicionais na base



Fonte: O autor (2018)

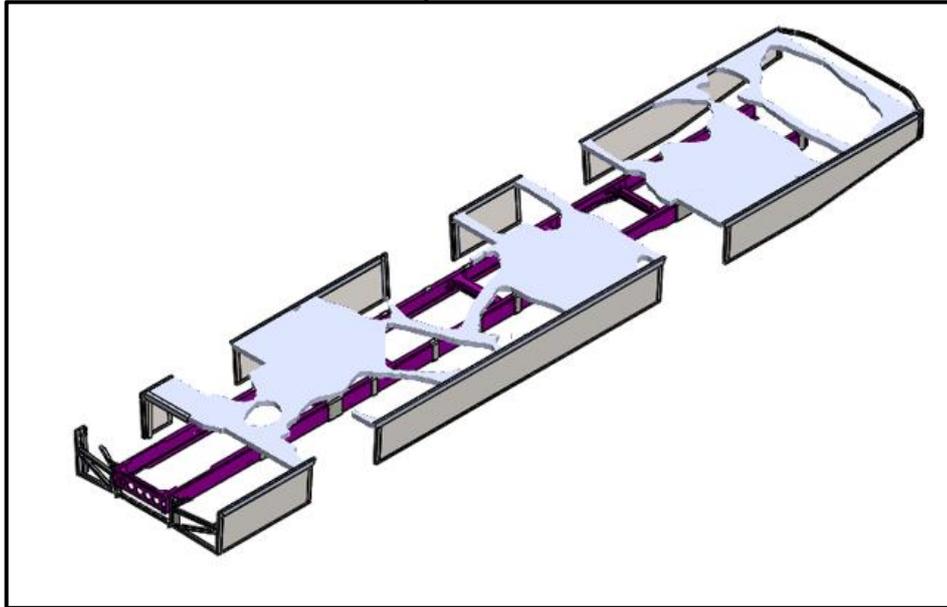
Além das variações de domínio e carregamentos foi optado pela utilização de um método evolucionário para produção da base. O método consiste em realizar a otimização em diferentes etapas, onde em cada análise serão acrescentadas áreas congeladas sobre o domínio podendo ou não ocorrer exclusão de regiões que demonstrarem grande perda de volume. Ou seja, em cada nível de análise ocorrerá remodelamento do subsistema buscando suprir as necessidades apresentadas em cada uma das três condições de otimização, após, aplicando novamente as otimizações até obtenção de uma estrutura adequada.

#### 4.3.1 Carregamentos sobre a primeira diagonal III

Para a primeira etapa de otimizações do subsistema base foi escolhida a utilização de 50% de restrição de volume em todas as análises, buscando a geração de formatos com remoção

de material menos agressiva do que a observada com 30% de restrição. A Figura 50 apresenta o resultado obtido para análise com carregamentos sobre a primeira diagonal. Foi possível observar um comportamento conservador sobre as regiões localizadas mais próximas às rodas fixadas como condição de contorno e com remoção mais elevada nas demais regiões.

Figura 50 - Otimização da base pela primeira diagonal com 50% de restrição de volume

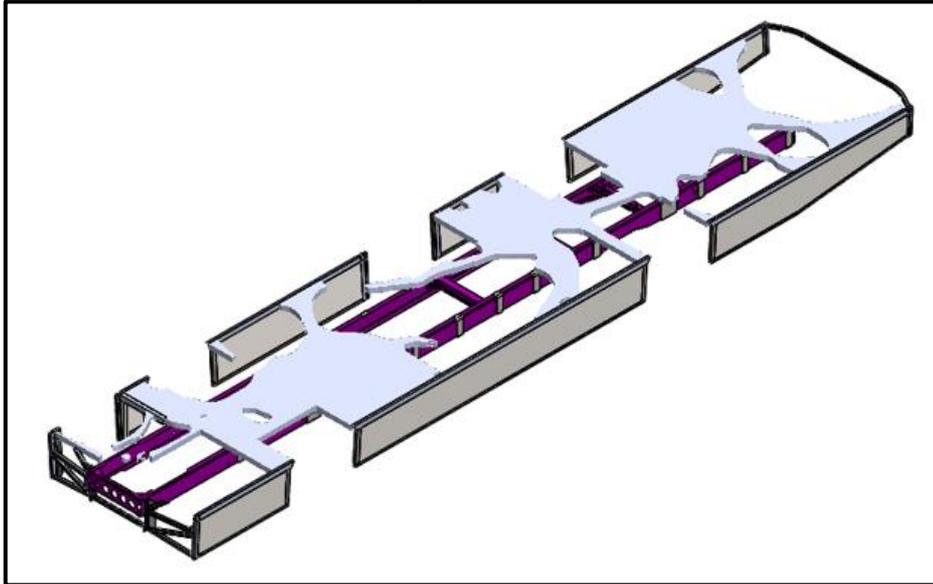


Fonte: O autor (2018).

#### 4.3.2 Carregamentos sobre a segunda diagonal III

A Figura 51 ilustra o formato obtido pela condição de carregamentos sobre a segunda diagonal. O comportamento perante a inversão da diagonal mostrou-se semelhante a topologia atingida pela condição sobre a primeira diagonal, criando áreas mais conservadoras próximo às rodas fixadas. Outras semelhanças identificadas foram: a aparição de formatos similares a barrotes de base nas áreas com otimização mais agressiva próximo aos rodados e na coluna traseira da porta entre eixo; uma grande remoção na região do entre eixo em frente e na região do vão de porta; e a abertura de um sulco no balanço traseiro logo após o término do chassi.

