



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Automotiva

PROJETO CONCEITUAL E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VEÍCULO MODULAR

Autor: Guilherme de Souza Cayres Ramos
Orientador: Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda
Coorientador: Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura

Brasília, DF
2018



Guilherme de Souza Cayres Ramos

PROJETO CONCEITUAL E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VEÍCULO MODULAR

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

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda
Coorientador: Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura

Brasília, DF

2018

Guilherme de Souza Cayres Ramos
PROJETO CONCEITUAL E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VEÍCULO
MODULAR/ Guilherme de Souza Cayres Ramos. – Brasília, DF, 2018-
132 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2018.

1. Conceito. 2. Modular. I. Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda. II. Univer-
sidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. PROJETO CONCEITUAL E
ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VEÍCULO MODULAR

CDU 02:141:005.6

Guilherme de Souza Cayres Ramos

PROJETO CONCEITUAL E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VEÍCULO MODULAR

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

Trabalho apresentado e aprovado na data 04/12/2018, em Brasília, DF, pela banca examinadora:

Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda
Orientador

Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura
Coorientador

Prof^a. MSc. Eneida Gonzalez Valdes
Convidada

Prof. MSc. Saleh Barbosa Khalil
Convidado

Brasília, DF
2018

Dedico este trabalho aos meus pais Erick e Ingrid, que me ensinaram que tudo é possível, no tempo certo.

Agradecimentos

Sou muito grato à Deus, primeiramente, por me conceder força, disposição, amor pelo que faço, perseverança e fé para galgar os mais diversos caminhos. Aos meus pais, que me ensinaram a sempre dar o melhor de mim, ter garra, caráter e dedicação, os segredos para o sucesso em qualquer carreira. Ao professor e orientador Mateus Miranda, pela orientação, paciência, suporte, confiança e oportunidade. À minha namorada Karine, pela ajuda na construção de desenhos, doses de ânimo, sorvetes, incentivos constantes e pela paciência. Aos companheiros de curso Jonatas Mangabeiro, Matheus Bolelli, Felipe Soares e muitos outros que me apoiaram nessa jornada até a graduação.

*“Na adversidade, uns desistem, enquanto outros
batem recordes.”
(Ayrton Senna)*

Resumo

O presente trabalho de conclusão de curso aborda o projeto, em nível conceitual e estrutural, de um veículo compacto para dois ocupantes. Para a escolha do modelo conceito são analisadas as necessidades de mercado com relação à mobilidade, à inovação, à redução de custo, ao aumento de sofisticação com uso de sistemas elétricos e eletrônicos e à praticidade do condutor. Diferente dos conceitos, exclusivamente do universo do *Design*, como One Car e City Transmitter, o projeto Join, aqui desenvolvido, é um carro conceito aplicado à engenharia, por qual para cada módulo o carro se enquadra em uma categoria de micro carro à *pick-up* pequena. Detalhando o modelo Join, determinam-se as etapas de modelo em CAD, análise ergonômica, análise estrutural em elementos finitos utilizando como ferramenta os softwares de desenho industrial, o CATIA V5R21, de análise computacional, o ANSYS 18.1 e de renderização o KEYSHOT. Para validação do modelo utilizam-se as normas internacionais da SAE e, por fim, comparam-se os resultados das simulações computacionais com experimentos reais da indústria. Apresenta-se a contextualização do veículo em diversos segmentos e a análise de viabilidade técnica para garantir a competitividade na categoria.

Palavras-chave: Carro Conceito. Carro Modular. Veículo Elétrico. Análise de Ergonomia. Método dos Elementos Finitos.

Abstract

The present work of conclusion of course approaches the project, in conceptual and structural level, of a compact vehicle for two occupants. In order to choose the concept model, the market needs are analyzed with respect to mobility, innovation, cost reduction, increasing sophistication with the use of electrical and electronic systems and the practicality of the driver. Unlike the concepts, exclusively from the Design universe, such as One Car and City Transmitter, the Join project, developed here, is a concept car applied to engineering, whereby for each module the car fits into a micro category car to small pick-up. In detail the Join model, it is determined the steps of CAD model, ergonomic analysis, finite element structural analysis using the industrial design software, CATIA V5R21, computational analysis, ANSYS 18.1 and KEYSHOT. In order to validate the model, SAE's international standards are used and, finally, the results of the computational simulations are compared with actual industry experiments. It presents the contextualisation of the vehicle in several segments and the analysis of technical feasibility to guarantee the competitiveness in the category.

Key-words: Concept Car. Modular Car. Electric Vehicle. Ergonomics Analysis. Finite Element Method.

Lista de ilustrações

Figura 1 – <i>Brainstorming</i> para projeto de veículo modular.	33
Figura 2 – Etapas básicas e desdobramentos do método MD3E. (1)	35
Figura 3 – Motores e baterias de um <i>Tesla Model S</i> . (2)	40
Figura 4 – BMW i8 Híbrida. (3)	41
Figura 5 – Espaço preenchido pelo sistema <i>carsharing</i> . (4)	42
Figura 6 – Eixos de rotação do Centro de Gravidade (C.G.). (5)	43
Figura 7 – Chassi escada de Chevrolet Silverado. (6)	43
Figura 8 – Exemplo de chassi monobloco. (7)	44
Figura 9 – Chassi <i>backbone</i> do DMC DeLorean. (8)	45
Figura 10 – Estrutura <i>space frame</i> de uma Mercedes 300SL. (9)	45
Figura 11 – Estrutura tubular de um veículo de competição projetado pela equipe UnBaja. (10)	46
Figura 12 – Em azul, câmara de combustão de dois tipos de motores. Tem-se em (a) um motor diesel, já em (b) um a gasolina. Adaptado de: Halderman(11)	47
Figura 13 – <i>Active Wheel</i> da Michelin com <i>in-hub motor</i> de 30kW.	48
Figura 14 – Exemplo de percentis 2,5%, 50% e 97,5%. (12)	50
Figura 15 – Informações contidas no <i>package</i> de um automóvel. (13)	51
Figura 16 – <i>Package</i> de um conceito não usual. (13)	51
Figura 17 – Superfície estrutural simples composta por um painel retangular plano. (14)	53
Figura 18 – Diferentes tipos de painéis necessários para a montagem de um <i>sedan</i> de quatro portas <i>hatchback</i> . (14)	54
Figura 19 – Esquemático de um modelo de vigas. (14)	55
Figura 20 – Posicionamento de mercado demonstrando a possibilidade para inserção do veículo modular em 1, da versão com quatro portas em 2 e da versão <i>pick-up</i> em 3. Adaptado de: Macey, Wardle e Gilles(13).	58
Figura 21 – Conceito One Car (15).	59
Figura 22 – Conceito Citi Transmitter (16).	60
Figura 23 – Esboço manual preliminar. Fonte: Gusmão, G., 2015	61
Figura 24 – Vistas ortogonais e <i>package</i> preliminar em 2D.	62
Figura 25 – Projeto em construção no <i>software</i> Catia.	62
Figura 26 – Corte realizado na carroceria para o para-brisa do tipo <i>zenith</i>	63
Figura 27 – Vista isométrica preliminar do Join em cor branca.	64
Figura 28 – Vista superior preliminar do Join em cor roxa.	64
Figura 29 – Vista lateral atual do Join em cor branca.	65
Figura 30 – Vista frontal atual do Join em cor roxa.	65

Figura 31 – Vista isométrica preliminar do Join com módulo de carga.	66
Figura 32 – Vista isométrica atual do Join com módulo de passageiros.	66
Figura 33 – Desenho técnico do veículo modular.	70
Figura 34 – Dados para <i>package</i> . Fonte: CATIA V5R21	71
Figura 35 – Bateria de íon-lítio 180 Ah Voltronix (17).	73
Figura 36 – Altura do <i>H-point</i> em relação ao solo.	73
Figura 37 – Medida do espaço necessário para acomodação das baterias.	74
Figura 38 – Disposição das baterias no assoalho.	74
Figura 39 – Compartimentos Internos.	75
Figura 40 – Cotas internas para os ocupantes.	76
Figura 41 – Veículo com motorista percentil 95 masculino. (Vista isométrica frontal)	76
Figura 42 – Veículo com motorista percentil 95 masculino. (Vista isométrica traseira)	77
Figura 43 – Visão binocular (com visão periférica) do motorista percentil 95 masculino.	77
Figura 44 – Veículo com motorista percentil 50 masculino. (Vista isométrica frontal)	78
Figura 45 – Veículo com motorista percentil 50 masculino. (Vista isométrica traseira)	78
Figura 46 – Visão binocular (com visão periférica) do motorista percentil 50 masculino.	79
Figura 47 – Veículo com motorista percentil 5 feminino. (Vista isométrica frontal)	79
Figura 48 – Veículo com motorista percentil 5 feminino. (Vista isométrica traseira)	80
Figura 49 – Visão binocular (com visão periférica) da motorista percentil 5 feminino.	80
Figura 50 – Distancias entre passageiros traseiros.	81
Figura 51 – Dimensões da elipse da cabeça (18).	82
Figura 52 – Distância abóbada à coluna do veículo, segundo norma de 1997.	83
Figura 53 – Distância abóbada à coluna do veículo, segundo norma de 2010	83
Figura 54 – Distância ao teto do veículo, segundo norma de 1997.	83
Figura 55 – Distância ao teto do veículo, segundo norma de 2010.	83
Figura 56 – Definição do ângulo de obstrução da coluna A.	85
Figura 57 – Ângulo de visão externa à frente do carro.	86
Figura 58 – Ângulo de visão interna do painel de instrumentos.	86
Figura 59 – Bolha de alcance do motorista.	87
Figura 60 – Alcance maçaneta da porta.	87
Figura 61 – Análise RULA, percentil 95 masculino.	89
Figura 62 – Análise RULA, percentil 50 masculino.	89
Figura 63 – Análise RULA, percentil 5 feminino.	90
Figura 64 – Vista lateral evidenciando o centro de gravidade (CG) em <i>mm</i> do veículo carregado.	91
Figura 65 – Chassi tubular vinculado ao suporte das baterias.	92
Figura 66 – Vista em detalhe da malha gerada na fixação do chassi na carroceria.	92

