



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



Clezidan Núcio Pereira

**ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS
FINITOS DE UM CHASSI VEICULAR TIPO SPACEFRAME**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2016

CLEZIDAN NÚCIO PEREIRA

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS
FINITOS DE UM CHASSI VEICULAR TIPO SPACEFRAME

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa

Coorientador:

Prof. Dr. José dos Reis Vieira de Moura Júnior

CATALÃO – GO

2016

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

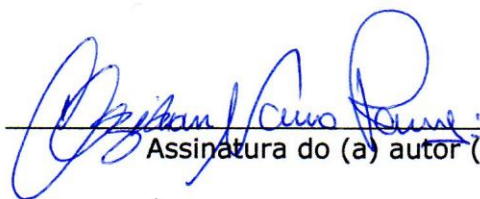
Nome completo do autor: Clezidan Núcio Pereira

Título do trabalho: **ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI VEICULAR TIPO *SPACEFRAME***

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ **SIM** ☐ **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor (a) ²

Data: 06 / 02 / 2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

²A assinatura deve ser escaneada.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Núcio Pereira, Clezidan

Análise Estrutural Estática por Elementos Finitos de um Chassi
Veicular Tipo Spaceframe [manuscrito] / Clezidan Núcio Pereira. -
2016.

92 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa; co-orientador Dr.
José dos Reis Vieira deMoura Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2016.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. Estruturas veiculares. 2. Chassi tubular. 3. Spaceframe. 4.
Elementos finitos. 5. Simulação estática estrutural. I. Henrique Stoppa,
Marcelo, orient. II. Título.

CDU 621.03

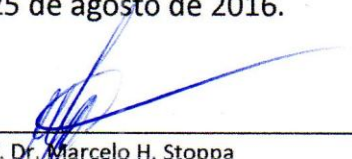


Defesa Nº _____

Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

Aos 25 dias do mês de agosto do ano de 2016, às 14h:00 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores Dr.(a) Marcelo H. Stoppa (presidente e orientador), Dr. José Waldo Martinez Espinosa, e Dr. Donald Mark Santee para, em sessão pública realizada na sala de reuniões do Centro Integrado de Pesquisa, da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado "Análise Estrutural Estática por Elementos Finitos de um Chassi Veicular Tipo Spaceframe", em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de Clezidan Núcio Pereira, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (X) **Aprovado** (unanimidade) ou () **Reprovado** (por maioria simples). Cumpridas as formalidades de pauta, às 15 h: 15 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Marcelo H. Stoppa, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 25 de agosto de 2016.



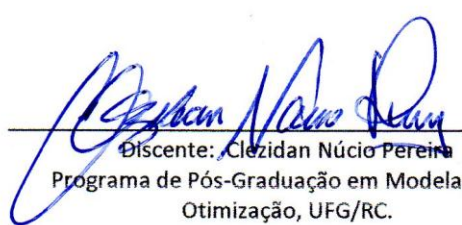
Prof. Dr. Marcelo H. Stoppa
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.
(Presidente da Banca)



Prof. Dr. José Waldo Martinez Espinosa
FENG - Universidade Federal de Goiás – RC



Prof. Dr. Donald Mark Santee
IMTec - Universidade Federal de Goiás – RC



Discente: Clezidan Núcio Pereira
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.

Agradecimentos

- *Agradeço* a Deus pois sem ele eu não teria forças para essa longa jornada, *agradeço* aos meus professores, meus colegas, que me ajudaram na conclusão da dissertação

Frases de dedicatória para professores

- Ao Professor Dr. Marcelo Henrique Stoppa, pela paciência e pelo conhecimento na orientação, que incentivaram e tornaram possível a conclusão desta monografia.
- Ao professor Dr. Marcos Napoleão Rabelo, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade.
- Ao Professor Dr. Donald Mark Santee, com quem partilhei o que era o broto daquilo que veio a ser este trabalho. Nossas conversas durante e para além dos grupos de estudos foram fundamentais. Desejei a sua participação na banca examinadora deste trabalho desde o princípio.
- Ao Professor Dr. José Reis, pela humildade e pelo farto conhecimento, o qual me ajudou bastante.
- A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia.

Outras frases dedicatórias

- Aos meus filios Ana Júlia e Vítor Núcio, com muito amor e carinho, dedico esse trabalho, pois não esconderam a satisfação dessa conquista e nem mediram esforços com incentivos para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.
- Aos meus irmãos, Alcindo Henrique e Cleider Marcos, pelo apoio nessa fase que estou passando.

- Ao meu amigo Delmivam, sua ajuda foi fundamental para que eu pudesse apresentar o veículo completo.
- À minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação, foi que deram em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, mesmo não estando aqui, entre nós, significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada, obrigado por acreditar em mim,
- À Carol, pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pelo carinho, apoio, paciência e pela sua capacidade de me trazer paz na correria do dia a dia.
- Aos meus tios, José da Cruz e Luciene, pelo exemplo de convivência.
- À minha avó Teolinda Pereira, exemplo de pessoa, meiga, carinhosa. Ao meu grande amigo e avô Sandoval Pereira da Silva, pelos conselhos, pelas histórias, pelo exemplo, e pela força que tem me dado.
- A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

RESUMO

NÚCIO PEREIRA, C. *ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI VEICULAR TIPO SPACEFRAME*. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Tido como o principal subsistema de um veículo, os chassis são o elo entre os demais subsistemas e ainda devem suportar diversos carregamentos estáticos e dinâmicos com rigidez, confiabilidade e segurança. Nesta linha, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento e análise de uma estrutura veicular tridimensional do tipo *spaceframe*, na qual, devido a complexidade da estrutura, foram utilizados ferramentais computacionais no intuito de simular estaticamente o comportamento da estrutura tubular, com o objetivo principal de certificar a confiabilidade do projeto desenvolvido, garantindo a segurança aos condutores. A estrutura, já existente, foi então modelada em CAD, através do software *SOLIDWORKS*, e suas simulações foram realizadas através do método de elementos finitos via o software comercial *ANSYS*[®]. A metodologia de simulação contou com a definição precisa dos carregamentos e restrições de deslocamento impostas ao modelo, a fim de tornar o modelo o mais verossímil possível. Foram então realizadas análises computacionais de capotamento e impacto frontal no modelo (80 *km/h* e 60 *km/h*). Através das simulações realizadas, foi possível analisar que os deslocamentos oriundos das situações críticas, na qual o veículo foi submetido, estão condizentes com o que se recomenda por normas regulamentadoras e bibliografias pertinentes, com isso, tendo em vista que o chassi desenvolvido empiricamente e simulado computacionalmente revelou resultados satisfatórios quanto sua confiabilidade e segurança, não são necessárias incremento de barras ou modificação da geometria do sistema.

Palavras-chaves: Estruturas veiculares, Chassi tubular, Spaceframe, Elementos finitos, Simulação estática estrutural.

ABSTRACT

NÚCIO PEREIRA, C. *ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI VEICULAR TIPO SPACEFRAME*. 2016. 96 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Regarded as the main subsystem of a vehicle, the chassis are the link between the other subsystems and must also support multiple static and dynamic loads with stiffness, reliability and security. In this line, this paper presents the development and analysis of a vehicle three-dimensional structure spaceframe type, due to the complexity of the structure were used computational tooling in order to simulate the behavior of statically tubular structure, with the main objective to certify the reliability of the developed project, ensuring safety to drivers. The structure, existing, was modeled in CAD through SOLIDWORKS software, and their simulations were performed using the finite element method via commercial software ANSYS®. The simulation methodology had the precise definition of loads and displacement constraints to the model in order to make the most plausible model possible. Were then performed computational analysis of rollover and frontal impact in the model (80 *km/h* e 60 *km/h*). Through the simulations, it was possible analyze the displacements arising from the critical situations in which the vehicle was submitted are consistent with what is recommended by regulating rules and bibliographies, with this in view that the chassis developed empirically and computationally simulated showed satisfactory results as its reliability and safety, are not required increment bars or modifying the system geometry.

Keywords: Vehicle structures, Tubular chassis, Spaceframe, Finite elements, Structural static simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tubo de aço redondo.	31
Figura 2.2 – Tubo de aço quadrado.	32
Figura 2.3 – Tubo de aço retangular.	32
Figura 3.1 – Chassi monobloco.	37
Figura 3.2 – Chassi escada.	37
Figura 3.3 – Chassi tubular – <i>spaceframe</i>	38
Figura 4.1 – Acidente com Alonso – GP Austrália 2016.	40
Figura 4.2 – Translação vertical do conjunto de suspensão dianteiro.	40
Figura 4.3 – Translação vertical da roda dianteira direita.	41
Figura 4.4 – Perfis "I" e "C".	41
Figura 4.5 – Análise estrutural de um chassi do tipo escada.	43
Figura 4.6 – Análise dinâmica de um chassi do tipo escada.	44
Figura 5.1 – Chassi simulado através de elementos finitos.	46
Figura 5.2 – Aplicação da malha à uma estrutura veicular.	46
Figura 5.3 – Geometria, elementos e pontos nodais	47
Figura 5.4 – Diferentes tipos de elementos para MEF.	47
Figura 5.5 – Cúpula treliçada.	48
Figura 5.6 – Chassi treliçado tridimensional.	49
Figura 5.7 – Análise de tensões (MEF) e análise de fluidos (CFX) realizadas no <i>software</i> <i>SOLIDWORKS</i>	51
Figura 5.8 – Fluxograma de desenvolvimento de protótipos.	53
Figura 5.9 – Transmissão automotiva modelada em CAD com alto nível de detalhamento.	54
Figura 5.10 – Discretização de um conjunto parafuso/porca.	55
Figura 5.11 – Análise estrutural de uma biela.	55
Figura 6.1 – Veículo experimental montado, com carenagem de fibra de vidro.	57
Figura 6.2 – Veículo experimental parcialmente desmontado, mostrando o chassi <i>spaceframe</i>	58
Figura 6.3 – Detalhe do chassi e suspensão do veículo experimental.	58
Figura 6.4 – Inclinação da barra lateral.	59

Figura 6.5 – Inclinação da barra que faz ligação entre o arco principal e o arco secundário.	59
Figura 6.6 – Réguas utilizadas nas medidas.	60
Figura 6.7 – Goniômetro sobre o para-choque traseiro.	60
Figura 6.8 – Medindo a lateral do veículo.	61
Figura 6.9 – Medição no teto do veículo.	61
Figura 6.10 – Chassi definitivo em modelo 3D obtido através do programa <i>SOLIDWORKS</i> 2015.	62
Figura 6.11 – Chassi definitivo em modelo 3D obtido através do programa <i>ANSYS</i> , mostrando todas bocas de emenda.	62
Figura 6.12 – Chassi definitivo em modelo 3D obtido através do programa <i>ANSYS</i> , mostrando todas malhas para análise.	63
Figura 6.13 – Elemento quadrático tetraédrico 3D de 10 nós.	63
Figura 6.14 – Pontos de travamento dianteiro.	64
Figura 6.15 – Pontos de travamento traseiro.	64
Figura 6.16 – Chassi com malha.	65
Figura 6.17 – Aplicação de forças no sentido x .	67
Figura 6.18 – Aplicação de forças no sentido y .	67
Figura 6.19 – Aplicação de forças no sentido z .	68
Figura 6.20 – Superfícies que sofrem os primeiros impactos frontais.	69
Figura 6.21 – Deformações oriundas dos impactos frontais.	69
Figura 6.22 – Deformações na direção do eixo x .	70
Figura 6.23 – Deformações específicas para o eixo y .	70
Figura 6.24 – Deformações específicas para o eixo z .	71
Figura 6.25 – Tensão Von Mises.	72
Figura 6.26 – Aplicação do carregamento referente ao impacto frontal à 60 km/h .	73
Figura 6.27 – Deformações totais à 60 km/h .	73
Figura 6.28 – Deformações no eixo x à 60 km/h .	74
Figura 6.29 – Deformações no eixo y à 60 km/h .	74
Figura 6.30 – Deformações no eixo z à 60 km/h .	75
Figura 6.31 – Tensão de Von Mises à 60 km/h .	75
Figura B.1 – Força lateral na direção x , Deslocamento total.	83
Figura B.2 – Força lateral na direção x , Deslocamento na direção x .	84
Figura B.3 – Força lateral na direção x , Deslocamento na direção y .	84
Figura B.4 – Força lateral na direção x , Deslocamento na direção z .	85
Figura B.5 – Força lateral na direção x , Tensão equivalente de Von Mises.	85
Figura B.6 – Força lateral na direção x , Fator de segurança.	86
Figura B.7 – Força lateral na direção x , Deformação equivalente.	86
Figura B.8 – Força vertical na direção y , Deslocamento total.	87
Figura B.9 – Força vertical na direção y , Deslocamento na direção x .	87

Figura B.10 –Força vertical na direção y , Deslocamento na direção y	88
Figura B.11 –Força vertical na direção y , Deslocamento na direção z	88
Figura B.12 –Força vertical na direção y , Tensão equivalente de Von Mises.	89
Figura B.13 –Força vertical na direção y , Fator de segurança.	89
Figura B.14 –Força vertical na direção y , Deformação equivalente.	90
Figura B.15 –Força frontal na direção z , Deslocamento total.	90
Figura B.16 –Força vertical na direção z , Deslocamento na direção x	91
Figura B.17 –Força vertical na direção z , Deslocamento na direção y	91
Figura B.18 –Força vertical na direção z , Deslocamento na direção z	92
Figura B.19 –Força frontal na direção z , Tensão equivalente de Von Mises.	92
Figura B.20 –Força frontal na direção z , Fator de segurança.	93
Figura B.21 –Força frontal na direção z , Deformação equivalente.	93
Figura B.22 –Aplicação de forças.	94
Figura B.23 –Força frontal na direção x , Deformação equivalente.	94
Figura B.24 –Força frontal na direção x , Fator de segurança.	95
Figura B.25 –Força frontal na direção x , Deformação equivalente.	95
Figura B.26 –Força frontal na direção x , Fator de segurança.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Classificação de Veículos.	24
Tabela 6.1 – Tabela de convergência da malha.	66
Tabela 6.2 – Resultados obtidos na simulação dos eixos x , y e z , para o arco principal.	68
Tabela 6.3 – Resultados compilados para a colisão frontal.	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação e Contextualização	23
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivos gerais	25
1.2.2	Objetivos específicos	26
1.3	Metodologia	26
2	MATERIAIS UTILIZADOS EM CHASSIS TIPO <i>SPACEFRAME</i>	29
2.1	Caracterização de Tubos de Aço	29
2.1.1	Bobina laminada a frio (BF)	29
2.1.2	Bobina laminada a quente (BQ)	30
2.1.3	Bobina aço zincado por imersão a quente (BZ)	30
2.2	Aferição da Qualidade em Tubos de Aço	30
2.3	Informações Técnicas	31
2.3.1	Cálculo do peso teórico de um tubo redondo de aço carbono	31
2.3.2	Cálculo do peso teórico de um tubo quadrado de aço carbono	31
2.3.3	Cálculo do peso teórico de um tubo retangular de aço carbono	32
2.4	Especificação dos Tubos de Aço Costurados	33
3	COMPONENTES ESTRUTURAIS VEICULARES (CHASSIS)	35
3.1	Chassi Monobloco	36
3.2	Chassi Escada	37
3.3	Chassi Tubular (<i>spaceframe</i>)	38
4	DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURAS AUTOMOTIVAS	39
4.1	Rigidez Flexional	40
4.2	Rigidez Torsional	41
4.3	Peso	41
4.4	Análises Estruturais	42
4.4.1	Análise estática	42
4.4.2	Análise dinâmica	43
4.4.3	Análise modal	43
4.4.4	Análise harmônica	44
4.4.5	Análise transiente	44
5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E CAD	45

5.1	Malha e Refinamento	46
5.2	Análise Teórica de Treliças Espaciais	48
5.3	Desenho Assistido por Computador	50
5.4	MEF no ANSYS®	52
5.5	Modelagem CAD	53
5.6	Simulação Via MEF	54
5.7	Análise Estrutural	55
6	ANÁLISE E RESULTADOS	57
6.1	Elemento Utilizado e Convergência de Malha	63
6.2	Condições de Contorno e Carregamento	64
6.3	Resultados e Discussões	66
6.3.1	Simulações Numéricas	66
6.3.2	Análise de capotamento – arco principal	67
6.3.3	Análise de impacto frontal (80 km/h)	69
6.3.4	Análise de impacto frontal (60 km/h)	72
7	CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	77
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A VALORES ENCONTRADOS NO CAD SOLIDWORKS	81
	APÊNDICE B IMAGENS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO PROGRAMA ANSYS	83

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Neste trabalho objetiva-se analisar uma estrutura tubular confeccionada com tubos de aço, utilizada para dar sustentação aos demais componentes de um veículo automotor construído experimentalmente.

1.1 Motivação e Contextualização

A necessidade de se locomover, transportar pessoas, produtos, objetos enfim, é uma necessidade encontrada desde os primórdios da espécie humana que se deslocavam de um lado para outro e levavam consigo seus pertences. Essa realidade, nos dias atuais, não é tão diferente, a diferença é que tempos atrás a dificuldade de locomoção era muito grande, sem contar ainda que não possuíam ferramentas e equipamentos hoje existentes. Por isso os meios de transportes eram muito frágeis e chegavam a demorar cerca de 3 a 4 dias para percorrerem uma distância, hoje percorrida em poucas horas. Essa necessidade fez com que, com o passar do tempo, os seres humanos se preocupassem cada vez mais com os meios de transportes e a importância que estes possuíam para eles. Assim, foram realizadas melhorias, facilitadas principalmente devido às transformações oriundas da modernização (FILHO, 2004).

Dentre os meios de transporte, o terrestre possui o maior número de veículos em sua frota. O veículo automotor teve início de sua evolução, no ano de 1769, com a criação do motor a vapor, capazes de transportar humanos, desde então, veículos automotores vêm sendo desenvolvidos para os mais devidos fins, podendo ser classificados em três grupos, quanto à espécie, à tração e à categoria, sendo cada grupo subdividido de acordo com a Tabela 1.1 (STONE; BALL, 2004).

Tabela 1.1 – Classificação de Veículos.

Tração	Espécie	Categoria
automotor	de passageiros	oficial
elétrico	de carga	de aluguel
de propulsão humana	misto	particular
de tração animal	de competição	de aprendizagem
reboque	de tração	de representação diplomática, junto ao governo
semi reboque	especial	
	de coleção	

Fonte: o autor.

De acordo com pesquisas, já são mais de um bilhão de veículos no mundo, quase sete pessoas para cada carro neste mundo, excluindo tratores, máquinas de obras, motocicletas e outro veículos de uso industrial, o que causa um grande caos no trânsito (ONU, 2015).

Os veículos terrestres possuem várias aplicações e são os mais comuns ao homem, no entanto, na maioria das vezes, os custos de aquisição ou mesmo de utilização destes, são elevados, consequência principalmente dos materiais ou tecnologias empregados em sua confecção, limitando a sua acessibilidade (OLIVEIRA, 2007).

Na construção veicular, são empregados diversos materiais e tecnologias, diferenciados em cada tipo de veículo ou aplicação. Apesar disso, todos os veículos têm algo em comum, o que pode ser dividido em cinco conjuntos, considerando os principais sistemas do veículo: direção, suspensão, transmissão, freio e chassi (FILHO, 2004).

A **direção** é um conjunto de componentes que trabalham em conjunto, tornando possível que o giro do volante seja transferido às rodas fazendo com que seja manobrado, ou seja dando controle ao motorista.

A **suspensão** é o sistema responsável por dar estabilidade ao veículo, seu objetivo é absorver todas as irregularidades do terreno e manter todas as rodas em contato com o chão, auxiliando no desempenho do automóvel e tornando-o mais seguro e confortável.

O sistema de **transmissão** é responsável por levar a força gerada pelo motor até as rodas. Todo esse processo é realizado por um conjunto de peças elaboradas de maneira a aproveitar o melhor rendimento do motor.

O sistema de **freio** é a parte do veículo que reduz a velocidade de forma estável e forças que atuam sobre ele, e tem como principal característica parar o veículo em movimento, dando segurança aos passageiros e aos pedestres.

O **chassi** é o componente estrutural do veículo, o suporte onde se montam todas as

partes do veículo, por isso é uma das mais importantes, sem o chassi não tem como montar, apoiar ou moldar o veículo. É responsável também por dar conforto e segurança aos ocupantes.

Uma estrutura de chassi veicular pode ser construída, basicamente de três maneiras, chassi tipo escada, tipo monobloco e tipo *spaceframe*. O chassi monobloco é utilizado na maioria dos veículos de passeio, sendo sua estrutura dotada de regiões reforçadas para suportar diferentes tipos de esforços (OLIVEIRA, 2007).

A principal característica de uma estrutura monobloco é que esta é formada por uma peça única, soldada ou prensada. Uma vez que a estrutura que envolve o veículo definida como carroceria é integrada ao chassi, especifica de forma geral, o tipo do veículo (CHANDRA; SREENIVASULU; HUSSAIN, 2012). Além destes aspectos, a fabricação de um chassi monobloco demanda altos custos com ferramentais, moldes e máquinas de estampagem, inviabilizando sua produção em escala em quantidade inferior a dez mil veículos por ano (OLIVEIRA, 2007).

Nesse trabalho, será dedicada atenção a essa parte do veículo, o chassi, com análise de um chassi veicular do tipo *spaceframe*, construído experimentalmente, com modelagem realizada por maquetes em escala, mas sem base científica ou simulação computacional.

Será realizada análise de peso, resistência e segurança aos ocupantes, de modo a apontar erros do processo artesanal. Esta análise terá foco em um chassi construído com tubos de aço carbono com costura e solda do tipo MIG, onde todas as dobras foram feitas a frio, com dobradeira hidráulica, com o intuito de não enfraquecer os tubos.

O chassi tubular proposto é destinado à locomoção de duas pessoas, dispostas de forma sentada, estando uma ao lado da outra, sendo suas dimensões adotadas segundo parâmetros ergonômicos aumentando a segurança e conforto de seus ocupantes. Será realizada a simulação de cenários estáticos, via elementos finitos, de modo a permitir identificar regiões que possam necessitar de reforço estrutural no chassi, maximizando a segurança e o conhecimento do comportamento estrutural do chassi proposto frente aos carregamentos realizados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Analisar um chassi de aço tubular com costura, do tipo *spaceframe*, de modo que o mesmo suporte uma carga mínima previamente especificada, sendo modelado e testado por meio do método de elementos finitos, utilizando um *software* de desenho e simulação.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar um chassi de estrutura tubular, confeccionada com tubos de aço carbono;
- Realizar análise estrutural da estrutura proposta;
- Desenvolver simulações computacionais da estrutura, avaliando tensões e deformações devidas a solicitações externas;
- Especificar os limites de carga para a estrutura;
- Avaliar a relação peso/região do chassi monobloco, determinando relações ou restrições via experimentação utilizando simulações computacionais;
- Avaliar proposta de correções e melhorias para o chassi;
- Analisar computacionalmente a reação do chassi a impactos frontais em velocidades de 60 *km/h* e 80 *km/h*.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento desse trabalho está distribuído em sete etapas conforme descrito a seguir.

- Realização da investigação bibliográfica, contextualização geral da pesquisa, visando a construção do referencial teórico necessário para realização da análise de um veículo experimental com chassi tubular tipo *spaceframe* confeccionado com tubos de aço carbono costurado.
- Estudo e levantamento das principais características dos tubos de aço utilizados para a confecção de estruturas veiculares.
- Estudo dos principais tipos de chassi e suas características.
- Análise do desenvolvimento e aperfeiçoamento das principais componentes estruturais automotivas.
- Estudo e conceituação exemplificada do método de elementos finitos com foco na análise de chassis estruturais.
- Estudo e experimentação de sistemas CAD (*SOLIDWORKS*[®]) para a análise de chassis pelo método de elementos finitos pelo módulo de MEF no *software ANSYS*.

Diante do exposto, este trabalho foi organizado de tal forma que:

O primeiro capítulo diz respeito à introdução, onde o trabalho foi contextualizado e as principais motivações foram apresentadas, juntamente com os objetivos e metodologia.

O segundo capítulo traz uma exposição sobre os principais materiais utilizados na confecção de chassis do tipo *spaceframe*, os processos de laminação do aço utilizado na confecção de tubos e os métodos de cálculo do peso teórico, característica relevante nos projetos de chassis.

O terceiro capítulo aborda os principais tipos de chassis utilizados na construção veicular, ressaltando as suas principais características.

No capítulo 4, são elucidadas informações acerca do desenvolvimento de automóveis, exibindo parâmetros importantes, tais como rigidez flexional, rigidez torcional, peso e como são realizadas as análises estruturais.

O quinto capítulo, trata das análises por elementos finitos, principalmente no tocante à malha, tipo de elemento e utilização, com enfoque no estudo das treliças espaciais.

No capítulo 6, são exibidas as análises realizadas por *software* de desenho assistido por computador (*Computer Aided Design* – CAD), após a identificação de como o Método dos Elementos Finitos (MEF) é realizado dentro do *software* ANSYS®.

Finalmente, são apresentadas as conclusões e propostas de continuidade.

Capítulo 2

MATERIAIS UTILIZADOS EM CHASSIS TIPO *SPACEFRAME*

2.1 Caracterização de Tubos de Aço

O material base para a confecção da estrutura veicular tipo *spaceframe* é o tubo de aço carbono com costura.

Os tubos podem ser produzidos em uma variada gama de matérias-primas (tipo de aço utilizado), que são normalmente fornecidas segundo especificações ASTM (*American Society for Testing and Materials*), DIN (*Deustaches Institute for Normuns*), API (*American Petroleum Institute*), AISI (*American Institute of Steel and Iron*), SAE (*Society of Automotive Engineers*), ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*) dentre outras.