Figura 51 - Otimização da base pela segunda diagonal com 50% de restrição de volume

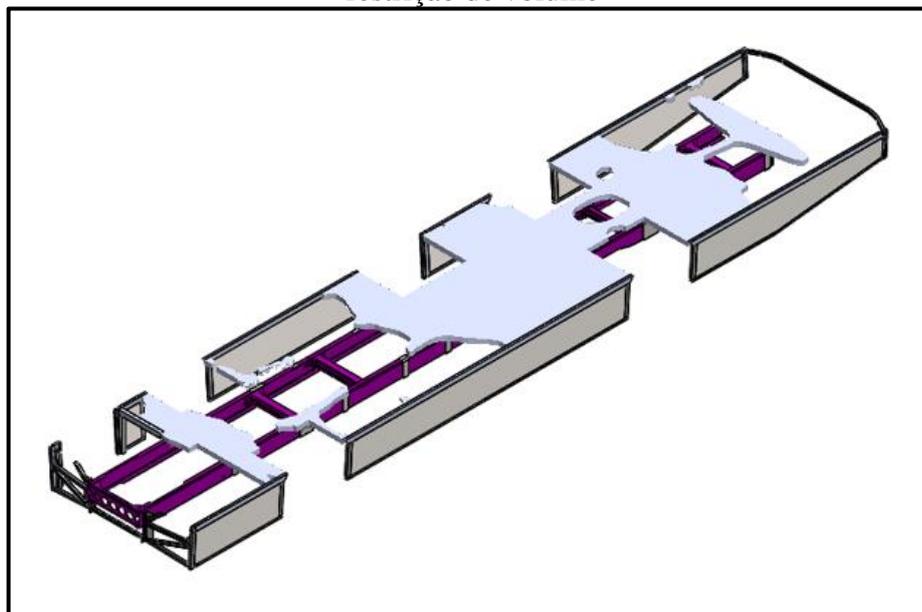


Fonte: O autor (2018).

#### 4.3.3 Carregamentos sobre as rodas dianteiras III

Sob condição de esforços nas rodas dianteiras, conforme apresenta a Figura 52, a otimização não produziu resultados que pudessem ser interpretados assertivamente para definição de novas áreas congeladas no modelo. Sendo assim, a condição referida foi excluída da comparação para primeiro remodelamento da base.

Figura 52 - Otimização da base pelas rodas dianteiras com 50% de restrição de volume

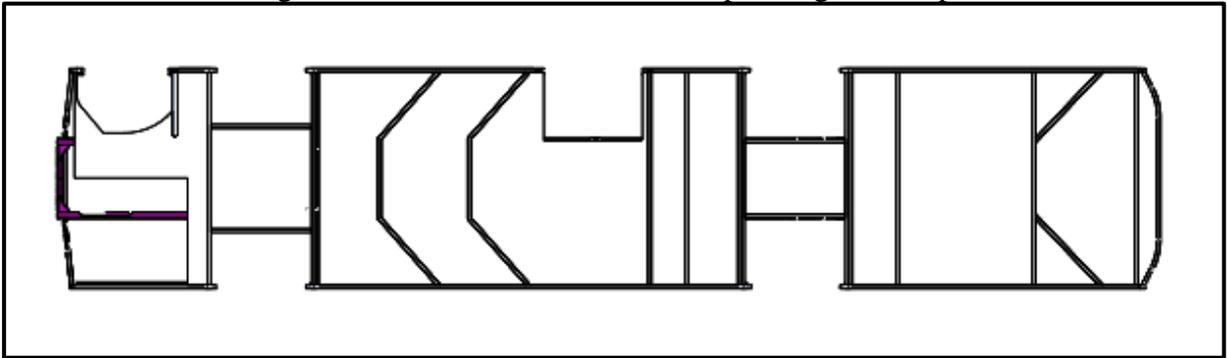


Fonte: O autor (2018).

#### 4.3.4 Remodelamento da estrutura da base

Devido às tendências observadas de conservação de material próximo as condições de contorno, buscou-se remodelar o subsistema base, adicionando barrotes em áreas em que se foi possível identificar topologias, conforme Figura 53. O intuito da segunda fase de remodelamento foi evoluir a estrutura de maneira a guiar o processo de otimização, buscando resultados mais coerentes de que os visualizados com a otimização “pura” da base, ou seja, sem nenhuma definição de áreas excluídas da análise do conjunto em específico.

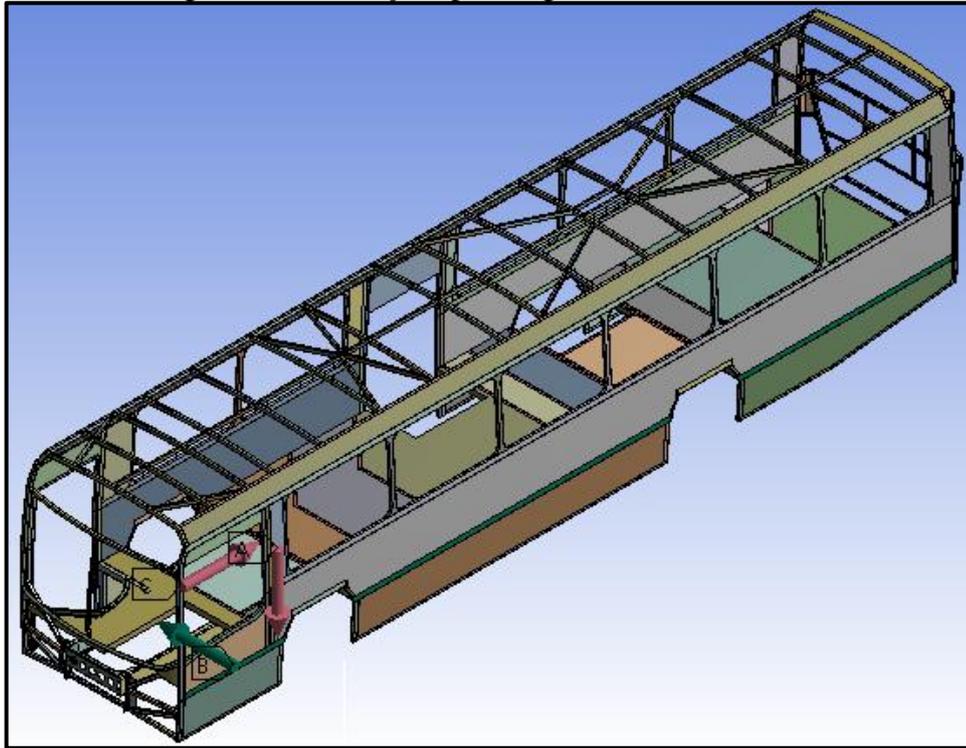
Figura 53 - Remodelamento da base para segunda etapa



Fonte: O autor (2018).