Figura 67 – Gráfico de refino de malha do tipo H.	93
Figura 68 – Tensão equivalente de von Mises para flexo-torção.	94
Figura 69 – Resposta harmônica para deformação.	96
Figura 70 – Fator de amplificação dinâmica em função da deformação (Receptância).	97
Figura 71 – Fator de amplificação dinâmica em função da velocidade (Mobilidade).	97
Figura 72 – Fator de amplificação dinâmica em função da aceleração (Acelerância).	97
Figura 73 – Dispositivo para acoplamento entre módulos.	98
Figura 74 – Componente fixado na extremidade traseira direita do chassi.	98
Figura 75 – Tensão equivalente de von Mises para carregamento axial estático.	99
Figura 76 – Vista em detalhe dos pontos com menor fator de segurança.	100
Figura 77 – Configuração 25-5 do teste FMVSS 216 (19).	101
Figura 78 – Condições de contorno para esmagamento da coluna A, destacada em vermelho. Em (a), aparece a configuração 25-5 e em (b), a 45-10.	102
Figura 79 – Deformação em milímetros em dois pontos de risco para os ocupantes na configuração 25-5 (a) e 45-10 (b).	102
Figura 80 – Obtenção do ângulo máximo de esterçamento da roda interna do veí- culo em curva para a esquerda (20).	105
Figura 81 – Obtenção do ângulo máximo de esterçamento da roda interna do veí- culo em curva para a esquerda.	106
Figura 82 – Características da bateria de 180 Ah.	107
Figura 83 – Desenho técnico do chassi.	122
Figura 84 – Desenho técnico do acoplamento.	124
Figura 85 – Vista lateral com dimensões externas.	126
Figura 86 – Vista lateral com dimensões internas.	128
Figura 87 – Vista superior com dimensões internas.	130
Figura 88 – Vista traseira com dimensões internas.	132

Lista de tabelas

Tabela 1 – Quadro de classificação do conceito (21).	59
Tabela 2 – Valores package.	72
Tabela 3 – <i>Package</i> para ocupantes.	75
Tabela 4 – Localização do centróide da elipse. Adaptado de SAE(18).	82
Tabela 5 – Pontos do centróide	84
Tabela 6 – Quadro para <i>Eye Point</i>	84
Tabela 7 – Pontos <i>Neck Pivot</i>	84
Tabela 8 – Descrição do significado do <i>Score Rula</i>	88
Tabela 9 – Associação de cores à pontuação de cada item do RULA.	88
Tabela 10 – Quadro para cálculo do CG.	91
Tabela 11 – Frequências de ressonância do chassi.	95
Tabela 12 – Carregamento do tipo Degrau.	96

Lista de abreviaturas e siglas

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BVP	<i>Boiler and Pressure Vessel</i>
CAD	<i>Computer-Assited Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CG	Centro de Gravidade
CMT	Capacidade Máxima de Tração
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
MD3E	Método de Desdobramento em 3 Etapas
MEF	Método dos Elementos Finitos
NF	Normalmente Fechado
RULA	<i>Rapid Upper Limb Assessment</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SSF	<i>Static Stability Factor</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicles</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles</i>

Lista de símbolos

a	Eixo dianteiro
b	Distância do centro de gravidade até o eixo traseiro
d	Lado direito
δ	Letra grega minúscula delta
δ_o	Ângulo de esterçamento externo
δ_i	Ângulo de esterçamento interno
γ	Letra grega minúscula gama
H	Altura do CG
k_t	Rigidez torcional
k_{tc}	Rigidez torcional da carroceria
k_{tt}	Rigidez torcional do chassi
L	Distância entre eixo
M_x	Momento de rolagem
p	Eixo traseiro
s	Lado esquerdo
T	Bitola
W_{fs}	Peso sobre eixo dianteiro
W	Peso total do veículo
z	Variação da posição vertical da roda

Sumário

I	INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	29
1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Motivação e Justificativa	31
1.2	Objetivo Geral	31
1.3	Objetivos Específicos	32
1.4	Metodologia	33
1.4.1	<i>Brainstorming</i>	33
1.4.2	Regulamentação SAE <i>International</i>	34
1.4.3	Método de Desdobramento em 3 Etapas (MD3E)	34
1.4.4	Ferramentas	35
1.5	Organização do Trabalho	36
II	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ASPECTOS GERAIS	37
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1	Engenharia Automotiva	39
2.2	Projeto Conceitual	39
2.2.1	Eletrificação e Hibridização	40
2.2.2	Carro Compartilhado	42
2.3	Sistemas Automotivos	42
2.3.1	Estruturas Veiculares	42
2.3.1.1	Chassi Escada	43
2.3.1.2	Chassi Monobloco	44
2.3.1.3	Chassi tipo Espinha Dorsal	44
2.3.1.4	<i>Space Frame</i>	45
2.3.2	Motorização	46
2.3.2.1	Motor a Combustão Interna	46
2.3.2.2	Motor Elétrico	47
2.3.2.3	Motores nas Rodas	48
2.4	Ergonomia do Produto	49
2.4.1	Antropometria	49
2.4.2	<i>Package</i>	51
2.5	Análise Estrutural	52
2.5.1	Método dos Elementos Finitos	52
2.5.1.1	Elemento de Casca (<i>Shell</i>)	52

2.5.1.2	Elemento de Viga (<i>Beam</i>)	54
3	DESIGN AUTOMOTIVO	57
3.1	Pré-Concepção	57
3.1.1	Análise de Mercado	57
3.1.2	Posicionamento de Mercado	58
3.2	Concepção	59
3.2.1	Definição do Design	60
3.2.2	Construção do Modelo em CAD	61
III	ANÁLISE ERGONÔMICA, ESTRUTURAL E VIABILIDADE TÉCNICA	67
4	ANÁLISE DE ERGONOMIA	69
4.1	<i>Package</i> Proposto	71
4.2	Módulo Principal com Manequins	76
4.2.1	Manequim Masculino Percentil 95	76
4.2.2	Manequim Masculino Percentil 50	78
4.2.3	Manequim Feminino Percentil 5	79
4.3	Módulo de Passageiros com Manequins	81
4.4	Análise de <i>Clearance</i> da Cabeça	82
4.5	Análise com Elipse dos Olhos	84
4.6	Análises de Alcance do Motorista	87
4.7	Análises RULA	88
5	ANÁLISE ESTRUTURAL	91
5.1	Análise Estática	92
5.1.1	Teste de Flexo-Torção	93
5.2	Análise Dinâmica	94
5.2.1	Análise Modal	95
5.2.2	Análise Harmônica	95
5.2.3	Análise Transiente	96
5.3	Dispositivo de Acoplamento	98
5.3.1	Análise de Fadiga	99
5.4	Propensão ao Capotamento	100
5.4.1	Fator de Estabilidade Estática	100
5.4.2	Risco de Lesão dos Ocupantes	101
5.5	Rigidez à Torção	103
6	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA	105

6.1	Raio de Giro	105
6.2	Pacote de Baterias	107
6.3	Motor Elétrico Veicular	108
IV	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	109
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS	113
	ANEXOS	119
	ANEXO A – APÊNDICE A	121
	ANEXO B – APÊNDICE B	123
	ANEXO C – APÊNDICE C	125
	ANEXO D – APÊNDICE D	127
	ANEXO E – APÊNDICE E	129
	ANEXO F – APÊNDICE F	131

Parte I

INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a motivação e justificativa, objetivos gerais e específicos, metodologia e organização do trabalho de conclusão de curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília. Este que abrange três etapas de projeto para a concepção de um novo veículo, são elas: o design conceitual, modelagem 3D e a análise estrutural do chassi.

1.1 Motivação e Justificativa

O estudo e a prática da engenharia é a propulsora da geração de tecnologias e da otimização de processos e produtos já consolidados. Desta maneira a criação de ideias inovadoras torna-se mais provável, conseqüentemente, mais frequente. Em sua grande parte, o desenvolvimento econômico de um país depende de sua capacidade de inovação, esta que traz benefícios sobre a competitividade e a produtividade locais, permitindo o fortalecimento das empresas domésticas e o maior valor agregado. Além disso, possibilita, de maneira indireta, o surgimento de novos padrões de aprendizado e de novos mercados. (22)

Com o aumento populacional, cresce a demanda por mobilidade urbana que é suprida principalmente pelo automóvel privado, apesar de todos os problemas urbanos e ambientais que resultam do seu uso desenfreado. (4) Essa forma de uso também intensifica o risco de acidentes de trânsito devido à falha humana.