A matéria-prima utiliza na indústria para confecção dos tubos é comprada em forma de bobinas, que são classificadas em três grandes grupos, que serão descritos a seguir (GORNI, 2009).

2.1.1 Bobina laminada a frio (BF)

Possuem uma cor clara, sendo necessários alguns cuidados especiais aos tubos produzidos nesta matéria-prima, pois ela é altamente suscetível à oxidação (corrosão, ferrugem). Os tubos devem ser armazenados e transportados sempre evitando a umidade, pois, tendem a amarelar, o que pode causar sérias consequências na utilização final sobre o produto.

Estas bobinas são produzidas normalmente em espessuras menores que 2,00 mm e possuem melhor tolerância dimensional e acabamento. Tem um processo de fabricação mais longo, e consequentemente, o custo é maior (GORNI, 2009).

2.1.2 Bobina laminada a quente (BQ)

Possuem uma cor escura e são menos suscetíveis a oxidação, quando comparado à BF. Os tubos podem ser armazenados e transportados em condições normais até mesmo em céu aberto sem ter sua qualidade prejudicada (GORNÍ, 2009).

Estas bobinas são produzidas normalmente em espessuras acima de 2,00 *mm* e não possuem uma tolerância dimensional tão restrita quanto as BF, sendo que são também denominadas de BG (bobinas grossas), quando a espessura for superior a 5,00 *mm*.

Quando for necessária uma melhor condição dimensional em uma espessura de BQ, pode-se fazer uma relaminação a frio da chapa. Este processo também é utilizado para obter espessuras não fornecidas pelas Usinas.

2.1.3 Bobina aço zincado por imersão a quente (BZ)

Também possuem uma cor clara, sendo necessários alguns cuidados especiais aos tubos produzidos com esta matéria-prima. Os tubos devem ser armazenados e transportados sempre evitando a umidade, senão tendem a amarelar, o que pode causar sérias consequências na utilização final do produto. Estas bobinas são produzidas normalmente em espessuras variando 0,30 a 2,70 *mm* e largura entre 700 *mm* a 1.624 *mm*. Quanto aos tubos de condução, são zincados a quente (ou galvanizados a fogo) não existe preocupação com a superfície do tubo, contudo, devem ser tomados alguns cuidados no seu armazenamento (GORNÍ, 2009).

2.2 Aferição da Qualidade em Tubos de Aço

Durante o processo produtivo dos tubos, podem acontecer algumas irregularidades que causam má qualidade do produto final. Então é necessário e comum, avaliar por meio de ferramentas da qualidade, o nível de perfeição com o qual os tubos estão sendo fabricados. Para detectar defeitos ou mesmo falhas mais graves do processo fabril, são realizados alguns tipos de ensaios, de forma que os principais serão descritos a seguir (SETTON; SENATOR, 2004).

Eletromagnético: Através de correntes parasitas o tubo é testado quanto a descontinuidades. Não garante a estanqueidade, porém é admitido como teste opcional ao hidrostático na maioria das normas de condução devido à sua grande velocidade de execução.

Hidrostático: Consiste em testar o tubo a uma determinada pressão hidráulica para garantir a estanqueidade do tubo.

Ensaio Destrutivo: Durante o processo de fabricação são realizados vários ensaios mecânicos destrutivos em amostras retiradas durante a produção, tais como alargamento,

flangeamento, dentre outros.

2.3 Informações Técnicas

O peso nos tubos de aço costurados podem ser calculados utilizando fórmulas específicas. São três os tipos de tubos de aço costurados que são comumente calculados: redondo, quadrado e retangular (SETTON; SENATORE, 2004).

2.3.1 Cálculo do peso teórico de um tubo redondo de aço carbono

O tubo de aço redondo tem perfil circular, conforme a Figura 2.1. Esse tubo é encontrado em várias chapas, de vários diâmetros.

Figura 2.1 – Tubo de aço redondo.



O cálculo do peso do tubo pode ser obtido através da Eq. (2.1).

$$P = 0,0246615(D-e)e \quad (2.1)$$

onde P é o peso do tubo em kg/m , e é a espessura da parede do tubo em mm e D é o diâmetro externo do tubo em mm .

2.3.2 Cálculo do peso teórico de um tubo quadrado de aço carbono

O tubo de aço quadrado, tem perfil quadrado, conforme a Figura 2.2. Esse tubo também é encontrado com várias espessuras de chapas e várias comprimentos de área de seção transversal.

Figura 2.2 – Tubo de aço quadrado.



Fonte: aldifer.com.br.

O cálculo do peso do tubo pode ser obtido através da Eq. (2.2).

$$P = 0,0246615(1,27L - e)e \quad (2.2)$$

onde, P é o peso do tubo em kg/m , e é a espessura da chapa em mm e L é o lado do quadrado em mm (medida externa).

2.3.3 Cálculo do peso teórico de um tubo retangular de aço carbono

Os tubos de aço retangular, tem seu perfil em forma de um retângulo, encontrados em várias dimensões de espessura de chapa e perfil, conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3 – Tubo de aço retangular.



Fonte: cofiasa.com.mx.

O cálculo do peso do tubo pode ser obtido através da Eq. (2.3).

$$P = 0,0246615(1,27((L_1 + L_2)/2) - e)e \quad (2.3)$$

onde P é o peso do tubo em kg/m , L_1 é o lado maior em mm , e é a espessura do tubo em mm e L_2 é o lado menor em mm .

Historicamente, os tubos de aço tiveram aumento expressivo em sua comercialização durante a Segunda Guerra Mundial, principalmente, para fins militares. Produzido comercialmente nas décadas de 1920 a 1930 na Alemanha e Estados Unidos, especificamente no Brasil passou a ser fabricado em 1954 pelas Indústrias Químicas Matarazzo (FORINI, 2008).

2.4 Especificação dos Tubos de Aço Costurados

Existe uma gama diversificada de tubos de aço com costura. Para a construção da estrutura do chassi veicular (*spaceframe*) objeto de estudo desta pesquisa, foi utilizado tubo de aço costurado redondo de modo que, de onde foram levantadas algumas questões que precisaram ser melhor compreendidas. Dentre estas, como aumentar a rigidez da estrutura, sem aumentar o peso, utilizando o reforço estrutural de modo a resistir às cargas que solicitam a estrutura.

Diante disso, vários modelos devem ser testados de modo a realizar o rearranjo dos tubos, promovendo o reforço estrutural necessário ou mesmo obedecendo a padrões aceitáveis de carga para uma dada região da estrutura, de modo a permitir sua utilização sem o comprometimento da segurança dos ocupantes do veículo automotor.

Neste contexto, para a análise do comportamento mecânico da estrutura será realizada simulação computacional, via elementos finitos, objetivando melhor compreensão do comportamento da estrutura frente a solicitações externas de carga, exigindo reforços estruturais, ou mesmo identificar possíveis restrições à sua utilização ou carregamentos para a estrutura. Para a confecção do chassi, existe uma enorme liberdade geométrica, pois o tubo é moldado, o que não ocorre com outros materiais (KLOECKNER, 2011).

Uma vez determinado o tipo do material empregado na construção do chassi é necessário aprofundar tecnicamente nos diversos tipos existente, o que deve ser abordado no capítulo seguinte (KLOECKNER, 2011).

Capítulo 3

COMPONENTES ESTRUTURAIS VEICULARES (CHASSIS)

Historicamente, tem-se como estrutura veicular um arranjo específico de material resistente, a fim de suportar diversificados esforços. Idealmente uma estrutura veicular deve acoplar as rodas do veículo e mostrar-se rígida quanto às flexões e torções. Deve ainda ser capaz de suportar todos os elementos e passageiros e tolerar todas as cargas estáticas e dinâmicas decorrentes do uso do veículo (COSTIN; PHIPPS, 1967).

Até a década de 60 estas estruturas eram constituídas predominantemente de arranjos com configurações planas, a partir desta década iniciaram-se então os estudos de estruturas tridimensionais com o intuito de agregar rigidez às estruturas desenvolvidas. Entretanto, verifica-se que as contribuições de estruturas veiculares vão mais além, sendo responsável por boas características de manobrabilidade do veículo e garantia de baixos níveis de ruídos e vibrações ao longo do percurso (COSTIN; PHIPPS, 1967).

Com o decorrer da segunda guerra, a estrutura tubular treliçada utilizada para suportar uma ampla gama de esforços em aeronaves (torção, flexão, compressão), foi então acoplada a estruturas automotivas, devido à sua rigidez e principalmente devido ao acréscimo de segurança ao condutor no caso de acidentes que envolvessem capotamento dos veículos.

Recentemente, com a evolução de técnicas e aparelhos de processos de fabricação foi possível o desenvolvimento de novas estruturas veiculares mais complexas, mais leves e ainda assim rígidas, cumprindo com eficácia seus requisitos de projeto. Além dos avanços na manufatura, o desenvolvimento de novos materiais, como a fibra de carbono, tem despertado o interesse das grandes montadoras devido às suas excelentes propriedades mecânicas.

No que diz respeito ao desenvolvimento de estruturas veiculares por parte da indústria automobilística, sempre existe o desafio devido à quantidade de variáveis de projetos que devem ser analisadas e devidamente consideradas. Como exemplo de alguns dos prin-

cipais parâmetros a ser atendido, pode-se citar, o não comprometimento da rigidez estrutural do veículo, sob condições normais de utilização. Além disto deve-se proteger ao máximo os ocupantes em caso de colisão.

Devido à importância da estrutura veicular, deve-se destacar a importância do adequamento, tanto quanto possível, dos diversos outros subsistemas (motor, suspensão, habitáculo, tanque de combustível, etc.).

Observou-se que, devido à variabilidade de requisitos de projeto a serem consideradas, não existe uma forma ótima de estrutura veicular. Isto se deve ao fato de cada veículo possuir um conjunto diferente de variáveis de projetos a serem analisadas e atendidas (HAPPIAN-SMITH, 2001). Ainda de acordo com os autores, analisando as várias condições a serem respeitadas, verifica-se uma ampla gama de estruturas a serem utilizadas, competentes para diversos carregamentos impostos e eficazes em diferentes condições de projeto desenvolvidos.

As diferentes configurações utilizadas são classificadas como segue.

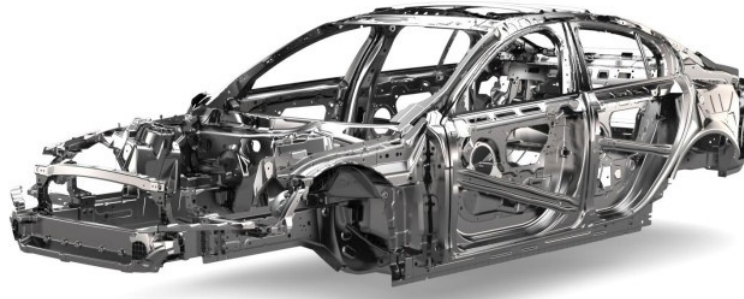
3.1 Chassi Monobloco

Historicamente o chassi monobloco (monocoque), é a estrutura mais utilizada em veículos de passeio. Peças metálicas são prensadas e soldadas constituindo uma peça única, que confere aos seus ocupantes, eficiência na proteção contra impactos. Possui ainda um alto nível de complexidade associado aos seus processos de fabricação, principalmente soldagem e estampagem, o que inviabilizam a produção deste tipo de estrutura em baixa escala (CASTRO, 2009; FURTADO, 2014).

Devido às complexidades dos processos de fabricação, estas estruturas possuem ainda um alto custo associado à sua fabricação, o que em casos de danos na estrutura, a reparação se torna extremamente complexa e de custo elevado, sendo necessária em alguns casos, a substituição de todo o conjunto monobloco (HAPPIAN-SMITH, 2001).

A estrutura do tipo monobloco necessita ainda suportar esforços com mesma eficácia que estruturas compostas por chassi e carroceria separadas. Com isso, comumente, verifica-se a presença de regiões estruturais reforçadas, aferindo uma resistência imprescindível. Pode-se observar ainda a presença de alívios, em partes da estrutura onde se verifica a baixa solicitação de esforços, desta forma, com a aplicação de reforços e alívios verifica-se uma estrutura com baixo peso associado e alta resistência, conforme exemplificado na Figura 3.1 (GILLESPIE, 1992).

Figura 3.1 – Chassi monobloco.

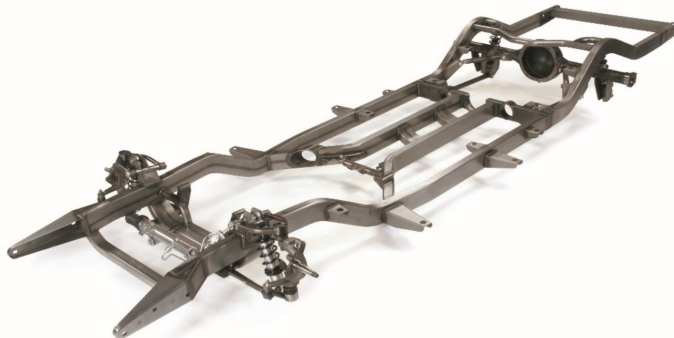


Fonte: carthrottle.com.

3.2 Chassi Escada

Como citado anteriormente os primeiros automóveis possuíam estrutura de chassi plana, na qual se assemelhava com uma escada, daí então se deu o nome, essa configuração é caracterizado por ser uma estrutura metálica, robusta e projetada para resistir os diversos carregamentos verticais impostos, é constituído por duas vigas longitudinais (conhecidas como longarinas) ligadas entre si por uma série de travamentos transversais (conhecidas por transversinas), como mostrado na Figura 3.2. Tem em sua estrutura seções em “C” que aumenta a rigidez da estrutura, e ainda seções em “X” que aumentam a resistência à torção (GILLESPIE, 1992).

Figura 3.2 – Chassi escada.



Fonte: dnmvettes.com.

O Chassi escada tem como características principais: boa resistência à flexão, baixa capacidade de deformação e baixa rigidez à torção. Devido a estas características principais, é amplamente utilizado em veículos que são submetidos a carregamentos de alta intensidade como: caminhonetes, caminhões e ônibus (NDH, 2015).

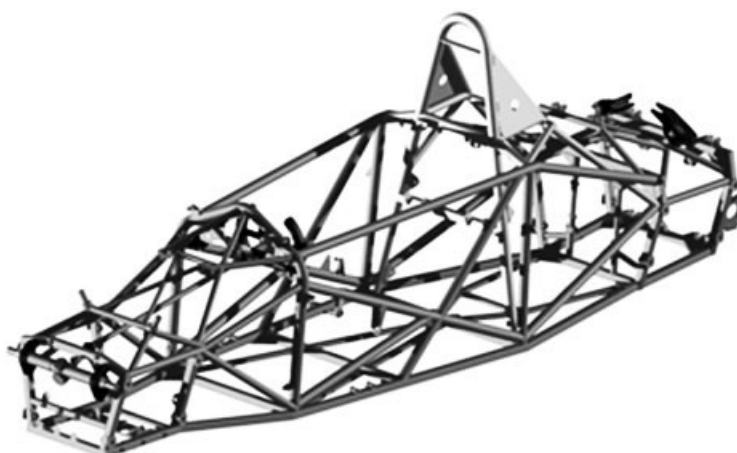
Nesta configuração, uma das características mais notórias é a separação entre o chassi e a carroceria, esta última comumente recebe o nome de cabine. Isto, o nível de processo de produção é extremamente vantajoso pela variabilidade de combinações possíveis na linha de produção aplicando-se desta forma diferentes cabines sobre um mesmo chassi (GILLESPIE, 1992).

3.3 Chassi Tubular (*spaceframe*)

A partir da teoria de estruturas tridimensionais treliçadas é possível conferir ao chassi resistência mecânica à torção e a flexão. O segredo deste tipo de estrutura está no uso intensivo da triangulação, desta forma, quaisquer forças atuantes nos vértices de um triângulo são decompostas em cargas de tração e compressão em suas arestas, não existindo cargas de flexão ou torção (SHIGLEY; MISCHKE, 2005).

O que se nota na indústria automotiva, principalmente no que diz respeito a veículos de alto desempenho é uma ampla utilização desta configuração devido ao seu baixo peso, associado às características estruturais, tendo em vista, que o enfoque das montadoras para os seus veículos mais potentes é a busca da otimização da relação peso potência, para atingirem assim suas metas de melhor desempenho em aceleração, dirigibilidade, frenagem, dentre outros (EXOMOTIVE, 2015).

Figura 3.3 – Chassi tubular – *spaceframe*.



Fonte: petrolsmell.com.

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURAS AUTOMOTIVAS

Analizadas as estruturas existentes no mercado, considerando as características positivas e negativas, é possível então que se defina os atributos à serem priorizados. Vale ressaltar novamente que o papel do chassi vai além da fixação e sustentação dos principais subsistemas, sendo comprovada, por exemplo, que as maiores deficiências na manobrabilidade de um veículo estão diretamente ligadas à projetos ineficientes e falhos de chassi (REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2001).

Desta forma, cabe ao projetista estabelecer qual tipo de estrutura (tubular, monobloco, escada) atende melhor suas necessidades de projeto, tais como, rigidez, manobrabilidade, custo, processo de fabricação dentre tantos outros. Como exemplo, nos veículos de Fórmula 1 o desempenho é o ponto chave, desta forma, o menor peso possível deve ser alcançado para que se tenha uma boa relação peso/potência. Entretanto, devido às altas velocidades praticadas na competição, a segurança do chassi não pode ser deixada de lado (COSTIN; PHIPPS, 1967).

Com isto, o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais é fundamental conferindo a rigidez necessária e o peso requerido, como prova disso, recentemente o bicampeão mundial Fernando Alonso sofreu um acidente no grande prêmio da Austrália (2016), onde seu veículo sofreu diversas rolagens a mais de 300 *km/h*. Graças à qualidade estrutural do projeto de seu veículo, Alonso saiu ileso, como mostrado na Figura 4.1, ilustrando assim a importância e eficácia que um projeto de chassi deve apresentar (Motorsport.com, 2016).

Definida então a estrutura aplicada, entra-se então na importante etapa de definição das suas características principais (rigidez torsional, peso, rigidez flexional) e em seguida são realizadas as análises pertinentes.

Figura 4.1 – Acidente com Alonso – GP Austrália 2016.



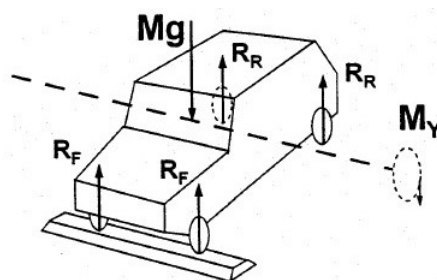
Fonte: motorsport.com.

Desta forma, é importante que sejam apresentados alguns conceitos importantes para o desenvolvimento de chassi, destacando três principais requisitos de projeto, a rigidez flexional, a rigidez torsional e o peso.

4.1 Rigidez Flexional

Caso o veículo encontre ondulações na pavimentação, que transladem o conjunto de suspensão traseiro separadamente do conjunto traseiro, ou vice e versa, o veículo sofrerá um momento fletor (M_y) ao longo do eixo longitudinal da estrutura, conforme apresentado na Figura 4.2 (GILLESPIE, 1992).

Figura 4.2 – Translação vertical do conjunto de suspensão dianteiro.



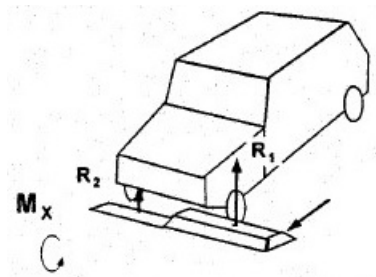
Fonte: (GILLESPIE, 1992).

A capacidade de o chassi suportar este tipo de solicitação, juntamente com a massa acoplada (M_g) ao veículo, é chamada de rigidez flexional, e deve ser dimensionada para que o veículo suporte quaisquer situações oriundas de uso normal (lombadas, buracos pequenos e trepidações) e ainda atenda, o quanto for possível, situações adversas como grandes deslocamentos verticais (R_F e R_R) aplicados ao sistema de suspensão (GILLESPIE, 1992).

4.2 Rigidez Torsional

Caso o veículo passe por ondulações na pavimentação que transladem apenas uma das rodas do veículo (R_1 e R_2), o veículo passará por um momento fletor (M_y) e um torçor (M_x) ao longo do eixo longitudinal da estrutura, por se tratar de uma combinação de carregamentos, tem alta severidade e deve ser tomada a devida atenção em projetos automobilísticos. Conforme apresentado na Figura 4.3 (GILLESPIE, 1992).

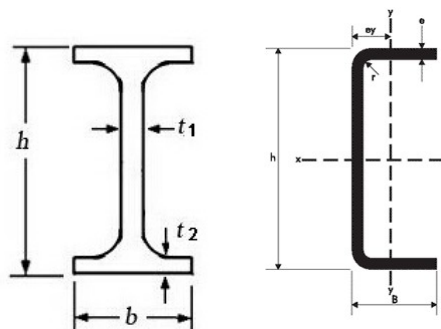
Figura 4.3 – Translação vertical da roda dianteira direita.



Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Um importante fator que deve ser levado em consideração no aumento da rigidez do chassi leva em consideração a seção transversal da componente estrutural utilizada, podendo ela ter perfis em “U”, “H”, “C”, “I”, circular, dentre outras, devendo ser analisadas quais as principais características a serem atendidas (SHIGLEY; MISCHKE, 2005).

Figura 4.4 – Perfis “I” e “C”.



Fonte: (SHIGLEY; MISCHKE, 2005).

4.3 Peso

O peso se faz uma importante característica de projeto, por dois importantes aspectos, a relação peso potência do veículo e também o consumo de combustível do veículo. Na relação peso potência, quanto mais se aumenta a quantidade de cavalos, menor será a

relação peso por cavalo de potência, aumentado assim o desempenho de aceleração e frenagem do veículo. Entretanto, em tempos de aquecimento global e constante busca pela preservação do ambiente, percebe-se que o aumento da cilindrada traz como consequência o aumento do consumo de combustível (NICOLAZZI, 2008).

Com o enfoque no uso racional de combustíveis fósseis, a redução do peso da estrutura deve ser tomada como uma variável de projeto a ser rigorosamente atendida, não devendo existir redundâncias na estrutura que super dimensionem a mesma, aumentando o desempenho do veículo, reduzindo o consumo de combustível e notavelmente reduzindo a quantidade de CO_2 liberado (STONE; BALL, 2004).

Como exemplo da eficácia da redução do consumo de combustível, devido à redução do peso de veículos, a competição nacional de eficiência energética, foi vencida com uma autonomia de 736 quilômetros com 1 litro de etanol, com peso total do veículo de aproximadamente 100 quilos.

4.4 Análises Estruturais

Elucidado alguns dos conceitos importantes, se faz necessário destacar a importância da análise numérica, na qual se verifica, previamente, as características estáticas, modais, harmônicas e transientes do chassi desenvolvido. Nesta fase o projetista deve garantir, preliminarmente, que o chassi não estará sujeito a falhas sob as diversas condições de operação de um veículo (COSTIN; PHIPPS, 1967).

4.4.1 Análise estática

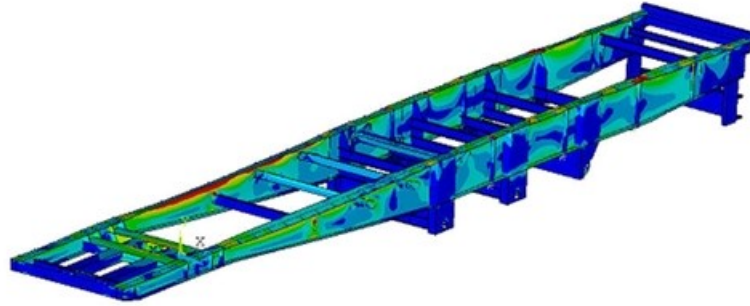
Nesta análise são verificadas as tensões aplicadas ao chassi decorrentes de carregamentos internos constantes, como exemplo, o peso do motor, transmissão, peso dos passageiros, carroceria, dentre outros. Ainda podem ser analisados, esforços externos aplicados constantemente, como exemplo, a aplicação de uma carga distribuída sobre a cabine de uma caminhonete. Vale ressaltar que nessa análise são desconsiderados os efeitos das forças de inércia e ainda do amortecimento.

Com essa análise, verifica-se a magnitude dos esforços internos e dos seus correspondentes deslocamentos internos, sendo assim, é possível que se determine, a partir de critérios de falha (Von Mises, Tresca, Rankine, dentre outros), a possibilidade de que o chassi venha a escoar ou trincar devido à ação dos carregamentos esperados (LOTTERMANN, 2015).

Desta forma, se a estrutura obedecer aos requisitos, não apresentando grandes tensões e grandes deslocamentos, significa que o chassi passou por uma análise preliminar da sua integridade e de sua rigidez. A Figura 4.5 exemplifica a situação onde foi realizada uma análise estática estrutural de um chassi do tipo escada em que foram aplicados carre-

gamentos constantes. Foram analisados, através do critério de Von Mises, os níveis de tensão atingidos pelo componente, destacando em cores vivas (Vermelho e amarelo) as regiões de maior tensão.

Figura 4.5 – Análise estrutural de um chassi do tipo escada.



Fonte: wildeanalysis.co.uk.