Tendo como base os resultados anteriores, também se identificou a necessidade da alteração dos pontos de fixação e carregamentos utilizados, tendo em vista a tendência do material de se posicionar apenas ao longo dos suportes. Assim, buscou-se simular os três tipos principais de acelerações que o veículo sofre em operação, referenciados à aceleração em curva, frenagem e devido ao peso próprio. Para isso foram adicionados carregamentos que refletissem tais esforços, inserindo-se forças sobre a parte superior de cada barrote e das longarinas laterais inferiores, por estarem ligadas diretamente a base, correlacionando com os carregamentos de peso próprio, sobre a parte frontal, representando a desaceleração, e também esforços laterais sobre as longarinas, simulando as acelerações em curva. Através da observação da tendência de conservação de material em áreas de fixação, essa condição de contorno também foi substituída, removendo o suporte das regiões das rodas para toda a área lateral do chassi, buscando trazer como resultado uma topologia mais dispersa e reveladora. A Figura 54 indica as direções dos esforços aplicados para a segunda etapa de análise sobre a base do veículo.

Figura 54 - Condições para segunda análise da base

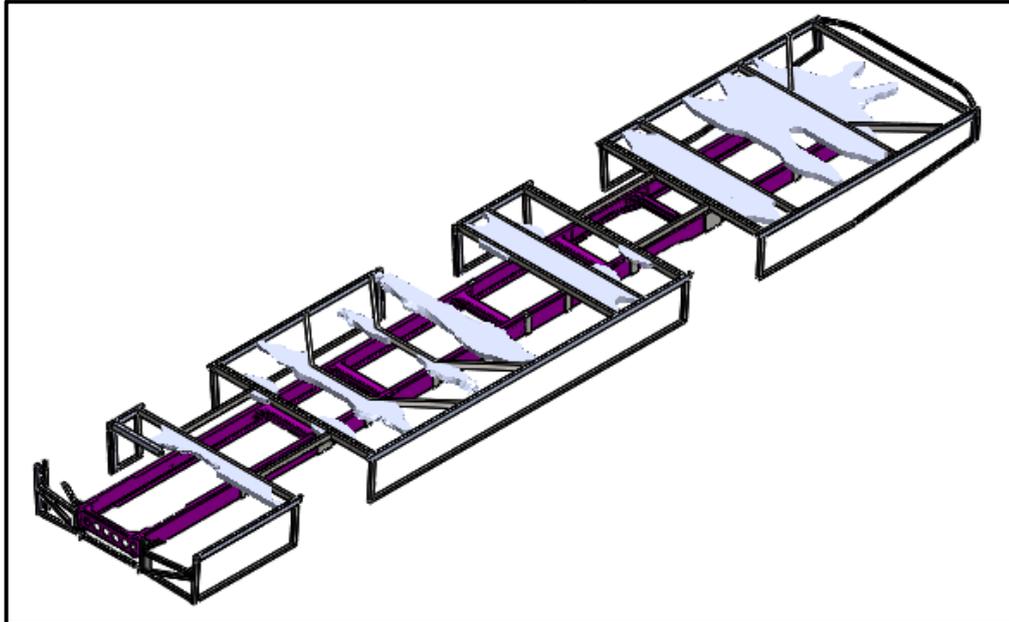


Fonte: O autor (2018).

#### 4.3.5 Segunda etapa de carregamentos sobre a base

A Figura 55 ilustra os resultados obtidos para a segunda etapa de otimização da base com 30% de restrição. Com base nas topologias obtidas nessa etapa é possível identificar mais claramente a conservação de material sobre as chapas de preparação sobre o chassi, bem como a sua tendência de formar ligações entre as duas longarinas laterais inferiores. Com relação ao posicionamento de material sobre os apoios no chassi observa-se a conservação de material sobre aqueles que não estavam em contato direto com as áreas congeladas, mostrando a relevância do posicionamento de barrotes sobre estes. Também, em comparação com os resultados atingidos durante as otimizações com torção sobre as diagonais, destacam-se alguns pontos específicos, como a topologia formada no entre eixo e no balanço traseiro após o término do chassi, áreas estas com menor retenção de material durante a etapa anterior.

Figura 55 - Segunda etapa de otimização sobre o subsistema base com 30% de restrição



Fonte: O autor (2018).

#### 4.3.6 Remodelamento da estrutura da base II

A partir dos resultados alcançados optou-se novamente pelo uso da superposição, compilando os resultados de todas as análises para modelamento da nova estrutura da base do casulo. Visando encontrar uma geometria coerente, foram posicionados barrotes sobre todos os apoios do chassi conforme observado nas respostas das otimizações. Com relação a região do entre eixo, como identificado com as soluções das condições de carregamentos de torção, foram mantidos tubos em diagonal nas regiões sobre as laterais do chassi até as longarinas inferiores. Analisando a região de porta para as respostas torcionais foi identificado um formato de distribuição de tubos de suporte partindo dos tubos diagonais logo antes do vão e seguindo em direção ao centro do veículo. No módulo de base logo após a porta percebe-se uma mudança no padrão de comportamento da estrutura, tendo sido definido devido aos contornos observados pelos resultados da otimização topológica. Para a região do balanço traseiro trabalhou-se usando o mesmo princípio, inserindo tubos de suporte ao longo das áreas limite de retenção de material. A Figura 56 indica as geometrias utilizadas de referência para a construção da estrutura da base.

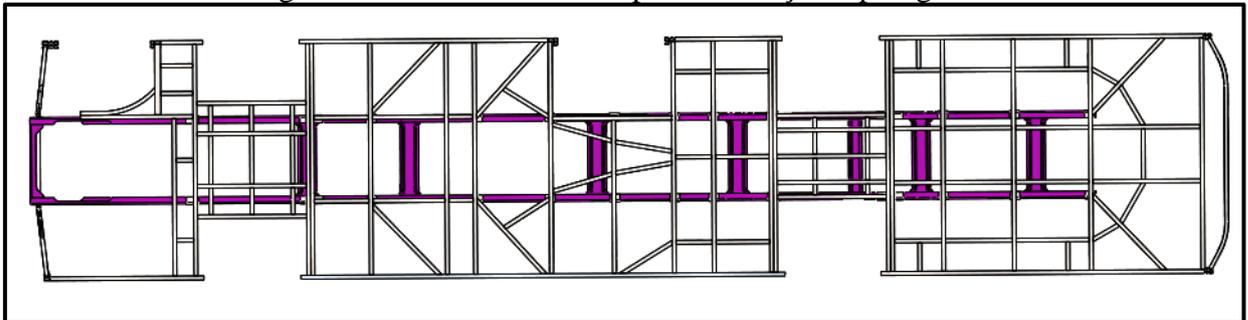
Figura 56 - Remodelamento final da estrutura da base



Fonte: O autor (2018).

