

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

EVERSON ARCILDO WEBER

ANÁLISE ESTRUTURAL CHASSI SPACE FRAME PARA VEÍCULO ELÉTRICO

CASCADEL – PR

2020

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

EVERSON ARCILDO WEBER

ANÁLISE ESTRUTURAL CHASSI SPACE FRAME PARA VEÍCULO ELÉTRICO

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Prof^ª. Ms. Fabiane Sorbar Fontana

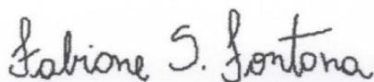
**CASCADEL – PR
2020**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
EVERSON ARCILDO WEBER**

ANÁLISE ESTRUTURAL CHASSI SPACE FRAME PARA VEÍCULO ELÉTRICO

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação da Professora Fabiane Sorbar Fontana.

BANCA EXAMINADORA



Orientadora Profª. Me. Fabiane Sorbar Fontana
Centro Universitário Assis Gurgacz
Mestre em Engenharia Agrícola e Bacharel em Ciências da Computação



Professor Me. Carlos Alberto Breda
Centro Universitário Assis Gurgacz
Mestre em Engenharia Agrícola e Especialização em Engenharia de Segurança no Trabalho, Bacharel em Engenharia Mecânica



Professor Me. Rosemar Cristiane Dal Ponte
Centro Universitário Assis Gurgacz
Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura e Bacharel em Informática

Cascavel, 02 de dezembro de 2020.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha mãe, que sempre esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus, pela força e sabedoria para enfrentar as dificuldades.

Agradeço também a minha mãe, irmãos e namorada, obrigado pelo apoio constante estando sempre ao meu lado, sou muito grato a Deus pela família que me deu.

Gratidão a minha orientadora Fabiane Sorbar Fontana, por todo apoio e dedicação.

RESUMO

Este trabalho tem como tema a análise estrutural de chassi Space frame para veículo elétrico fora de estrada, já que veículos elétricos tornaram-se um dos símbolos da preservação ao meio ambiente e que esta ideia vem ganhando força graças aos avanços tecnológicos, principalmente após a Terceira Revolução Industrial onde a robotização e a automação se tornaram parte da indústria automobilística. Um exemplo claro dessa evolução são as baterias, que evoluíram muito com o tempo, tornando-se mais eficientes, com maior autonomia e recarregando-se mais rapidamente. Em contra partida, ainda são pesadas e ocupam um espaço razoável dentro da estrutura, sendo que este peso extra implica em esforços maiores na estrutura do automóvel. Nesta perspectiva, o chassi Space frame vem sendo utilizado desde a Segunda Guerra Mundial e sua construção foi realizada com a utilização de tubos de aço dobrados e soldados formando o chassi, tornando-o assim, resistente e de baixo custo. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise utilizando software *SolidWorks* a partir de um chassi Space frame, com propulsão elétrica e com o posicionamento das baterias no assoalho, e, para a produção do mesmo buscou-se, a luz de normas e bibliografias existentes, realizar uma análise estrutural por meio do emprego do método dos elementos finitos no quadro. Ao final dos experimentos constatou-se que a estrutura suportara o carregamento proposto, com uma deformação mínima do chassi não afetando, contudo, sua rigidez, bem como a tensão manteve-se abaixo do limite de escoamento do material.

Palavras-chaves: baterias, veículo elétrico, chassi Space frame, elementos finitos, *SolidWorks*.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Chassi escada.	16
FIGURA 2: Chassi monobloco.	17
FIGURA 3: Chassi tipo espinha dorsal.	18
FIGURA 4: Chassi Space frame.	18
FIGURA 5: Chassi elétrico jaguar i-pace.	20
FIGURA 6: Análise estrutura viga.	22
FIGURA 7: Superfície retangular plana.	24
FIGURA 8: Elemento de viga.	25
FIGURA 9: Aplicação de malha chassi space frame.	26
FIGURA 10: Elementos e pontos nodais.	27
FIGURA 11: Representação de equilíbrio de forças em um conjunto de elementos.	28
FIGURA 12: Compatibilidade de descolamento.	28
FIGURA 13: Translação vertical da suspensão dianteira.	31
FIGURA 14: Translação vertical da suspensão dianteira direita.	31
FIGURA 15: Modelo chassi Space Frame.	33
FIGURA 16: Vista explodida chassi Space Frame elétrico.	34
FIGURA 17: Massa e centro de massa do chassi.	35
FIGURA 18: Refinamento da malha.	35
FIGURA 19: Malha aplicada no chassi.	36
FIGURA 20: Pontos de fixação do chassi.	37
FIGURA 21: Análise estática, tensão máxima e mínima do chassi.	39
FIGURA 22: Análise estática, deslocamento da estrutura.	40
FIGURA 23: Análise torsional, tensão máxima e mínima do chassi.	41
FIGURA 24: Análise torsional, deslocamento da estrutura.	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Propriedades do Aço SAE 1020.....	32
TABELA 2: Massa presente na estrutura.....	37

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Desenho do Chassi.....	47
---------------------------------	----

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1: Momento de inercia das seções transversal.....	23
EQUAÇÃO 2: Forças de cisalhamento.....	24
EQUAÇÃO 3: Lei de Hooke.....	29
EQUAÇÃO 4: Fórmula do coeficiente de segurança.....	41
EQUAÇÃO 5: Coeficiente de segurança.....	41

LISTA DE SIGLAS

CAD – Projeto Assistido por Computador (*Computer-aided design*)

C.S – Coeficiente de segurança

DMC - *DeLorean Motor Company*

MEF – Método dos elementos finitos

PLS - Proposição Legislativa

MM – Milímetros

MPa – Mega Pascal

N/MM² - Newton por Milímetro quadrado

PP-Pi – Partido Progressista do Piauí

RPM – Rotações por minuto

SAE – Sociedade dos Engenheiros automotivos (*Society Automotive Enginner*)

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVOS	11
1.1.1.	Geral	11
1.1.2.	Específicos	11
1.2.	JUSTIFICATIVA	11
1.3.	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.4.	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	13
2.1.	VEÍCULOS ELÉTRICOS	13
2.1.1.	BATERIAS	14
2.2.	SOLIDWORKS	15
2.3.	MODELOS DE CHASSI	16
2.3.1.	CHASSI ESCADA	16
2.3.2.	CHASSI MONOBLOCO	16
2.3.3.	CHASSI TIPO ESPINHA DORSAL	17
2.3.4.	CHASSI SPACE FRAME	18
2.3.5.	CHASSI VEÍCULO ELÉTRICO	19
2.4.	ELEMENTOS FINITOS	21
2.4.1.	SISTEMAS CONTÍNUOS	23
2.4.2.	SISTEMAS DISCRETOS	23
2.4.3.	ELEMENTO DE CASCA (SHELL)	23
2.4.4.	ELEMENTO DE VIGA (BEAM)	24
2.4.5.	MALHA E REFINAMENTO	26
2.5.	REGRAS FUNDAMENTAIS	27
2.5.1.	EQUILÍBRIO DE FORÇAS	27
2.5.2.	COMPATIBILIDADE DE DESLOCAMENTO	28
2.5.3.	DEFORMAÇÃO ELASTICA LINEAR	29
2.6.	ANÁLISE ESTÁTICA	29
2.6.1.	ANÁLISE DINÂMICA	29
2.6.2.	ANÁLISE MODAL	30
2.6.3.	RIGIDEZ FLEXIONAL	30
2.6.4.	RIGIDEZ TORSIONAL	31
3.	METODOLOGIA	32

3.1.	MODELO	32
3.2.	CHASSI E SUPORTE DE BATERIAS VISTA EXPLODIDA	33
3.3.	PESO DA ESTRUTURA.....	34
3.4.	MALHA	35
3.5.	PONTOS DE FIXAÇÃO.....	36
3.6.	ANÁLISE ESTRUTURAL	37
3.6.1.	DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA	37
3.6.2.	PONTO CRÍTICO	38
3.6.3.	ANÁLISE TORSIONAL.....	38
4.	RESULTADO E DISCUSSÕES.	39
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
5.1.	SUGESTÃO DE PESQUISAS FUTURAS	44
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	ANEXO 1 – DESENHO DO CHASSI	47

1 INTRODUÇÃO

Entende-se que o chassi é o componente essencial da estrutura do veículo, das quais são fixados todos os outros conjuntos, como suspensão, motor, transmissão, baterias, modulo eletrônico e demais componentes. A estrutura do chassi é submetida a carregamento interno e externo, cargas externas são transferidas através das rodas e o solo, com destino a suspensão do veículo, enquanto as cargas internas são provocadas pela massa do veículo, bem como a massa dos passageiros, motor, baterias e demais componentes.

Quanto ao chassi *Space frame*, este pode ser descrito como uma estrutura rígida, resistente, leve e em forma de treliça (elementos triangulares cuja as extremidades são conhecidos como nós), confeccionado em componentes circulares de pequeno e médio diâmetro, ou elementos quadrados dispostos em distintas posições em forma tridimensional, com interesse a oferecer uma altíssima rigidez quando sujeito a diversos formas de carregamento. O chassi *Space frame*, possui grande flexibilidade em sua produção de baixa escala, permitindo modificações em sua produção, variação dimensional, de matérias e modelo, em sistemas de produção de larga escala se torna inviável economicamente.

Em relação as principais alterações em veículos elétricos, pode-se citar o posicionamento e o tamanho das baterias, como elas ainda pesam muito, seu posicionamento lógico é sob o assoalho, de modo a não ocupar espaço e manter o centro de gravidade do carro o mais baixo possível. O assoalho deve ser fortificado para resistir a esse peso extra, comumente não presente em automóveis tradicionais, além disso, os acumuladores de íon-lítio necessitam de segurança adicional contra colisão, eis que aberturas ou estragos mais severos na bateria podem resultar em incêndios violentos e de penosa contenção.

As baterias de íons de lítio são consideradas estáveis, em colisão o risco de uma explosão acarretado pelas baterias é baixo, porém possa apresentar vazamento de fluido, ocasionando incêndio, em um eventual incidente os cabos podem se romper, ocasionando um curto circuito no sistema ou espalhar uma corrente elétrica de alta tensão pela estrutura do carro.