4.4.2 Análise dinâmica

A análise dinâmica diferencia da estática no que diz respeito à constância dos carregamentos, que neste tipo de análise podem variar magnitude, direção e posição com o tempo, diferentemente das análises estáticas. Vale ressaltar que neste tipo de análise, as forças de inércia e amortecimento são consideradas, regido então pela equação matricial (4.1):

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = p(t) \quad (4.1)$$

onde M é a matriz de massas, C a matriz de amortecimento, K a matriz de rigidez, $p(t)$ o vetor de carregamento externo aplicado ao chassi, $\ddot{x}$ vetor de acelerações, $\dot{x}$ vetor de velocidade e x como sendo o vetor de deslocamentos (FURTADO, 2014).

A Eq. (4.1) representa o equilíbrio dinâmico de um sistema amortecido não homogêneo, devido a aplicação de uma carga externa. Solucionando a Eq. (4.1) através de integração numérica, é possível então realizar importantes análises como mostrado a seguir.

4.4.3 Análise modal

Esta análise corresponde a medição da magnitude das respostas devido a excitações em um determinado espectro de frequência, para isso, analisa-se a Eq. (4.1) sem a matriz de amortecimentos e sem o vetor de velocidades, resultando assim nas frequências naturais e nos modos de vibração de uma estrutura.

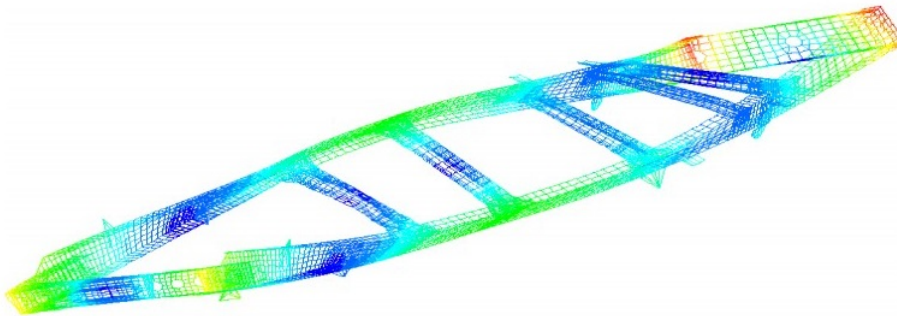
Vale ressaltar que sempre que a frequência de excitação externa coincide com uma das frequências naturais de um objeto, ocorre então o fenômeno de ressonância, onde acon-

tecem deslocamentos muito mais altos, podendo ocorrer trincas e em casos extremos até o colapso do chassi em análise (FURTADO, 2014).

Desta forma, a análise modal se faz importante para que o projetista possa deslocar as frequências naturais para valores que na qual o veículo não opera, evitando assim o efeito de ressonância indesejado. Uma das formas do projetista deslocar estas frequências é através de alteração da massa, rigidez do sistema e até mesmo mudanças na geometria.

Para melhor ilustrar, é mostrado, na Figura 4.6, um chassi respondendo a um determinado modo de vibração, mais especificamente o modo de flexo-torção, na qual o chassi experimenta esforços de tração, compressão e cisalhamento, indesejáveis pelo projetista, cabe então ao projetista deslocar estas frequências naturais o quão for possível.

Figura 4.6 – Análise dinâmica de um chassi do tipo escada.



Fonte: wildeanalysis.co.uk.

4.4.4 Análise harmônica

A análise harmônica se faz importante pois irá ditar quais são os modos de vibração que mais tem influência nas respostas dinâmicas da estrutura. O processo desta análise utilizado por *softwares* de elementos finitos comerciais, como exemplo o ANSYS, é a aplicação de um carregamento harmônico senoidal na estrutura, com isso obtém-se a resposta da estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo.

4.4.5 Análise transiente

Esta análise refere-se aos máximos deslocamentos devido aos deslocamentos iniciais aplicados a estrutura, verificando também esforços e tensões quando submetidos à estas condições.

Capítulo 5

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E CAD

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é amplamente utilizado na engenharia para diversos tipos de análises em diferentes campos. Na engenharia mecânica, por exemplo, a análise dos deslocamentos e tensões em um sólido sujeito a ações externas é de ampla importância no projeto e dimensionamento de estruturas, como exemplo, pórticos, pontes, edificações, dentre outros.

Anteriormente ao desenvolvimento deste método, a análise de problemas de meios contínuos era realizada através da resolução de sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenômeno, onde comumente recorria-se a séries de Fourier, e devido à complexidade estes procedimentos eram aplicáveis somente a meios contínuos homogêneos e estruturas de geometria simples.

O MEF se baseia na discretização e subdivisão de um domínio do objeto em análise em pequenas partes, denominadas de elementos. Desta forma, é possível que se transforme um problema de alta complexidade na soma de diversos problemas com grau de complexidade menor (FURTADO, 2014).

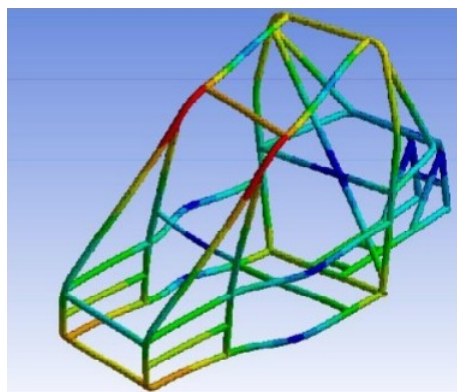
Com o desenvolvimento do método, o modelo matemático é simplificado a um conjunto de equações diferenciais ordinárias que regem o comportamento da estrutura em análise. Com isto, sua utilização na elaboração de projetos de engenharia se tornou indispensável, pois com a utilização do método, a simulação e análise do comportamento de estruturas podem ser realizadas antes que sejam construídos protótipos, reduzindo desta forma custo e tempo na concepção de projetos.

Como exemplo de aplicação do método de elementos finitos, está a indústria automotiva, na qual, devido à variabilidade de esforços a que a estrutura está submetida, diversos são os ensaios requeridos para validação do projeto, inviabilizando a construção de inúmeros protótipos e ressaltando a eficácia do MEF, reduzindo o custo e tempo no desenvolvimento dos veículos.

Em casos extremos, onde os recursos financeiros são ainda mais escassos, inviabilizando a construção de um protótipo físico, ou seja, o produto final equivale-se ao primeiro protótipo, a utilização destes *softwares* é ainda mais necessária e de maior relevância.

Como exemplo, a competição nacional SAE Baja que ocorre em São Paulo, reúne mais de 70 faculdades do Brasil para exibirem os projetos e competirem com os seus protótipos, devido à escassez de recursos disponibilizados para o projeto pelas instituições de ensino, toda a validação da eficácia, segurança e desempenho de suas estruturas é simulada virtualmente através do MEF, conforme o exemplo de análise de chassi exibido na Figura 5.1 (LOTTERMANN, 2015).

Figura 5.1 – Chassi simulado através de elementos finitos.

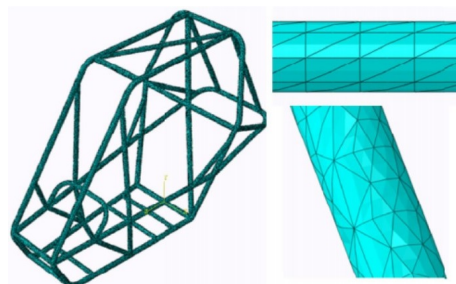


Fonte: (Teixeira, 2006).

5.1 Malha e Refinamento

No método dos elementos finitos a precisão dos resultados está diretamente ligada à quantidade de elementos que são utilizados na simulação, sendo o conjunto destes elementos denominado por malha. O método passa então pela escolha da correta discretização do problema a fim de que os resultados oriundos das simulações numéricas estejam condizentes com o comportamento real da estrutura. Na Figura 5.2 observa-se um chassi veicular com detalhe para a malha aplicada na estrutura. Quanto maior for a quantidade de elementos da malha, a tendência é que os resultados (numérico e real) converjam (LOTTERMANN, 2015).

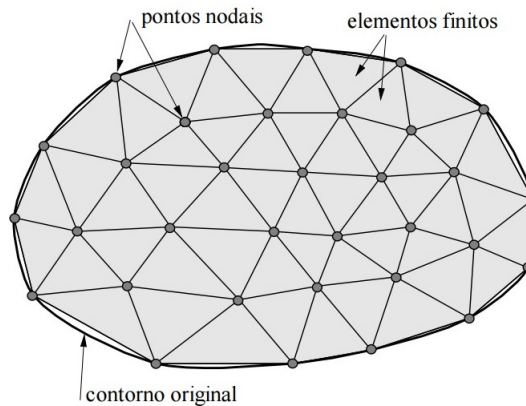
Figura 5.2 – Aplicação da malha à uma estrutura veicular.



Fonte: (LOTTERMANN, 2015).

Além do refinamento oriundo do aumento da quantidade de elementos na malha, deve-se destacar a possibilidade de análise com diversos tipos de elementos. A ligação entre os elementos é realizada através de pontos, denominados nós (Figura 5.3).

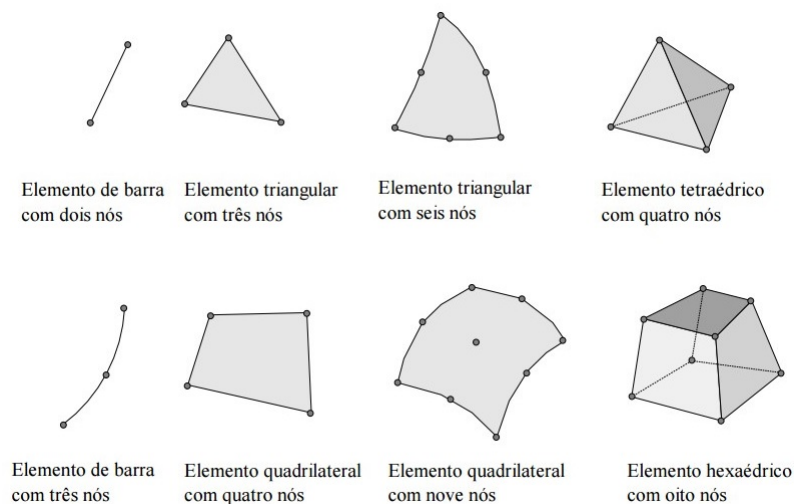
Figura 5.3 – Geometria, elementos e pontos nodais



Fonte: (SOUZA, 1990)

Dependendo da quantidade de nós que o elemento apresenta, sua forma geométrica, dimensão e quantidade de graus de liberdade (GDL), a discretização e o refinamento da malha requeridos podem ser atingidos com eficácia. A Figura 5.4 mostra alguns elementos que podem ser aplicados na teoria de elementos finitos (SOUZA, 1990).

Figura 5.4 – Diferentes tipos de elementos para MEF



Fonte: (SOUZA, 1990)

Apesar dos constantes desenvolvimentos obtidos na área de elementos finitos, a correta determinação da malha e sua discretização ainda são funções exclusivamente depen-

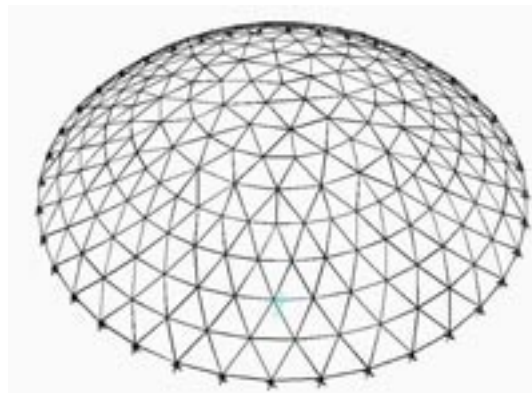
dentes do projetista, cabendo ao mesmo determinar corretamente a quantidade de elementos a serem utilizados e aplicar o correto elemento para que a estrutura seja representada com eficácia. Vale ressaltar ainda, que a complexidade do elemento, junto a uma maior discretização da malha, afetam diretamente o custo computacional necessário para a resolução das simulações. Desta forma, ponderar entre o refinamento da malha e o custo computacional também é uma importante tarefa que o projetista deve se executar (SOUZA, 1990).

5.2 Análise Teórica de Treliças Espaciais

Devido ao objeto deste estudo serem estruturas de veículos tubulares (*spaceframes*) é importante que se destaque as teorias e métodos utilizados especificamente na resolução e análise de estruturas espaciais. Este tipo de estrutura se destaca por ser formada por elementos lineares dispostos em planos diversos.

As primeiras estruturas tridimensionais surgiram após o século *XVIII*, aproximadamente em 1811 com a cúpula de Bellange e Brunet. Isso só foi possível devido aos avanços nas tecnologias e utilização do ferro fundido como elemento estrutural.

Figura 5.5 – Cúpula treliçada.



Fonte: metalica.com.br.

Nas últimas décadas houve um expressivo avanço na utilização das treliças espaciais em diversas aplicações, dentre elas, o projeto de veículos. Isto se deve às principais vantagens (LOTTERMANN, 2015):

- A disposição em três dimensões permite uma melhor distribuição homogênea dos esforços, conseqüentemente, reduzindo o peso total da estrutura;
- As treliças apresentam uma grande resistência à flexão;
- Devido ao baixo peso associado, podem apresentar barras redundantes, acarretando em um coeficiente de segurança maior para a estrutura;

- Com a facilidade de confecção de estruturas diversas sem a perda de rigidez estrutural, veículos superesportivos utilizam-se de estruturas treliçadas tridimensionais para a criação dos mais diversos designs sem que haja o comprometimento da estrutura e do peso do veículo (Figura 5.6).

Figura 5.6 – Chassi treliçado tridimensional.



Fonte: factoryfive.com.

Na análise de estruturas espaciais tridimensionais, tem-se como foco a determinação dos deslocamentos e tensões internas devido a ações externas (HAPPIAN-SMITH, 2001). Alguns importantes pontos nas análises devem ser destacados, dentre eles:

- O modelo numérico analisado, em elementos finitos, deve ser, o quanto possível, fiel ao modelo estudado, ou seja, a representação deve mostrar as características geométricas (furos, emendas e ranhuras, por exemplo);
- Se faz necessário saber todos os pontos que caracterizam o comportamento do material que constitui o modelo;
- Um aspecto primordial é a determinação dos esforços que estão aplicados à estrutura e ainda as restrições impostas ao modelo, fase importante para que ocorra a convergência dos resultados entre o modelo numérico e o modelo real;
- É importante que o projetista conheça parcial ou completamente o comportamento da estrutura estudada, além da provável resposta. Por exemplo, se tratando da linearidade, a amplitude de resposta, a fim de que o projetista identifique quaisquer anormalidades na resposta obtida pela análise realizada.

Três importantes aspectos devem ser analisados referentes ao colapso de estruturas treliçadas tridimensionais, que pode estar relacionado a:

- Colapso dos elementos (barras), devido à excesso de tração;
- Colapso das ligações;
- Instabilidade geral da estrutural.

As duas primeiras características são apontadas como as principais causas do colapso de treliças.

O rompimento de barras, na maioria dos casos, ocorre devido à submissão das treliças a um carregamento excessivo. Para efeito de projeto, as treliças devem ser dimensionadas com barras que apresentem tensão última superior aos carregamentos que serão impostos à estrutura, gerando assim um coeficiente de segurança e conseqüentemente uma confiabilidade maior à estrutura (HAPPIAN-SMITH, 2001).

No processo de dimensionamento de barras e definição das tensões, o projetista deve se atentar a dois tipos de comportamento das treliças. Primeiramente, o comportamento linear, onde as deformações das barras e os deslocamentos da estrutura são proporcionais aos carregamentos aplicados. Em seguida, uma análise do comportamento não-linear das treliças, onde não há proporcionalidade entre o carregamento aplicado e as deformações e deslocamentos (HAPPIAN-SMITH, 2001).

No caso da estrutura apresentar o carregamento linear, a sua análise pode ser realizada através de elementos finitos de forma convencional e utilizando-se para isso de programas de análise em regime elástico linear, enquanto que no caso das não linearidades, outras considerações importantes devem ser realizadas a fim de que os deslocamentos e as deformações sejam corretamente obtidos de acordo com o carregamento imposto.

Para simulações de elementos finitos em regime elástico linear o *software SOLIDWORKS*® se apresenta satisfatório, e suas características e funcionalidades são apresentadas a seguir.

5.3 Desenho Assistido por Computador

O *SOLIDWORKS* é um programa CAD (*Computer Aided Design* – Projeto Assistido por Computador) que permite efetuar modelagem sólida tridimensional a partir de formas geométricas básicas. Ele foi desenvolvido pela empresa *SOLIDWORKS Corporation*, na qual a empresa francesa *Dassault Systems* é detentora de seus direitos.

O *software* é fundamentado na filosofia de trabalho em planos de representação, na qual o usuário representa uma geometria bidimensional e aplica sobre ela uma terceira coordenada, obtendo assim um modelo 3D básico, para isso, o *software* se utiliza do recurso

Application Programming Interface (API – Interface de Aplicação de Programação), na qual a sequência de elaboração de um desenho pode ser salva, visualizada e modificada através de linguagem *BASIC* de programação, o que permite uma iteração com a plataforma CAD, executando assim, comandos e realizando desenhos previamente estabelecidos (TAVARES; FONSECA, 2014).

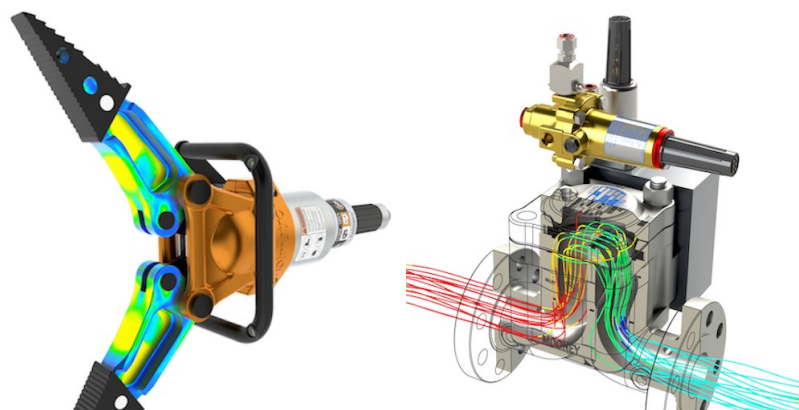
Todas as características geométricas de um objeto, como por exemplo, ranhuras, fa-
ceamentos, furos, chanfros, dentre outros, são aplicados no ambiente de modelagem deno-
minado *Part*, além deste modo o programa conta com o *Drawing*, onde o projetista trabalha
em duas dimensões com vistas ortográficas e permite uma edição dimensional das facetas
do projeto. Para completar os ambientes, o *SOLIDWORKS* conta com o modo *Assembly*, onde
é realizada a montagem das peças.

Vale destacar que no ambiente *Assembly*, o usuário insere os componentes e através
de relações geométricas, realiza a montagem do conjunto. Para facilitar este processo, o
software conta ainda com uma árvore de gerenciamento de projeto a qual mostra, de forma
sequencial, todos os processos de montagem executados pelo projetista.

Há alguns anos uma empresa desenvolveu alguns módulos de análise bastante efici-
entes, dentre eles o módulo de análise para elementos finitos, o que elevou o *software* CAD
ao patamar de mais utilizado no desenvolvimento de projetos em todo o mundo, sendo di-
fundido em grande parte das universidades e empresas pelo mundo.

A Figura 5.7 exhibe algumas funcionalidades do *software*, especificamente, resultados
de análise de tensões e análise de fluidos.

Figura 5.7 – Análise de tensões (MEF) e análise de fluidos (CFX) realizadas no *software* *SOLIDWORKS*.



Fonte: hawkridgesys.com.

O *software* *SOLIDWORKS* é caracterizado como de porte médio, pois está numa po-
sição intermediária entre *softwares* de uso pessoal e os utilizados por empresas de grande
porte, que necessitam de pacotes gráficos altamente sofisticados.

5.4 MEF no ANSYS®

A escolha do *softwares* de elementos finitos para realizar as simulações estruturais deve ser pautada principalmente pela precisão que o projetista tem como alvo. Entretanto, percebe-se, na maioria dos casos, um acréscimo no custo computacional, cabendo assim analisar se o nível de precisão almejado é compatível com os incrementos de custo computacional resultantes.

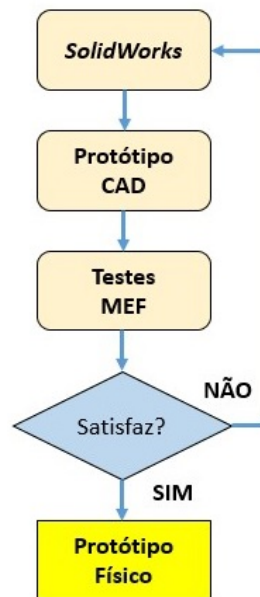
Além do custo computacional, é importante ressaltar a compatibilidade que o *software* de análise de elementos finitos possui com o de CAD na qual foram desenvolvidas as peças a serem simuladas, sendo que em alguns dos *softwares*, esta incompatibilidade requer que o projetista realize conversões no formato de arquivo da peça, o que muitas vezes, causa a perda de detalhes importantes dos projetos, reduzindo a precisão da simulação de MEF (TAVARES; FONSECA, 2014).

Analisando então estes quesitos, foi então utilizado o módulo de análise em elementos finitos do *software*, na qual é possível a utilização da ferramenta FEA (*Finite Elements Analysis*) onde são realizadas simulações estáticas, harmônicas e modais. Aliado a isso, a precisão de projeto requerida pelo projetista é atendida de forma satisfatória pelo ANSYS, justificando então a sua escolha.

É importante que se ressalte que *softwares* com ferramentais CAE (*Computer Aided Engineering* - Engenharia Assistida por Computador) na qual realizam diversificados tipos de testes, dentre eles os estruturais, através do método de elementos finitos, apenas liberam dados ao projetista, cabendo a este definir se o projeto satisfaz as características de projeto necessárias.

Para melhor ilustrar o processo de desenvolvimento, teste e verificação, o projetista deve atender o fluxograma exibido na Figura 5.8. É evidente que o processo de desenvolvimento é iterativo e depende exclusivamente das competências do projetista na definição da aprovação ou não do projeto simulado, para que possa enfim ser concebido o protótipo físico (TAVARES; FONSECA, 2014).

Figura 5.8 – Fluxograma de desenvolvimento de protótipos.



Fonte: o autor.

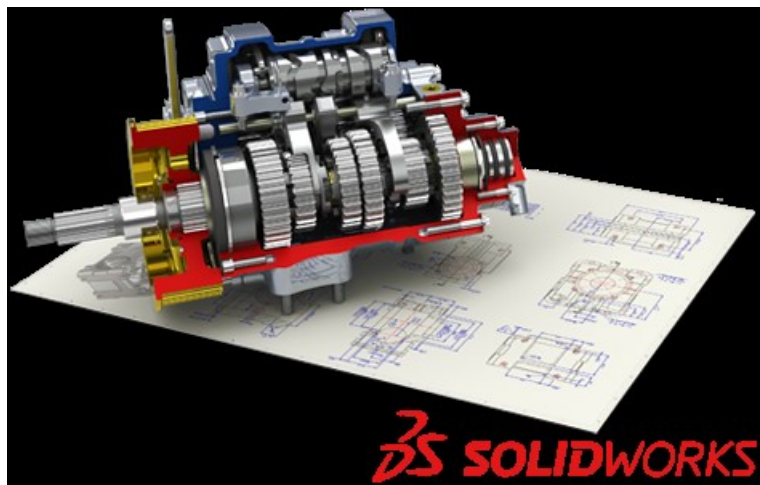
5.5 Modelagem CAD

Ao desenhar uma peça em um *software* de CAD, possibilita-se a criação de modelos através de limites (superfícies), estas fronteiras são representadas através de vetores, na qual, possuem um modelo matemático associado, possibilitando a flexibilidade e precisão necessárias.

Além das propriedades geométricas definidas pelos modelos matemáticos que descrevem o objeto de estudo, quando o desenho é levado das duas dimensões para três, as propriedades mecânicas do material devem ser inseridas. Dentre as propriedades podem ser citadas: peso e volume específico, módulo de elasticidade, densidade, coeficiente de *Poison*, dentre outros. As propriedades mecânicas são indispensáveis para que o *software* defina algumas características intrínsecas da peça projetada, como exemplo, momento de inércia polar e linear, centro de massa e peso total (NORTON, 2010).

Na fase de modelagem em CAD é importante que o projetista se atente, o quão for possível, ao maior nível de detalhamento das peças, o que se faz importante devido às propriedades mecânicas e geométricas possuírem influência direta nas análises seguintes (CAE) às quais o projeto será submetido. A Figura 5.9 exibe um desenho em CAD com altíssimo nível de detalhamento, contendo ranhuras, furações e diferentes tipos de materiais.

Figura 5.9 – Transmissão automotiva modelada em CAD com alto nível de detalhamento.



Fonte: hawkridgesys.com.

5.6 Simulação Via MEF

Após definidas as características geométricas e mecânicas do projeto, sob desenvolvimento, é possível que o projetista submeta o mesmo a diversos tipos de verificações, dentre elas as análises que se utilizam do MEF.

Como citado anteriormente, este tipo de simulação permite que o usuário defina importantes características de projeto, verificando os pontos a quais estão submetidas às maiores e menores tensões, a quais frequências naturais o sistema irá responder, suas máximas deformações além de outras características estáticas e dinâmicas para conclusão satisfatória de um projeto (YAN, 2011).