Tendo isso como motivação, este trabalho visa utilizar conhecimentos de projeto estrutural automotivo, do design e da ergonomia do produto para trazer um conceito nunca visto no mercado atual de automotores urbanos, um automóvel modular, pensado para um mercado do futuro, onde os veículos serão elétricos, compactos, compartilhados e autônomos.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é projetar um veículo compacto para dois ocupantes a nível conceitual e estrutural, no qual é possível o acoplamento de um módulo afim de ampliar a capacidade do carro. Esse módulo pode ser para passageiros ou para carga conforme a necessidade do condutor.

Para atingir o objetivo é necessária a definição da melhor estrutura veicular para essa aplicação e a melhor geometria para o dispositivo de acoplamento entre os módu-

los, assegurando dessa forma, o máximo de confiabilidade para conduzir o veículo com segurança.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são baseados em resultados do objetivo geral e podem ser definidos como as etapas do projeto deste trabalho:

- Definir a metodologia de realização do projeto;
- Contextualizar o veículo modular e seu ambiente de atuação;
- Elencar as necessidades e requisitos do projeto;
- Análise de mercado e projetos conceituais semelhantes;
- Definir o conceito a ser desenvolvido;
- Modelagem via CAD da estrutura principal, dos módulos de passageiros, de carga e dos demais sistemas veiculares;
- Análises ergonômicas;
- Análises estruturais do módulo principal;
- Modelagem via CAD do sistema de acoplamento carro-módulo;
- Análises estruturais do dispositivo de acoplamento;
- Análise de viabilidade técnica;

1.4 Metodologia

Faz parte do objetivo da metodologia o direcionamento e planejamento dos caminhos pelo qual se deve percorrer. No planejamento do produto é necessário identificar oportunidades, realizar pesquisas de marketing, fazer análises dos produtos concorrentes, qual a proposta do novo produto, elaboração das oportunidades e especificações de projeto. (23)

1.4.1 *Brainstorming*

Tendo direcionado o projeto para um carro compacto com otimização de espaço e versatilidade de atividades, buscou-se estruturar o projeto baseado em dados, estatísticas, previsões de população, mercado e tendências futuras. (24) Para isso realizou-se com um grupo de estudantes da Universidade de Brasília um *Brainstorming* com possíveis conceitos e inspirações para o projeto, mostrado na Fig. 1.



Figura 1 – *Brainstorming* para projeto de veículo modular.

Essa ferramenta de potencialidade criativa propõe que o grupo se reúna e utilize a diversidade de pensamentos e experiências para gerar soluções inovadoras, sugerindo qualquer pensamento ou ideia que vier à mente a respeito do tema tratado. (25)

1.4.2 Regulamentação SAE *International*

Para ter adequação de um veículo ao público de interesse torna-se necessário criar normas que possam determinar aos fabricantes de veículos estudos básicos para seus produtos. Tais normas são estabelecidas pela Sociedade dos Engenheiros de Mobilidade (SAE *International*), baseadas no comprometimento com a segurança e conforto dos ocupantes do veículo.

Visando facilitar o projeto de design e a validação da visão do motorista para localizar outros veículos, a norma SAE J941 traz técnicas básicas para fazer o estudo do campo visual do motorista. Seu estudo é baseado em motoristas com a cabeça em linha reta, sem rotacioná-la, sentados com ajuste dianteiro e traseiro e ângulos traseiros fixos. (26)

A norma SAE J1050 foi criada com objetivo de estabelecer um método e descrever a medição do campo de visão do motorista. Em sua estrutura é apresentado três métodos para medir diretamente e indiretamente esses campos e suas obstruções. (27)

O primeiro método consiste em usar dois pontos para o olho e indicar o campo de visão e suas obstruções. O segundo método usa as *Eyellipses* da norma SAE J941, estipula o campo e suas obstruções mas considerando percentis populacionais. E o terceiro método, utilizando um *Eyepoint*, mede a extensão de um específico campo de visão ou obstruções para aquele ponto.

Já a norma SAE J1052, estabelece medidas que descrevem os contornos virtuais do posicionamento da cabeça do motorista. Esses contornos definem o procedimento para construção do espaço interno do veículo, cobrindo todos os possíveis pontos de contato com a cabeça. (18)

Para uma grande variedade de veículos, com diferentes propósitos, a norma SAE J1100 define um conjunto de ajustes tanto do interior, com as distâncias de referência do *H-point* e do assento do motorista, como do exterior do veículo, com as cotas gerais de entre-eixos, comprimento, ângulo de ataque e saída, etc.. (28)

1.4.3 Método de Desdobramento em 3 Etapas (MD3E)

Com as definições internas de acordo com os possíveis usuários, é possível avançar para o design externo seguindo a metodologia de projeto MD3E. Nesse método, considerado como aberto por não estabelecer processos e etapas fixas, a equipe de projeto possui mais liberdade para ordenar as atividades que devem ser cumpridas no decorrer da execução. (1)

A metodologia segue uma estrutura radial, cujas etapas vão sendo alteradas conforme a necessidade. São três etapas básicas que se desdobram em auxiliares para ajudar

na solução de problemas, como pode ser visto na Fig. 2

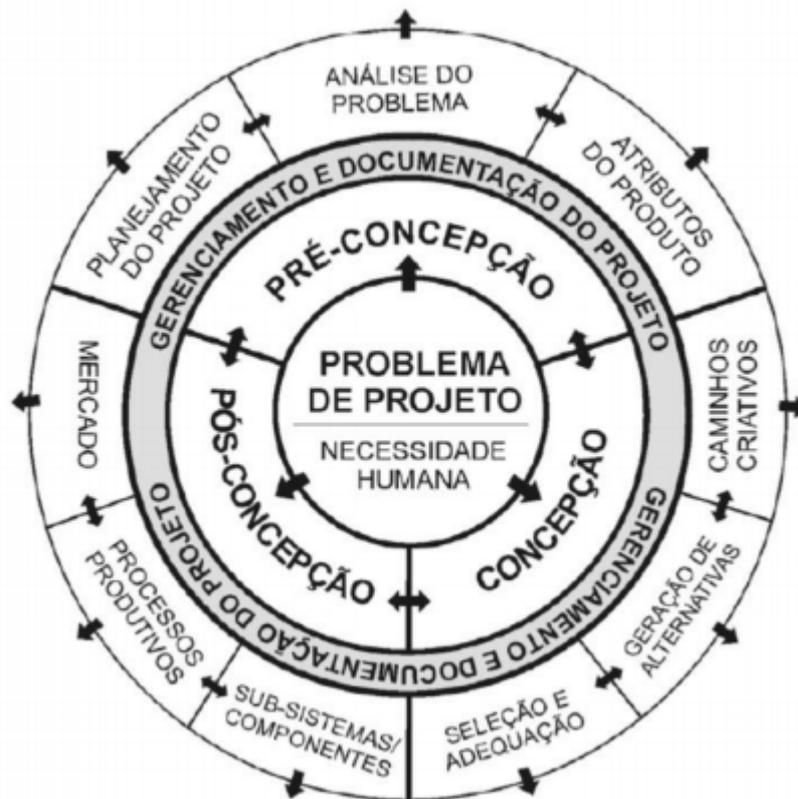


Figura 2 – Etapas básicas e desdobramentos do método MD3E. (1)

Os desdobramentos são atividades que devem ser realizadas para que a etapa básica seja concluída. Dessa maneira, em uma metodologia de projeto aberta, as etapas do projeto melhoram a qualidade do processo gerando resultados mais consistentes.

1.4.4 Ferramentas

Para a execução do trabalho foram utilizadas as seguintes ferramentas computacionais:

- Modelagem em ambiente CAD e análises ergonômicas utilizando o *software* CATIA V5R21 (Dassault Systemes);
- Desenvolvimento de análises estruturais em *software* CAE ANSYS *Workbench* 18.1;
- Planilhas de cálculo no Microsoft Excel;
- Renderizações 3D no CATIA e *photoshop* Keyshot.

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em quatro partes distintas. Onde a primeira parte é referente ao capítulo 1, a segunda parte ao capítulo 2 e 3, a terceira parte, o capítulo 4, 5 e 6, a quarta e última parte, o capítulo 7.

Neste primeiro capítulo apresenta-se a introdução, motivação e justificativa, objetivos gerais e específicos, metodologia e organização do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica definindo desde o que é um projeto conceitual, passando pelos sistemas automotivos relevantes ao projeto, a teoria de análise ergonômica e estrutural, além de expor os passos necessários para a concepção de um novo veículo.

O terceiro capítulo relata as necessidades e requisitos de acordo com a proposta do conceito e a demanda do usuário. A análise do estado da arte e dos conceitos concorrentes, para, feito isso, apresentar o resultado da concepção do projeto em modelagem 3D e seus desenhos técnicos.