Assim, neste estudo, foi analisado o comportamento estrutural de um chassi *Space frame*, com propulsão elétrica, e com o posicionamento das baterias no assoalho, levando em consideração, motor, conjunto de baterias e ocupante. Para a

construção do modelo foi utilizado o *software SolidWorks*, e a inspeção foi feita em uma análise e simulação com a utilização de elementos finitos na estrutura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Realizar uma análise utilizando *software SolidWorks* a partir de um chassi *Space frame*, com propulsão elétrica e com o posicionamento das baterias no assoalho.

1.1.2 Específicos

- Construir o modelo de chassi *Space frame* utilizando *software SolidWorks*.
- Analisar a estrutura por meio dos elementos finitos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A observação simples de informações cotidianas permitem afirmar que é cada vez mais comum falar em poluição e emissão de poluentes, embora o carro elétrico emita poluição durante a sua construção (VARGAS 2016), bem como a produção de energia elétrica nem sempre é a das mais limpas, em média o veículo elétrico emite menos poluentes durante sua vida útil comparado com um veículo a combustão interna, o veículo elétrico tende-se a tornar o meio de transporte mais comum no mundo.

É fato que veículos elétricos utilizam uma plataforma diferente de carros a combustão, enquanto motores com queima de combustível armazenam energia em tanques localizadas na traseira da viatura, motores elétricos armazenam a energia em baterias, normalmente grandes e pesadas, localizadas no assoalho do chassi.

Chassis destinados a veículos elétricos necessitam de reforços extras em sua estrutura, principalmente em volta dos ocupantes e das baterias, a garantir a segurança dos ocupantes, a proteção dos módulos de íons de lítio são essenciais tendo em conta que perfurações ou vazamento a bateria pode inflamar ao contato

com o ar, e fios de cobre podem entrar em contado com a estrutura e descarregar uma tensão altíssima nos ocupantes.

Sendo assim, torna-se necessário que novos modelos de chassis sejam construídos, para se adaptar a essa exigência, o que torna este estudo pertinente, já que seu objetivo é construir um modelo de chassi, e na sequência realizar uma análise estrutural do mesmo verificando sua adequação as novas exigências.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Como produzir um modelo de chassi que atenda às necessidades de um veículo elétrico?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo apresenta a construção e análise de um chassi modelo *Space frame*, utilizando a plataforma *SolidWorks*, com propulsão elétrica, a mesma será focada na análise estática, teste de flexão e torção, utilizando normativas e bibliografias, verificando sua performance.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Veículos elétricos foram inseridos no mercado automotivo a mais de um século, antes mesmo dos veículos movidos a combustão interna, no mesmo período alguns pesquisadores e inventores começaram a empregar o conceito de automóveis movidos puramente a eletricidade, utilizando baterias não recarregáveis, Robert Anderson e Thomas Davenport apresentaram os primeiros modelos elétricos de pequena escala, utilizando como plataforma para o desenvolvimento do automóvel a carruagem, com a invenção das baterias recarregáveis de chumbo ácido de Gaston Planté, os carros elétricos práticos se tornaram possíveis, sendo mais empregados que carros a combustão em meados de 1900 (HOYER, 2008).

Com a implementação do motor de arranque em propulsores a combustão interna, a abertura de novos poços de petróleo no Texas baixando o custo do combustível, bem como a invenção da linha de produção de Henry Ford, que barateou o custo de produção de veículos movidos a combustível, tendo uma maior autonomia em comparação com veículos elétricos, o interesse pelos automóveis elétricos reduziu consideravelmente, (FONTAINHAS, 2012).

No mundo globalizado onde a urbanização se acentuou gradativamente, cada vez mais se fala em poluição e emissão de poluentes, embora o carro elétrico emita poluição durante a sua construção (VARGAS, 2016), e a produção de energia elétrica nem sempre é a das mais limpas, em média o veículo elétrico emite menos poluentes durante sua vida útil comparado com um veículo a combustão interna, o que permite afirmar que o mesmo tende-se a tornar o meio de transporte mais comum no mundo.

Veículos elétricos são a solução para menores emissões de poluentes, principalmente em grandes cidades que possuem maior quantidade de veículos, o combustível utilizado para carros a combustão será utilizado para produção de energia elétrica em usinas termoeletricas sendo sua localização distantes de cidades, assim localizando a poluição produzida por combustíveis fósseis. Motores elétricos apresentam quase zero poluição sonora e vibração oferecem para o veículo um rodar mais silencioso e suave (FONTAINHAS, 2012), bem como o sistema de

freio regenerativo, transforma a energia cinética em eletricidade, carregando a bateria.

Ademais, os veículos elétricos contam com incentivos fiscais, pagando menos impostos. Quanto ao custo de aquisição, quando comparados a carros de motor a combustão de modelos semelhantes, o veículo elétrico possui custo mais elevado, em razão do alto custo da tecnologia utilizada na construção do veículo e sendo produzido em pequena escala.

O veículo elétrico possui baixa autonomia quando se trata de armazenamento de energia, sendo que a duração da carga é relativamente baixa e seu tempo de recarga, quando realizado em postos especializados, leva cerca de 15 a 20 minutos (podendo demorar de 6 a 8 horas quando carregadas em casa, utilizando-se de tomadas de 220 volts), sendo que o Brasil, atualmente, conta com poucos postos de carga, tornando extremamente difícil encontrá-los (FONTAINHAS, 2012), mas a eficiência do motor elétrico é superior a motores de combustão interna, bem como a entrega de torque em motores elétricos é mais eficiente em toda faixa de RPM do motor.

O projeto de lei PLS 304/2017, determina a partir de primeiro de janeiro de 2030 a substituição de carros a combustão por elétricos, apenas veículos elétricos e a etanol, serão liberados. A partir de 2040 a circulação de veículos a combustão será proibida, apenas veículos clássicos, oficiais, diplomáticos e carros de visitantes estrangeiros, poderão circular no país (Rodrigo Baptista, 2020).

Segundo o senador Ciro Nogueira (PP-PI), vários países apresentaram uma tomada de decisão similar, Reino Unido e a França, por exemplo, pretendem proibir a venda de automóveis movidos por motores à combustão, sendo estes responsáveis por um sexto das emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

2.1.1 BATERIAS

As baterias de íons de lítio são consideradas estáveis, em colisão o risco de uma explosão acarretado pelas baterias é baixo, porém podem apresentar vazamento de fluido, ocasionando incêndio, o fluido de íons de lítio são extremamente inflamáveis em contato com o oxigênio, e, para evitar o risco de explosão a bateria é selada contendo solvente orgânico, prevenindo o contato com o ar, diminuindo o risco de ignição do fluido, em um eventual incidente os cabos

podem se romper, podendo ocasionar curto circuito no sistema ou espalhar uma corrente elétrica de alta tensão pela estrutura do carro (BISSCHOP, 2019).

Durante a aplicação de carga no motor, a bateria fornece a energia necessária, os íons de lítio se deslocam do material que compõe o anodo, até o elemento do catodo, os elétrons migram pelo cordão de cobre, alimentando o motor, o anodo da bateria é o polo negativo construído em carbono, com excelente condutividade térmica, apresentando uma condição laminar, o catodo também se encontra na forma de estrutura laminar, sendo empregado óxidos de metais de mudança litiado, como por exemplo o oxido de cobalto e lítio $LiCoO_2$, transformando a anergia química em energia elétrica (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000).

A vida útil das baterias em média é de dois mil ciclos de carga e descarga, num carro movido apenas a eletricidade, antes de perder sua utilidade, embora acreditasse que avanços na tecnologia das baterias possam ter um ciclo de carga e descarga maiores.

O valor para aquisição das baterias varia de acordo com autonomia e potência do motor, segundo a (ESTAPAR), um conjunto de baterias do Toyota prius custa em média R\$ 9.990, as baterias do Ford fusion podem variar de R\$ 32.500 a R\$ 39.500. O descarte das baterias automotivas é similar com o descarte de baterias de celulares, computadores e eletrônicos, sendo a reciclagem destinada a separar metais e outros componentes para serem reutilizados em novas baterias, bem como as baterias de íons de lítio não são reciclados e tratados no Brasil, são enviadas para Europa, o Brasil não fabrica baterias de íons de lítio em larga escala, bem como a reciclagem gera um custo, sendo assim por ora montar uma fabrica de reciclagem no País não é economicamente viável.

2.2 SOLIDWORKS

Trabalha com tecnologia CAD, *significa Computer Aided Design* ou desenho assistido por computador (SOLIDWOKS, 2018), utilizando as ferramentas do *tools box* é possível criar os mais diversos tipos de objetos, permitindo a modelagem a partir de formas geométricas simples, na Engenharia Mecânica a sua utilização facilita o trabalho dos projetistas, por onde é possível visualizar de forma simples um determinado conjunto de peças, simular a sua movimentação e possíveis contatos entre componentes, utilizando o *Solidworks Simulation*, podemos fazer simulações

da resistência mecânica, vibração, impacto, fadiga de material, análise de escoamento, análise térmica, simular o processo de usinagem entre outras funções disponíveis.

2.3 MODELOS DE CHASSI

2.3.1 CHASSI ESCADA

Chassi escada (Figura 1), geralmente utilizado em veículos de carga, sua estrutura é construída por longarinas no sentido longitudinal, sendo ligados por travessas, as longarinas suportam os esforços de aceleração, frenagem e carga, as travessas suportam as forças laterais, torção e rolagem da carroceria, confeccionadas em componentes metálicos robustos, com perfil retangular, redondo e viga U, chassis destinados a caminhão é comumente utilizado vigas de perfil U e I, sendo fixados por solda ou rebites (GILLESPIE, 1992).



Figura 1: Chassi escada.

(Fonte: Bestcarweb, 2003).