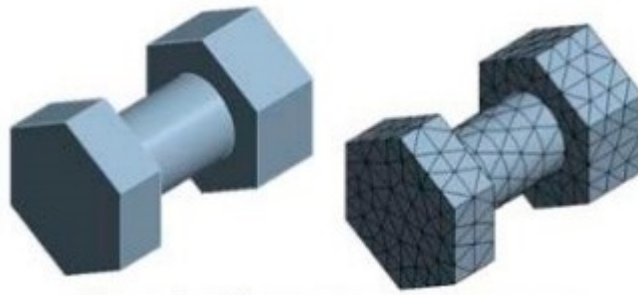
No modo de análise estrutural do *software* ANSYS, faz-se necessário que sejam importadas as peças do CAD para o ambiente de simulação. Este é um ponto importante para que nenhuma característica geométrica e/ou mecânica seja perdida no processo de importação, com isso, devido ao fato das plataformas CAD do *SOLIDWORKS* e CAE do *ANSYS* serem muito bem interfaceadas, o processo de importação é feito de forma direta.

Importada a geometria, o projetista deve definir as condições de contorno às quais o projeto está submetido. Esta fase deve ser feita de forma bastante minuciosa para que nenhum resultado seja falseado, isto é, seja condizente com as condições reais nas quais serão aplicadas o projeto. Nesta fase são então definidas forças, aplicações de restrições de movimento (por exemplo, engaste, junta translacional, junta rotacional), pressões, temperaturas, dentre outras condições possíveis de serem habilitadas no *software* ANSYS e que confirmam verossimilhança ao projeto.

Uma vez aplicadas as condições de contorno e as propriedades do projeto, é impor-

tante que seja simplificado o desenho em CAD para que o mesmo possa ser solucionado computacionalmente. O *software* ANSYS se utiliza do método de discretização através de elementos finitos para realização de análise estrutural. A usabilidade do método vem da simplificação dos cálculos do sistema, na qual a discretização permite que o deslocamento de cada um dos nós seja definido por uma função polinomial (YAN, 2011). A Figura 5.10 exhibe um modelo discretizado por malha de elementos finitos para um conjunto parafuso e porca.

Figura 5.10 – Discretização de um conjunto parafuso/porca.

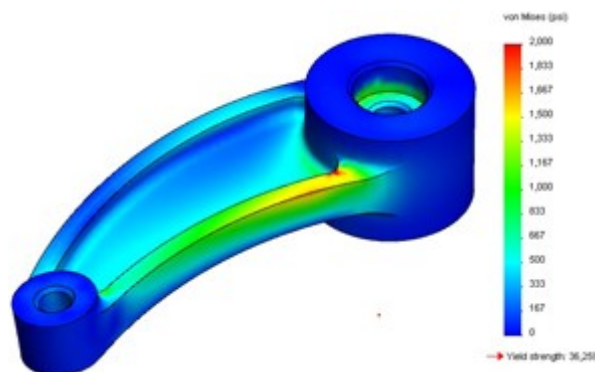


Fonte: metalica.com.br.

5.7 Análise Estrutural

Como destacado anteriormente, a fase de análise, ou pós-processamento, é muito importante na verificação da eficácia de um projeto. Caso as características geométricas, mecânicas e as condições de contorno estejam condizentes, após a discretização dos objetos, o *software* fornecerá resultados a serem analisados pelo projetista (Figura 5.11).

Figura 5.11 – Análise estrutural de uma biela.



Fonte: blog.capinc.com.

Para realizar a análise, o *software* utiliza do critério de falha de Von Mises e desta forma

verifica o estado de tensão na qual os elementos do projeto estão submetidos. Para facilitar a visualização do projetista, os *softwares* de elementos finitos utilizam-se de uma escala gráfica com aplicação de cores, sendo que cores mais quentes representam um estado de tensão e/ou deformação mais elevado (VORCARO, 2003).

Nesta fase o projetista deve então analisar as tensões e as deformações às quais as peças estão submetidas e então definir, de acordo com suas características iniciais de concepção, se o projeto está satisfatório ou não. Sendo que em caso de não atendimento aos requisitos de projeto, conforme mostrado no fluxograma da Figura 5.8, o projeto volta para sua fase de modelagem em CAD para que sejam alteradas características geométricas e/ou mecânicas conforme requisitos de projetos pré-estabelecidos.

Capítulo 6

ANÁLISE E RESULTADOS

A grande motivação para a avaliação formal de uma estrutura veicular tipo *spaceframe*, foi o desenvolvimento e construção artesanal de um veículo de forma empírica, na categoria de automobilismo experimental. As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 , exibem o veículo a ser analisado em toda sua forma, na Figura 6.1 temos o veículo montado, com carenagem de fibra de vidro, na Figura 6.2, o veículo está parcialmente desmontado, apresentando o chassi *spaceframe*, na Figura 6.3, exibe a suspensão do veículo.

A estrutura a ser analisada, que é composta por um chassi tubular, (*spaceframe*) construído com tubos de aço costurado com massa total do veículo montado de 720 kg, e após feita a estrutura no CAD *SOLIDWORKS* foi encontrada a massa do chassi igual a 144,85 kg.

Como dito anteriormente, o modelo foi totalmente construído por meios de maquetes e testes empíricos em escala, sem qualquer simulação computacional.

Figura 6.1 – Veículo experimental montado, com carenagem de fibra de vidro.



Fonte: o autor.

Figura 6.2 – Veículo experimental parcialmente desmontado, mostrando o chassi *spaceframe*.



Fonte: o autor.

Figura 6.3 – Detalhe do chassi e suspensão do veículo experimental.



Fonte: o autor.

A geometria do veículo resultante é consequência de algumas tentativas, simulações com maquetes, e foi construída em modelo virtual no *SOLIDWORKS* para a modelagem computacional em modelo 3D.

Para modelagem, o veículo foi desmontado, facilitando o processo de medição (ângu-

los, comprimento, diâmetro de barra). Todas as medidas tomadas, foram transferidas para o programa, tornando assim mais preciso a simulação.

As Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, mostram parte do processo de medição, utilizando um Goniômetro para medir ângulos. A Figura 6.3 mostra a medição da inclinação da barra lateral, ligando o arco principal ao secundário. Na Figura 6.4, a medição da inclinação barra que liga o arco principal ao secundário. A Figura 6.5, mostra a as réguas utilizadas também na tomada de medidas.

Figura 6.4 – Inclinação da barra lateral.



Fonte: o autor.

Figura 6.5 – Inclinação da barra que faz ligação entre o arco principal e o arco secundário.



Fonte: o autor.

Figura 6.6 – Réguas utilizadas nas medidas.



Fonte: o autor.

Para que as medidas fossem precisas com a utilização do goniômetro (medidor de ângulos), o veículo foi colocado em um piso totalmente nivelado, e algumas partes do veículo também niveladas com esse piso, nas Figuras 6.7, 6.8, e 6.9, temos o goniômetro marcando 0° , o que indica a nivelção.

Na Figura 6.7, goniômetro colocado sobre o para-choque traseiro, marcando 0°

Figura 6.7 – Goniômetro sobre o para-choque traseiro.



Fonte: o autor.

Na Figura 6.8, Goniômetro colocado na lateral do veículo, mostrando que também

está nivelado nessa posição.

Figura 6.8 – Medindo a lateral do veículo.



Fonte: o autor.

Na Figura 6.9, a ferramenta foi colocada na barra do teto do veículo, mostrando que também nessa posição está nivelado, com isso todas as medidas foram criteriosamente tomadas e transferidas para o programa *SOLIDWORKS*.

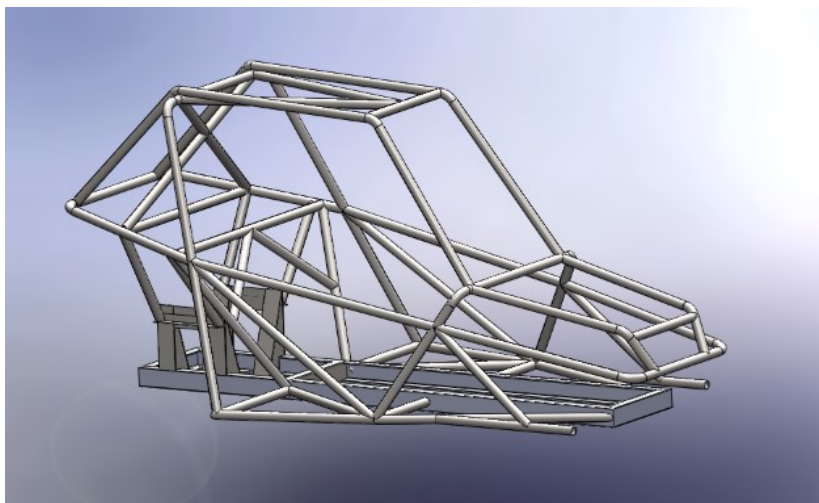
Figura 6.9 – Medição no teto do veículo.



Fonte: o autor.

Com todas as medidas, o chassi foi modelado computacionalmente, como podemos ver na Figura 6.10, exibindo o chassi definitivo em 3D através do programa *SOLIDWORKS* 2015.

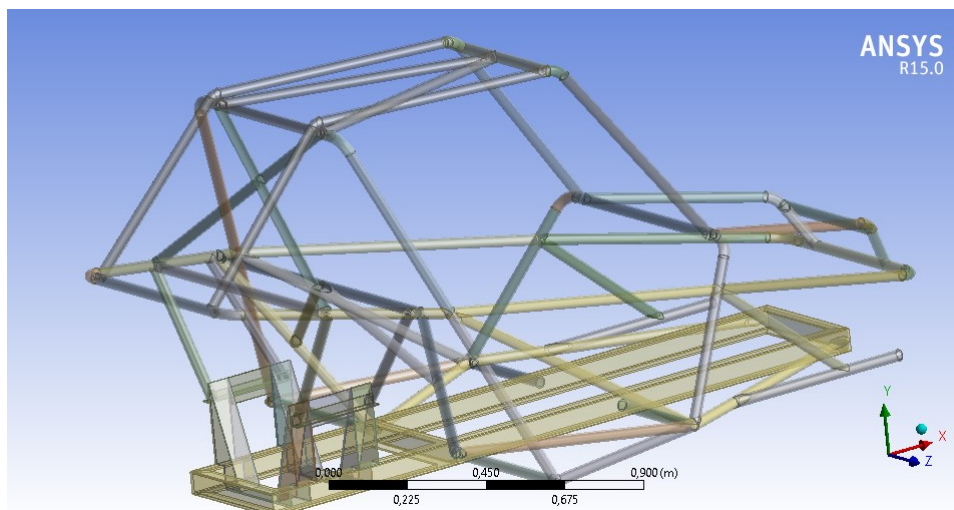
Figura 6.10 – Chassi definitivo em modelo 3D obtido através do programa *SOLIDWORKS* 2015.



Fonte: o autor.

Como citado anteriormente, a respeito das vantagens de se utilizar o *software* de elementos finitos *ANSYS*, o mesmo foi então utilizado com o intuito de realizar as análises estruturais do modelo anteriormente desenhando no *software SolidWorks*, desta forma, importada a geometria, tem-se que, todas as emendas são mostradas na Figura 6.11, através do programa *ANSYS*, mostrando também as bocas de emenda dos tubos.

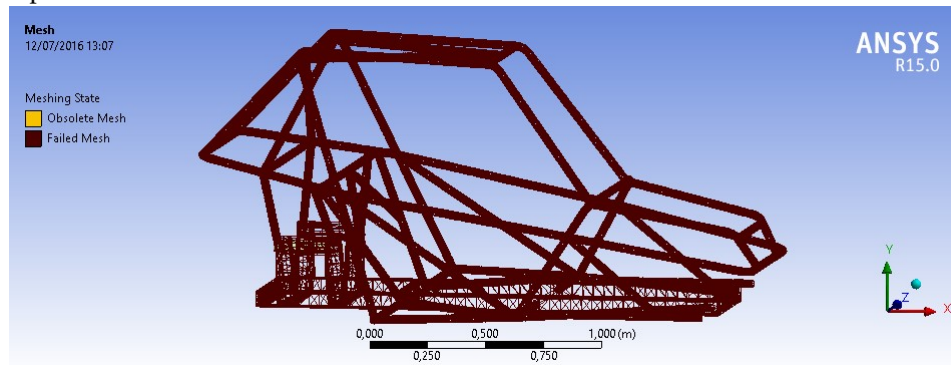
Figura 6.11 – Chassi definitivo em modelo 3D obtido através do programa *ANSYS*, mostrando todas bocas de emenda.



Fonte: o autor.

Na Figura 6.12 verifica-se o chassi modelado, importado para o *software ANSYS*, mostrando a superfície do modelo já malhada, pronta para as análises estruturais.

Figura 6.12 – Chassi definitivo em modelo 3D obtido através do programa ANSYS, mostrando todas malhas para análise.



Fonte: o autor.

6.1 Elemento Utilizado e Convergência de Malha

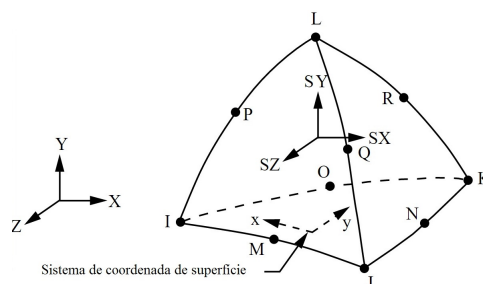
No MEF os resultados estão diretamente ligados à quantidade de elementos que são utilizados na simulação, ou seja, quanto maior o número de elementos, melhor e mais preciso será o resultado. Estes elementos formam uma malha que é o conjunto de elementos e nós (Canut, 2014).

Desse modo, é muito importante estabelecer uma quantidade ideal de elementos a partir de um tamanho determinado pela malha. Neste caso, o parâmetro utilizado é a tensão equivalente de Von Mises.

Considerando o menor custo computacional possível. A convergência de malha é realizada para todos os ensaios computacionais.

Para as simulações numéricas do chassi foi utilizado o elemento tetraédrico quadrático de 10 nós, que é um elemento 3D bastante adequado para a modelagem de malhas irregulares. É definido por nós com três graus de liberdade com translações em x , y e z e pressões podem ser aplicadas nas faces do elemento. Tem como principais características alta elasticidade, grande capacidade de tensão e deflexão e análise de rigidez a partir das tensões (GUIDE, 2010). A Figura 6.13 apresenta o elemento tetraédrico selecionado.

Figura 6.13 – Elemento quadrático tetraédrico 3D de 10 nós.



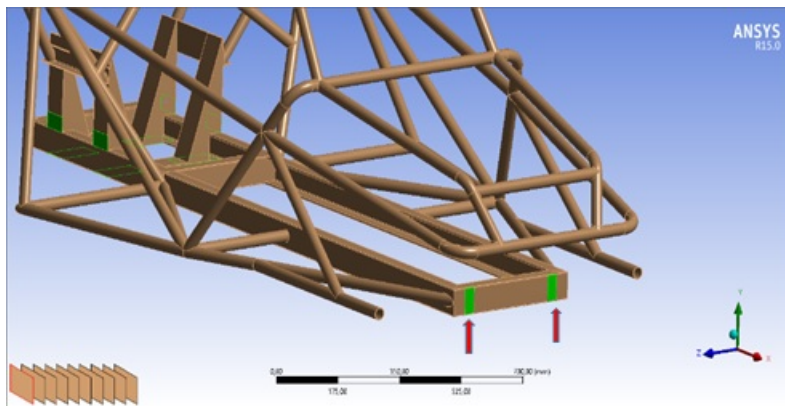
Fonte: (GUIDE, 2010).

6.2 Condições de Contorno e Carregamento

As condições de contorno fixam a peça quanto ao seu deslocamento, para isso, os pontos de fixação são em 6 áreas ao longo do assoalho do veículo, são dois pontos na dianteira, onde é colocada a suspensão, Figura 6.14 e quatro pontos na traseira, onde são colocadas as balanças da suspensão, Figura 6.15. Esses pontos estão destacados na cor verde e apresentam setas indicadoras.

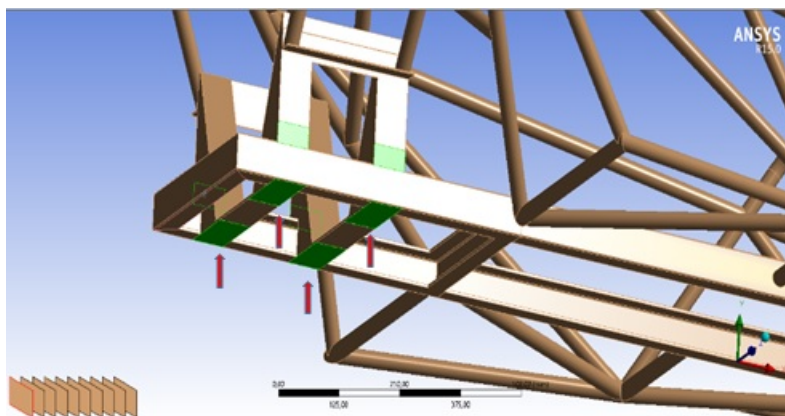
Estas áreas foram desenhadas de forma a minimizar erros relativos à concentração de tensões. Durante as primeiras tentativas foi observado que ao selecionar pontos para fixar o chassi ocorria um pico de tensões no mesmo local o que distancia o ensaio das condições que possam gerar resultados mais consistentes.

Figura 6.14 – Pontos de travamento dianteiro.



Fonte: o autor.

Figura 6.15 – Pontos de travamento traseiro.



Fonte: o autor.

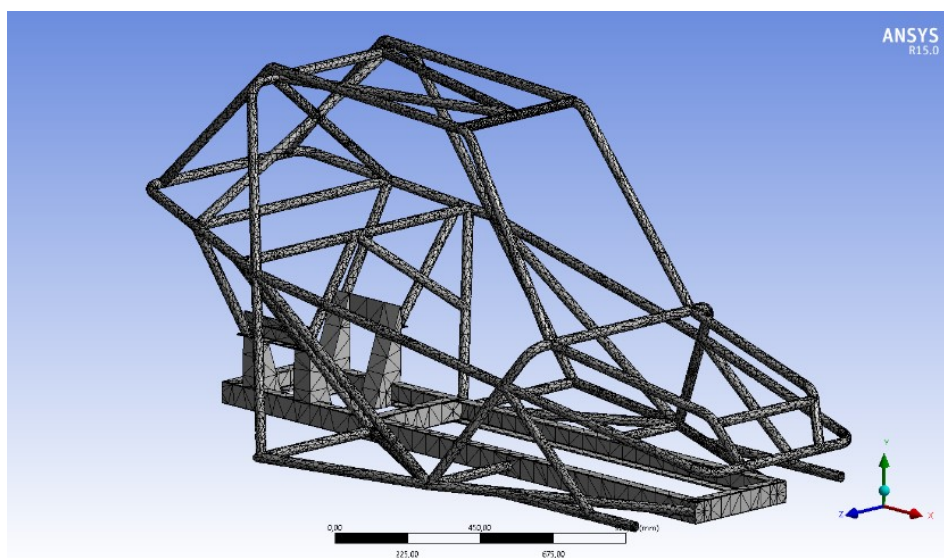
Para geração da malha, no ANSYS foi utilizado o modo “default” em que a malha é

gerada automaticamente e de forma variável se adequando à estrutura proposta, como seguinte procedimento:

1. Malha no modo “*default*”;
2. Após obtenção o resultado observam-se os pontos de maior concentração de tensões e é aplicado ali, o controle de malha;
3. Ou seja, o refinamento de malha é realizado nos locais de maior concentração de tensões e deformações para obter os melhores resultados nestas regiões que, de fato, são as mais relevantes para análise da simulação da estrutura.
4. Controle de malha em 31 faces iniciando em 50 *mm* (*default*) para comprimento de elemento;
5. Controle de malha com 45 *mm* de comprimento;
6. Controle de malha com 25 *mm* de comprimento;
7. Controle de malha com 12,5 *mm* de comprimento;
8. Controle de malha com 5 *mm* de comprimento.

Para a convergência de malha foi escolhido o elemento de 25 *mm* de comprimento, por ser o mais eficiente entre os comprimentos testados, com gasto computacional inferior para uma malha mais refinada. A Figura 6.16 exibe a estrutura já com a malha aplicada.

Figura 6.16 – Chassi com malha.



Fonte: o autor.

Abaixo, a Tabela 6.1 com valores utilizados na geração da malha, com tamanho do elemento, número de elementos, o tempo e a tensão equivalente de Von Mises

Tabela 6.1 – Tabela de convergência da malha.

Convergência de malha			
Tamanho do elemento [mm]	Número de elementos	Tempo [s]	Tensão equivalente de von Mises [MPa]
Default (50)	138652	54,5	143,45
45	176901	101,9	184,86
25	136936	52,2	170,08
12,5	166685	116,3	174,53
5	366165	283,3	266,67

Fonte: o autor.

6.3 Resultados e Discussões

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos nas simulações a partir do método de elementos finitos, sendo assim, as discussões referentes ao modelo bem como análises e sugestões quanto à configuração geométrica do *spaceframe* (chassi tubular).

6.3.1 Simulações Numéricas

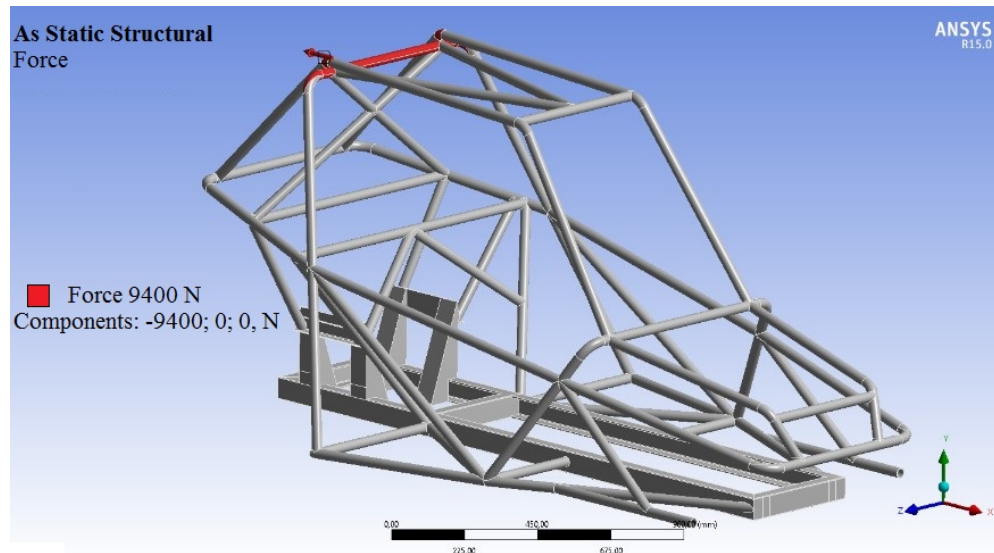
As simulações numéricas do chassi do protótipo servem para analisar a resistência da estrutura a partir de forças aplicadas nos arcos principal e na parte frontal do veículo. Estruturas essas projetadas para envolverem o piloto em pontos vitais com objetivo de garantir a segurança do condutor. O arco principal deve proteger o crânio, pescoço e ombros do ocupante localizado logo atrás da cabeça do piloto, este arco deve estar no mínimo a 50 mm da parte superior do capacete do piloto. Já o arco secundário se localiza mais ao centro do habitáculo logo atrás do volante garantindo proteção às mãos, quadris e membros inferiores acima do joelho. Sobre o ponto mais alto destes arcos foram aplicadas forças nos eixos x, y e z para atestar fatores de segurança condizentes com a tensão de escoamento do material escolhido e deslocamentos que não se excedam a ponto de atingir o piloto. Existe ainda um terceiro arco que protege principalmente os pés, mas segundo a metodologia SAE esforços não serão aplicados sobre este arco.

Para os ensaios estabelecidos foi utilizado um computador portátil (*laptop*), computador este que foi utilizado para todas as simulações deste trabalho, com as seguintes características: Sistema operacional: Windows 10 Home 2015; 64 bits, processador Intel Core i7; Memória RAM: 8 GB; Disco rígido de 1 TB; Placa de vídeo: NVIDIA GeForce GT 745M DDR3/GDDR5.

6.3.2 Análise de capotamento – arco principal

Na Figura 6.17 é mostrado o ponto de aplicação da força no arco principal no sentido x , com força aplicada de -9400 N . Com seta indicadora de direção da força em vermelho.

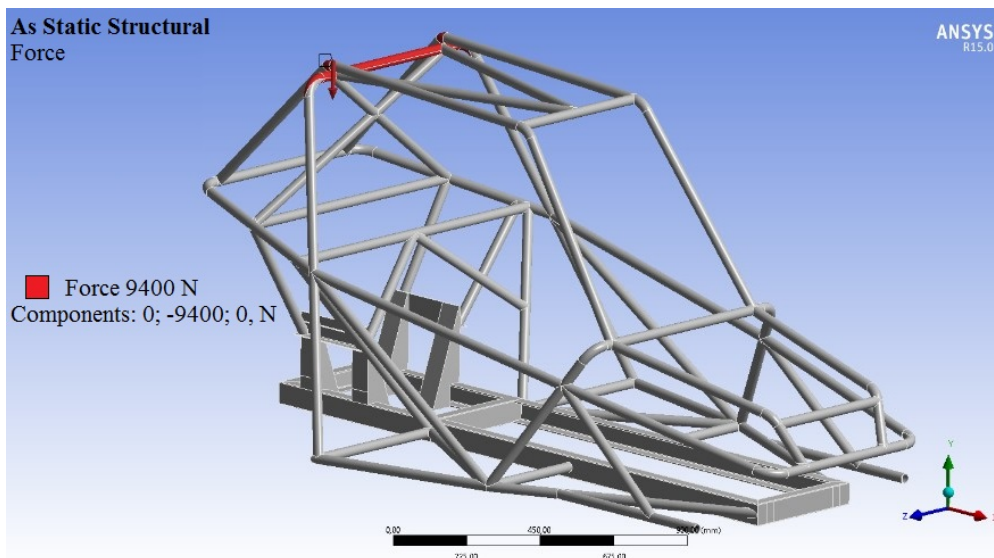
Figura 6.17 – Aplicação de forças no sentido x .