No quarto e quinto capítulo são apresentados os resultados das análises de ergonomia e estrutura, o projeto do acoplamento entre módulos, a propensão ao capotamento e a rigidez torcional da carroceria. A viabilidade do projeto é apresentada no sexto capítulo.

O sétimo, e último, capítulo consiste na apresentação das conclusões sobre o trabalho realizado e sugestões de trabalhos futuros para complementação do projeto.

Parte II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ASPECTOS
GERAIS

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é delimitado à revisão bibliográfica referente à realização de um projeto conceitual, com ênfase no design automotivo e as análises ergonômicas e estruturais. Demonstra-se aqui, alguns parâmetros para a concepção de um produto inovador no mercado, uma introdução aos sistemas automotivos, os passos para um projeto automotivo e também, as metodologias utilizadas nas análises para adequar o veículo aos diferentes percentis populacionais e para a determinação do comportamento estrutural do chassi.

2.1 Engenharia Automotiva

Conforme [Freyre\(29\)](#) define, engenharia é dada como a arte de aplicar conhecimentos científicos para converter recursos, tanto naturais como humanos, em algo útil e viável a si mesmo. Seja com intuito de melhorar a vida em sociedade ou meio ambiente ao seu redor.

A engenharia automotiva, de acordo com [Larica\(30\)](#) é a engenharia aplicada a máquinas e veículos autopropulsionados. A Indústria Automotiva, se for considerada como um complexo mundial de indústrias, é a maior usuária da Engenharia Automotiva e de todas as atividades de pesquisa, projeto e design à ela vinculadas, tais como: tecnologia dos materiais e processos de fabricação, aerodinâmica, computação gráfica, prototipagem rápida, modelagem, ergonomia aplicada à veículos etc. Os principais produtos produzidos por estas indústrias são: automóveis, caminhões, ônibus, motocicletas e um elenco de veículos especiais derivados destes.

Portanto, os sistemas automotivos e seus componentes devem ser projetados, manufaturados, montados e testados de maneira integrada e calibrada para tornar possível o conceito pensado para cada veículo, possibilitando a produção em larga escala ou para engenharia de competição.

2.2 Projeto Conceitual

Um conceito, segundo [BAXTER\(23\)](#) é a formulação de uma ideia por meio de palavras ou recursos visuais que tomam forma, por exemplo, a partir de um projeto conceitual. Este deve produzir princípios de projeto para um novo produto, atender as exigências do consumidor e possuir a inovação como diferencial.

Existe uma fase de planejamento em que a atenção deve ser concentrada principalmente nas necessidades do consumidor e, em menor grau, na viabilidade de fabricação do

produto. Nessa fase, é necessário reexaminar as implicações do planejamento do produto no projeto conceitual e verificar se ele é sensível, significativo e útil. Assim, a análise do espaço do problema serve para verificar se o planejamento do produto foi bem feito (23).

2.2.1 Eletrificação e Hibridização

O uso cada vez maior de sistemas elétricos/eletrônicos em automóveis é uma tendência, a indústria eletrônica continua a reduzir custos e aumentar a sofisticação, e os fabricantes de automóveis estão se tornando mais hábeis em usar a tecnologia para ganhar vantagem competitiva (31).

Os veículos, geralmente, são movidos por um motor a combustão interna em que uma mistura ar/combustível sofre compressão seguida de combustão. O trabalho gerado nesse processo converte movimento linear dos pistões em movimento angular até rodas. Porém, a eficiência desses motores de transferir todo esse deslocamento têm níveis entre 17% a 21%, havendo grandes perdas em todo o processo, principalmente na forma de energia térmica, vibração e ruído (32). Além disso, a queima na câmara de combustão gera diversos gases nocivos, que são expelidos pelo escapamento.

Os motores elétricos têm níveis de eficiência superiores. Se considerada toda a sequência, desde a entrada da energia elétrica até o movimento das rodas, a eficiência total em um veículo puramente elétrico é de aproximadamente 59% a 62% (32). Nesse tipo de motorização a energia provém de uma bateria capaz de alimentar o motor e a recarga é feita pela conexão à rede elétrica. A Fig. 3, mostra como são dispostos os motores (em vermelho) e as baterias (em prata, abaixo de todo o assoalho) de um *Tesla Model S*.

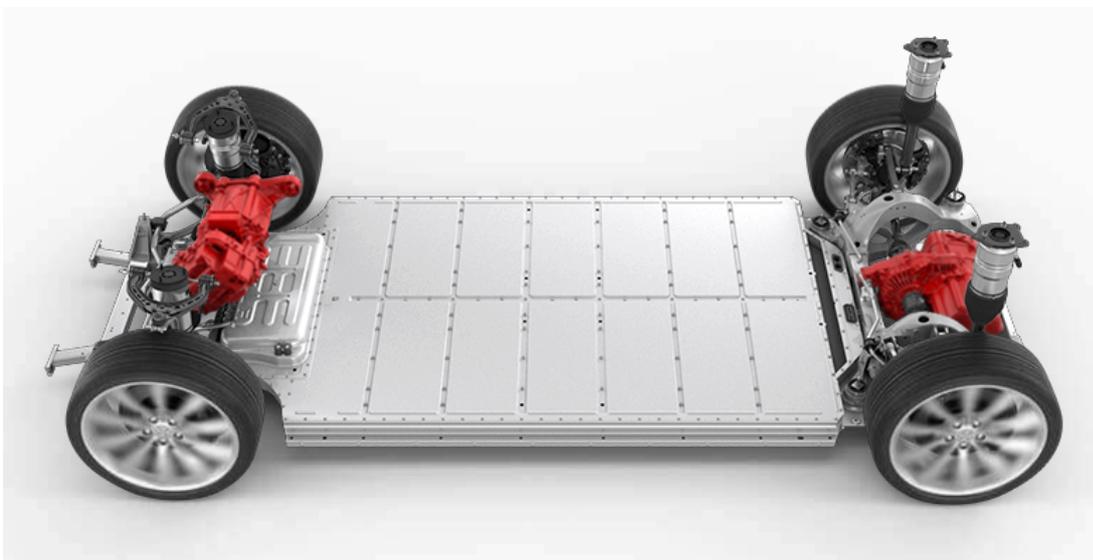


Figura 3 – Motores e baterias de um *Tesla Model S*. (2)

Já os veículos híbridos são aqueles que combinam um motor a combustão interna com um ou mais motores elétricos para propulsão. São chamados HEVs (*Hybrid Electric Vehicles*) por combinar os dois tipos e os motores possuem menor dimensão que nas configurações plenas. Os HEVs, contudo, não dispõem de estrutura para conexão à rede elétrica e também não há cabo para recarregar a bateria diretamente. A carga provém do próprio motor a combustão e de mecanismos como frenagem regenerativa, que recarregam a bateria. O usuário precisa, portanto, abastecer o veículo com combustível. Os veículos com a possibilidade de recarga diretamente da rede elétrica são denominados *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) e têm fundamentalmente a mesma configuração de um *full hybrid*. A diferença está nos componentes elétricos (como motor, alternador e bateria), que são ainda maiores e possibilitam a operação integralmente em modo elétrico, já que a bateria pode ser recarregada diretamente na rede. Os HEVs e PHEVs são de 30% a 40% mais eficientes que os modelos tradicionais a combustão interna, além de emitirem menos gases (33). Na Fig. 4 está um exemplo de um HEV, destaca-se em amarelo o motor a combustão e em azul, o elétrico.

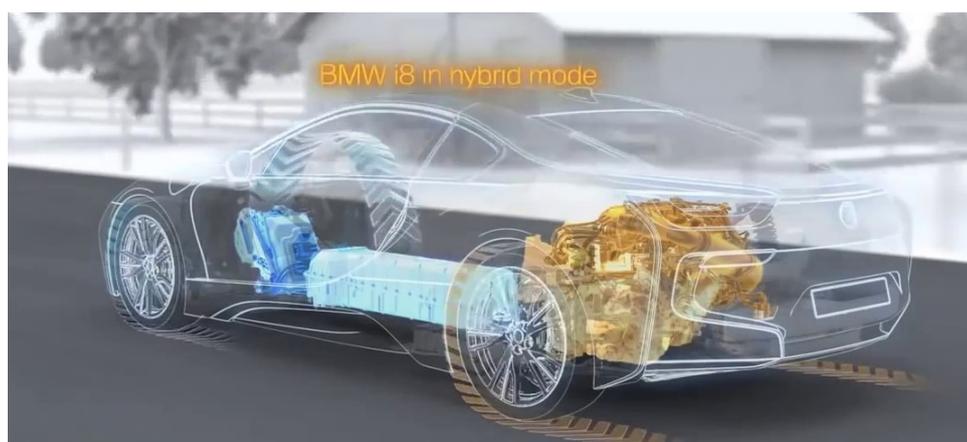


Figura 4 – BMW i8 Híbrida. (3)

Entretanto, de acordo com Vaz, Barros e Castro(33), híbridos e elétricos têm limitações por não estarem no mesmo grau de maturidade tecnológica que os veículos a combustão. O alto custo das baterias, o elevado tempo de recarga, a carente infraestrutura de recarga e a limitada autonomia são alguns dos principais inibidores à adoção em massa desses veículos. Mas as vantagens de eficiência energética, o menor impacto ambiental local e global e a redução da dependência do petróleo, sempre envolvido em complexas questões geopolíticas, sobrepõem-se às limitações e têm levado alguns países, como os EUA, Noruega e Reino Unido, a adotarem políticas públicas de incentivo à oferta e à demanda de híbridos e elétricos.