2.3.2 CHASSI MONOBLOCO

Modelo de chassi mais utilizado na construção de veículos de passeio, a confecção da estrutura utiliza chapas metálicas, sendo utilizados para conformação das chapas, moldes contendo a geométrica da peça, o molde é pressionado contra a chapa, assim moldando a superfície do componente, a junção dos elementos são feitos por solda, formando uma peça única, concedendo alta proteção contra

impactos, viável na produção em larga escala, devido a grande complexidade dos processos de fabricação (FURTADO, 2014).

A estrutura monobloco (Figura 2) é a união do chassi com a carroceria, preservando a forma do veículo, sendo possível utilizar materiais de diferente resistência mecânica, em regiões de maior carregamento utiliza-se matérias de maior resistência, em locais de baixa solicitação de força, aplica-se materiais de baixa resistência, assim implicando em uma estrutura de baixo peso e alta resistência, tornando o conjunto mais eficiente (GILLESPIE,1992), comumente utilizado em linhas de produção robotizadas.



Figura 2: Chassi monobloco.

(Fonte: Carrosinfoco 2018).

2.3.3 CHASSI TIPO ESPINHA DORSAL

O chassi tipo espinha dorsal ou também conhecido como chassi *Backbone* (Figura 3), compreende uma estrutura retangular volumosa no centro do automóvel, produzida em chapas e tubos metálicos, com capacidade de resistir seis vezes mais uma carga de torção, em comparação com um chassi tipo escada, bem como fornece a união do eixo dianteiro e traseiro, sendo mais viável em automóveis esportivos, com baixa demanda, estrutura empregada na produção do *Lotus Elan*, *DMC DeLorean* entre outros.



Figura 3: Chassi tipo espinha dorsal.

(Fonte: Planetcarsz).

2.3.4 CHASSI SPACE FRAME

Resumidamente, este gênero de chassi é formado por tubos (Figura 4), os quais estão dispostos em moldes triangulares ou treliças. O molde de treliça expande a profundidade da armação e, com isso, reforça sua rigidez e firmeza à flexão e torção ao ser sujeitado a distintos tipos de carregamento (HAPPIAN-SMITH, 2001), sendo composto por matérias de seção circular ou quadrado.



Figura 4: Chassi Space frame.

(Fonte: Formulastudent, 2009).

O chassi é o componente essencial da estrutura do veículo, das quais são fixados todos os outros elementos, bem como suspensão, motor, transmissão, baterias, modulo eletrônico e demais componentes (HAPPIAN-SMITH, 2001). A estrutura do chassi é submetida a carregamento interno e externo, cargas externas são transferidas através das rodas e o solo, com destino a suspensão do veículo, enquanto as cargas internas são provocadas pela vibração e massa do veículo, bem como a massa dos passageiros, motor, baterias e demais componentes.

Chassi *Space frame* é uma estrutura rígida e resistente, leve em forma de treliça (elementos triangulares cujas extremidades são conhecidas como nós), confeccionado em componentes circulares de pequeno e médio diâmetro, ou elementos quadrados dispostos em distintas posições em forma tridimensional, com interesse a oferecer uma altíssima rigidez quando sujeito a diversas formas de carregamento. Esse modelo de chassi, possui grande flexibilidade em sua produção de baixa escala, permitindo modificações em sua produção, variação dimensional, de matérias e modelo, em sistemas de produção de larga escala se torna inviável economicamente (EXOMOTIVE, 2015).

Estruturas construídas em treliças possuem excelente resistência mecânica a torção e flexão, o uso acentuado de formas triangulares no modelo, decompõem as forças atuantes em cargas de tração e compressão nas pontas do triângulo, basicamente não existindo esforços de flexão e torção, devido as favoráveis características mecânicas da estrutura, é possível a confecção de estruturas leves e rígidas melhorando o desempenho dos veículos, bem como dirigibilidade e economia de combustível (EXOMOTIVE, 2015).

2.3.5 CHASSI VEÍCULO ELÉTRICO

Veículos elétricos necessitam de uma plataforma diferente de carros a combustão, enquanto motores com queima de combustível armazenam energia em tanques localizadas na traseira da viatura, motores elétricos armazenam a energia em baterias, normalmente grandes e pesadas, localizadas no assoalho do chassi (Figura 5). O peso extra das baterias implica em esforços maiores na estrutura do veículo, ocasionando o rompimento dos tubos de aço, devido a um carregamento excessivo nas treliças, sendo necessário o dimensionamento das tubulações com

uma tensão última maior, proporcionando um coeficiente de segurança maior (HAPPIAN-SMITH, 2001).



Figura 5: Chassi elétrico jaguar i-pace.

(Fonte: Greencarcongress, 2018).

Chassis destinados a veículos elétricos necessitam de reforços extras em sua estrutura, principalmente em volta dos ocupantes e das baterias, a garantir a segurança dos ocupantes, a proteção dos módulos de íons de lítio são essenciais levando em conta que perfurações ou vazamento a bateria pode inflamar ao contato com o ar, e fios de cobre podem entrar em contado com a estrutura e descarregar uma tensão altíssima nos ocupantes, assim como no processo de dimensionamento a definição das tensões e seu comportamento, são necessárias para a análise de deformação, sendo o deslocamento proporcional a carga aplicada (HAPPIAN-SMITH, 2001).

No processo de dimensionamento de barras e delimitação das tensões, o projetista deve observar duas categorias de comportamentos das treliças. Primeiramente, o comportamento linear, onde as alterações das barras e os deslocamentos da estrutura são proporcionais as cargas aplicadas. Em seguida, um exame do comportamento não-linear das treliças, onde não há equivalência entre a carga aplicada e as alterações e deslocamentos (HAPPIAN-SMITH, 2001).

2.4 ELEMENTOS FINITOS

Diversas abordagens são utilizadas para resolver problemas estruturais, os métodos utilizados se fundamentam em conceitos da mecânica geral, em especial a mecânica estática, por onde são definidos os conceitos de vigas e placas, mas essa teoria atua apenas em problemas definidos. Problemas mais complexos e soluções mais confiáveis e precisas buscam ferramentas computacionais como o método dos elementos finitos (MEF) que fragmenta a estrutura em partes menores, chamadas de elementos, interligados por nós, ou seja, problemas complexos são transformados em problema fácil, a estrutura escolhida é subdividida em elementos menores em forma de malha, sendo necessário especificar a característica do elemento, como sua massa e rigidez.

No que se refere aos elementos finitos, este têm auxiliado na solução de problemas complexos. Este modelo consiste em decompor a geometria complexa da peça, em numerosos elementos geométricos menores, de baixa complexidade, é um método matemático de aproximação, componentes muito complexos, se tornam extremamente trabalhosos ou impossíveis de serem calculados por métodos convencionais, modelos de aproximação como o métodos dos elementos finitos facilitam o trabalho em componentes complicados (FILHO, 2000).

Com o método dos elementos finitos, é possível determinar o comportamento estrutural dos elementos, utilizando *softwares* disponíveis que nos auxiliam no cálculo do deslocamento, deformação e tensões na carcaça da peça, havendo a necessidade de compreender as grandezas físicas imposta na estrutura, bem como entender as solicitações do carregamento, as dimensões da peça, modulo de elasticidade, densidade, pressão, pontos de fixações entre outros, enfim é necessário assimilar o comportamento do conjunto, de modo a conseguimos identificar o modelo de cálculo a ser utilizado (FILHO, 2000).

Segundo Azevedo (2003), logo após a análise da estrutura pelo método dos elementos finitos, pode-se observar os resultados aproximados de deslocamento e das tensões, sendo os dados apresentados junto com a malha, melhorando a observação dos resultados. Os valores de deformação, deslocamento e tensões, são multiplicados por um fator de alongamento, onde o agente intensifica os valores dados como resposta, por exemplo, se aplicarmos uma determinada carga numa peça de aço, os resultados da deformação, serão baixos quando aplicado baixa

força, dificultando a visualização da deformidade, ou seja o fator alonga o resultado, facilitando a observação.

Com o resultado da análise, é possível perceber a localização das tensões, e a trajetória percorrida na estrutura, os valores do vetor deslocamento são quantificados por cores conforme (Figura 6), ou seja, próximo da base engastada a superfície é representada na cor azul, indicando pouco deslocamento, na face livre a superfície é simbolizada na cor vermelha, apontando maior deslocamento.

Para a realização da análise, utilizando o MEF, é preciso apontar os pontos de fixação da peça, sendo demonstrado pelo (Figura 6), as setas em verde claro indica em qual direção a peça está presa, ou em qual sentido a peça esta impedida de se movimentar, bem como é necessário aplicar o material que será utilizado, para a análise, foi utilizado o aço SAE 1020, bem como aplicamos a força sobre a peça, sendo nesse caso uma força distribuída ao longo do corpo, o resultado demonstra um gráfico de barras com diferentes cores apontando o deslocamento ao longo da peça, nesse caso temos uma flexão da viga devido ao carregamento, o maior deslocamento da peça está demonstrada na região em vermelho, localizada na ponta da viga não engastada, ou a ponta não apoiada assim está livre para se mover em todas as direções, próximo da ponta engastada a esquerda demonstrada pela cor azul, temos uma diminuição no deslocamento, então podemos dizer que o resultado da análise está correto, sendo a deformação uniforme ao longo do corpo com uma diminuição do deslocamento conforme se aproxima da superfície engastada.

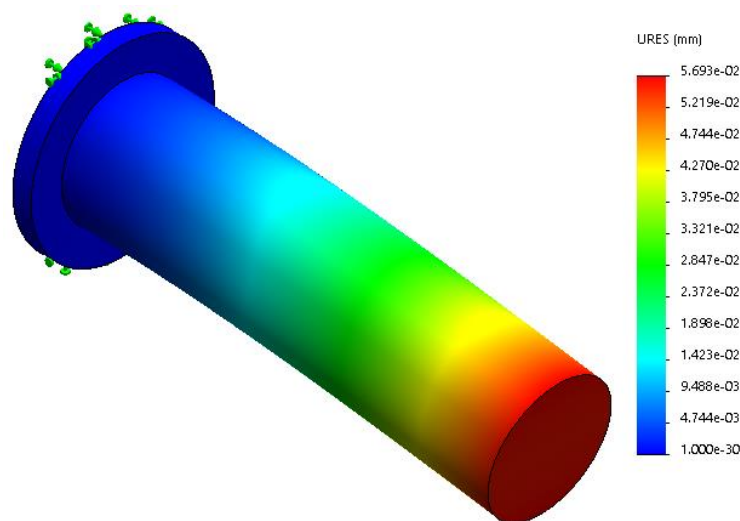


Figura 6: Análise estrutura viga.