Fonte: o autor.

Na Figura 6.18 é mostrado o ponto de aplicação da força no arco principal no sentido y , com força aplicada de -9400 N . Com seta indicadora de direção da força em vermelho.

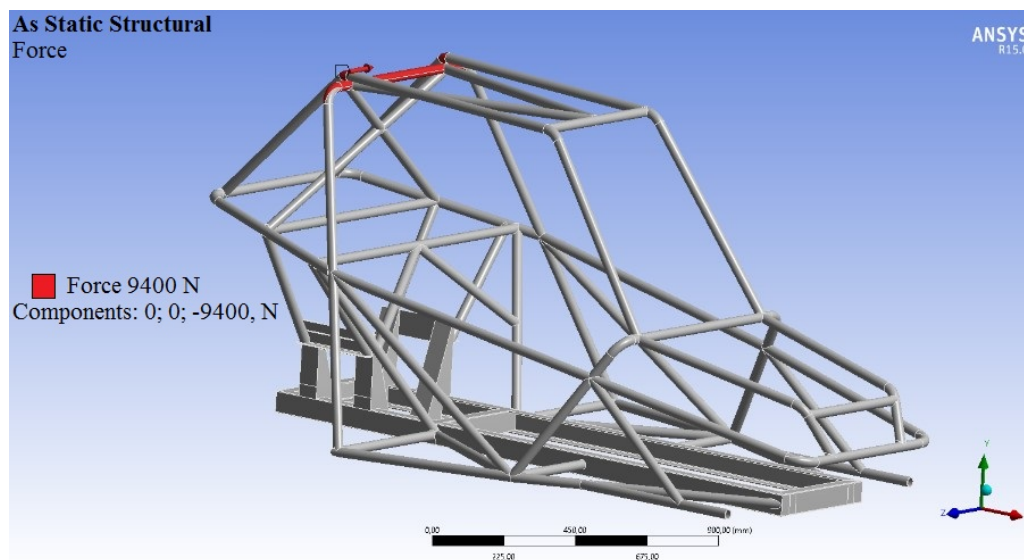
Figura 6.18 – Aplicação de forças no sentido y .



Fonte: o autor.

Na Figura 6.19 é mostrado o ponto de aplicação da força no arco principal no sentido z , com força aplicada de -9400 N . Com seta indicadora de direção da força em vermelho.

Figura 6.19 – Aplicação de forças no sentido z .



Fonte: o autor.

Na Tabela 3, temos um resumo dos resultados obtidos para as simulações x , y e z , aplicadas no arco principal.

Tabela 6.2 – Resultados obtidos na simulação dos eixos x , y e z , para o arco principal.

Resultados da simulação para o chassi – arco principal			
Direção de aplicação das forças	Direção Lateral (x)	Direção Vertical (y)	Direção Longitudinal (z)
Tensão equivalente de von Mises [MPa]	536,67	170,08	469,71
Deslocamento máximo equivalente [mm]	5,807	1,515	13,934
Deslocamento direcional x	0,14	0,635	1,345
Deslocamento direcional y	5,599	0,056	6,037
Deslocamento direcional z	0,88	0,356	0,523
Deformação máxima equivalente [mm/mm]	0,004223	0,001067	0,002687
Fator de segurança para escoamento	0,65216	2,0579	0,74515

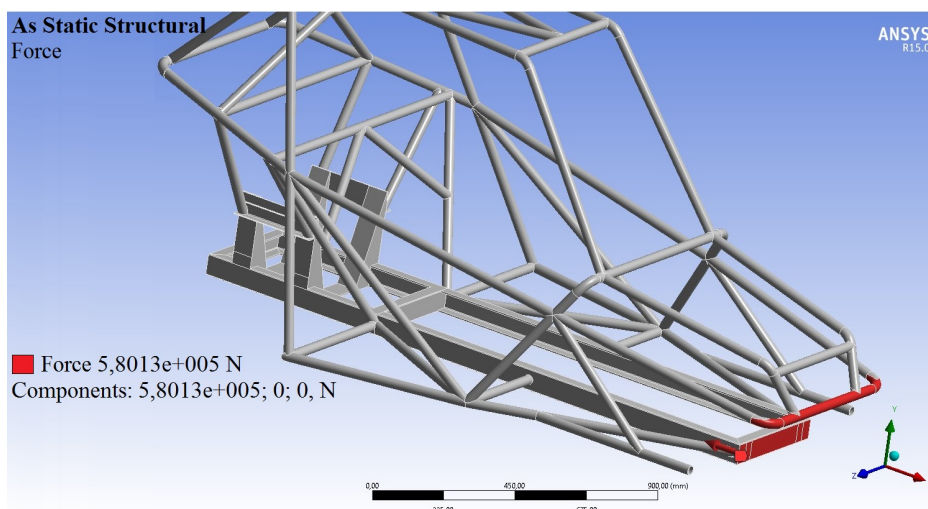
Fonte: o autor.

Para a verificação das condições de segurança e confiabilidade do modelo criado empiricamente, duas importantes análises foram realizadas, sendo elas, análises de colisão frontal, considerando velocidades de 80 km/h e 60 km/h aplicadas ao protótipo.

6.3.3 Análise de impacto frontal (80 km/h)

Estabelecidas as análises a serem realizadas, foram aplicadas condições de engastamento tal qual mostrados nas Figuras 6.13 e 6.14, sendo que, as condições iniciais de carregamentos são distintas devido ao tipo de análise que foi realizada. Foram aplicadas cargas axiais no eixo x sobre a superfície da tubulação frontal, isto devido ao fato de ser responsável por sofrer as primeiras deformações oriundas de impactos frontais, conforme ilustrado na Figura 6.20.

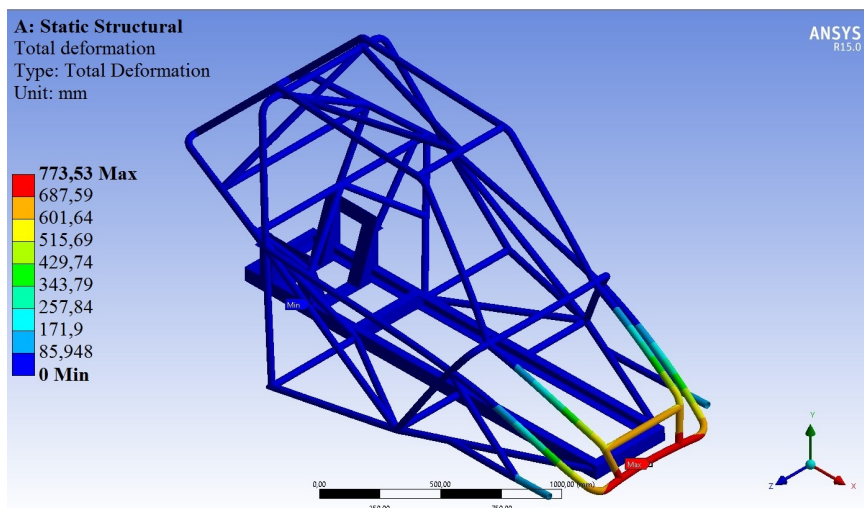
Figura 6.20 – Superfícies que sofrem os primeiros impactos frontais.



Fonte: o autor.

Aplicada a força oriunda do impacto frontal (12.446 MPa), realizada as devidas simulações no *software* de MEF, é possível que se obtenha todas as deformações nas tubulações do chassi, conforme ilustrado na Figura 6.21.

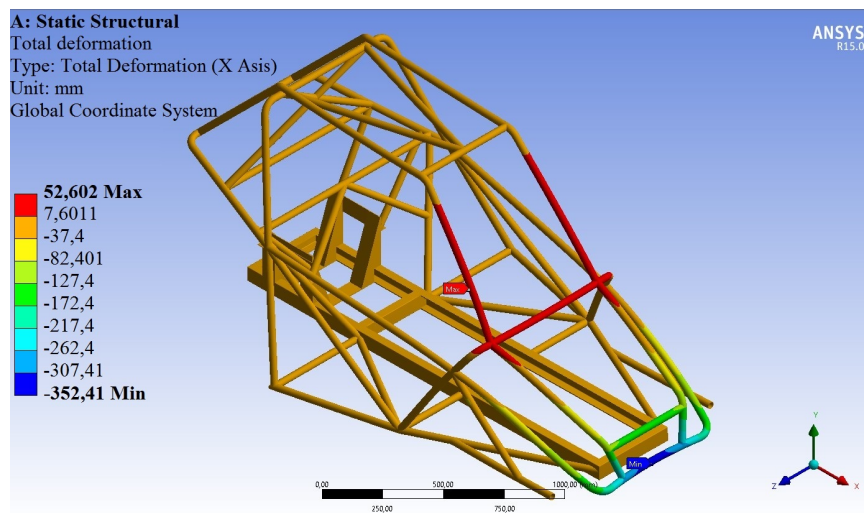
Figura 6.21 – Deformações oriundas dos impactos frontais.



Fonte: o autor.

Além da deformação total mostrada anteriormente, é possível avaliar as deformações resultantes nas direções de cada eixo coordenado, e em todas as componentes do *space-frame*, possibilitando uma análise mais minuciosa a respeito da confiabilidade e segurança do veículo. Na Figura 6.22 abaixo são mostradas as deformações na direção do eixo x , com 352,41 mm de máxima deformação, no sentido negativo de x , de acordo com eixo de referência destacado na Figura 6.22.

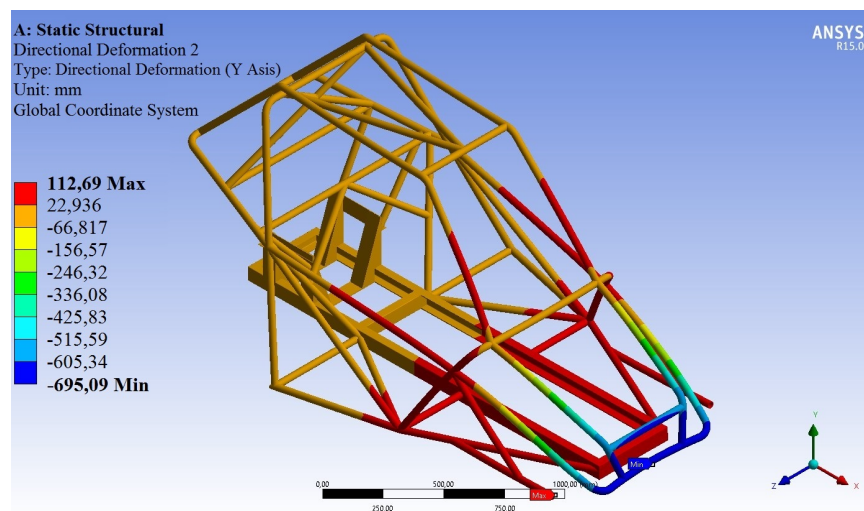
Figura 6.22 – Deformações na direção do eixo x .



Fonte: o autor.

Em seguida, são mostradas as deformações na direção do eixo y , onde obteve-se deformações máximas da ordem de 695,0941 mm de máxima deformação, no sentido negativo de y , de acordo com eixo de referência destacado na Figura 6.17 abaixo.

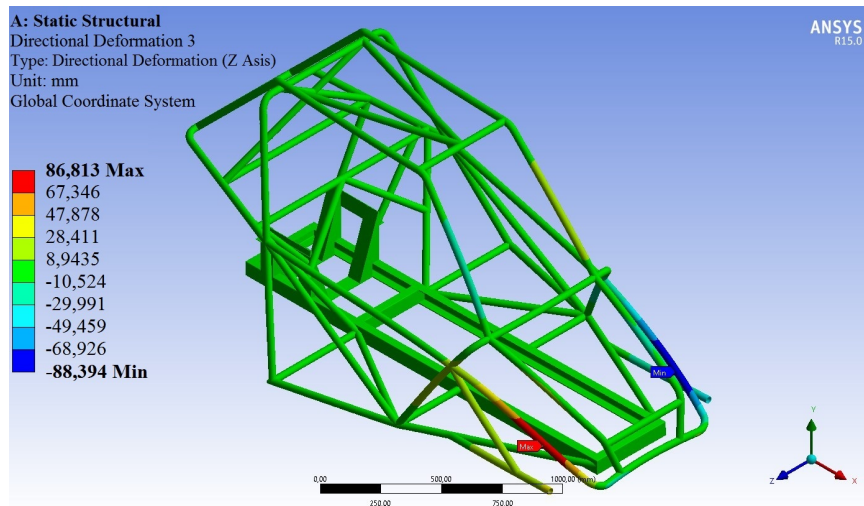
Figura 6.23 – Deformações específicas para o eixo y .



Fonte: o autor.

Não menos importante, as simulações referentes aos deslocamentos direcionais no eixo z também foram simuladas, resultando em deformações da ordem de 86 mm nos travamentos dianteiro direito do veículo analisado, conforme ilustrado na Figura 6.24.

Figura 6.24 – Deformações específicas para o eixo z .



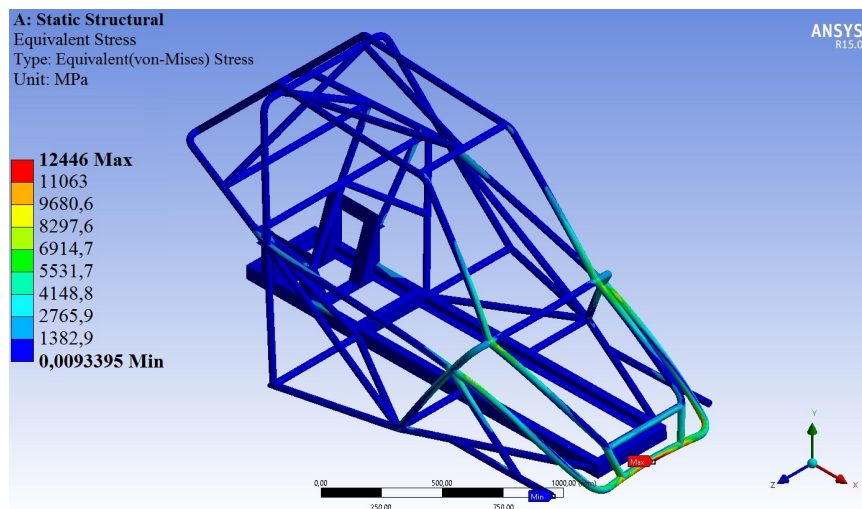
Fonte: o autor.

Uma importante análise a ser realizada é a tensão equivalente de Von Mises, que conforme mencionado anteriormente, analisa o estado plano de tensão do elemento e o compara com as tensões de escoamento do material, com isso, é possível verificar indícios de escoamento de um material sólido, onde, antes do escoamento a resposta do material é tida como elástica.

Com isso, projetistas se utilizam amplamente deste e de outros critérios para analisar a confiabilidade de um projeto conforme ilustrado na Figura 6.25, onde verifica-se uma tensão máxima de 12.446 Mpa , na tubulação frontal onde, não coincidentemente, é o ponto de aplicação do choque frontal.

Vale ressaltar, que como o aço utilizado no projeto possui tensão de escoamento de aproximadamente 350 Mpa . Isto possibilita estabelecer uma relação entre os patamares de tensões atingidos nas duas análises e a tensão de escoamento do material, obtendo-se assim o fator de segurança para escoamento Tabela 6.2.

Figura 6.25 – Tensão Von Mises.



Fonte: o autor.

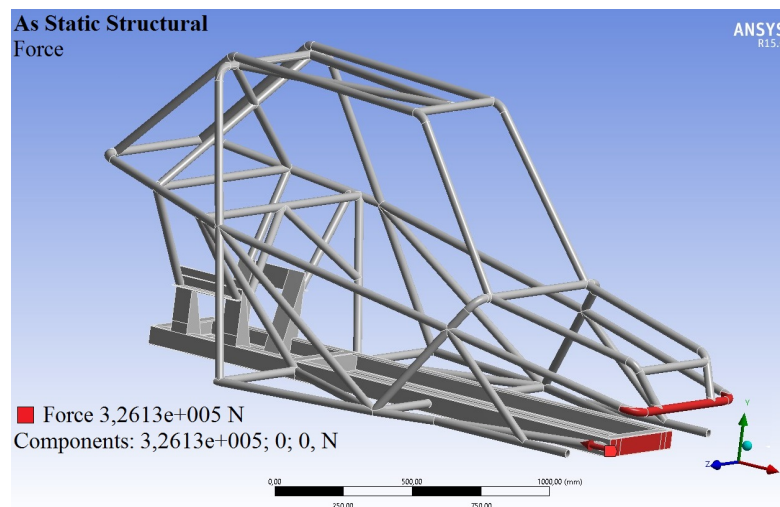
Apesar da simulação referente a colisões ser bastante crítica se tratando de um veículo colidindo a 80 km/h contra um alvo fixo, é importante ressaltar que as simulações realizadas na indústria automotiva são realizadas em torno de 60 km/h contra blocos de concreto ou metais indeformáveis, pois, existem estudos que indicam que grande parte dos acidentes que envolvem vítimas, ocorrem próximos dessa velocidade, considerando que, veículos que trafegam a velocidades superiores, em geral, acabam freando e reduzindo suas velocidades para valores próximos de 60 km/h .

Com isso, é importante que se destaque que os valores obtidos para as simulações de colisão 100% frontal com velocidades de 80 km/h são situações extremamente críticas, não devendo assim inviabilizar completamente projetos estruturais automotivos, cabendo assim, uma análise das simulações para impactos frontais à 60 km/h .

6.3.4 Análise de impacto frontal (60 km/h)

De modo análogo às análises referentes ao impacto de 80 km/h , as simulações de 60 km/h foram conduzidas, de forma que a única variável a ser alterada é a força, pois houve variação da velocidade de impacto, permanecendo constante as outras condições de contorno, mostrado na (Figura 6.26).

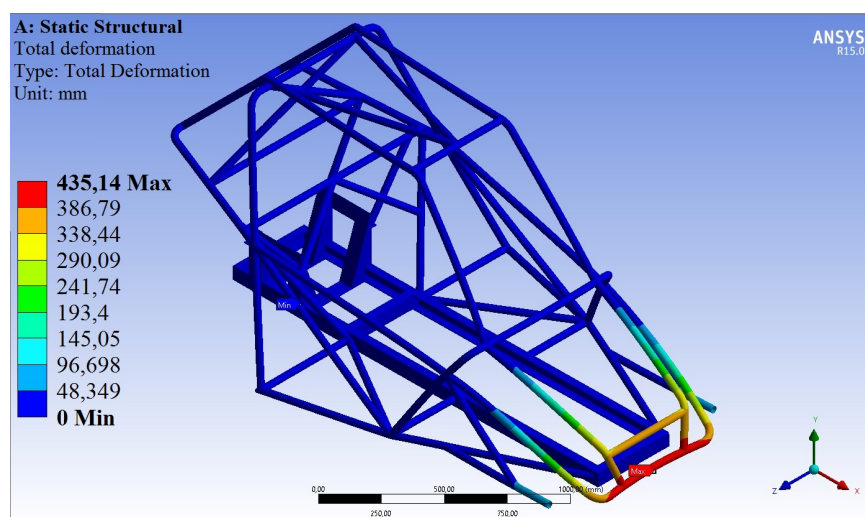
Figura 6.26 – Aplicação do carregamento referente ao impacto frontal à 60 km/h.



Fonte: o autor.

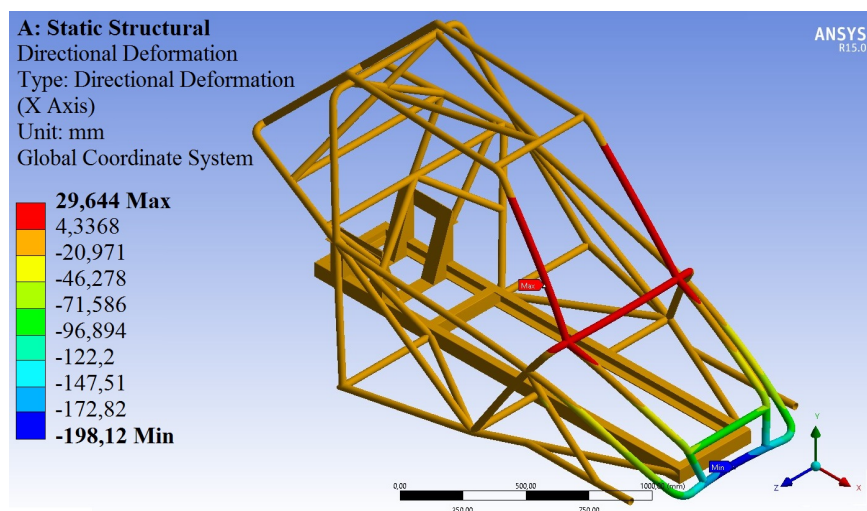
Simuladas as condições de contorno, consideradas anteriormente, os resultados obtidos são exibidos na Figura 6.27, com destaque para as deformações totais devido à colisão.

Figura 6.27 – Deformações totais à 60 km/h.



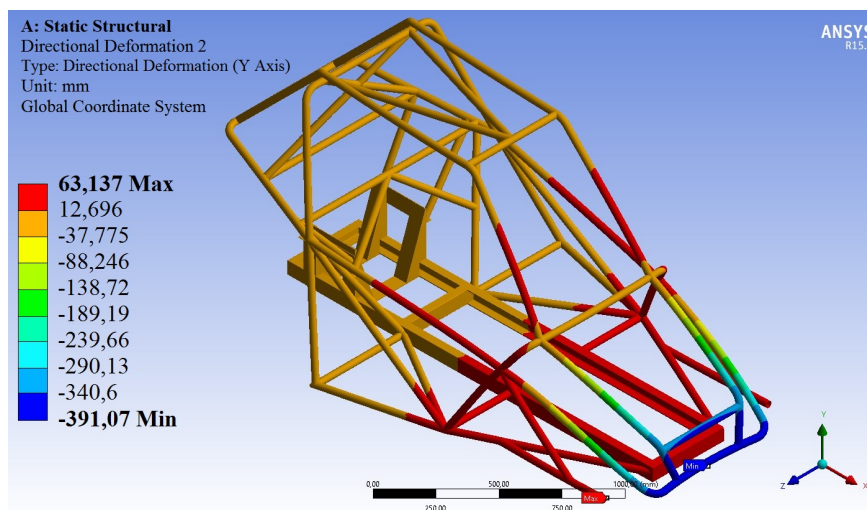
Fonte: o autor.

Considerando sua importância da análise de deformação direcional, a Figura 6.28 exhibe os deslocamentos direcionais referentes ao eixo *x*.

Figura 6.28 – Deformações no eixo x à 60 km/h.

Fonte: o autor.

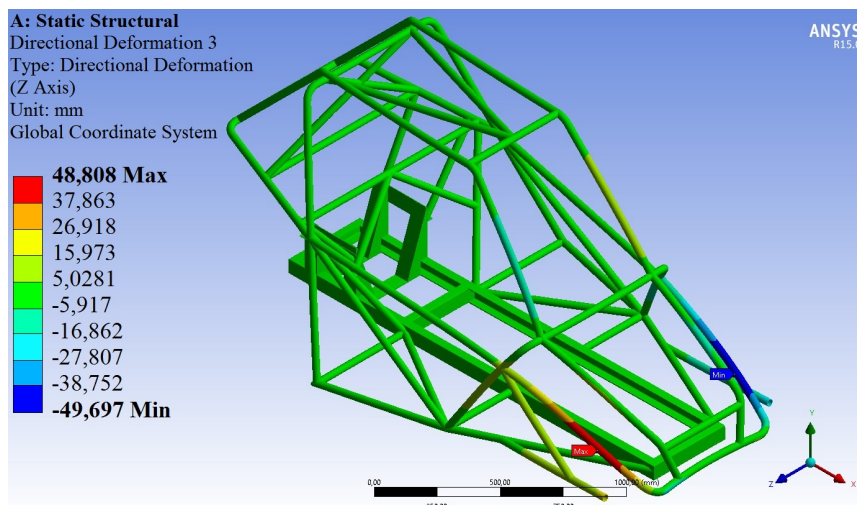
Na Figura 6.29 são mostrados os deslocamentos direcionais no eixo y .

Figura 6.29 – Deformações no eixo y à 60 km/h.

Fonte: o autor.

E na Figura 6.30, são mostrados os deslocamentos direcionais do eixo z .

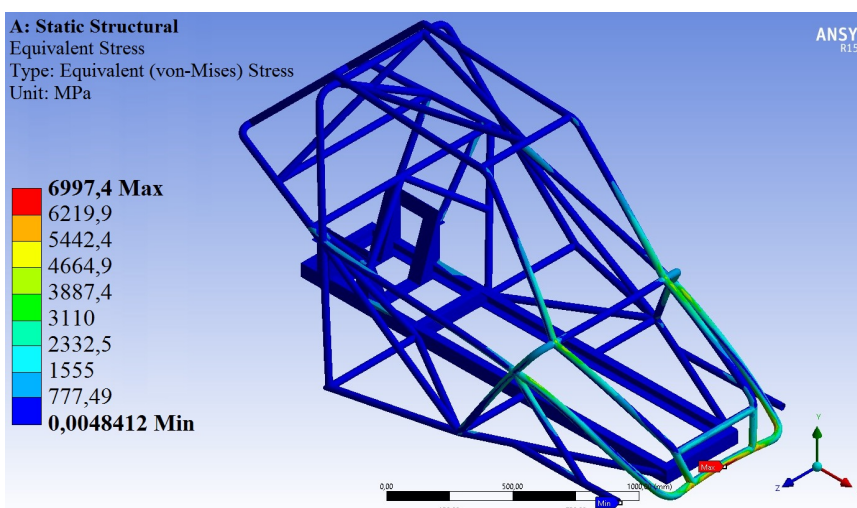
Figura 6.30 – Deformações no eixo z à 60 km/h.