A descrição do funcionamento desses motores é mostrado em seguida na Seção 2.3.2.

2.2.2 Carro Compartilhado

Um conceito recente que já é implementado em países desenvolvidos, o carro compartilhado, ou *carsharing*, consiste em uma nova maneira de utilização do veículo. Como é descrito por Paganelli(4), essa ideia é interessante pois consiste no uso compartilhado de poucos veículos por um grupo de indivíduos.

O sistema funciona como um aluguel de carro, o usuário cadastrado faz uma reserva, recebe um cartão que serve como chave para destravar o automóvel em qualquer ponto de distribuição. Após o uso, o carro pode ser devolvido no mesmo ou em outra estação, dependendo das regras do operador, ainda dispõe de vagas exclusivas para carros desse tipo com pontos de recarga para a bateria, no caso dos veículos elétricos da *Autolib*, criado pela Prefeitura de Paris que segundo seus criadores, cada *Autolib* em circulação tira sete carros comuns das ruas de Paris.(34)

O *carsharing* é mais eficaz e atrativo quando visto como um meio termo entre o transporte público e o carro privado, uma vez que pode ser integrado a outros sistemas de mobilidade para preencher um *gap* entre a utilização do transporte público ou privado e a cobertura de pequenas ou grandes distâncias. Essa ideia é demonstrada graficamente na Fig. 5.

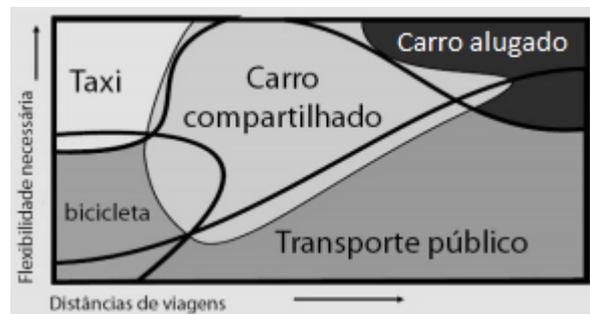


Figura 5 – Espaço preenchido pelo sistema *carsharing*. (4)

2.3 Sistemas Automotivos

2.3.1 Estruturas Veiculares

Uma estrutura é responsável por fornecer sustentação e suporte, no caso de um veículo, esta é denominada chassi. Nele são montados os sistemas do automóvel como o motor, suspensão, carroceria, etc., é também incumbido a rigidez, a integridade e a estabilidade de acordo com a solicitação referente.

Um chassi veicular deve se manter estável perante as forças e momentos decorrentes da dinâmica, ou seja, os movimentos dos corpos que compõem o veículo e os esforços que os originam. Essas forças e momentos com seus eixos de atuação são demonstrados na

Fig. 6. Por esses motivos, o chassi é considerado o componente mais significativo de um veículo.

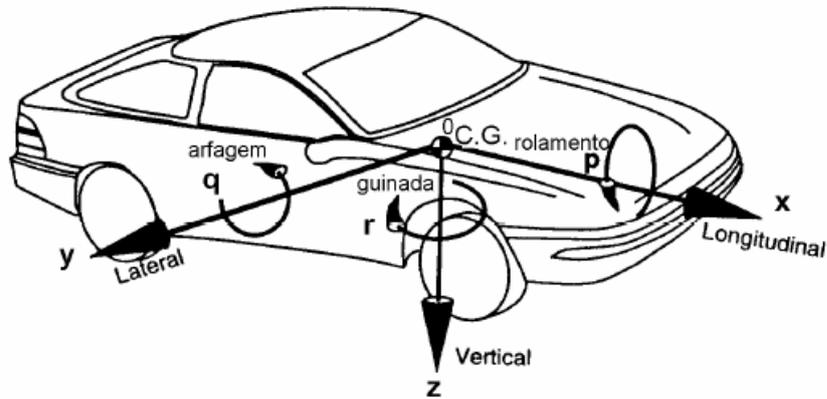


Figura 6 – Eixos de rotação do Centro de Gravidade (C.G.). (5)

A seguir serão classificados os diferentes tipos de chassis automotivos.

2.3.1.1 Chassi Escada

Utilizado em sua maioria para suportar altos carregamentos, o chassi do tipo escada ou *ladder* é constituído por membros tubulares de perfil redondo, retangular ou em “C”. Ao longo do comprimento do carro, vigas em paralelo chamadas longarinas suportam os principais carregamentos oriundos da aceleração e frenagem (arfagem). Membros dispostos transversalmente chamados travessas, garantem o travamento da estrutura além de suportar forças laterais e efeitos de rolagem de carroceria. (35)

A Fig. 7 mostra um exemplo de chassi *ladder*.



Figura 7 – Chassi escada de Chevrolet Silverado. (6)

2.3.1.2 Chassi Monobloco

A estrutura do tipo monobloco é uma união do chassi, com a carroceria e com a estrutura frontal (berço do motor) em uma única peça. Esse arranjo estrutural é o mais utilizado na produção em série de veículos leves de passeio, cerca de 95% de todos os automóveis produzidos. (35)

A indústria utiliza essa estrutura devido principalmente ao baixo custo de fabricação e oferece boa proteção contra impactos em função da existência das colunas laterais na região frontal, central e traseira. Essas colunas e outros reforços estruturais podem ser observados em azul na Fig. 8.



Figura 8 – Exemplo de chassi monobloco. (7)

2.3.1.3 Chassi tipo Espinha Dorsal

Essa geometria projetada por Colin Chapman em 1962 para o Lotus Elan apresenta uma peça única, robusta, retangular no centro do veículo, capaz de resistir até seis vezes mais uma carga torcional, comparada a uma estrutura do tipo escada. (35) Na Fig 9, o chassi do DMC DeLorean que também utiliza espinha dorsal abaixo da carroceria.

Também chamado de chassi *backbone*, é utilizado para unir o eixo dianteiro ao traseiro. Podendo ser manualmente construído em fibra de vidro, sua aplicação é viável para carros esportivos pequenos com baixo volume de produção. (36)

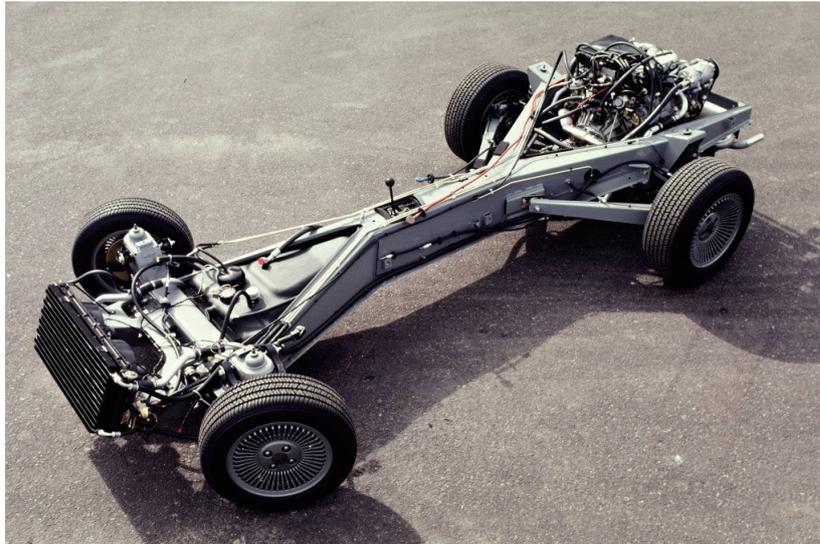


Figura 9 – Chassi *backbone* do DMC DeLorean. (8)

2.3.1.4 *Space Frame*

De acordo com Michael, David e Allington(37), por definição, um chassi do tipo *space frame* verdadeiro é uma estrutura composta por elementos tubulares de seção circular ou quadrada, com um arranjo tridimensional de alta complexidade que, em conjunto oferecem alta resistência à torsão sendo submetidos apenas a tração e compressão.

O primeiro projeto de uma estrutura *space frame* foi desenvolvido por Barnes Wallis, aviador que durante a Segunda Guerra Mundial, aumentou a capacidade dos aviões de suportarem grandes quantidades de danos, em relação aos aviões da época, sempre mantendo a resistência. Após a guerra, esse conceito inspirou engenheiros da época, como Ferdinand Porsche, que aplicaram esse tipo de chassi em carros esportivos. (35) A Fig. 10 evidencia o *space frame* de uma Mercedes 300 SL.



Figura 10 – Estrutura *space frame* de uma Mercedes 300SL. (9)

O chassi *space frame* se torna inviável para produção em grande escala por conta do custo de fabricação, devido à grande quantidade de tubos unidos por solda, porém é a estrutura mais eficiente, sendo bastante difundida na engenharia de competição, como pode ser visto na Fig. 11 uma estrutura tubular de um veículo de competição off-road do tipo Mini-Baja.