(Fonte: Autor,2020).

2.4.1 SISTEMAS CONTÍNUOS

Soluções analíticas permitem determinar o deslocamento perpendicular em Y para todos os valores de X, assim a solução é obtida para os infinitos pontos da viga, por intermédio de uma função matemática, desse modo a viga a ser analisada é tratada como um sistema contínuo, visto que a solução é obtida para todos os pontos que constituem o corpo contínuo (ALVES FILHO, 2013).

2.4.2 SISTEMAS DISCRETOS

A abordagem do equilíbrio da estrutura pode ser efetuada a um sistema discreto, a ideia da discretização de um sistema contínuo considera a divisão da estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si nos pontos discretos.

Neste caso a solução aproximada simula a estrutura como uma montagem de elementos que tem um comprimento finito. Assim o sistema é subdividido em um número finito de partes ou elementos, de sorte que a estrutura inteira é modelada por um agregado de estruturas simples, os pontos de conexão entre os elementos são chamados de nós do modelo (ALVES FILHO, 2013).

2.4.3 ELEMENTO DE CASCA (SHELL)

O elemento de casca é utilizado para analisar a estrutura de chapas, trabalhando apenas com forças no plano, ou sofrendo deformação, sendo as tensões existentes apenas em sigma x e y, forças com sentido contrário ao plano podem ser ignoradas, devido sua alta flexibilidade (FILHO, 2000).

O componente plano mais comum é dado pelo quadro retangular demonstrado na (Figura 7), com dimensões a, b e espessura s, em algumas aplicações a espessura é irrelevante em comparação a outras dimensões, sendo os momentos de inércia das seções transversal determinado pela equação 1.

$$I_x = \frac{a*s^3}{12} \quad I_y = \frac{s*b^3}{12} \quad I_z = \frac{b*s^3}{12} \quad (1)$$

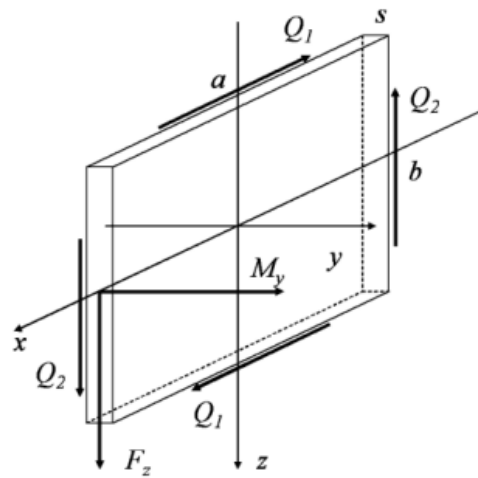


Figura 7: Superfície retangular plana.

(Fonte: Genta e Morello, 2008).

Como o momento de inércia I_y é maior que I_x e I_z , o plano estrutural da chapa, será capaz de resistir somente forças de flexão no eixo y , tendo como exemplo, a execução de uma força em F_z na lateral do quadro, pode ser equilibrado, utilizando duas forças de cisalhamento Q_1 e Q_2 empregado aos dois lados, assim satisfazendo a equação 2.

$$Q_1 b - Q_2 a = 0 \quad (2)$$

As forças de cisalhamento são aplicadas, quando houver uma limitação, podendo ser outro quadro perpendicular soldado ao primeiro painel, considerando a espessura limitada, painéis são confeccionados em diferentes formas, contudo sempre será caracterizado por sua capacidade de resistir a forças somente em seu plano.

2.4.4 ELEMENTO DE VIGA (BEAM)

O elemento de viga é normalmente utilizado em expressões numéricas, empregado no projeto de estruturas automotivas, vigas permitem uma representação simplificada das tensões e deformação da estrutura do veículo, assim como na análise estrutural os modelos matemáticos são definidos utilizando o método dos elementos finitos (MEF).

Todos os elementos de viga são fixados por nós, sendo que um elemento pode ter até dois nós, o que mostra a (figura 8), o chassi é construído utilizando de tubos de aço, assim os tubos representam o elemento de viga, cada componente e soldado, formando a união entre os tubos, representando os nós. Para os elementos de viga se calcula os esforços apenas no eixo x, sendo esforços de tração e compressão.

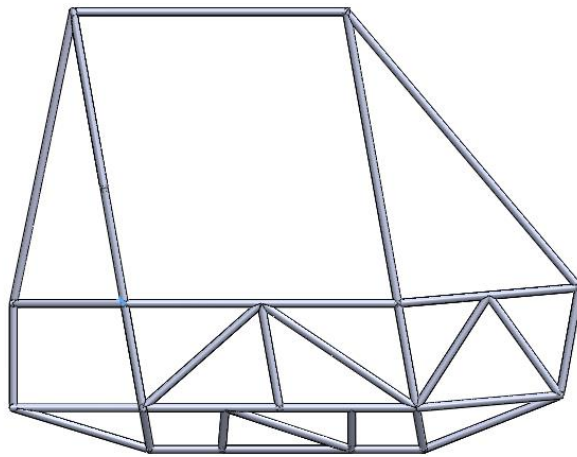


Figura 8: Elemento de viga.

(Fonte: AUTOR,2020).

Elementos de viga facilitam a análise computacional, estruturas sólidas necessitam de um número enorme de elementos na malha, sendo necessário um tempo maior para mapear toda a estrutura, em elementos de viga é necessário um número menor de componentes para ser estruturados, tem em vista que a seção transversal não precisa ser esquematizada, sendo importante apenas suas propriedades.

Segundo Genta e Morello (2008), a viga é um componente simples, um segmento unido por dois nós, com seis graus de liberdade, sendo a área e momento de inercia atribuindo uma seção fechada ao corpo.

A teoria de De Saint Venant e a formulação do elemento de viga, são coincidentes, utilizando componentes desse tipo, podemos descrever a estrutura como um *Space frame* de vigas, pode ser definido o posicionando abaixo da forma exterior, assim atribuindo uma seção transversal compatível, assim como sua geometria é definida por seções transversal.

2.4.5 MALHA E REFINAMENTO

A precisão do resultado no método dos elementos finitos, está associado a quantidade de elementos utilizados na simulação, sendo o conjunto de elementos chamado de malha, o método escolhe uma unidade contida e discreta do modelo, afim que os resultados obtidos na simulação condizem com o comportamento real da estrutura, na (Figura 9), um chassi com a malha aplicada em sua estrutura demonstra os elementos da malha, quanto maior for o número de elementos, mais aproximado os resultados numéricos dos reais (LOTTERMANN,2015).

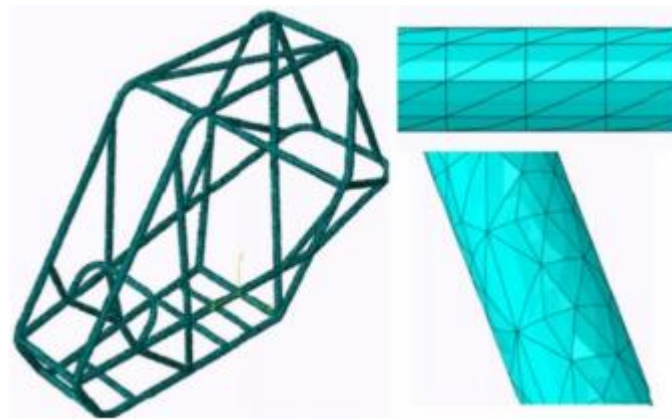


Figura 9: Aplicação de malha chassi space frame.

(Fonte: Lottermann, 2015).

O refinamento da malha aumenta a quantidades de elementos na estrutura, sendo fixados por pontos nodais (nós), quanto maior o número de componentes na malha mais aproximado será o resultado numérico com o real. Elementos e pontos nodais representados pela (Figura 10).

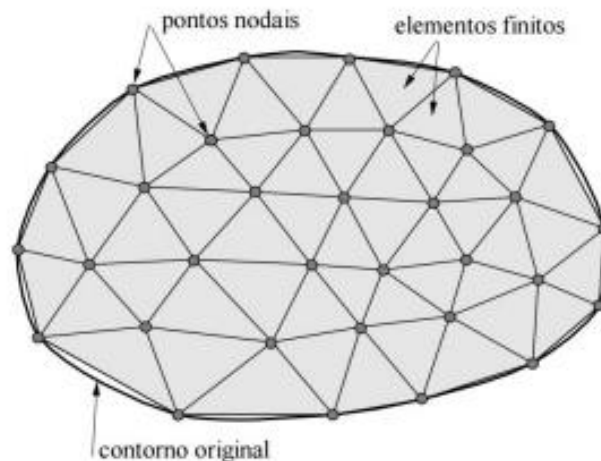


Figura 10: Elementos e pontos nodais.

(Fonte: Souza, 1990).

2.5 REGRAS FUNDAMENTAIS

A importância da análise através do método dos elementos finitos, na resolução de problemas estruturais, diz a respeito à determinação da configuração deformada da estrutura, utilizando o cálculo dos deslocamentos nodais, assim as forças atuantes em um componente e seu respectivo deslocamento estão associados entre si, bem como a rigidez associada ao elemento, a resolução matemática permite a resolução do problema baseia-se em algumas leis fundamentais (ALVES FILHO, 2013).

2.5.1 EQUILÍBRIO DE FORÇAS

O equilíbrio é um cenário de repouso ou de movimentação uniforme constante de uma estrutura física, isso acontece quando as forças que atuam sobre o corpo, apresentam força resultante igual à zero, sendo classificado como, equilíbrio estático quando o corpo está em repouso e equilíbrio dinâmico quando o corpo possui uma movimentação constante. Uma estrutura se encontra em condição de equilíbrio, aplica-se a equação de equilíbrio (Figura 11), no estudo da mecânica utiliza-se cada elemento de forma isolada (ALVES FILHO, 2013).