A Figura 57 representa o modelamento final da base. Juntamente com a superposição dos resultados de cada carregamento, buscou-se fazer a simetria da estrutura com relação ao meio de veículo.

Figura 57 - Estrutura da base pós otimização topológica



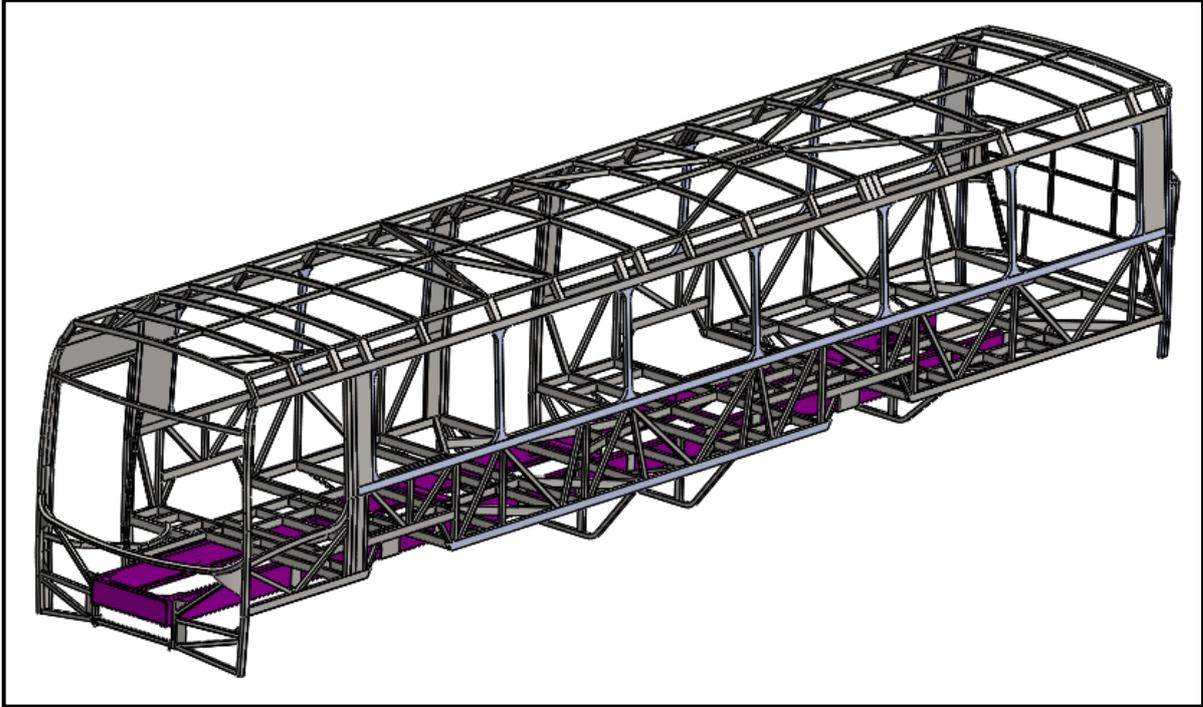
Fonte: O autor (2018).

#### 4.4 ANÁLISE FINAL

A Figura 58 ilustra a estrutura final desenvolvida após os processos de otimização. As regiões analisadas a partir do domínio inicial de projeto referem-se ao teto e a base do casulo do ônibus, sendo as laterais e a união do casulo com chassi tendo sido produzidas a partir de conceitos pré-definidos. Como resultado sobre a região do teto foram contabilizados 49 tubos distribuídos ao longo desse subsistema, e para a região da base identificam-se 103 tubos. A

massa final da estrutura da carroceria, levando em consideração teto, base, laterais, união casulo com chassi, frente e traseira, foi mensurada em 1726 kg.

Figura 58 - Modelamento final do casulo estrutural



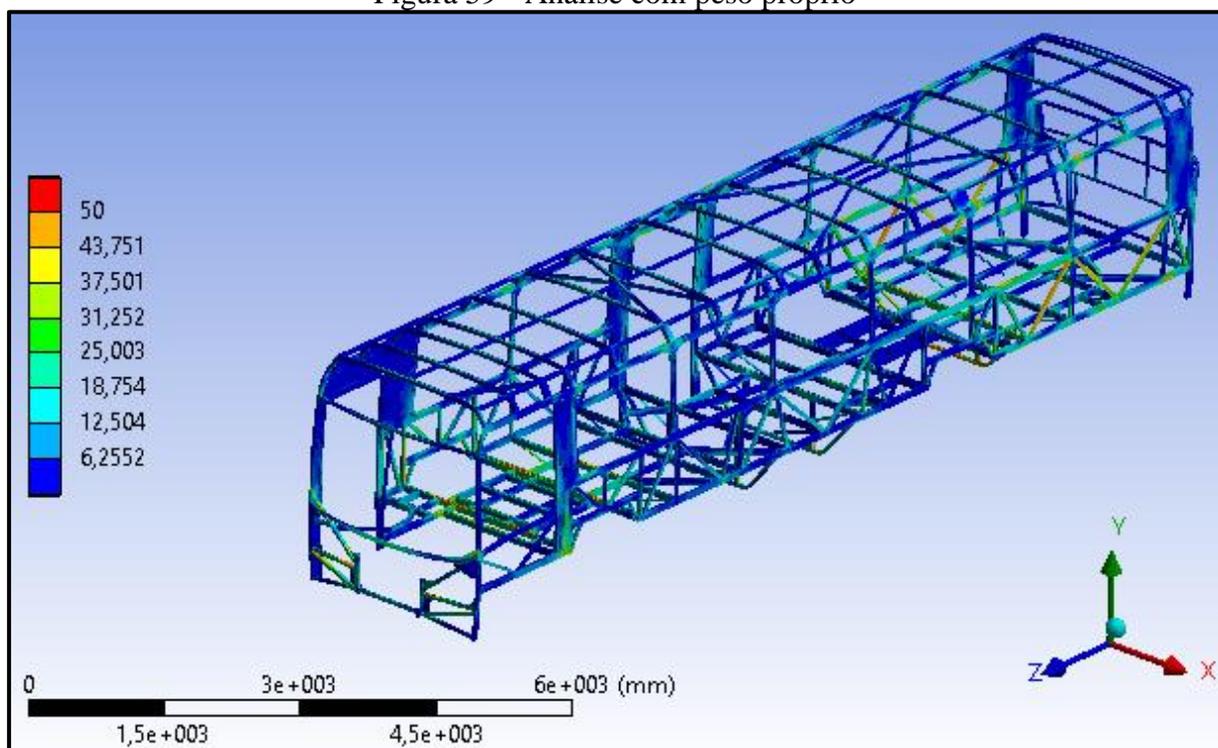
Fonte: O autor (2018).