Figura 11 – Estrutura tubular de um veículo de competição projetado pela equipe Un-Baja. (10)

2.3.2 Motorização

Como explica Costa(38), o motor é a fonte de energia do automóvel. Nos motores convencionais com combustão interna, a energia calorífica produzida na queima de uma mistura de ar e combustível é convertida em energia mecânica que imprime movimento nas rodas. Porém essa não é a única maneira de gerar trabalho para movimentar um carro, nesse tópico são expostos alguns tipos de motores explorados pela indústria automotiva.

2.3.2.1 Motor a Combustão Interna

Atualmente, o motor a combustão interna é o mais difundido pelo mercado automotivo, seja ele a gasolina (ciclo Otto) ou a diesel, como já foi dito na Seção 2.2.1. O termo combustão interna significa que a queima da mistura que alimenta o motor ocorre dentro do próprio motor, mais especificamente na câmara de combustão dos cilindros, demonstrada na Fig. 12 tanto no motor diesel como no movido a gasolina.

Como Sobey(39) descreve, num motor diesel (a) onde não há vela de ignição, a mistura deve ser comprimida até a temperatura de ignição instantânea do diesel. Para isso, o motor aspira o ar, comprime-o o suficiente para a temperatura alcançar por volta

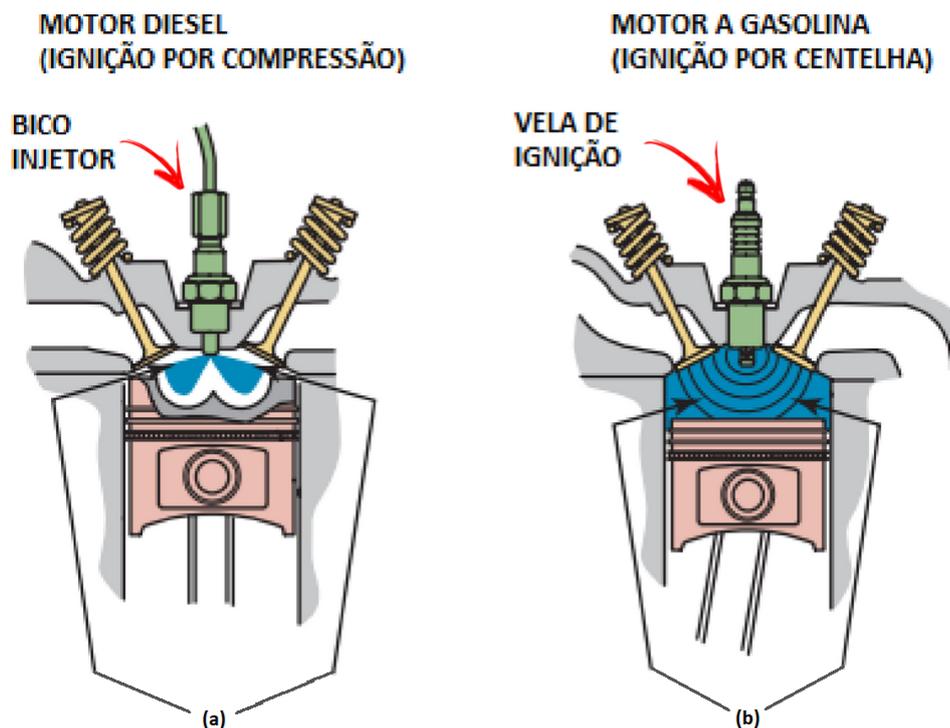


Figura 12 – Em azul, câmara de combustão de dois tipos de motores. Tem-se em (a) um motor diesel, já em (b) um a gasolina. Adaptado de: [Halderman\(11\)](#)

de 815° C e injeta diretamente o combustível, causando a queima instantânea a uma taxa de compressão de aproximadamente 20:1, ou seja, 20 partes de ar para 1 parte de diesel. Essa combustão empurra o pistão, gerando trabalho para mover o automóvel.

Já no caso (b) da Figura 12 uma mistura de, por exemplo, 10 partes de ar para 1 de gasolina (taxa de compressão 10:1) é comprimida pelo pistão até que no momento certo determinado pela ECU, a vela de ignição produz uma centelha que faz a queima da mistura. O restante do processo se mantém praticamente o mesmo para os dois tipos de motores.

2.3.2.2 Motor Elétrico

Diferentemente do combustível usado nos motores Otto e Diesel, motores elétricos de automóveis utilizam energia armazenada em baterias como fonte de alimentação. A reação química das baterias é reversível para poder serem recarregadas várias vezes, alguns modelos ainda reaproveitam a energia cinética do carro durante uma desaceleração. O impulso do carro mantém o movimento e o motor girando, passando a atuar como um gerador capaz de recarregar a bateria. (39)

Os motores dos carros elétricos podem trabalhar com correntes alternadas (CA) ou contínuas (CC). Em uma topologia do tipo CC, o sistema se mantém relativamente

simples, sendo alimentado por um controlador eletrônico; e uma boa eficiência com aproximadamente 85%; porém a manutenção das escovas é recorrente. Usando a topologia CA, a tensão da bateria passa por um inversor; apresenta até 95% de eficiência, uma curva de torque mais adequada e facilidade de controle na frenagem regenerativa; contudo o sistema fica muito mais caro, devido à maior complexidade do controlador e o custo do motor. (40) e (41)

2.3.2.3 Motores nas Rodas

Segundo Denton(42), um novo modelo de motor elétrico, montado dentro das rodas, é desenvolvido por engenheiros da General Motors e Michelin, sendo capaz de aumentar em 60% o torque de arrancada quando associado a um motor a combustão de 4 cilindros.

Também chamado por *in-hub motor* ou *wheel hub motor*, pode ser montado diretamente no cubo de cada roda e apresentar potência entre 25 e 30 kW (34 e 40 cv) com cerca de 15 kg cada, totalizando entre 136 e 160 cv em um veículo de quatro rodas. A *Active Wheel*, projetada pela Michelin é mostrada na Fig 13. (43)



Figura 13 – *Active Wheel* da Michelin com *in-hub motor* de 30kW.

Esse tipo de montagem com habilidade de comandar cada roda individualmente, melhora a resposta no controle da estabilidade e tração, com possível aplicação de esterçamento independente como utilizado no conceito ROMO (44).

2.4 Ergonomia do Produto

A ergonomia estuda as condições de trabalho em que os indivíduos estão submetidos ao realizar suas atividades, com ênfase na postura que adotam na execução. Em um veículo, as ações realizadas pelo piloto e a postura adotada durante a condução possuem intensidade correspondente a um operário em seu posto de trabalho. O corpo deste condutor está submetido a esforços da posição de pilotagem e das forças transmitidas pelo veículo. (45)

Tradicionalmente, no desenvolvimento de um projeto automotivo, a ergonomia era pensada no final do processo de modelagem, porém com o aperfeiçoamento do design, a ergonomia se tornou um diferencial competitivo para as montadoras terem vantagem no mercado de automóveis. (31)

2.4.1 Antropometria

O início do estudo da ergonomia é feito com o conceito de antropometria, que segundo [Happian-Smith et al.](#)(31) é definido pelas medidas dimensionais do corpo humano, ou seja, sua forma, tamanho e volume. Como ainda não é economicamente viável construir um veículo com seu interior adaptado exclusivamente para cada comprador, a solução para que o mercado cubra a maior faixa de público possível é utilizando amostragem populacional.

Alguns dados para o cálculo estatístico considerados são: local de nascimento, idade, mão dominante (destro, canhoto ou ambidestro), percepção de cores, ancestrais, fatores econômicos e demográficos. Com esses dados, divide-se a população em cem categorias de acordo com a porcentagem, os chamados percentis, exemplificados na Fig. 14. (46)