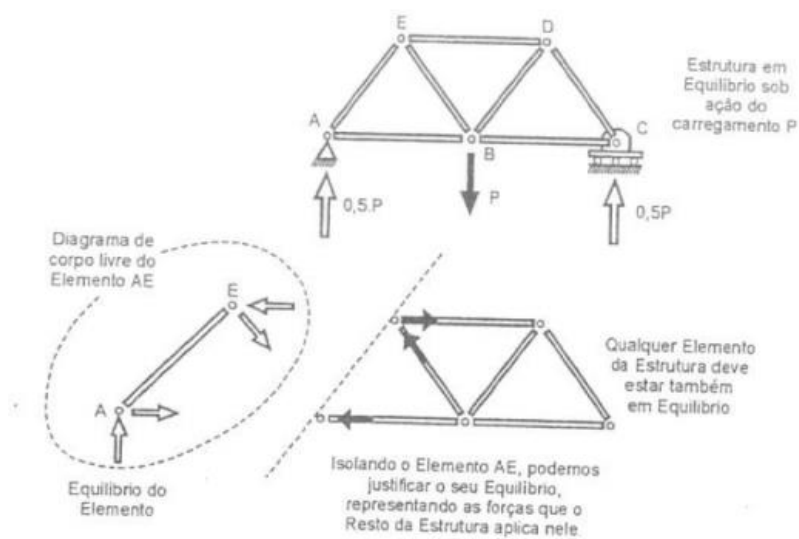


Figura 11: Representação de equilíbrio de forças em um conjunto de elementos.

(Fonte: Adaptado de Alvez Filho, 2013).

2.5.2 COMPATIBILIDADE DE DESLOCAMENTO

A compatibilidade apresenta a situação geométrica que satisfaz a estrutura ao ser deformada, permanece de forma contínua sem vazios ou sobreposição de pontos (Figura 12), os elementos amarrados pelos nós devem permanecer ligados após a deformação (ALVES FILHO, 2013).

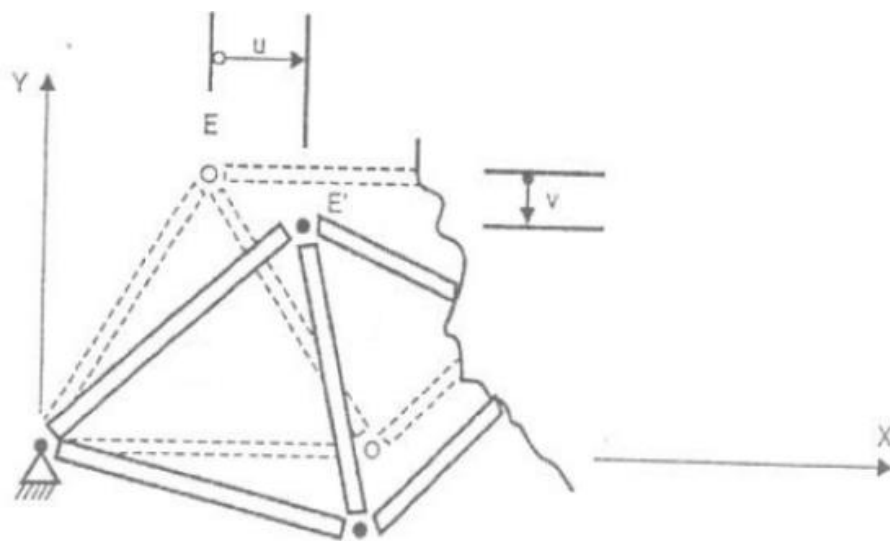


Figura 12: Compatibilidade de deslocamento.

(Fonte: Adaptado de ALVES FILHO, 2013).

2.5.3 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LINEAR

Quando um elemento recebe uma força, a peça sofre uma deformação, sendo o seu deslocamento proporcional a força aplicada, ao remover a força aplicada o material retorna a sua forma padrão, sendo uma propriedade dos corpos sólidos, atribuindo um deslocamento limitado, pode-se utilizar a relação entre força e deslocamento como demonstrada na equação 3.

$$F = k * x \quad (3)$$

F - Força elástica (n)

K - Constante elástica (N/m)

X – Deformação do material (m)

2.6 ANÁLISE ESTÁTICA

Com a análise estática são averiguadas as tensões aplicadas a estrutura do chassi, resultante dos carregamentos internos constante, como por exemplo, o peso das baterias, transmissão, motor, ocupante, chassi e demais componentes, bem como é possível fazer uma análise estática externa, como exemplo, a aplicação de uma carga constante na carroceria de uma picape, no estudo estático as forças inerciais e de amortecimento são desconsideradas, desta forma, verificamos a amplitude dos esforços internos e seu deslocamento, sendo assim, possível determinar os valores de deformação, deslocamento e tensões, utilizando o critério de falha de Von Mises.

Quando aplicado uma carga sobre a estrutura de forma gradual o suficiente, as forças inerciais são ignoradas, assim a análise do problema pode ser simplificada como uma força estática, assim pode-se verificar a deformação linear da estrutura.

2.6.1 ANÁLISE DINÂMICA

A análise dinâmica leva-se em consideração forças inerciais e de amortecimento, sendo computadas para a análise, o chassi está sujeito a forças de

aceleração, com as forças variando a sua intensidade, assim como a sua direção e sentido, o ensaio dinâmico fornece resultados aproximados do comportamento da estrutura em diversas situações, bem como capotamento e impactos, como os métodos de análise trabalham com sistemas lineares o resultado obtido se aproxima do comportamento real do chassi.

2.6.2 ANÁLISE MODAL

A análise modal determina a magnitude das excitações, por uma determinada frequência, o resultado é obtido através da vibração de uma estrutura e sua frequência natural, quando a frequência natural de um objeto, corresponde a frequência de agitação, ocorre um fenômeno de ressonância, sendo prejudicial a estrutura, ocasionando deslocamentos elevados, sendo capaz de originar trincas em casos extremos bem como o colapso da armação (FURTADO, 2014).

Portanto a análise modal determina as frequências naturais da estrutural, assim evitando que a estrutura trabalhe próxima a sua frequência de ressonância indesejada, alterando a massa, geometria e rigidez do sistema é possível deslocar as curvas de repetição da estrutura.

2.6.3 RIGIDEZ FLEXIONAL

Quando o automóvel se depara com uma superfície sinuosa, ocorre uma translação na suspensão, sendo que o translado acontece de forma separada entre o conjunto traseiro e dianteiro da suspensão, dessa forma a estrutura do veículo sofrerá um momento fletor (M_y) através do eixo longitudinal da armação, conforme retrata a (Figura 13) (GILLESPIE 1992).

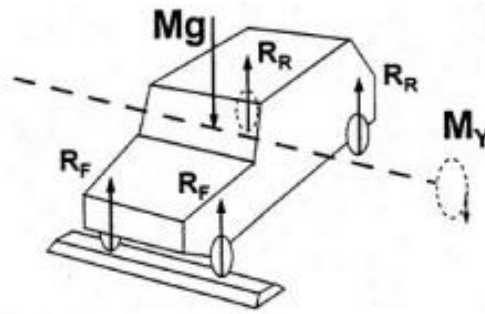


Figura 13: Translação vertical da suspensão dianteira.

(Fonte: Adaptada de Gillespie, 1992).

O chassi está sujeito a uma solicitação de flexão, em conjunto com a massa (Mg) do automóvel, a capacidade do chassi para resistir a essa deflexão é chamada de rigidez flexional, sendo a estrutura do veículo dimensionado para suportar qualquer situação de uso habitual do veículo, como oscilações do terreno, buracos e lombadas, quando for possível suportar grandes deslocamentos verticais aplicados ao conjunto de suspensão (GILLESPIE, 1992).

2.6.4 RIGIDEZ TORSIONAL

O veículo em determinada circunstância desloca-se por ondulações no solo que desloca apenas uma das rodas (R_1 e R_2), o chassi do veículo receberá um momento fletor (M_y) e um torsor (M_x), por toda a extensão longitudinal do chassi, a combinação de carregamentos provoca estresse severo na estrutura, sendo um fator de atenção em projetos automotores, conforme (Figura 14) (GILLESPIE, 1992).

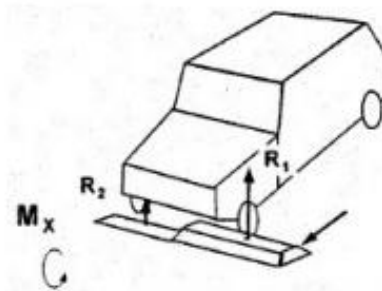


Figura 14: Translação vertical da suspensão dianteira direita.

(Fonte: Adaptado de Gillespie, 1992).

3 METODOLOGIA

O projeto tem como propósito analisar a estrutura de um veículo elétrico, com as baterias dispostas no assoalho, tendo em vista a segurança do piloto, bem como a proteção do conjunto de baterias.

Para confecção da estrutura foi utilização Tubos de aço SAE 1020, com diâmetro de 21.3mm e espessura de 2.7mm, sendo as propriedades mecânicas descritas na tabela 1, possui excelente soldabilidade, característica muito importante para a construção de um chassi *Space frame*, já que os tubos metálicos são fixos por solda, como o aço 1020 possui em media 0,20% de carbono, em função dessa baixa concentração, esse aço apresenta como principal propriedade uma elevada ductibilidade e baixa temperabilidade, o que confere ao material uma excelente soldabilidade.

Teor de carbono	0.20%
Modulo de elasticidade	205GPa
Limite de escoamento	352MPa
Massa especifica	0,00787 kg/cm ³
Resistência a tração	420 MPa
Modulo de cisalhamento	80 GPa
Coeficiente de Poisson	0.29

Tabela 1: Propriedade do Aço SAE 1020.