Para validação final da estrutura utilizaram-se das análises de peso próprio, aceleração em curva e frenagem, conforme capítulo 3.2.2, definindo a intensidade das acelerações com base no peso bruto total aproximado do veículo em estado carregado. Considerando as estruturas produzidas pela otimização, onde definiu-se como material o aço ZAR 230, têm-se como limite de tensão o valor de 230 MPa, referente ao limite de escoamento do material.

#### 4.4.1 Peso Próprio

Para a análise de peso próprio utilizou-se como pontos de apoio as regiões do chassi em contato com eixos dianteiro e traseiro. Conforme ilustrado na Figura 59, o resultado em questão apresenta maiores concentrações de tensão no rodado dianteiro e logo após o rodado traseiro. Citando apenas as áreas otimizadas, verifica-se pouco esforço resultante sobre a estrutura do teto e maiores intensidades de carregamentos sobre a base. Afirma-se que em determinadas regiões da base, como próximo à porta entre eixo e na estrutura central sobre o eixo traseiro houveram valores mais baixos de esforços quando comparados às demais regiões.

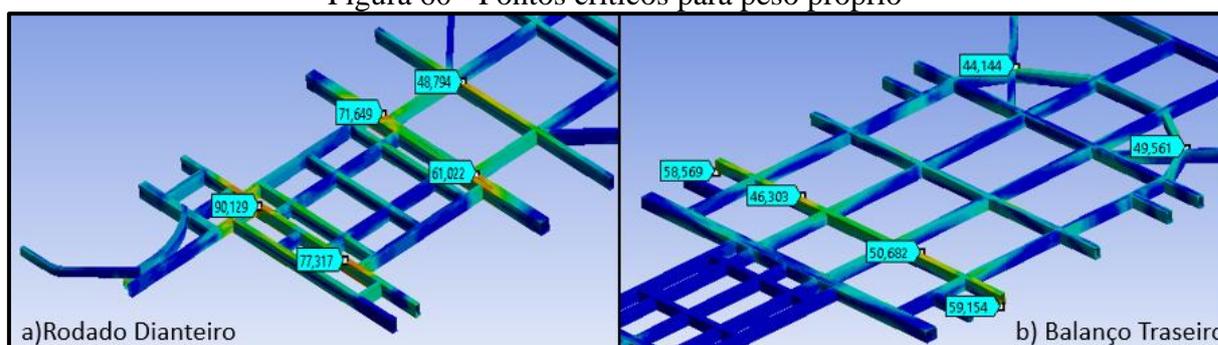
Figura 59 - Análise com peso próprio



Fonte: O autor (2018).

Os pontos críticos verificados são apresentados na Figura 60. Dentre esses pontos destacou-se como maior valor encontrado a tensão de 90 MPa, localizada à direita do primeiro barrote em frente ao eixo dianteiro. Tratando das demais áreas referentes ao eixo dianteiro, percebeu-se a tendência de maiores concentrações em ambos barrotes do rodado, frente e traseiro, provocadas no limiar da largura das longarinas do chassi. Com relação ao balanço traseiro, localizaram-se as maiores tensões no segundo barrote após o rodado, tendo valores máximos de 59 MPa nas regiões de contato com as longarinas laterais. Outros valores críticos encontrados sobre referem-se as conexões dos tubos angulados que ligam o final do chassi à traseira da carroceria.