Fonte: o autor.

Da mesma forma que para 80 km/h, as análises de Von Mises compõem o quadro de resultados a serem utilizados na análise de confiabilidade e segurança de estruturas automotivas, conforme ilustrado na Figura 6.31 abaixo.

Figura 6.31 – Tensão de Von Mises à 60 km/h.



Fonte: o autor.

Após realizadas as análises, foi realizada uma compilação dos dados principais das simulações a fim de verificar o comportamento, quanto à rigidez estrutural, segurança e confiabilidade, da estrutura automotiva aqui proposta, conforme ilustrado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Resultados compilados para a colisão frontal.

Direção de aplicação da força	80 km/h	60 km/h
Tensão equivalente de von Mises [MPa]	12446	6997,4
Deslocamento máximo equivalente [mm]	773.53	435,14
Deslocamento direcional x	52.602	29,644
Deslocamento direcional y	112,69	63,167
Deslocamento direcional z	86,813	48,808
Deformação máxima equivalente [mm/mm]	0,0756	0,04253
Fator de segurança para escoamento	0,0281	0,05002

Fonte: o autor.

Visto a tabela compilada com os dados acima, verifica-se que o comportamento obtido para protótipo, em colisões frontais, atinge tensões equivalentes altas, verificando-se o patamar de 12 GPa , o que para condições estáticas de funcionamento representaria um coeficiente de segurança ínfimo. Entretanto, vale ressaltar que essas análises foram feitas para condições de impacto, ou seja, aplicações de forças excessivas em pontos específicos, originando altíssimos valores de tensão como observado e resultando em deformações já esperadas devido a superposição da tensão de escoamento do material utilizado. O importante então, neste tipo de análise, é determinar as máximas variações do deslocamento das barras, verificando assim, a integridade e segurança do projeto desenvolvido.

Para análise de deslocamento, em estruturas veiculares do tipo *spaceframe*, a norma regulamentadora da SAE-Brasil, especifica para veículos com chassi tubular, monoposto e para competições, que em condições críticas (como exemplo o impacto frontal), as deformações do habitáculo do monoposto não devem chegar ao patamar de 152 mm dos órgãos vitais do piloto, protegendo desta forma, cabeça e tronco dos ocupantes do veículo. Com isso, vale verificar que as maiores deformações ocorrem nas barras frontais e suas deformações são no eixo y , no sentido contrário ao de aproximação do piloto, como destacado anteriormente.

Em relação ao deslocamento no eixo x , eixo de aplicação das forças, não foram verificados deslocamentos excessivos, garantindo assim a integridade do piloto.

Capítulo 7

CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Com o que foi apresentado, a respeito das atividades aqui desenvolvidas, é possível que se enumere as conclusões mais relevantes e se aponte ainda as proposições de trabalhos a serem desenvolvidos nesta linha de pesquisa.

Partindo dos conceitos iniciais, referentes a estruturas veiculares, foi realizada uma revisão bibliográfica, garantindo assim a fundamentação teórica do trabalho, na qual foram mostradas ainda as diferentes usabilidades de arranjos de chassi, na qual suas características específicas se destacam em diferentes características e segmentos de veículos. Nesta linha, foram apresentados todos os requisitos necessários para a concepção de um de chassi adequado com as suas características de projeto.

Foram destacadas, ainda, neste trabalho, as tendências na utilização de ferramentas poderosas, como exemplo, os *softwares* de CAD e CAE na concepção de projetos de chassi, com destaque na utilização do método dos elementos finitos para análise de esforços, visto que os mesmos representam com boa precisão o comportamento de sistemas reais, sendo economicamente viáveis por evitarem a construção desnecessária de protótipos físicos. Onde destaca-se que o *software* ANSYS, em seu pacote CAE, se mostrou eficaz para análises estruturais de chassi do tipo *spaceframe* (tubular).

Para a simulação da gaiola, criada anteriormente de forma empírica, a mesma foi modelada através do *software* de CAD *SOLIDWORKS* e, em seguida, simulada através de elementos finitos com o módulo CAE presente no programa ANSYS. No que diz respeito as condições de simulação, a base do chassi foi engastada, simulando uma situação crítica de operação do veículo, tendo em vista que os componentes de suspensão presentes em veículos dissipam as forças aplicadas sobre o mesmo. Além dos engastamentos, verifica-se que foram aplicadas cargas distribuídas sobre barras específicas, o que também é tido como condição crítica, já que, na maioria dos acidentes (capotamento, choque frontal, lateral, etc.) o

choque é distribuído sobre uma quantidade maior de barras.

Tendo em vista as condições críticas de contorno, nas quais o chassi foi simulado, como visto na metodologia, foram ainda aplicadas nestas condições duas situações de colisões, sendo uma delas a 60 *km/h* e a segunda a 80 *km/h*. Para determinação da força oriunda da colisão foi utilizada a segunda lei de Newton que diz que força é igual a massa multiplicada pela aceleração ($F = m.a$) e sendo realizado pelo método de elementos finitos uma análise de esforços para a aplicação de cargas verticais, laterais e frontais para o chassi em estudo.

Analizando a regulamentação que mais se aproxima para este tipo de construção de protótipo, que utiliza chassis do tipo *spaceframe*, a SAE-BRASIL, em sua norma regulamentadora (SAE 2013 RBSB 7) para veículos monopostos de chassi tubular, estabelece que em qualquer circunstância de operação do veículo, as tubulações superiores, laterais ou frontais não devem ultrapassar uma distância de 152 *mm* exigidos da cabeça do piloto.

Desta forma, como verificado nas análises realizadas, o maior descolamento direcional obtido foi no eixo *y*, cujo valor é de 112,69 *mm*, obtido para o choque realizado a 80 *km/h*. Desta forma, como sugerido pela SAE, a estrutura aqui simulada demonstrou, computacionalmente, níveis satisfatórios de rigidez. É importante destacar que a deformação das barras do chassi se faz necessária devido ao armazenamento e dissipação de energia oriundas do carregamento externo aplicado, acarretando na diminuição do impacto no piloto gerado pela desaceleração da estrutura, aumentando significativamente as chances de sobrevivência do piloto, o que agrega ao chassi, aqui desenvolvido, confiabilidade e segurança.

Tendo em vista que o chassi desenvolvido empiricamente e simulado computacionalmente revelou resultados satisfatórios quanto sua confiabilidade e segurança, não são necessárias incremento de barras ou modificação da geometria do sistema.

Como sugestão de trabalhos futuros considera-se que seria interessante a realização de uma análise dinâmica do modelo, verificando assim as suas frequências naturais a fim de que não coincidam com frequências de operação do veículo, evitando o fenômeno da ressonância e consequentemente trincas e falhas indesejáveis.

É necessário ainda que seja realizado um estudo mais aprofundado do veículo completo, analisando assim o incremento dos componentes de suspensão, incluindo o amortecedor, a fim de obter valores mais condizentes com a realidade.

REFERÊNCIAS

CASTRO, B. M. *Chassis: Estudo dos pneus e rodas*. São José dos Campos, 2009. Citado na página 36.

CHANDRA, M. R.; SREENIVASULU, S.; HUSSAIN, S. A. Modeling and structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Citeseer, v. 2, n. 4, p. 2594–2600, 2012. Citado na página 25.

COSTIN, M.; PHIPPS, D. *Racing and sports car chassis design*. [S.l.]: Bentley Pub, 1967. Citado 3 vezes nas páginas 35, 39 e 42.

EXOMOTIVE. 2015. Disponível em: <<http://exomotive.com/exocet/>>. Acesso em: 01/05/2015. Citado na página 38.

FILHO, R. R. P. Conceção, projeto e otimização de uma estrutura para aplicação em veículo de uso misto. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

FORINI, S. H. *Incorporação de Argilas Esmectíticas em Plastisol*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 33.

FURTADO, D. C. Análise estrutural de chassi de veículos automotivos. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 36, 43, 44 e 45.

GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. [S.l.], 1992. Citado 5 vezes nas páginas 36, 37, 38, 40 e 41.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. *Corte e Conformação de Metais*, v. 4, n. 44, p. 26–57, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

GUIDE, A. F. U. *Version 12*. [S.l.], 2010. Citado na página 63.

HAPPIAN-SMITH, J. *An introduction to modern vehicle design*. [S.l.]: Elsevier, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 36, 49 e 50.

KLOECKNER. *Manual Técnico de Tubos de Aço Carbono com Costura*. 2011. Citado na página 33.

LOTTERMANN, J. P. T. Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibaja: análise numérica e experimental. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 42, 46 e 48.

- NDH. 2015. Disponível em: <<http://ndh.vn/>>. Acesso em: 11/03/2015. Citado na página 38.
- NICOLAZZI, L. C. Apostila de veículos. UFSC, Florianópolis. Cedida pelo próprio autor, por meio eletrônico, 2008. Citado na página 42.
- NORTON, R. L. *Cinemática e dinâmica dos mecanismos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2010. Citado na página 53.
- OLIVEIRA, F. C. G. d. Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- ONU. *Conferência internacional de transporte sustentável*. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/>>. Acesso em: 22/06/2015. Citado na página 24.
- REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. *The automotive chassis: engineering principles*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2001. Citado na página 39.
- SETTON, E.; SENATORE, M. Estudo comparativo entre tubos de aço inoxidável austenítico com e sem costura. *SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL*, v. 7, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. *Projeto de engenharia mecânica*. [S.l.]: Bookman, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 41.
- SOUZA, M. A. *Chassis: Estudo dos pneus e rodas*. [S.l.], 1990. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- STONE, R.; BALL, J. K. *Automotive engineering fundamentals*. [S.l.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 42.
- TAVARES, J. M. R. S.; FONSECA, J. Introdução ao solidworks: análise de tensões e peças – simulationxpress. *Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- VORCARO, R. S. T. Análise de tensões em perfil soldado comparação de resultados em elementos finitos. 2003. Citado na página 56.
- YAN, L. T. W. Análise estrutural utilizando o método de elementos finitos de componentes do veículo baja sae submetidos a esforços de fadiga. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

APÊNDICE A

VALORES ENCONTRADOS NO CAD *SOLIDWORKS*

Propriedades de massa de Chassi3 pronto

Configuração: Valor predeterminado<Como usinado>

Sistema de coordenadas: – valor predeterminado –

Densidade = 0.00000790 quilogramas por milímetro cúbico

Massa = 144.85937751 quilogramas

Massa de solda total = 0.00000000 quilogramas

Volume = 18336630.06511761 milímetros cúbicos

Área de superfície = 9091533.04417354 milímetros quadrados

Centro de massa: (milímetros)

$x = 218.26124975,$

$y = 337.48219694,$

$z = 0.16997169.$

Eixos principais de inércia e momentos de inércia principais: (quilogramas * milímetros quadrados)

Tomado no centro da massa.

$I_x = (0.96971131, -0.24425392, 0.00005009),$

$P_x = 31882674.70796670,$

$I_y = (-0.00170511, -0.00697453, -0.99997422),$

$P_y = 79482069.00116110,$

$I_z = (0.24424797, 0.96968623, -0.00717976),$

$$P_z = 79954459.46357992.$$

Momentos de inércia: (quilogramas * milímetros quadrados)

Obtido no centro de massa e alinhado com o sistema de coordenadas de saída.

$$L_{xx} = 34750635.07560084,$$

$$L_{xy} = -11386074.89754211,$$

$$L_{xz} = 3140.62114132,$$

$$L_{yx} = -11386074.89754211,$$

$$L_{yy} = 77086474.86415896,$$

$$L_{yz} = 2706.42791355,$$

$$L_{zx} = 3140.62114132,$$

$$L_{zy} = 2706.42791355,$$

$$L_{zz} = 79482093.23294807.$$

Momentos de inércia: (quilogramas * milímetros quadrados)

Tomados no sistema de coordenadas de saída.

$$I_{xx} = 51249286.99208546,$$

$$I_{xy} = -715836.56907701,$$

$$I_{xz} = 8514.64815108,$$

$$I_{yx} = -715836.56907701,$$

$$I_{yy} = 83987286.18439797,$$

$$I_{yz} = 11015.91227593,$$

$$I_{zx} = 8514.64815108,$$

$$I_{zy} = 11015.91227593,$$

$$I_{zz} = 102881548.09958808.$$

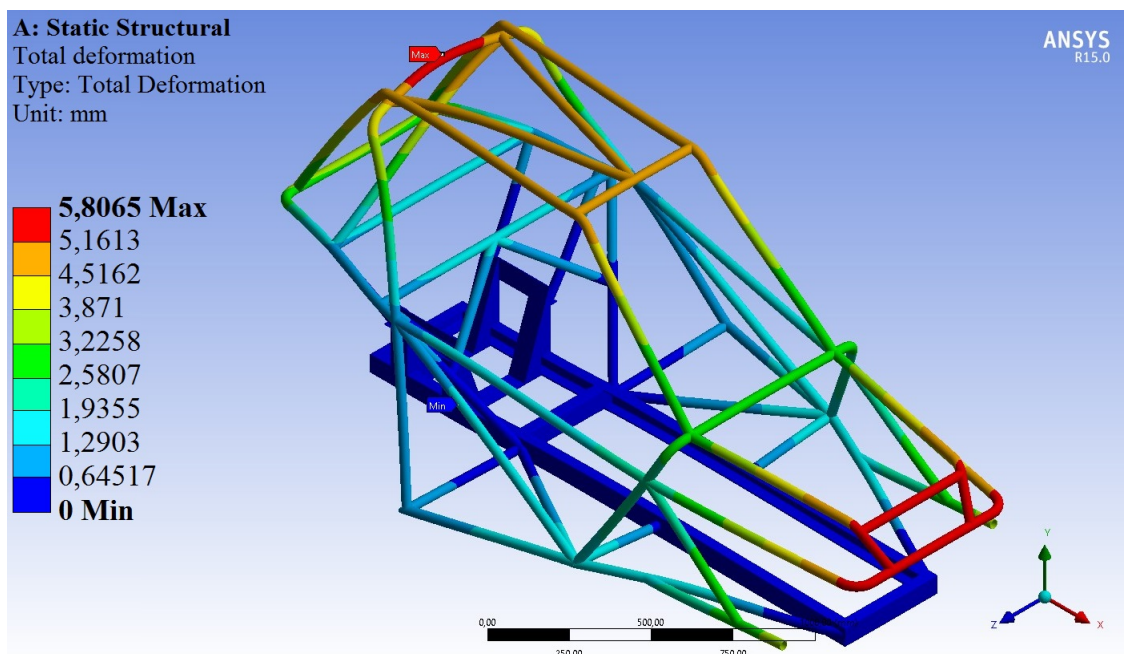
APÊNDICE B

IMAGENS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO PROGRAMA ANSYS

ENSAIO 1: Aplicação de forças no arco principal:

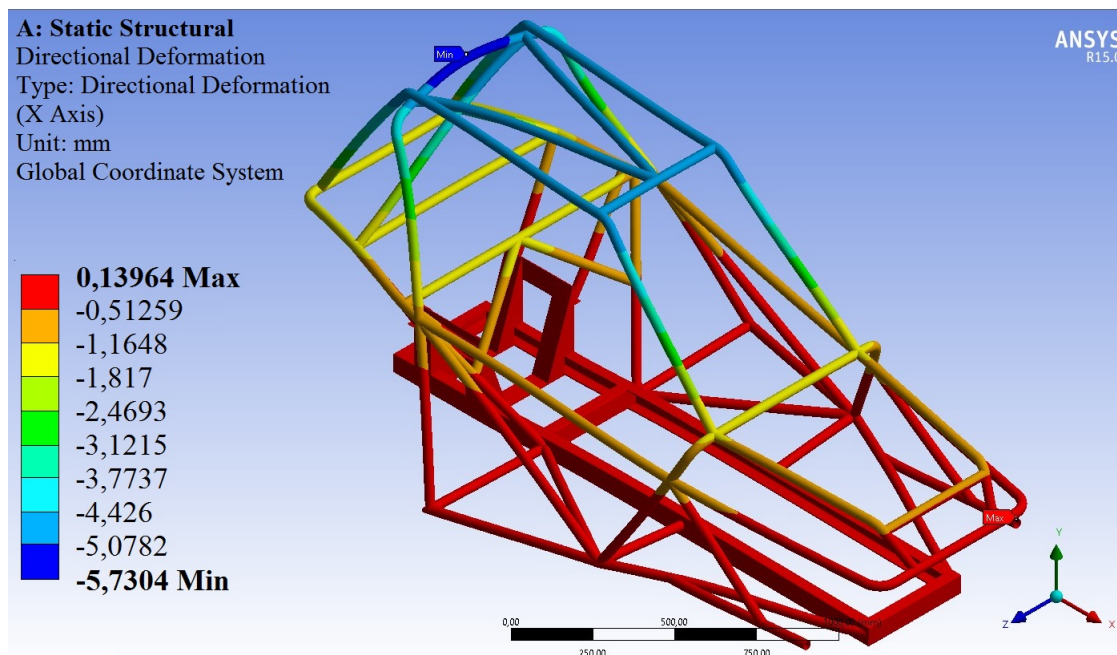
Força lateral de -9400 N no sentido x :

Figura B.1 – Força lateral na direção x , Deslocamento total.



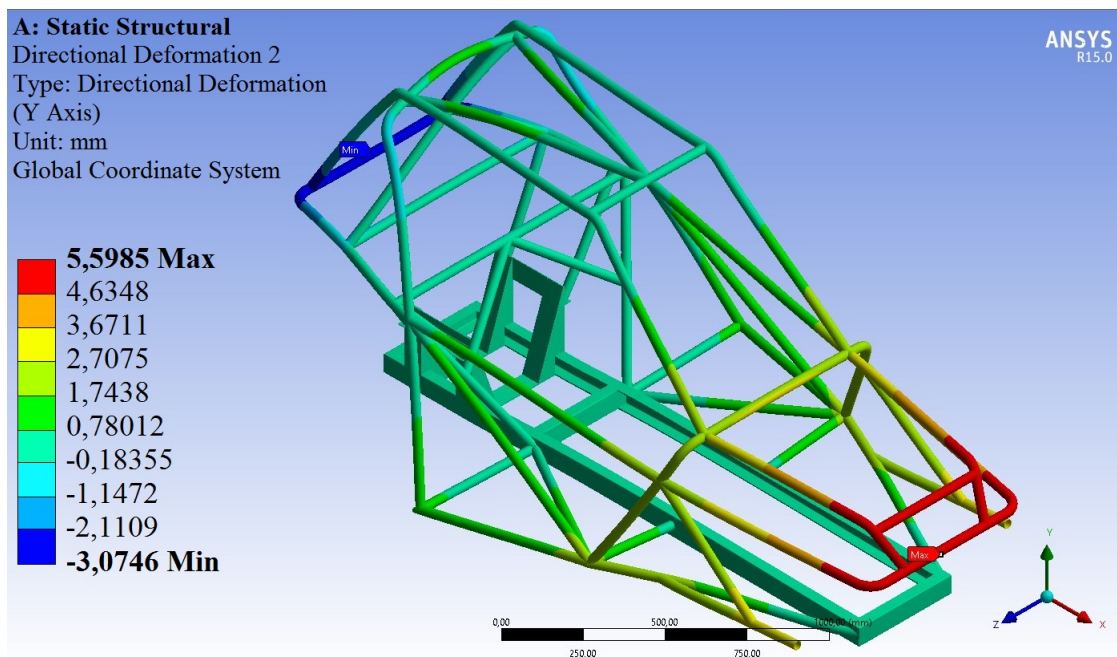
Fonte: o autor.

Figura B.2 – Força lateral na direção x, Deslocamento na direção x.



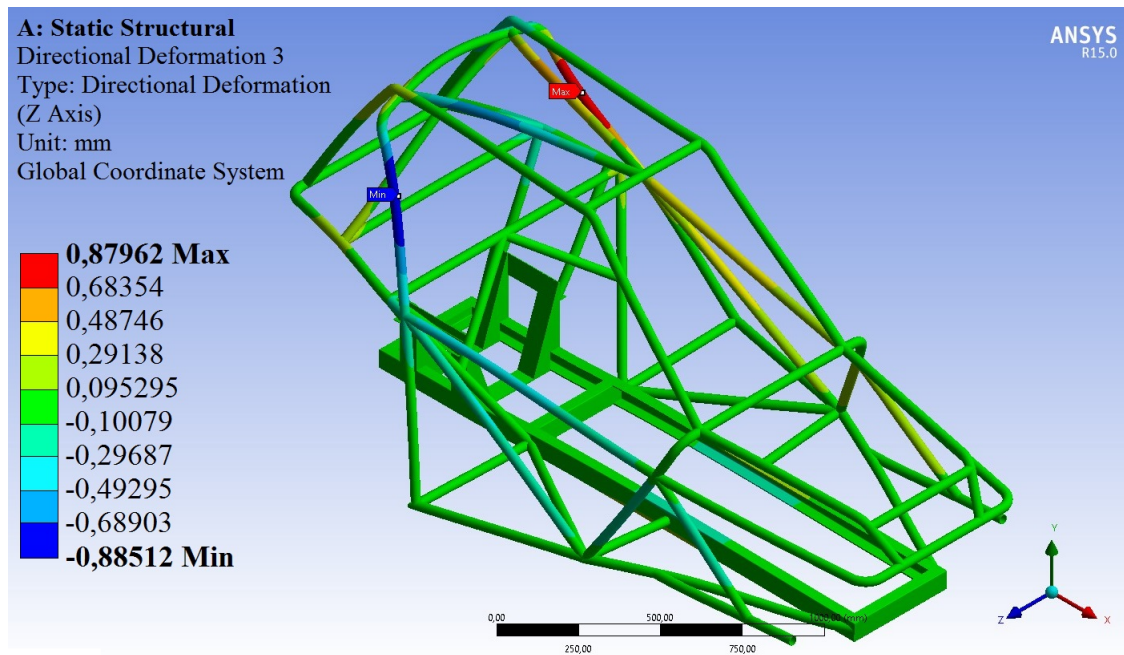
Fonte: o autor.

Figura B.3 – Força lateral na direção x, Deslocamento na direção y.



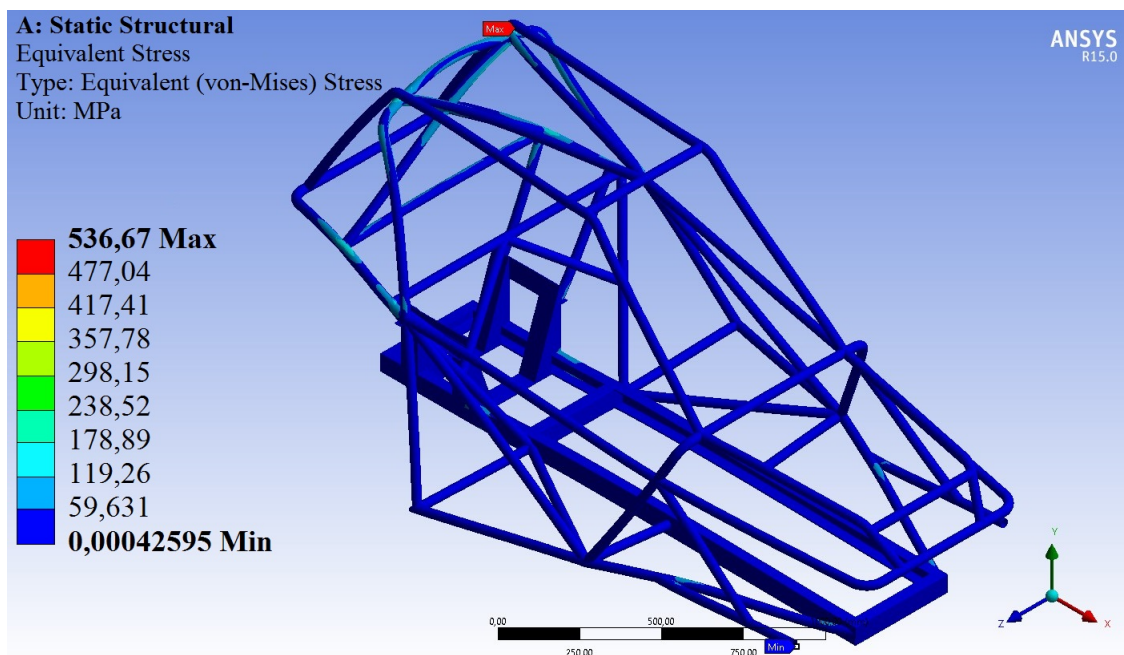
Fonte: o autor.

Figura B.4 – Força lateral na direção x , Deslocamento na direção z .