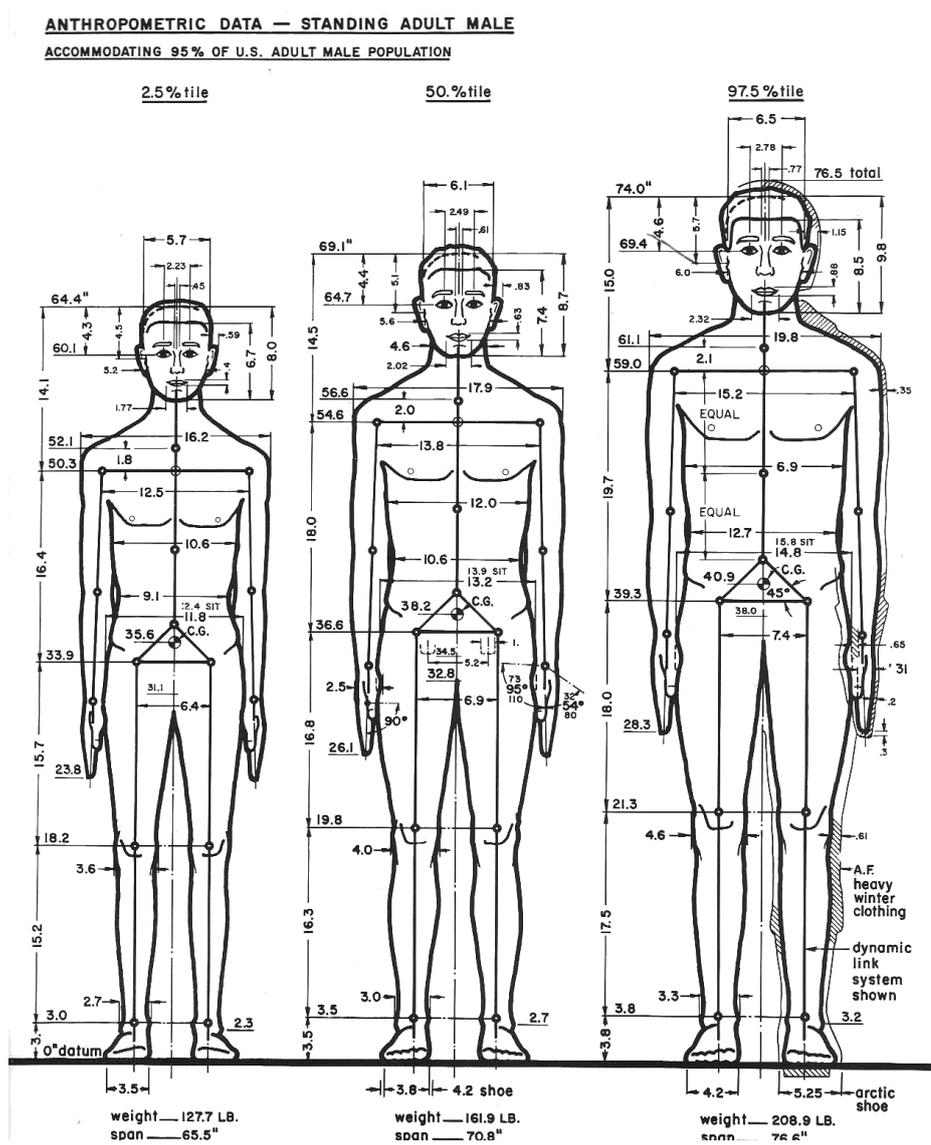


Figura 14 – Exemplo de percentis 2,5%, 50% e 97,5%. (12)

Na Figura 14, tem-se o exemplo de três percentis da população masculina norte americana:

- Percentil 2,5% - correspondente à segunda parte e meia da população onde 2,5% é mais baixa e 97,5% é mais alta;
- Percentil 50% - proporcional a média da estatura da população;
- Percentil 97,5% - equivalente à nonagésima sétima parte e meia da população onde 97,5% é mais baixa e 2,5% é mais alta;

Na engenharia automotiva, utiliza-se nas análises de ergonomia os percentis 5% feminino e 95% masculino, ou seja, os extremos populacionais e demográficos, além do percentil 50% masculino, adequando-se assim o veículo a um maior público.

2.4.2 Package

O *package* é a representação 2D ortogonal em formato de vistas do veículo em 3D, essas vistas apresentam as dimensões básicas da mecânica e da ergonomia do automóvel projetado. Isso significa que além das cotas contendo as vistas do carro (frontal, lateral e superior), devem estar presentes os ocupantes na posição de condução e a disposição dos compartimentos internos com o volume disponível para cada sistema.

A Figura 15 demonstra os elementos de um *package* que, de acordo com Macey, Wardle e Gilles(13), aparece na maioria dos veículos. Cada elemento deve ser estudado pela equipe de design para atender um alto nível de confiança no projeto do automóvel.

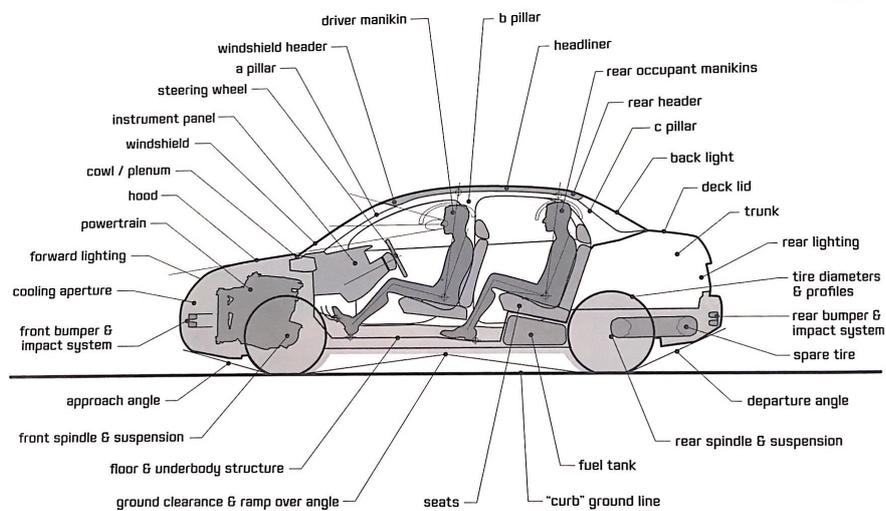


Figura 15 – Informações contidas no *package* de um automóvel. (13)

Em conceitos que se diferem do usual, ou seja, que não apresentam características comuns ao mercado, o *package* deve evidenciar esses diferenciais, como mostra a Fig. 16.

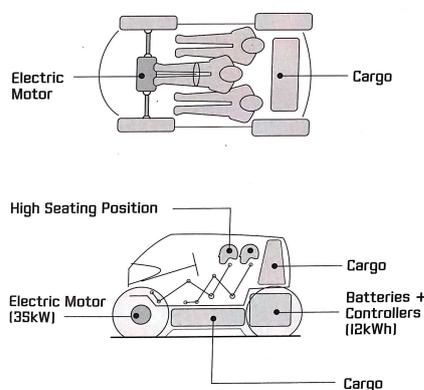


Figura 16 – *Package* de um conceito não usual. (13)

O conceito da Figura 16 é incomum no posicionamento dos ocupantes, na posição da direção, baterias, motorização e armazenamento de carga, se aproximando do conceito do veículo modular contido neste trabalho.

2.5 Análise Estrutural

São diversas as abordagens utilizadas pela engenharia para solucionar problemas estruturais, que dependem da disponibilidade de recursos e ferramentas de cálculo. Porém, as técnicas utilizadas se baseiam nos conceitos da Mecânica Geral, mais especificamente na Estática, onde são definidas as teorias de vigas, placas e cascas. Essas teorias tratam de problemas bem definidos, cujas soluções analíticas são deduzidas através de equações diferenciais ordinárias. (35)

A indústria automotiva demanda soluções confiáveis, precisas, com tempo e recurso restritos. Para isso buscou-se ferramentas computacionais para executar simulações eficientes, desenvolvendo um modelo para a simulação, aplica-se condições de contorno, encontra-se uma solução com essas condições para então analisar os detalhes da resposta. (35)

Dessa forma, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta que, utilizada da maneira correta, acrescenta produtividade e gera mais eficiência nos projetos de engenharia mais modernos.

2.5.1 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é baseado no conceito de discretização, subdividindo o domínio contínuo da estrutura em pequenas partes, chamadas de elementos, conectados por nós. Com esse procedimento, um problema complexo é transformado na soma de diversos problemas simples, cuja solução é encontrada para cada um dos elementos através de interpolações e métodos numéricos. (35)

A discretização da estrutura é feita escolhendo um tipo de elemento e preencher todo o volume com esse elemento em forma de malha, para isso é fundamental definir as propriedades dos materiais utilizados nos componentes estruturais, como sua massa e rigidez. Sendo o veículo contido neste trabalho composto pela carroceria e *under body*, é importante definir os elementos que descrevem esses sistemas na simulação, o elemento de casca e elemento de viga, respectivamente.

2.5.1.1 Elemento de Casca (*Shell*)

Genta e Morello(14) descrevem uma superfície estrutural como um painel plano elementar que, devido à sua espessura pode suportar cargas contidas apenas no seu plano

central, cargas direcionadas para outras direções não podem ser resistidas por causa de sua alta flexibilidade.

O elemento de superfície mais simples é dado pelo painel retangular mostrado na Fig. 17, definido por dois lados de dimensões a e b e espessura s , que é assumido como insignificante em relação às outras dimensões. Para tal painel, os momentos de inércia das seções transversais são definidos pela Eq. 2.1:

$$J_x = a \frac{s^3}{12}, \quad J_y = s \frac{b^3}{12}, \quad J_z = b \frac{s^3}{12}. \quad (2.1)$$

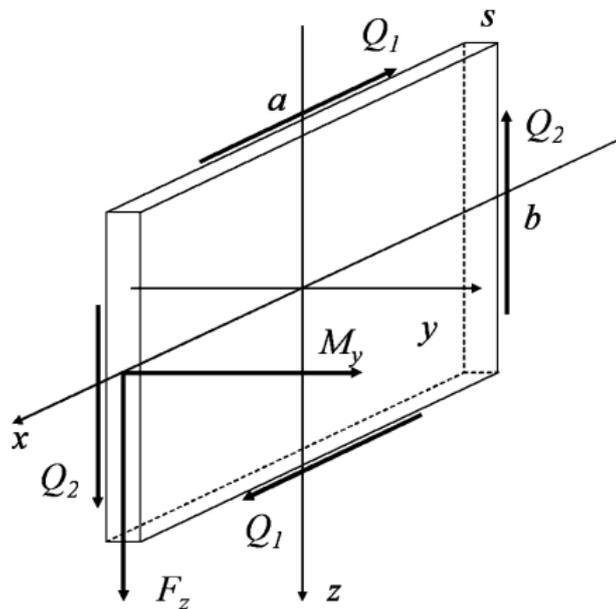


Figura 17 – Superfície estrutural simples composta por um painel retangular plano. (14)

Como J_x e J_z são muito menores que J_y , a superfície estrutural assim definida será capaz de suportar apenas momentos de flexão ao longo do eixo y e forças paralelas aos lados.