Figura 60 - Pontos críticos para peso próprio

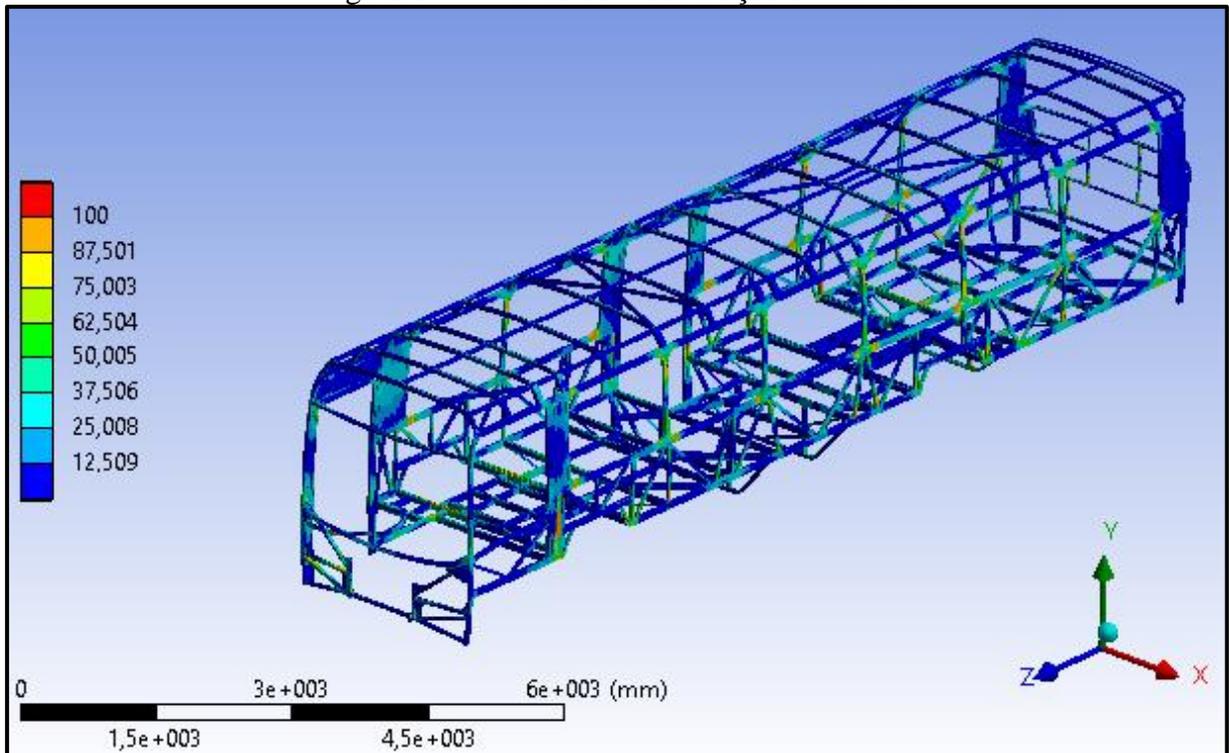


Fonte: O autor (2018).

#### 4.4.2 Aceleração em Curva

Para a análise de aceleração em curva, mantendo-se as mesmas condições da análise de peso próprio e adicionando uma aceleração lateral, proveniente do centro para a direita do ônibus, obtiveram-se os resultados conforme Figura 61. A partir desses resultados observou-se um comportamento similar ao identificado em peso próprio próximo ao rodado dianteiro, trazendo maiores tensões nos barrotes na frente e na traseira do eixo. Para este caso de análise os maiores valores foram encontrados nos tubos da base à direita da estrutura próximos da longitudinal do chassi. Com relação ao teto não foram identificados pontos críticos para essa condição.

Figura 61 – Análise com aceleração em curva

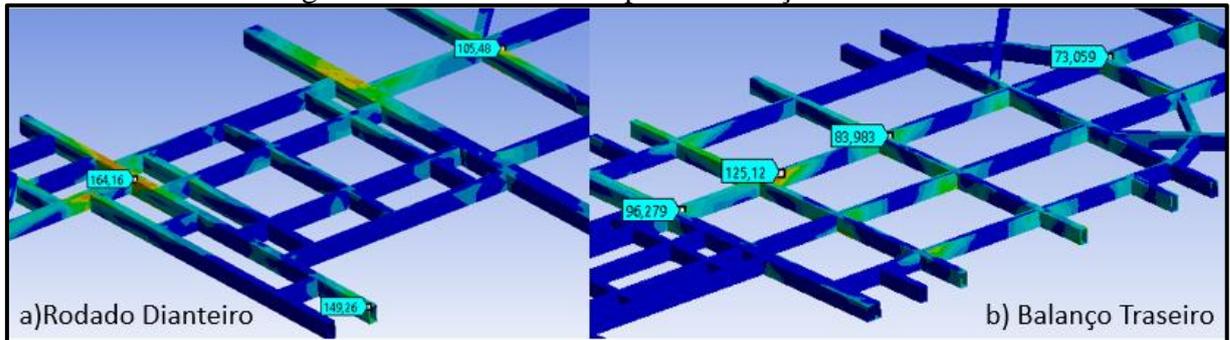


Fonte: O autor (2018).

A Figura 62 apresenta os maiores esforços observados, sendo o maior deles localizado na mesma posição identificada na análise de peso próprio e equivalente à 164 MPa. A adição da aceleração lateral sobre o modelo resultou em um pequeno deslocamento dos picos de tensão sobre o balanço traseiro, aumentando os valores resultantes sobre os tubos de ligação entre barrotes no lado direito da base. O valor máximo encontrado para a região traseira foi de 125 MPa, posicionado no tubo direito mais próximo ao chassi no segundo módulo de base traseira.

Os picos subsequentes encontraram-se em posições similares no primeiro e terceiro módulo. Na região após o término do chassi, diferentemente do resultado da análise anterior, o ponto de maior tensão foi identificado sobre o tubo longitudinal, no local onde é conectado com seu tubo correspondente ao lado esquerdo do ônibus.

Figura 62 - Pontos críticos para aceleração em curva

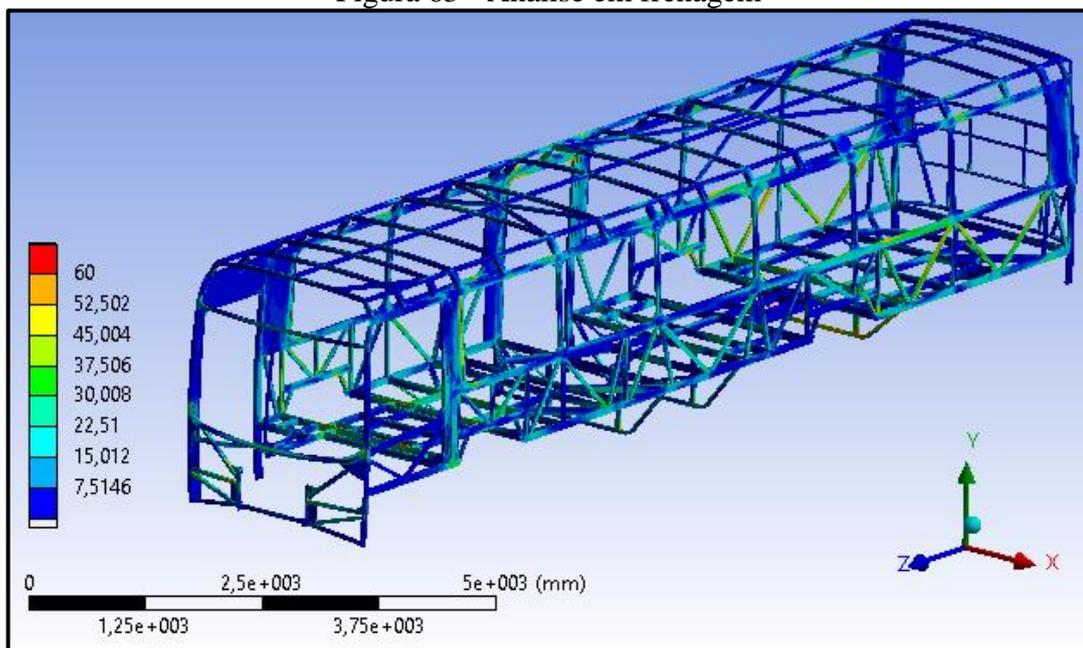


Fonte: O autor (2018).