(Fonte: Azo, 2013).

3.1 MODELO

Optou-se pela escolha do chassi *Space frame* na construção do modelo, por possuir uma estrutura rígida, resistente, leve e grande flexibilidade, permitindo modificações no projeto, para se adequar de forma mais eficiente a diferentes aplicações, bem como a possibilidade de utilizar diferentes matérias em sua fabricação, Para a construção da estrutura do modelo conforme (Figura 15) foi utilizado o *software SolidWorks 2018*, e para sua análise estruturante foi utilizado o *SolidWorks Simulation*.

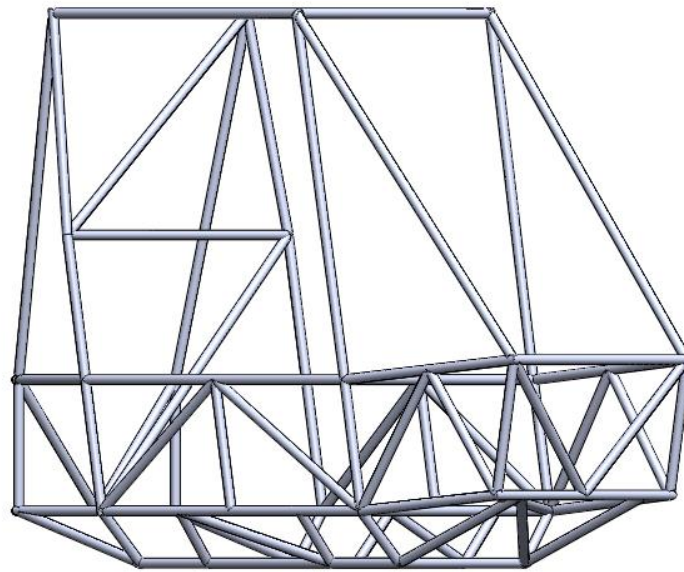


Figura 15: Modelo chassi Space Frame.

(Fonte: Autor, 2020).

O chassi *Space frame* possui uma excelente resistência, pelo qual os componentes são posicionados em distintas formas e posições tridimensionais, oferecendo altíssima rigidez a estrutura, bem como possui uma alta flexibilidade a modificações e aplicações. Foram utilizados tubos circulares para a confecção da carcaça, para a fixação dos componentes foi aplicado o elemento de solda, tornando a estrutura presa, assim sendo possível fazer a análise estática da estrutura, sendo que elementos não especificados acarretam erros na análise, tornando-se necessário especificar cada elemento do chassi.

3.2 CHASSI E SUPORTE DE BATERIAS VISTA EXPLODIDA

Conforme (Figura 16), podemos visualizar a estrutura do chassi, sendo fixado na armação superior, motor, transmissão, banco e demais componentes, e a armação inferior é fixa o conjunto de baterias, a vista explodida facilita a visualização da estrutura, demonstrando de forma mais simples os componentes do chassi. Sendo possível a construção de veículo com motor a combustão, sendo a parte inferior desnecessária para essa aplicação.

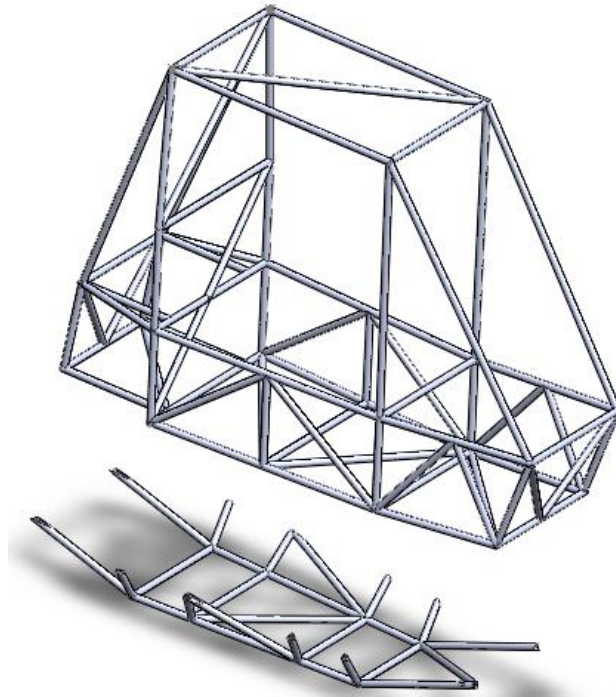


Figura 16: Vista explodida chassi Space Frame elétrico.

(Fonte: Autor, 2020).

As principais alterações em um veículo elétrico em comparação a um veículo puramente a combustão está relacionado com o posicionamento do reservatório de energia para o motor, as baterias são posicionadas no assoalho do veículo, conforme (Figura 16), como as baterias ocupam espaço e fornecem uma carga extra a estrutura, a construção de um reservatório é necessário, assim a uma separação do piloto com o conjunto elétrico, protegendo o ocupante de possíveis falhas, bem como a parte superior é responsável pela segurança e acomodação do piloto e o elemento inferior responsável pelo aposento e segurança das baterias.

3.3 PESO DA ESTRUTURA

A massa do chassi é um fator importante no desempenho do veículo, quanto maior a massa da estrutura do veículo, mais potência será necessária para deslocar o conjunto, bem como exigirá mais do conjunto de suspensão do veículo, conforme Figura 17, a massa da estrutura é de aproximadamente 53 Kg, sendo uma armação leve e rígida, também é apresentado o centro de massa do chassi, conforme os

componentes forem posicionados na estrutura o centro de massa muda, podendo haver uma distribuição mais traseira ou dianteira, alterando a dinâmica do veículo.

Optou-se pela utilização do aço SAE 1020, devido ao baixo custo de aquisição dos tubos em comparação com outros materiais, bem como é possível a utilização de outros insumos para a construção do chassi, como aços ligas, alumínio e compósitos.

Densidade = 7.87 gramas por centímetro cúbico
 Massa = 53411.82 gramas
 Volume = 6786.76 centímetros cúbicos
 Área de superfície = 4987068.72 milímetros quadrados
 Centro de massa: (milímetros)
 X = -24.49
 Y = 294.29
 Z = 0.16

Figura 17: Massa e centro de massa do chassi.

(Fonte: Autor,2020).

3.4 MALHA

Foi realizado um refinamento de malha a fim de melhorar os resultados da análise estrutural do chassi, sendo utilizado o modelo de malha para vigas, com um total de 4913 nós e 4888 elementos, com um tempo de 10 segundos para sua conclusão (Figura 18), o refinamento da malha aumenta a quantidade de elementos na viga, sendo fixados por pontos nodais (nós), quanto maior o número de componentes na malha mais aproximado será o resultado numérico com o real.

Nome do estudo	Estudo de Malha (-Valor predeterminado<Como usinado>-)
Tipo de malha	Malha de viga
Controle de malha	Definido
Total de nós	4913
Total de elementos	4888
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss)	00:00:10

Figura 18: Refinamento da malha.

(Fonte: Autor,2020).

Na (Figura 19), podemos visualizar a malha já aplicada na estrutura do chassi onde foi utilizado o método de elemento de viga, este método é normalmente utilizado em expressões numéricas e muito empregado no projeto de estruturas automotivas, pois as vigas permitem uma representação simplificada das tensões e deformação da estrutura do veículo.

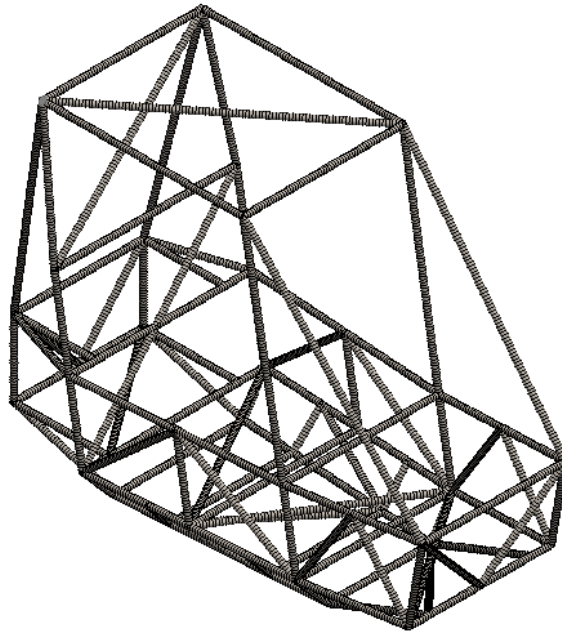


Figura 19: Malha aplicada no chassi.

(Fonte: Autor,2020).

3.5 PONTOS DE FIXAÇÃO

Inicialmente é necessário determinar o ponto de ancoragem do chassi, sendo fixados próximos do ponto de apoio da suspensão, totalizando 12 pontos, sendo 6 pontos de apoio dianteiros e 6 traseiros, na (Figura 20) podemos ver os pontos de fixação em verde. Para a análise torsional foi utilizado apenas 6 pontos de apoio, sendo 3 pontos localizados na dianteira esquerda e 3 pontos na traseira direita, a utilização dos pontos de apoio determina a direção e sentido em que a estrutura está amarrada.

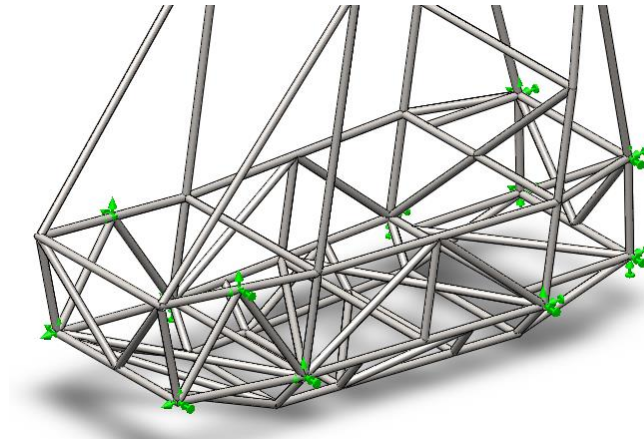


Figura 20: Pontos de fixação do chassi.