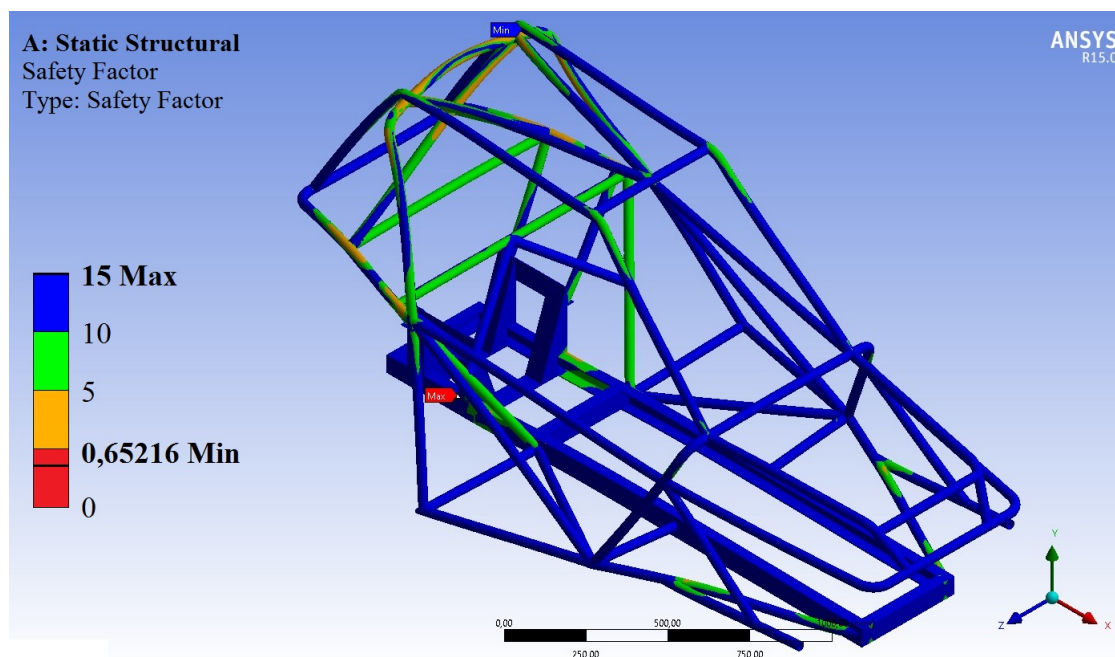
Fonte: o autor.

Figura B.5 – Força lateral na direção x , Tensão equivalente de Von Mises.



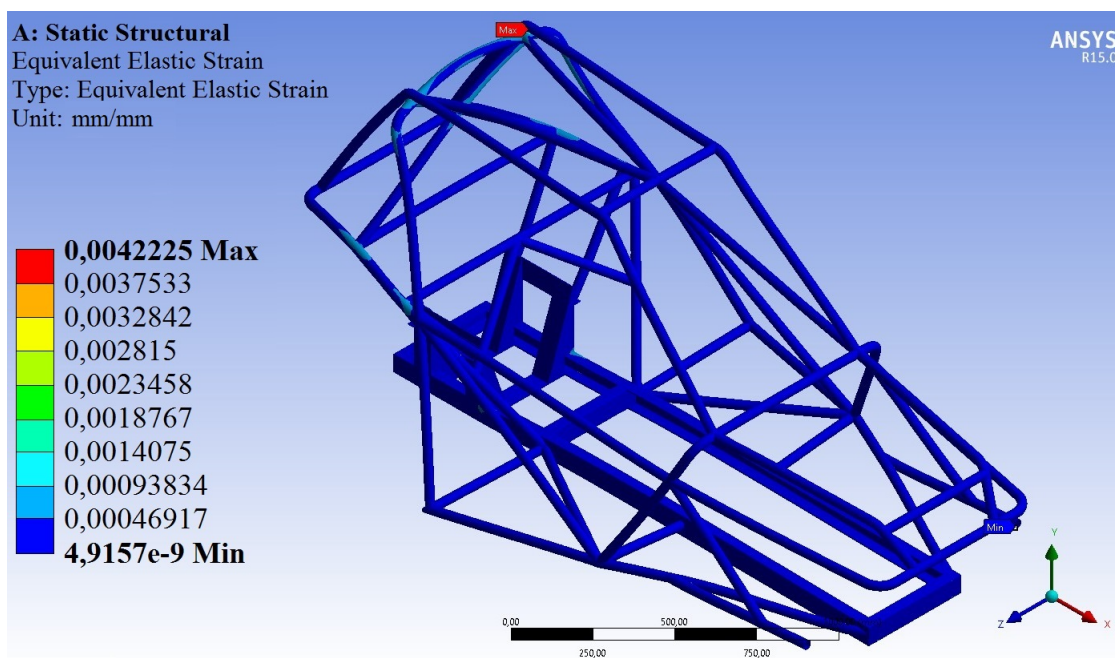
Fonte: o autor.

Figura B.6 – Força lateral na direção x, Fator de segurança.

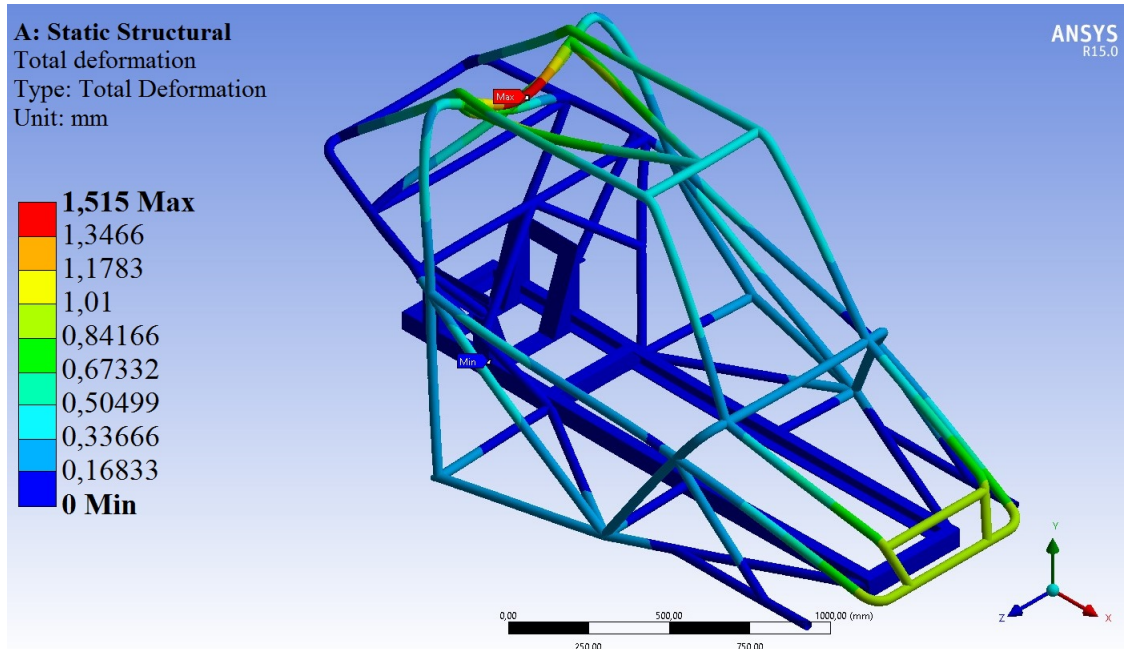


Fonte: o autor.

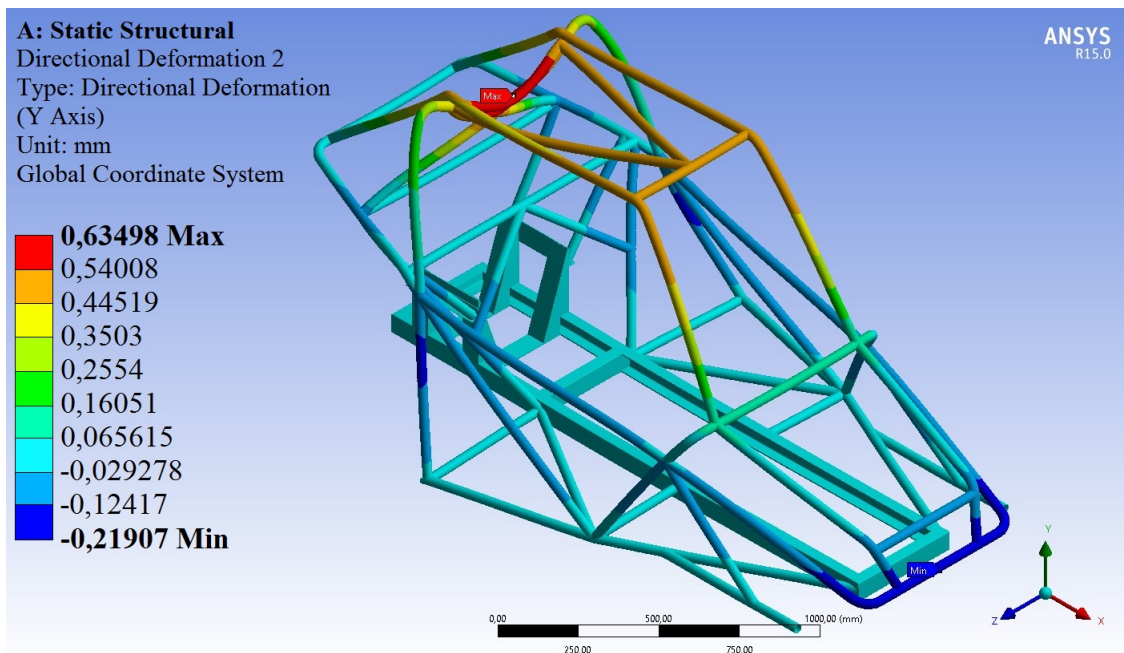
Figura B.7 – Força lateral na direção x, Deformação equivalente.



Fonte: o autor.

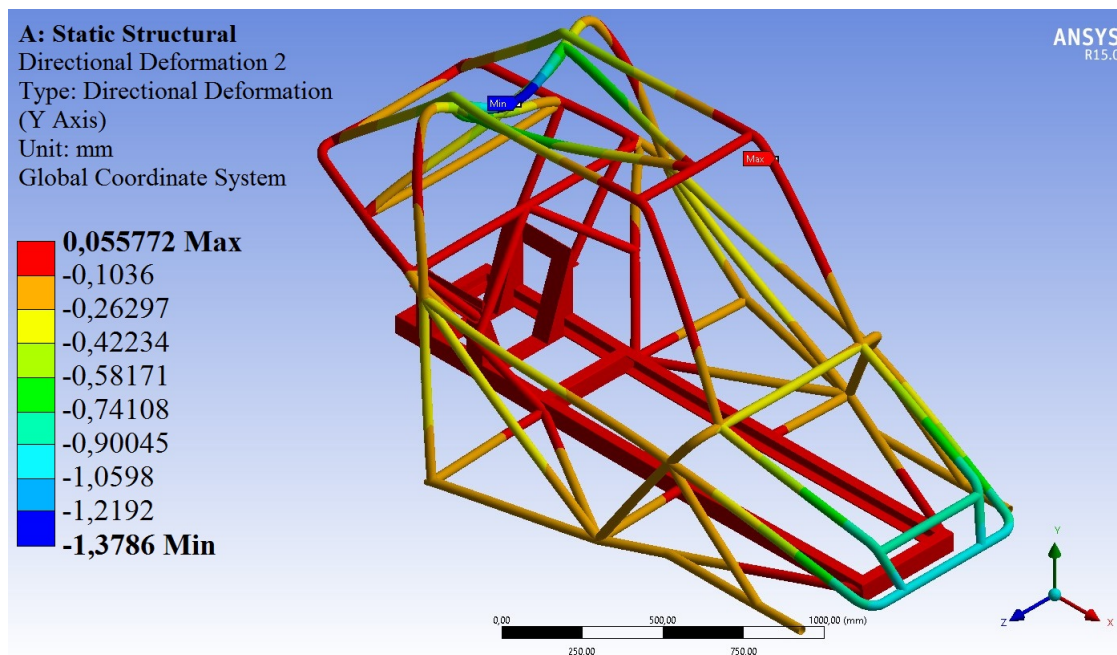
ENSAIO 2 – Arco principal: Força vertical de -9400 N no sentido y :Figura B.8 – Força vertical na direção y , Deslocamento total.

Fonte: o autor.

Figura B.9 – Força vertical na direção y , Deslocamento na direção x .

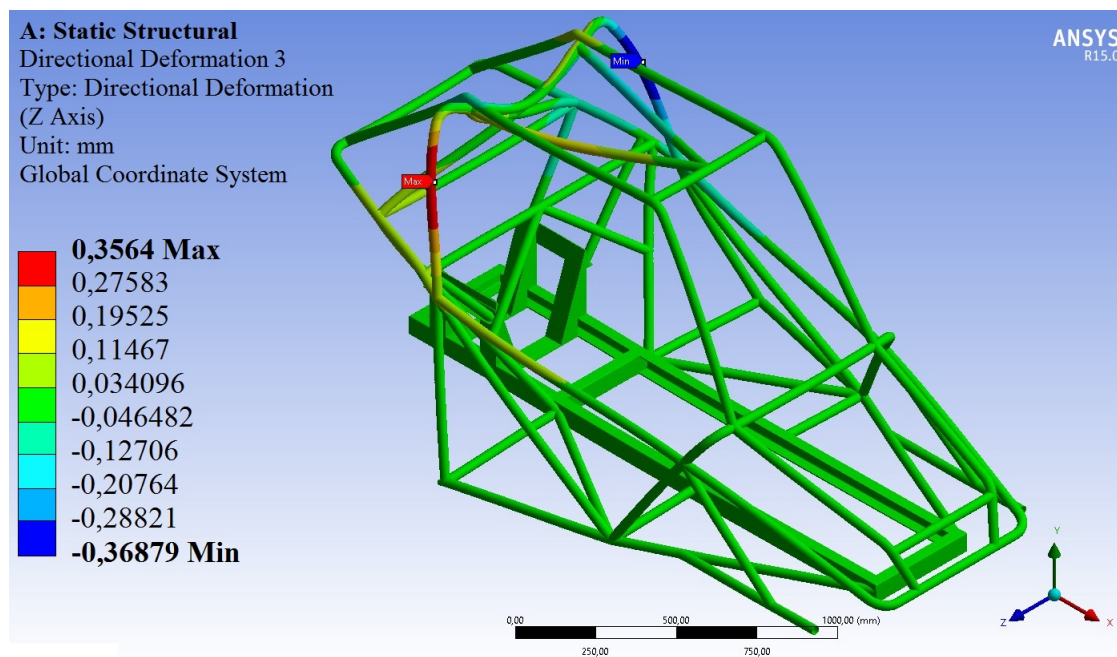
Fonte: o autor.

Figura B.10 – Força vertical na direção y, Deslocamento na direção y.



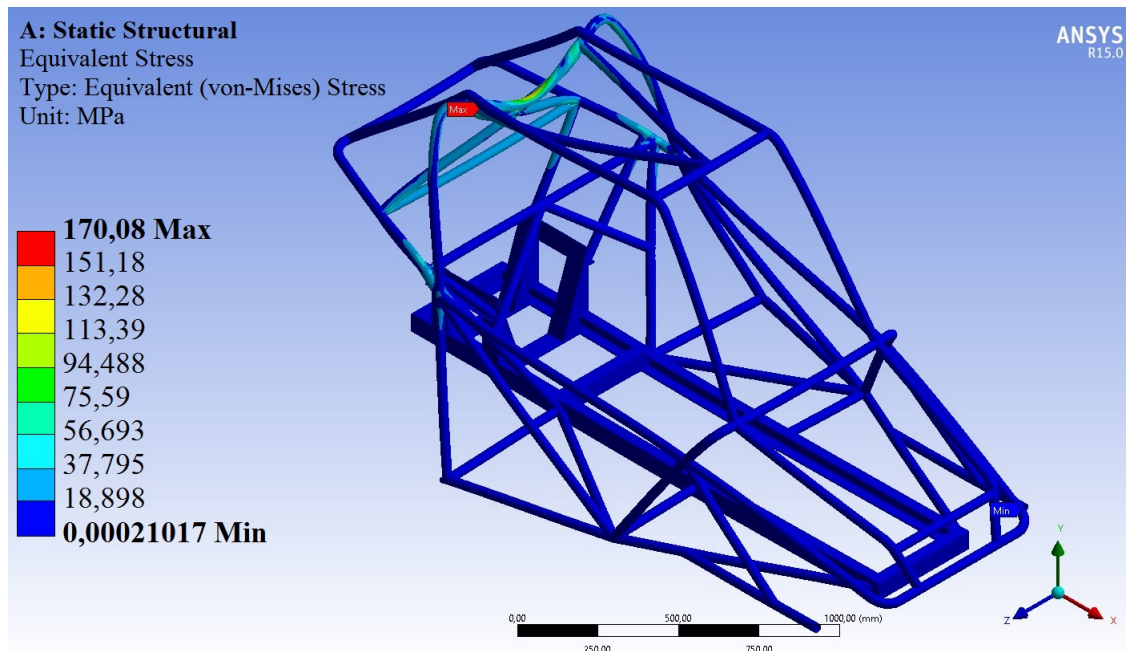
Fonte: o autor.

Figura B.11 – Força vertical na direção y, Deslocamento na direção z.



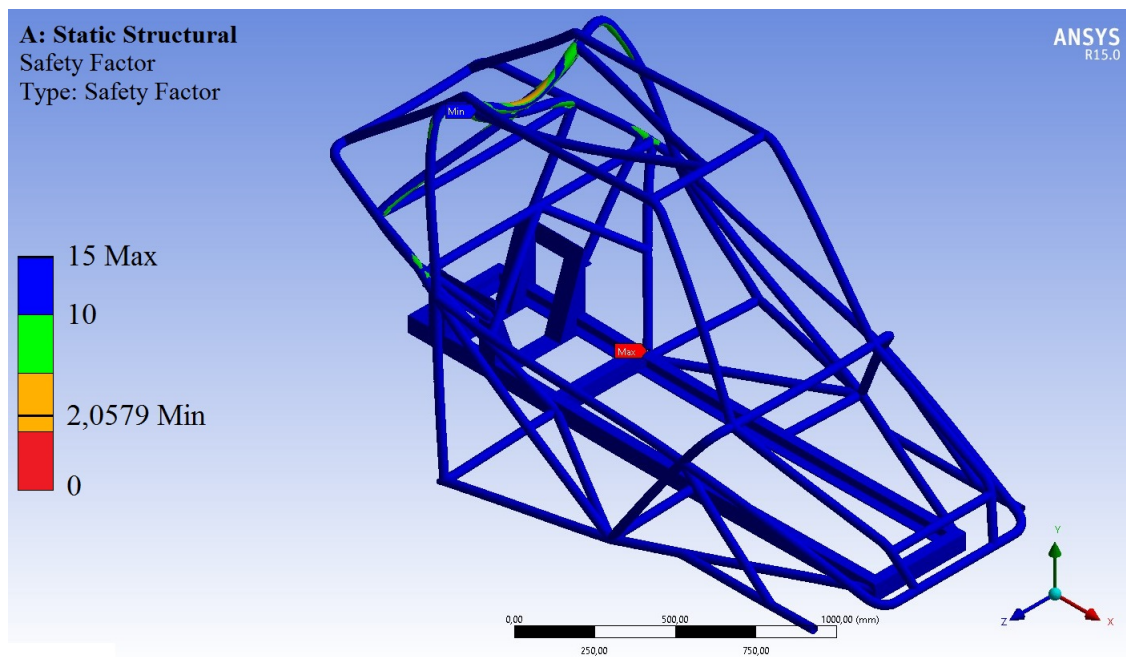
Fonte: o autor.

Figura B.12 – Força vertical na direção y, Tensão equivalente de Von Mises.

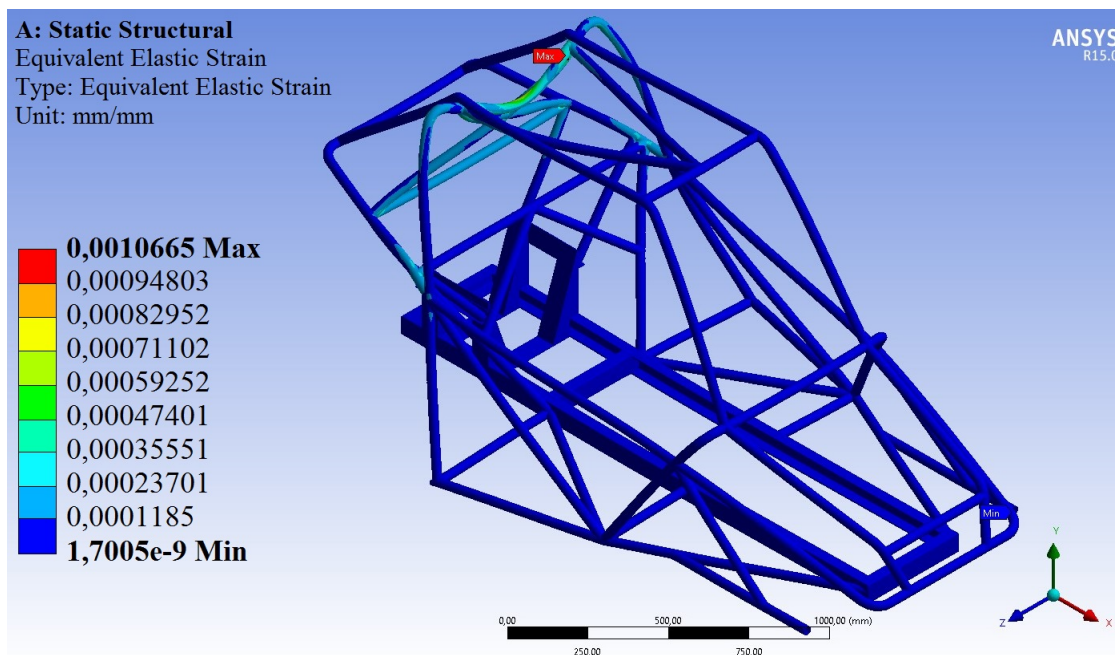


Fonte: o autor.

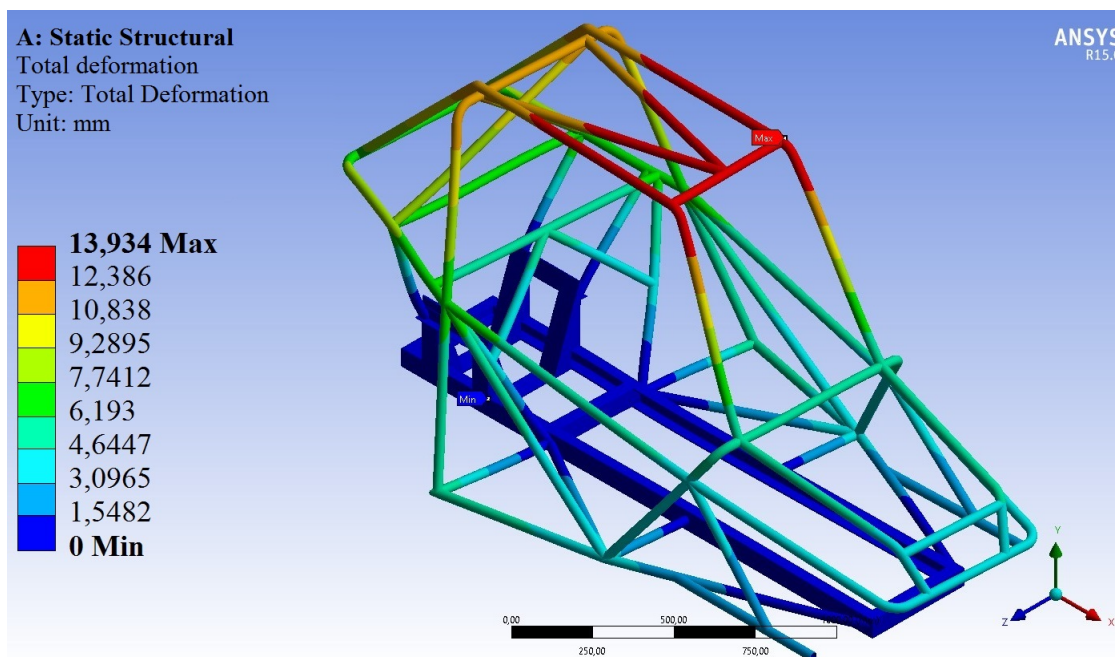
Figura B.13 – Força vertical na direção y, Fator de segurança.



Fonte: o autor.

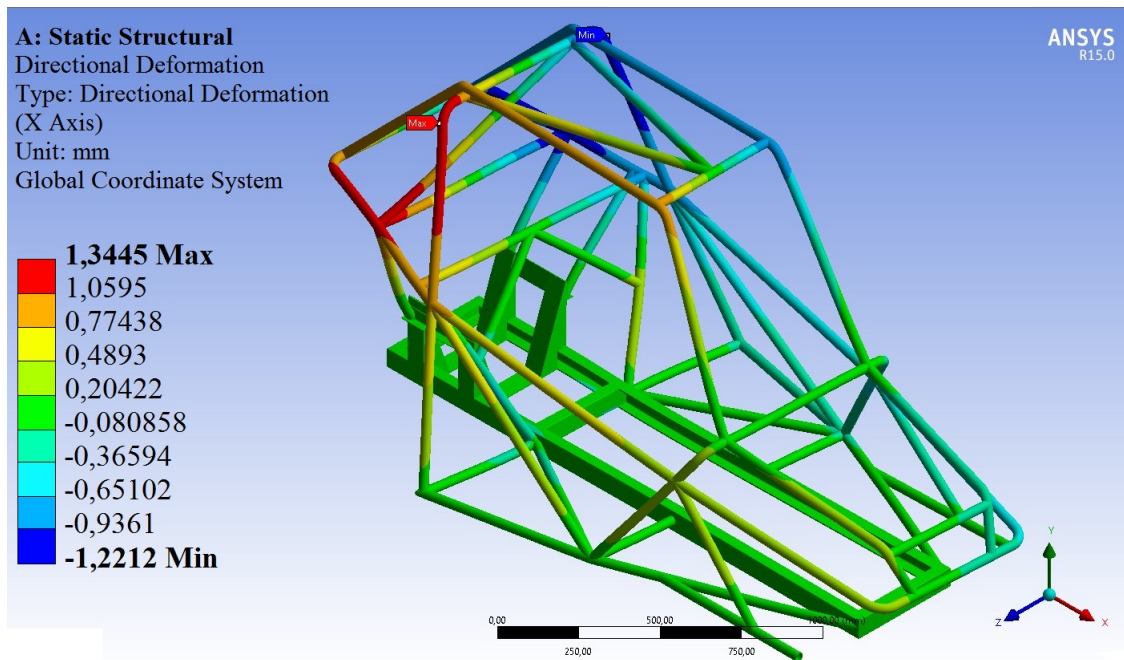
Figura B.14 – Força vertical na direção y , Deformação equivalente.