#### 4.4.3 Frenagem

Para a análise de frenagem, foram mantidas as condições aplicadas na análise de peso próprio com a adição de uma aceleração aplicada na direção  $-z$  sobre a carroceria, os resultados são ilustrados na Figura 63.

Figura 63 - Análise em frenagem

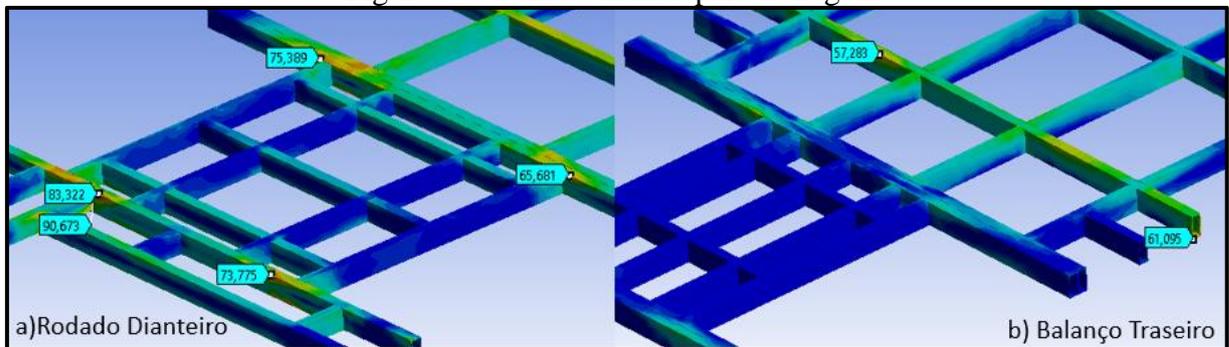


Fonte: O autor (2018).

As respostas encontradas em frenagem foram semelhantes à peso próprio, tendo como diferenças mais relevantes uma maior distribuição de tensões sobre os tubos responsáveis por unir os barrotes da base. Assim como nas demais análises o teto da estrutura manteve-se com baixa concentração de esforços.

Dentre os pontos críticos define-se o lado direito do barrote em frente ao eixo dianteiro, com uma tensão máxima de 90MPa. Para a estrutura traseira da base, a região com maiores tensões foi identificada como o segundo barrote após o eixo traseiro, com resultantes mais relevantes na ligação com as longarinas das laterais, de 61 MPa, e no limiar das longarinas do chassi, de 57 MPa.

Figura 64 - Pontos críticos para frenagem



Fonte: O autor (2018).

Foram observadas diversas similaridades entre os resultados provenientes das três análises, indicando como pontos críticos principais os barrotes de base do rodado dianteiro e o segundo barrote após o rodado traseiro. Através da comparação desses resultados com as respostas provenientes das otimizações sobre a estrutura da base é esperado que as partes críticas observadas no modelo sejam coerentes com a realidade, tendo em vista sua proximidade com as condições de suportes. Com relação a esses pontos julga-se necessário a aplicação de otimizações pontuais apenas sobre as áreas de interesse buscando identificar topologias mais adequadas para a aplicação, áreas estas devem ser delimitadas aos pontos de tensão máxima e arredores, para evitar influência na remoção de material devido a zonas adjacentes com baixas tensões resultantes. Avaliando a estrutura do teto, foram obtidas baixas solicitações resultantes pelas análises de acelerações, não gerando pontos críticos perante as mesmas.

## 5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho foram desenvolvidas análises virtuais sobre o domínio de uma estrutura de ônibus. O intuito foi encontrar um método que permitisse a definição do casulo estrutural e de suas variações, buscando uma distribuição ótima de tubos ao longo da carroceria desde a concepção do projeto. Para isso, utilizou-se uma ferramenta de otimização topológica para encontrar uma geometria adequada. Foram impostas diferentes condições e carregamentos, sobre as quais o veículo pode vir a ser submetido durante sua vida útil, garantindo que a estrutura otimizada atenda as diferentes solicitações.

Durante a execução do trabalho foi possível perceber uma necessidade de mapeamento de carregamentos iniciais mais rígida, bem como a aplicação de mais condições de otimização. O uso de esforços mais generalizados pode levar a resultados não desejados, impossibilitando a aplicação do método sobre o casulo estrutural como um todo, e como solução a tal empecilho, mostrou-se útil a divisão e desenvolvimento das estruturas por subsistemas.

Surge à tona como tópico importante a dificuldade em se trabalhar com o algoritmo otimizador ao utilizar-se de um domínio regido por múltiplas condições de carregamentos. Tratando-se dessa questão é possível afirmar que o desenvolvimento de análises topológicas separadas para cada configuração de esforços, e a utilização do método de superposição para a geração da estrutura, pode acarretar em superdimensionamento. Assim observa-se a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o tema em específico.

Ao comparar as estruturas resultantes do método de otimização com um casulo de ônibus padrão é possível encontrar diferenças. No teto, tais diferenças referem-se as estruturas em “X” produzidas ao longo do veículo, e com relação a base referem-se principalmente a distribuição de tubos angulados no entre eixo e com a formato e posicionamento de tubos após o término do chassi.