(Fonte: Autor,2020).

3.6 ANÁLISE ESTRUTURAL

3.6.1 DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA

A deformação da estrutura é causada pelo carregamento dos componentes mecânicos e piloto, presentes ao longo do chassi, sendo os elementos e carga máximos aplicados a estrutura descrita na Tabela 2. Para a análise de deformação e tensão a massa de 52 Kg do veículo foi considerada.

Componente	Massa (kg)
Motor elétrico	23
Baterias	93
Piloto	95
Banco	14
Transmissão	12
Demais componentes	35
Total	272

Tabela 2: Massa presente na estrutura.

(Fonte: Autor, 2020).

Os componentes do veículo provocam uma força sobre o chassi, causando uma deformação na estrutura da armação, quanto maior a carga, maior a

deformação. Para o projeto foi desenvolvido uma análise estática do chassi, descartando as forças amortecidas pela suspensão do veículo, sendo consideradas apenas as forças inerciais.

3.6.2 PONTO CRÍTICO

O ponto crítico é provocado devido a uma distribuição não uniforme na estrutura do chassi, sendo assim um determinado ponto da estrutura pode estar sujeito a uma carga maior, denominado como o ponto crítico da estrutura, utilizando o *software SolidWorks*, para isso foi desenvolvido uma análise estática do chassi. Utilizando o mesmo carregamento proposto conforme tabela 2, também foi considerada a massa de 52 Kg do chassi, e os mesmos pontos de fixação conforme (Figura 20). Neste processo são obtidos os resultados da tensão máxima em N/mm^2 ou Mpa, o método utilizado pelo programa foi o critério de falha de Von Misses, processo utilizado para determinar a deformação em pontos específicos em materiais como o aço 1020.

3.6.3 ANÁLISE TORSIONAL

O chassi está sujeito a esforços que atuam verticalmente nos pontos de apoio da suspensão, ocasionando uma torsão no chassi. Para esta constatação foi realizada uma simulação, em que o veículo se encontra apoiado apenas em duas rodas (dianteira esquerda e traseira direita), assim foi possível obter os resultados de deformações máximas e mínimas da estrutura, bem como conseguimos obter os resultados de tensão máxima e mínima distribuídas na estrutura, sendo possível identificar que, um caso extremo de esforço poderá ocasionar danos a sua armação.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES.

Com todos os parâmetros estabelecidos para a construção da estrutura do chassi, foi desenvolvida uma análise dela, a fim de verificar o seu comportamento quando submetido a algumas situações que poderiam simular a sua aplicação real.

Nos testes computacionais foram validadas as questões de deformação na estrutura, ponto crítico e análise torsional obtendo os resultados expostos a seguir.

Na análise estática representada pela (Figura 21), podemos identificar os pontos da estrutura que estarão sujeitos a maior carga, demonstrando as tensões máximas e mínimas sobre a estrutura, de modo respectivo em vermelho e azul, sendo indicado o ponto crítico do chassi, localizado na parte inferior da armação, com uma tensão de 95 (Mpa), desse modo a tensão máxima e inferior ao limite de escoamento do material.

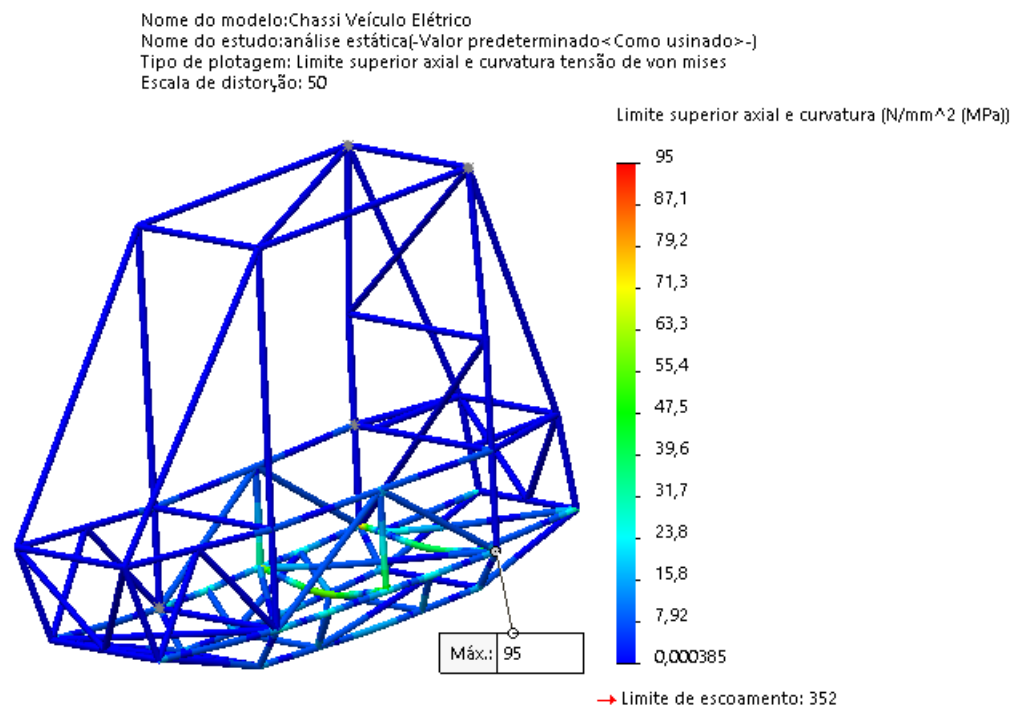


Figura 21: Análise estática, tensão máxima e mínima do chassi.

(Fonte: Autor, 2020).

O ponto crítico da estrutura está submetido a um acúmulo de tensões, como demonstra a (Figura 21), o ponto crítico está localizado em uma junção de vários tubos, a união de várias vigas (elementos) no mesmo ponto (nó), pode acarretar em

uma acumulação de forças, o que pode ter acarretado no ponto de maior tensão da estrutura, levando em consideração que a maioria dos elementos da estrutura estão em azul escuro, que representa uma baixa tensão no componente.

O deslocamento provocado pelo carregamento é demonstrado pela (Figura 22), onde os resultados obtidos de máximo e mínimo são representados em vermelho e azul sendo, 0.862 mm e 1×10^{-30} mm, sendo assim a estrutura sofrera um pequeno deslocamento, no qual a rigidez da armação não será afetada.

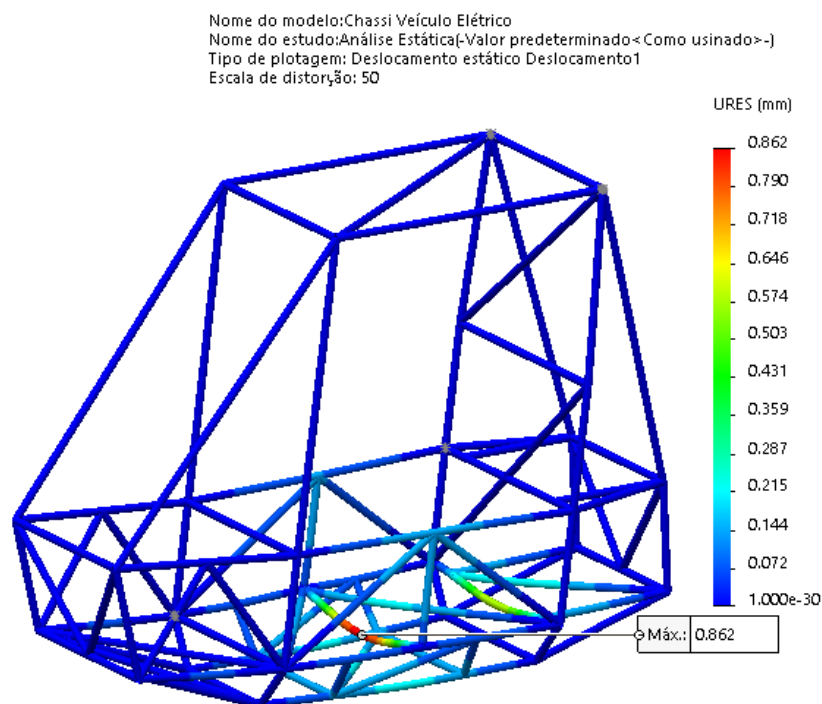


Figura 22: Análise estática, deslocamento da estrutura.

(Fonte: Autor, 2020).

Na análise torsional conforme a (Figura 23) apresenta o resultado da tensão máxima e mínima na estrutura do chassi, sendo o ponto crítico da armação localizado na parte inferior, com uma tensão de 103 Mpa, desse modo a tensão máxima é inferior ao limite de escoamento do material. Sendo o ponto crítico da estrutura localizado no mesmo ponto da análise estática, podendo haver um acúmulo de tensões devido a um número maior de elementos no mesmo ponto, visto que o modelo de chassi *Space frame* é modular o reposicionamento de alguns tubos pode melhorar o desempenho do chassi.

Para calcular o coeficiente de segurança do chassi foi utilizada a maior tensão sobre a estrutura, sendo 103 Mpa e o limite de escoamento de 352 Mpa, representados na (Figura 23), conforme a equação 5, foi obtido um fator de segurança de aproximadamente 3.4, sendo assim a estrutura suportara 3 vezes o carregamento proposto.

$$Cs = \sigma_{limite} / \sigma_{admissivel} \quad (4)$$

$$Cs = 352 / 103 = 3.417 \quad (5)$$

Cs = coeficiente de segurança

σ limite= tensão de escoamento

σ admissível= tensão máxima sobre a estrutura.