Fonte: o autor.

ENSAIO 3 – Arco principal: Força frontal de -9400 N no sentido z :Figura B.15 – Força frontal na direção z , Deslocamento total.

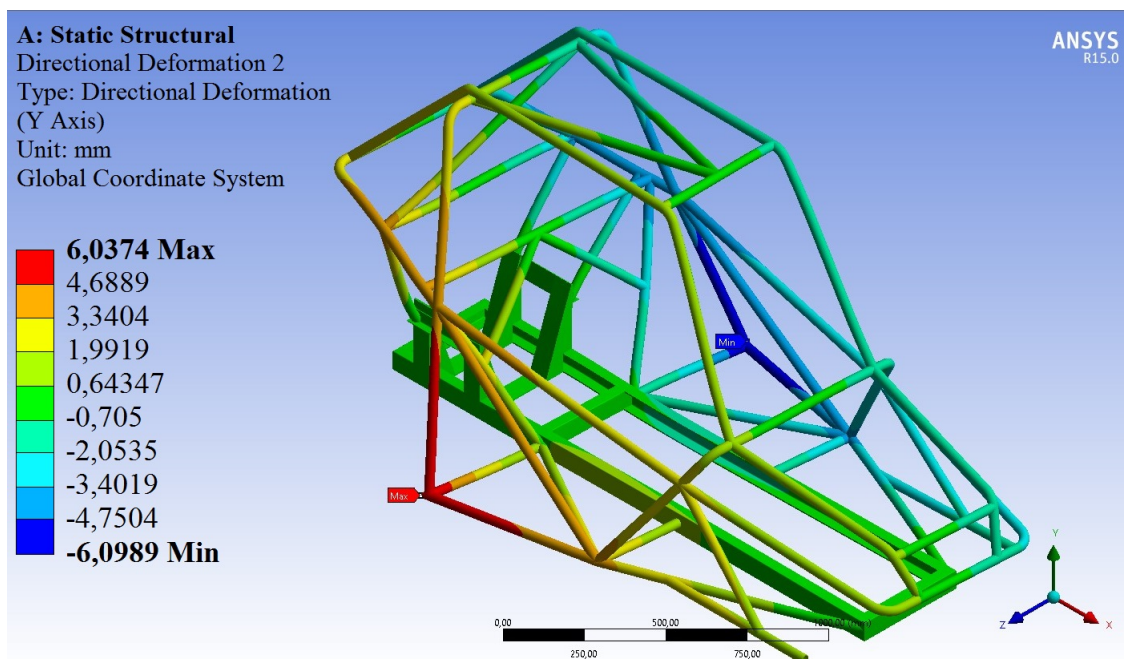
Fonte: o autor.

Figura B.16 – Força vertical na direção z, Deslocamento na direção x.



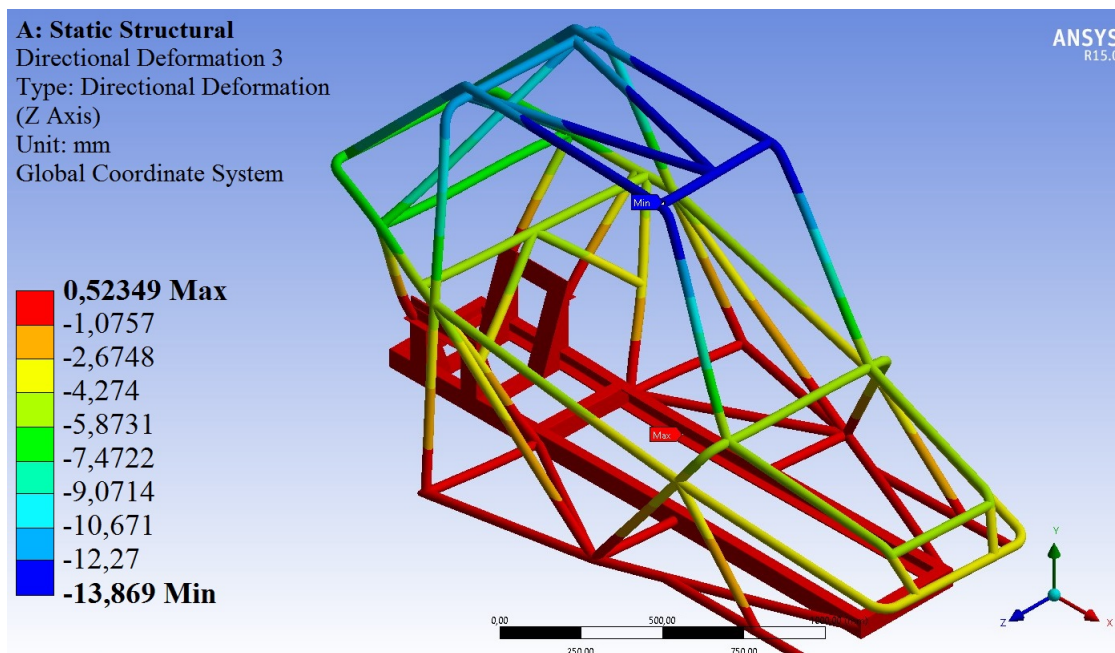
Fonte: o autor.

Figura B.17 – Força vertical na direção z, Deslocamento na direção y.



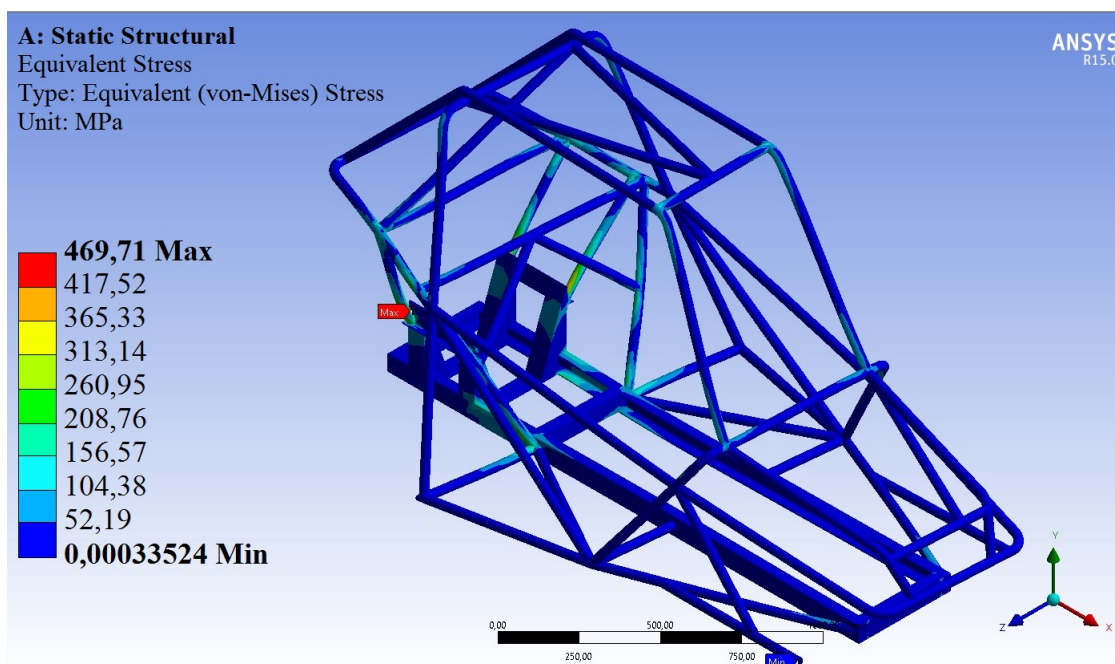
Fonte: o autor.

Figura B.18 – Força vertical na direção z, Deslocamento na direção z.



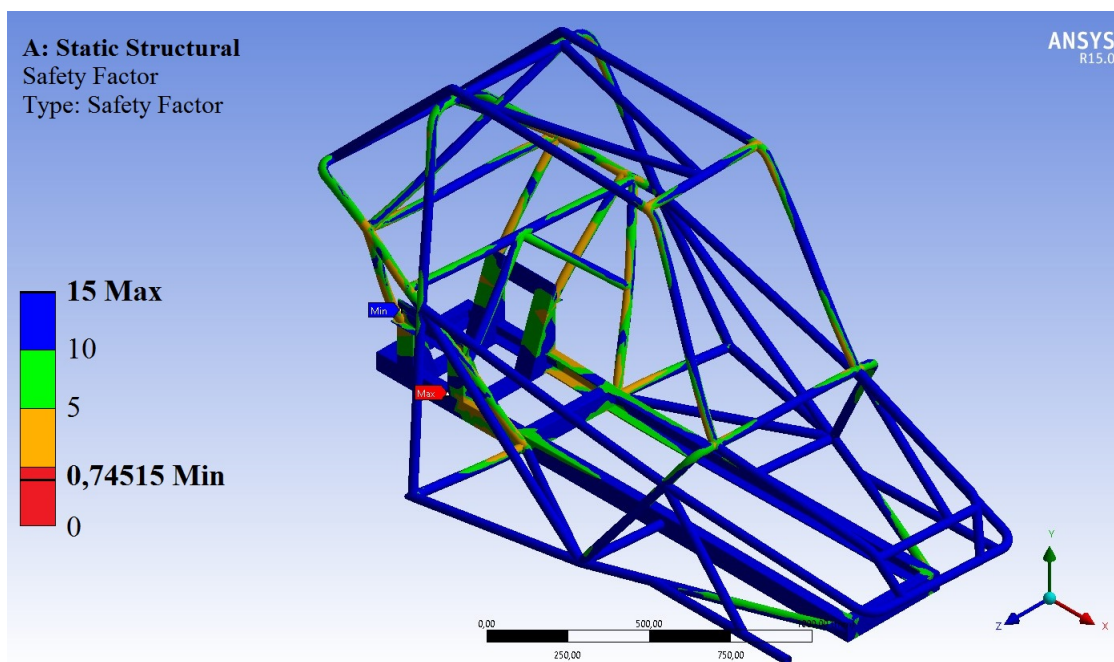
Fonte: o autor.

Figura B.19 – Força frontal na direção z, Tensão equivalente de Von Mises.



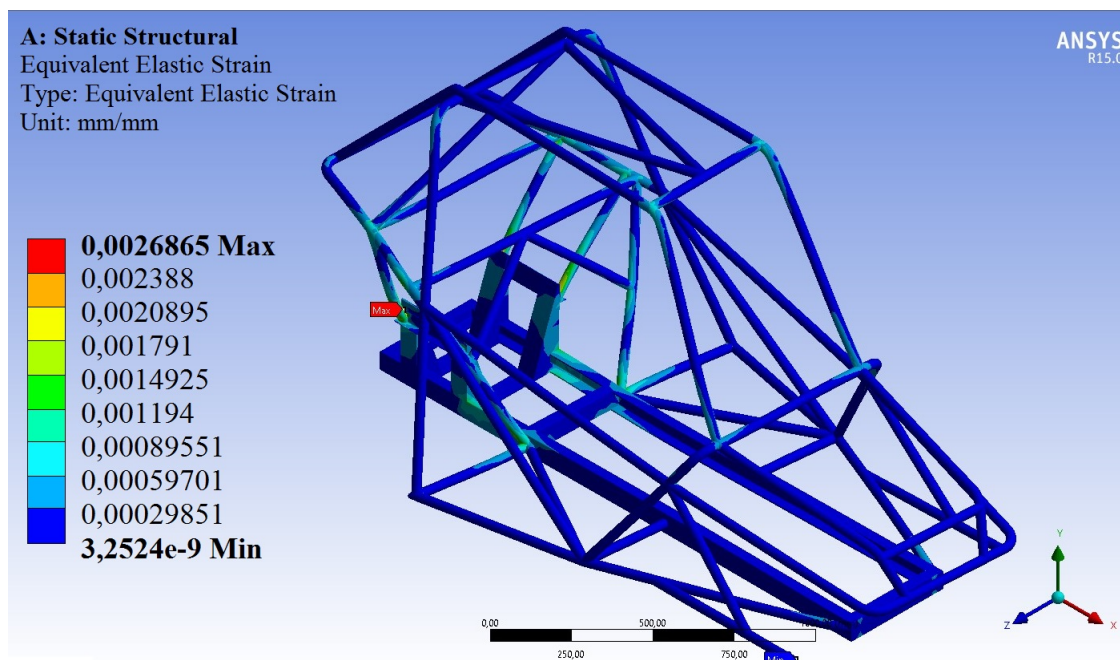
Fonte: o autor.

Figura B.20 – Força frontal na direção z, Fator de segurança.



Fonte: o autor.

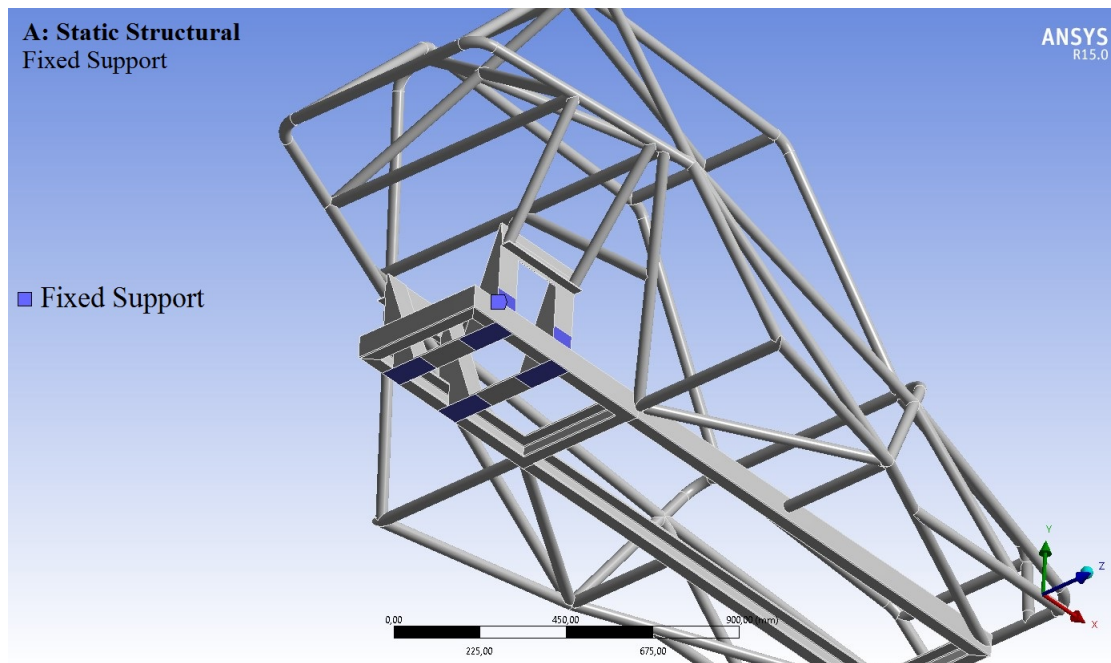
Figura B.21 – Força frontal na direção z, Deformação equivalente.



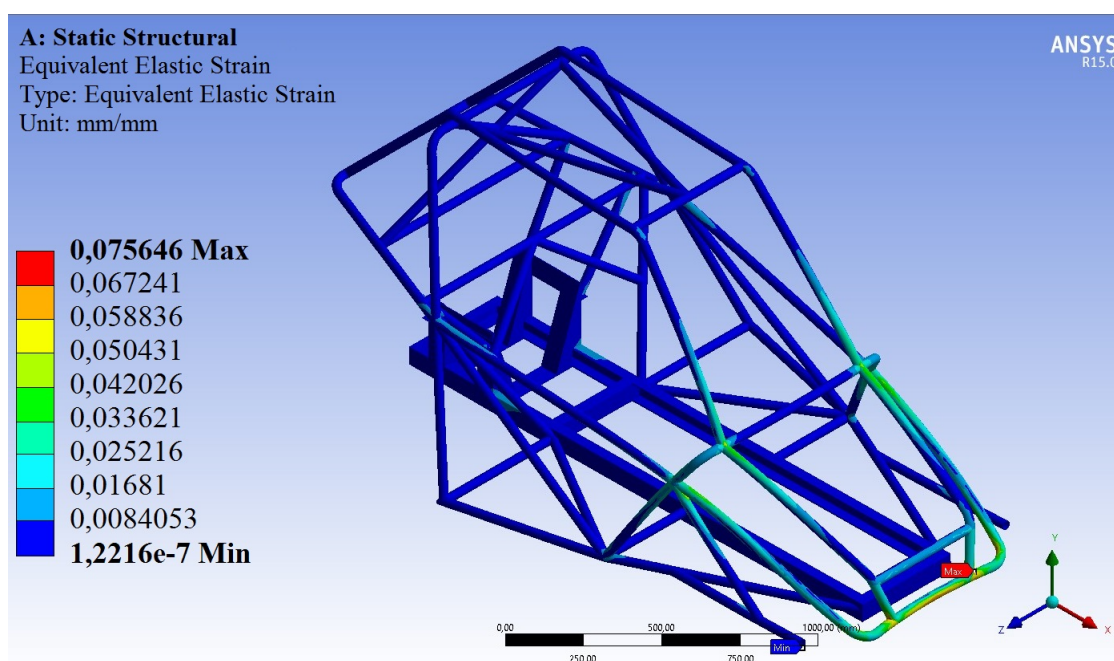
Fonte: o autor.

ENSAIO 4 – Colisão Frontal a 80 km/h: Engastamento

Figura B.22 – Aplicação de forças.

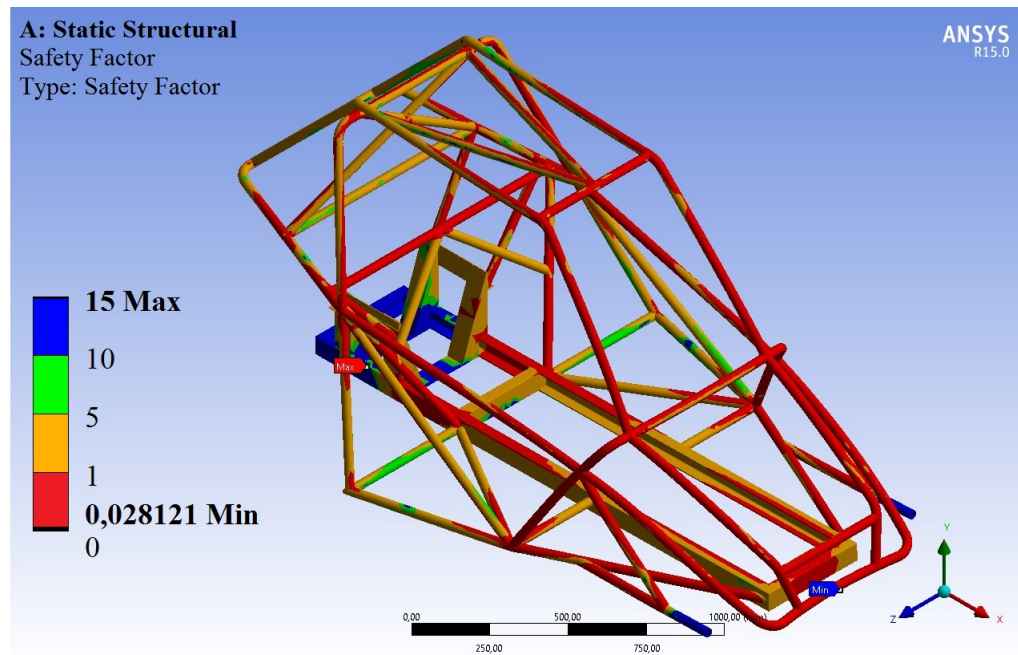


Fonte: o autor.

Figura B.23 – Força frontal na direção x , Deformação equivalente.

Fonte: o autor.

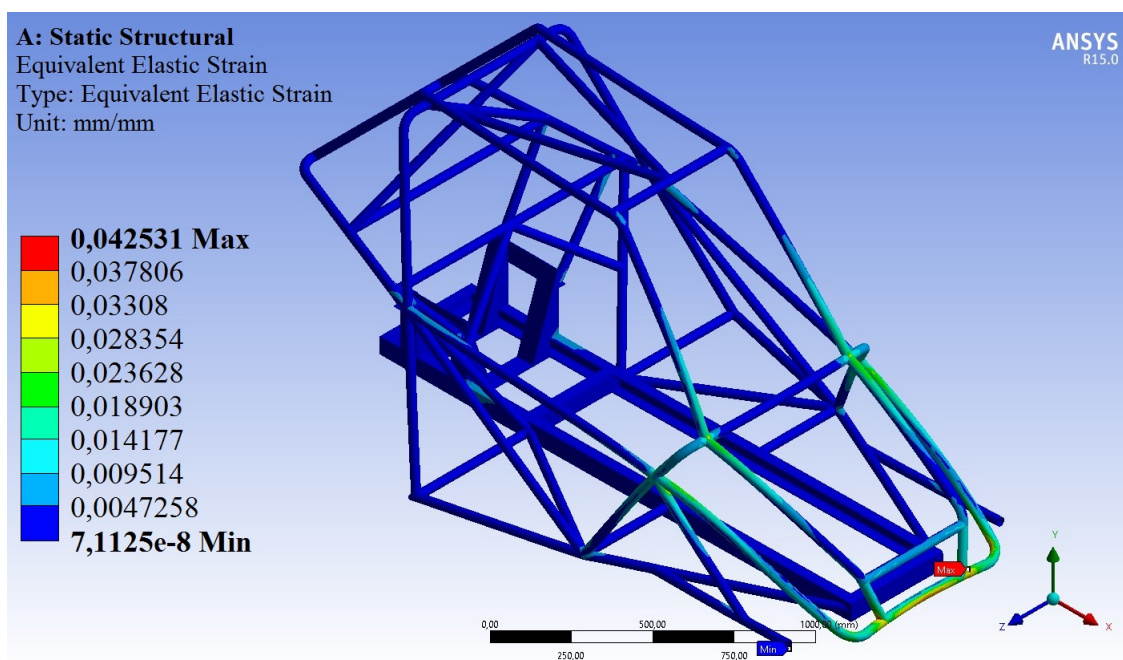
Figura B.24 – Força frontal na direção x , Fator de segurança.



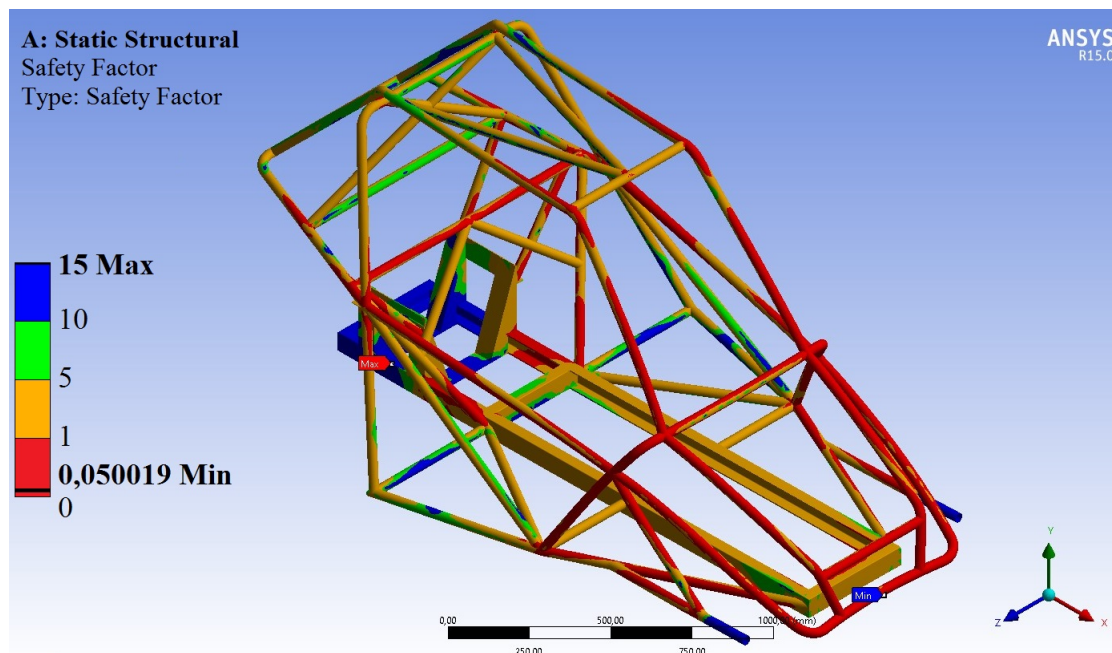
Fonte: o autor.

ENSAIO 5 – Colisão Frontal a 60 km/h :

Figura B.25 – Força frontal na direção x , Deformação equivalente.



Fonte: o autor.

Figura B.26 – Força frontal na direção x , Fator de segurança.

Fonte: o autor.

Apesar de ocorrer o escoamento do material os limites de deslocamentos direcionais são respeitados para a segurança do piloto de forma que nenhum tubo se deforma a ponto de atingir o piloto ou navegador.

Configuração do PC

Windows 10 64 *bits*

Intel Core *i7*

8 *Gb RAM*

1 *Tb HD*

Placa de vídeo Geforce Nvidia 745M