A partir dos resultados pode-se dizer que o objetivo desse trabalho foi alcançado, mostrando ser possível o desenvolvimento da estrutura de teto e base do ônibus a partir da aplicação de otimização topológica, porém levantando como questionamento o aprimoramento do método de múltiplas condições buscando evitar estruturas superdimensionadas.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pela necessidade observada durante a execução desse trabalho de estudos mais aprofundados com relação a análises de otimização com múltiplas condições de carregamentos, sugere-se o desenvolvimento de trabalhos conforme a seguinte ordem:

- a) Aplicação do método evolucionário para otimização de um subsistema do casulo considerando apenas uma condição de carregamento, mantendo o restante da estrutura fixada;
- b) Utilizar mescla dos métodos de sobreposição e evolucionário sobre o subsistema da base, realizando pequenas reduções de volume e trocando os carregamentos e condições de contorno em cada iteração, identificando a porcentagem de máxima de retirada de material para tornar o método viável;
- c) Analisar o comportamento da estrutura sobre método mesclado a partir da troca da ordem de aplicação dos carregamentos no processo iterativo, identificando a fração de redução de volume máxima para obtenção de estrutura similares;
- d) Aplicação do método mesclado utilizando parâmetros máximos de remoção de material por iteração encontrados no item c para otimização da base, por ser o subsistema mais próximo às condições de contorno;
- e) Aplicação de ferramentas de otimização dimensional em conjunto com o método de otimização por múltiplos carregamentos.

Considerando os resultados obtidos a partir das análises desenvolvidas sugere-se um mapeamento maior de carregamentos iniciais, considerando não apenas os esforços resultantes sobre as rodas do ônibus, mas também esforço atuante de passageiros, bagagens e mecanismos acoplados sobre o casulo estrutural. Ainda com relação aos carregamentos, destaca-se a importância em aplicar proporções entre carregamentos adequadas para possibilitar revelar uma estrutura coerente. Também se sugere a divisão da otimização da carroceria por subsistema, diferenciado as quantidades de retenção de material buscando estruturas mais robustas em áreas com maior solicitação e evitando superdimensionamento em áreas com baixa tensão resultante.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AKIYAMA, Milton Koiti. **Suspensões de Veículos** – Um Estudo de Caso. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.
- ALMEIDA, Valério Silva; SIMONETTI, Hélio Luiz; NEVES, Francisco Assis das. Seleção de topologias ótimas de estruturas elásticas 2D com restrição de tensão. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño em Ingeniería**. Vol 30, p. 69-79, 2014.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE**. 8 ed. São Paulo: Editora Erica Ltda, 2003.
- ARORA, Jasbir S. **Intruduction to optimum design**. 3 ed. London: Elsevier Academic Press, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Transporte: Acessibilidade em veículos de características urbanas para o transporte coletivo de passageiros**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AZEVEDO, Álvaro F.M. **Método dos elementos finitos**, <http://www.fe.up.pt/~alvaro>, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, abr, 2003.
- BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite element procedures**. London: Prentice Hall, 1996.
- BELYTSCHKO, Ted; LIU, Wing Kam; MORAN, Brian. **Nonlinear Finite Elements for Continua Structures**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- BENDSOE, Martin P.; SIGMUND, Ole. **Topology Optimization: Theory, methods and applications**. Berlin: Springer-Verlang, 2003.
- BUJNY, M. *et al.* **Evolutionary Crashworthiness Topology Optimization of Thin-Walled Structures**. 11th ASMO UK / ISSMO / NOED: International Conference on Numerical Optimization Methods for Engineering Design, Munich, 2016.
- CASTRO, Márcio Schneider. **Uma metodologia para melhoria da rigidez torcional de componentes estruturais automotivos**. 2008. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- CIAPPARINI, Joel Vicenti. **Avaliação de fadiga de uma carroceria de ônibus submetida a diferentes perfis de pista**. 2012. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- 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.

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

GOEDEL, Fábio. **Aspectos relacionados com o impacto semi-frontal em um ônibus rodoviário**. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

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

HEARN, Edwin John. **Mechanics of Materials 2: An introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials**. 3 ed. Johannesburg: Elsevier, 1997.

JUNIOR, Agenor Dias de Meira; WALBER, Marcio; ITURRIOZ, Ignacio. Avaliação de diferentes metodologias de análise de estruturas de vigas submetidas a impacto contra um obstáculo rígido. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional**, Santa Fe, v. 25, p. 667-685, nov. 2006.

MAIA, João Paulo Ribeiro. **Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta solver**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MISZENDEHDEL, Amir M.; SURESH, Krishnan. A pareto-optimal approach to multi-material topology optimization. **Journal of Mechanical Design**, Vol. 137, n. 10, ago. 2015

MORSCH, Inácio Benvegnú. **Análise estrutural de veículos comerciais tipo ônibus**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ÔNIBUS BRASIL. **Auto viação mercês**. Disponível em <<https://onibusbrasil.com/cleber123/5971521>>. 2018. Acesso em 4 de junho de 2017.

PAVAN, Leandro. **Otimização do comportamento dinâmico lateral e vertical de um ônibus modelado como sistema multicorpo**. 2015. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PERINI, Gustavo. **Estudo de caso: aplicação de otimização topológica no desenvolvimento de um protótipo de cubo de roda**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

SILVA, Cláudio Alessandro de Carvalho. **Otimização estrutural e análise de sensibilidade orientadas por objetos**. 1997. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Projeto Mecânico, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

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.

SCANIA. **Manual do Encarroçador.** Edição 2013.4 pt-BR, 2013.

SHIGLEY, Joseph E.; BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, Keith J. **Elementos de máquina de Shigley:** Projeto de engenharia mecânica. Tradução de João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 8 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

SORDI, Alexsandro. **Análise da união estrutural de um ônibus em condição de tombamento utilizando MEF.** 2016. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul (UCS), Caxias do Sul, 2016.

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

TECH, Tomás Wayhs. **Proposta de metodologia para otimização estrutural de um ônibus em condições de tombamento.** 2009. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VARGAS, Denis 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**, v. 33, n.3-4, p. 91-99, dez. 2016.

WALBER, Márcio. **Avaliação dos níveis de vibração existentes em passageiros de ônibus rodoviários intermunicipais, análise e modificação projetual.** 2009. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

WANG, Michael Yu; WANG, Xiaoming; GUO, Dongming. A level set method for structural topology optimization. **Computer methods in applied mechanics and engineering.** Vol. 192, n. 1-2, p 227-246, jan. 2003.

YAN, Kun; CHENG, Gengdong. **A hybrid approach to structural topology optimization of vehicle for crashworthiness.** 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Orlando, 2013.