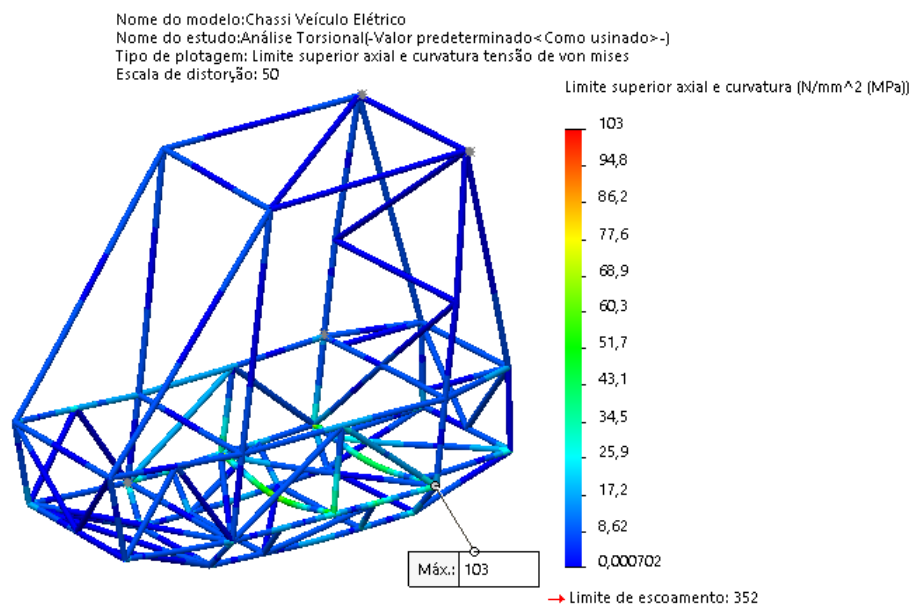


Figura 23: Análise torsional, tensão máxima e mínima do chassi.

(Fonte: Autor, 2020).

O deslocamento provocado pelo carregamento é demonstrado pela (Figura 24), onde os resultados obtidos de máximo e mínimo são representados em vermelho e azul sendo, 0.977 mm e 1×10^{-30} mm, sendo assim a estrutura sofrera um pequeno deslocamento, no qual a rigidez da armação não será afetada.

Na análise torsional foram obtidos os maiores valores de tensão e deslocamento da estrutura, a utilização de um número menor de pontos de apoio na

armação, deixou o chassi mais livre, quando comparado com a análise estática utilizando mais pontos de apoio, a torsão da estrutura proporcionou um número maior de elementos com deslocamento conforme (Figura 24).

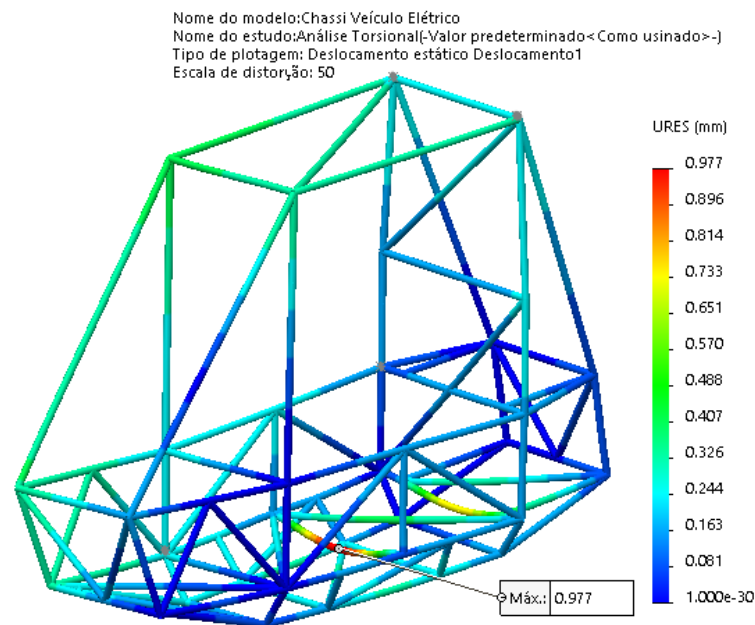


Figura 24: Análise torsional, deslocamento da estrutura.

(Fonte: Autor, 2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto um veículo elétrico, utilizando o modelo de chassi *Space frame*, pois se trata de uma estrutura rígida e leve, possuindo grande flexibilidade em sua construção, a estrutura foi desenvolvida para receber um conjunto de baterias no assoalho.

Nas análises computacionais, foi simulado algumas situações enfrentadas pelo chassi durante sua vida, sendo análise estática e torçiona da estrutura, realçando a utilização do método dos elementos finitos para analisar o comportamento do chassi sobre o carregamento proposto, possuindo bom desempenho na análise comportamental da estrutura, foi utilizado para confecção e análise da estrutura o *software SolidWorks*.

O método computacional utilizado trabalha com uma análise linear, sendo utilizado o limite de escoamento do material, para determinar a deformação e tensão sobre a estrutura, segundo (HAPPIAN-SMITH, 2001), para a pior situação de carregamento, o stress não poderá exceder 67 % da tensão de escoamento do material, sendo assim o coeficiente mínimo de segurança é de 1.5, sendo obtido um Cs de 3.4 acima do mínimo previsto.

Na análise estática, obteve-se um resultado de tensão de 95 Mpa, sendo o limite de escoamento do aço 1020 de 352 Mpa, sendo assim o resultado é considerado satisfatório para a aplicação proposta, bem como a deformação máxima foi de 0.862 mm, suportando o carregamento sem grande deformação.

Os resultados obtidos da análise torsional, apresentaram uma de tensão de 103 Mpa, sendo o limite de escoamento do aço 1020 de 352 Mpa, sendo assim o resultado é considerado satisfatório para a aplicação proposta, bem como a deformação máxima foi de 0.977 mm, suportando o carregamento sem grande deformação.

Foi observado que o ponto crítico da estrutura se localiza em um arranjo de elementos fixados por um ponto, podendo assim haver um acúmulo de tensões sobre o local, bem como poderá existir uma zona termicamente afetada maior nos tubos, devido à necessidade de soldar várias vigas no mesmo ponto.

5.1 SUGESTÃO DE PESQUISAS FUTURAS

Com base na bibliografia utilizada no estudo.

- Realizar uma análise de impacto na estrutura, a 60 km/h.
- Reposicionar de forma mais eficiente os elementos da estrutura, assim verificando se o ponto crítico foi causado pelo acúmulo de tensões.
- Execução de análises dinâmicas na estrutura, com foco na vibração e fadiga do chassi.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica. 2013.

AZEVEDO, A. F. M.; **Método dos elementos finitos**. Universidade do porto, abril de 2003, 1 edição.

BAPTISTA, Rodrigo. **Venda de veículo a gasolina ou diesel pode ser proibida no Brasil em 2030**, disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/02/12/venda-de-veiculo-a-gasolina-ou-diesel-pode-ser-proibida-no-brasil-em-2030>> Acesso em: 30 de outubro de 2020.

BESTCARWEB. **Chassi tubular: a melhor opção para esportivos e carros de corrida**. 2003. Disponível em <<http://www1.uol.com.br/bestcars/ct/chassi.htm>> Acesso em: 18 de outubro 2020.

BISSCHOP, R.; WILLTRAND, O.; AMON, F.; ROSENGREN, M.; **FIRE SAFETY OF LITHIUM-ION BATTERIES IN ROAD VEHICLES**. RISE, REPORT 2019.

BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R.; **Nomenclatura e classificação dos sistemas eletroquímicos**. Química Nova na Escola, 2000.

CONGRESS, Green Card. **Jaguar reveals 500km-range battery-eletric I-PACE Concept SUV: production version in 2018**. Disponível em <<https://www.greencarcongress.com/2016/11/20161115-jaguarpace.html>> Acesso em 21 de outubro de 2020

ESTAPAR, 2020. **Saiba quanto custam as baterias de carros elétricos e quem recicla**. Disponível em <<https://www.estapar.com.br/blog/saiba-quanto-custam-baterias-carros-eletricos-e-quem-recicla-a>>. em : 30/11/2020

EXOMOTIVE. 2015. Disponível em: <<http://exomotive.com/exocet/>>. Acesso em: 11 de outubro de 2020.

FILHO, A. A., prof. Dr. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Erica, 2000.

FONTAINHAS, J. J. C, **avaliação da viabilidade econômica da aquisição de um veículo elétrico em Portugal**. Universidade do moinho outubro 2012.

FORMULASTUDENT. **Pat'sColumn - Space-frame Chassis**. 2009. Disponível em: <<https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/pats-column-space-frame-chassis/>>. Acesso em: 21 de outubro de 2020.

FURTADO, D. C. **Análise estrutural de chassi de veículos automotivos**. 2014.

GENTA, G.; MORELLO, L. The Automotive Chassis: Volume 1: **Components Design**. Springer Netherlands, 2008. (MechanicalEngineering Series). Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ZBrg8iwcRfsC>>. Acesso 27 de outubro de 2020.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. [S.l.]: SAE International, 1992. ISBN 978-1-56091-199-9.

HAPPIAN-SMITH, J. **An introduction to modern vehicle design**. [S.l.]: Elsevier, 2001.

Hoyer, K.G. (2008) **The History of Alternative Fuels in Transportation: The Case of Electric and Hybrid Cars**.

INFOCO, Carros. **Chassi monobloco 2018**. Disponível em <<https://carrosinfoco.com.br/2018/07/detalhes-mecanicos-de-chassi-e-carroceria-parcialmente-unidos/>> Acesso em 17 de outubro de 2020

LOTTERMANN, J. P. T. **Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibaja: análise numérica e experimental**. 2015.

MATERIALS, AZO. **1020 Carbon Steel 2013**. Disponível em <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>> Acesso em 18 de outubro de 2020.

PLANETCARSZ, **Delorean Chassi Tipo Espinha Dorsal**. Disponível em <<http://planetcarsz.com/assets/uploads/DELOREAN%20DMC%2012%20PROTOTYP E%201976%2014.jpg>> acesso em 22 de outubro de 2020.

SOUZA, M. A. **Chassis: Estudo dos pneus e rodas**. [S.l.], 1990.

VARGAS, J. E. V.; SEABRA, J. E. A.; WALTER, A. C. S.; CAVALIERO, C. K. N.; FALCO, D. G. **Avaliação do ciclo de vida de veículos elétricos e de veículos flex fuel nas condições brasileiras**. 2016.

ANEXO 1 – DESENHO DO CHASSI