Por exemplo, a aplicação de uma força F_z em um lado deste painel pode ser equilibrada por duas forças de cisalhamento Q_1 e Q_2 aplicadas aos dois lados, de modo a satisfazer a Eq. 2.3:

$$Q_1 b - Q_2 a = 0, \quad (2.2)$$

$$F_z - Q_2 = 0. \quad (2.3)$$

Mas, considerando a espessura limitada, essas forças de cisalhamento só podem ser aplicadas se houver outras restrições, que podem ser outro painel, colocado em um plano perpendicular soldado ao primeiro, ou uma viga provavelmente moldada por uma seção fechada com o próximo painel.

Os painéis podem ser feitos em diferentes formas, mas são sempre caracterizados por sua capacidade de reagir a forças contidas unicamente em seu plano. A Figura 18 mostra alguns exemplos de aplicações em um *sedan* de três volumes.

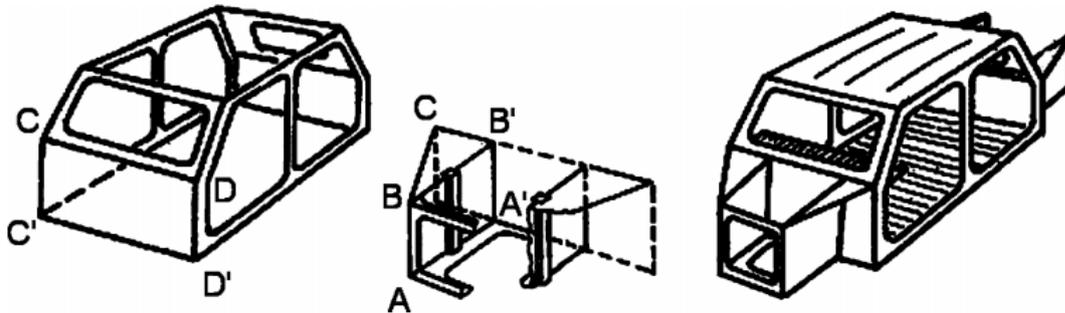


Figura 18 – Diferentes tipos de painéis necessários para a montagem de um *sedan* de quatro portas *hatchback*. (14)

Uma estrutura de carroceria, como a utilizada neste projeto, pode ser modelada para uma análise estrutural simplificada como uma combinação de superfícies estruturais.

2.5.1.2 Elemento de Viga (*Beam*)

De acordo com Genta e Morello(14), o elemento de viga é o mais aplicado em modelos numéricos para projeto de estruturas veiculares. Vigas são objetos matemáticos que permitem uma descrição simplificada, em termos de tensão e deformação, da estrutura do veículo sob a ação de cargas externas e restrições.

Na análise estrutural, esses modelos matemáticos são definidos de acordo com o Método dos Elementos Finitos (MEF). Assumindo deslocamentos limitados, pode-se aceitar a relação usual entre forças e deslocamentos demonstrada na Eq. 2.4:

$$F = Ku \quad (2.4)$$

onde:

F é o vetor de forças aplicadas na estrutura;

K é a matriz de rigidez da estrutura;

u é o vetor deslocamento.

Na verdade, Genta e Morello(14) descrevem que a viga é um elemento simples: um segmento unindo dois nós com seis graus de liberdade, para os quais os traços característicos (área e momento de inércia) de uma seção fechada do corpo pode ser atribuída.

A formulação do elemento de viga e a teoria de *De Saint Venant* são coincidentes. Usando elementos desse tipo, a estrutura pode ser descrita como um *spaceframe* feito de

vigas e sua forma é determinada colocando-as abaixo da forma exterior estilizada (carroceria) e atribuindo-lhes seções transversais compatíveis, escalonadas a partir de bases de dados existentes. Suas características elásticas e geométricas são unicamente definidas por suas seções transversais e são demonstradas na Fig. 19 para um carro pequeno.

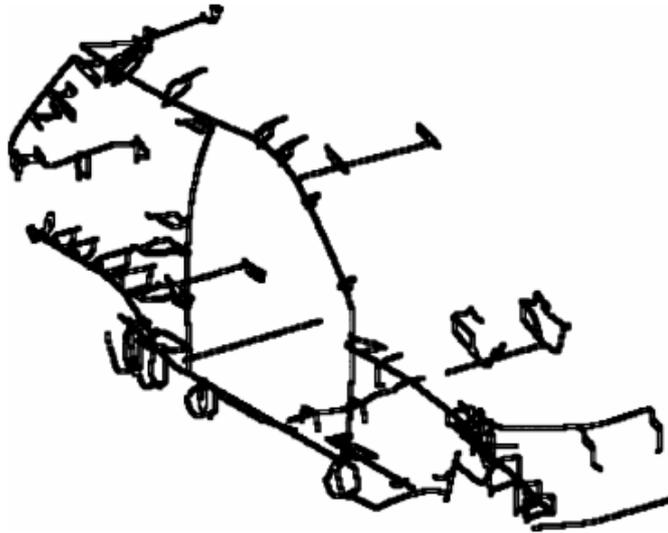


Figura 19 – Esquemático de um modelo de vigas. (14)

Seguindo a definição de [Genta e Morello\(14\)](#), o método por elementos de vigas assume uma abordagem oposta ao método por elementos de casca, negligenciando o papel dos painéis. Porém, os dois métodos não devem ser considerados como concorrentes entre si para resolver o mesmo problema.

O primeiro, apenas para corpos unificados, pode ser aplicado para o desenvolvimento de conceitos envolvendo a arquitetura geral do corpo. É simples e permite que muitas alternativas diferentes sejam consideradas em um curto espaço de tempo.

O segundo método oferece uma melhor aproximação e pode ser aplicado após o primeiro para otimizar uma estrutura já definida. Ao contrário do primeiro, o segundo método também é sensível às modificações da casca exterior. Também é mais adequado para chassis escada e *spaceframes*.

3 DESIGN AUTOMOTIVO

Este capítulo é delimitado ao detalhamento do conceito, seguindo a metodologia do MD3E de [SANTOS\(1\)](#), que apresenta a fase central do problema a ser resolvido, projetar um veículo elétrico e modular, com seus desdobramentos básicos da metodologia seguindo as seguintes etapas:

- Pré-concepção;
Inicia-se com o público alvo, o posicionamento de mercado, a categoria que o veículo pertence e as ferramentas utilizadas para a elaboração do conceito, também é feita uma análise do problema afim de identificar os principais obstáculos do projeto, relatando os atributos relacionados ao projeto conceitual.
- Concepção;
Descreve-se os caminhos criativos até o estado da arte, com as inspirações para a fase de geração de alternativas, os esboços preliminares, chegando nas diretrizes adotadas para a construção definitiva.
- Construção do modelo em CAD.
O esboço final em 3D e os desenhos técnicos em 2D.

3.1 Pré-Concepção

A partir dos dados de [Longo\(24\)](#) e do conteúdo ministrado na disciplina de Introdução ao Design Automotivo, na Universidade de Brasília, segundo o Prof. Dr. Mateus Miranda em 2015, foram delineadas as características do público, território, trânsito e panorama comercial para lançar o veículo no mercado.

3.1.1 Análise de Mercado

O público alvo escolhido para a inserção do veículo projetado é qualquer indivíduo adulto, homem ou mulher, de classe média pois se trata de um carro econômico e compacto. Além disso o seu conceito de módulos acoplados chamaria atenção do público, gerando maior receptividade.

O território que melhor atende a expectativa para aceitação do produto é a Europa e a América do Norte, lugares onde o trânsito estará melhor adaptado para veículos autônomos e as vagas de estacionamento mais escassas. Nesse lugares também funciona bem o aluguel temporário de veículos elétricos, por exemplo o *Autolib* em Paris já citado

na Seção 2.2.2, pois considerando que o veículo projetado é aberto ao aluguel de módulos adaptáveis de acordo com a necessidade do consumidor, seria de fácil aceitação essa nova logística adotada.

3.1.2 Posicionamento de Mercado

Um dos requisitos do veículo modular é que ele seja compacto, econômico e acessível. Seguindo a definição de Macey, Wardle e Gilles(13) e analisando seus possíveis concorrentes, existe a possibilidade de inserção do conceito próximo à categoria dos micro compactos, porém mais deslocado para a posição de “Prestígio” do gráfico, devido a sua possibilidade de acoplamento de módulos. O posicionamento inicial do veículo modular pode ser visto em "1" na Fig. 20.

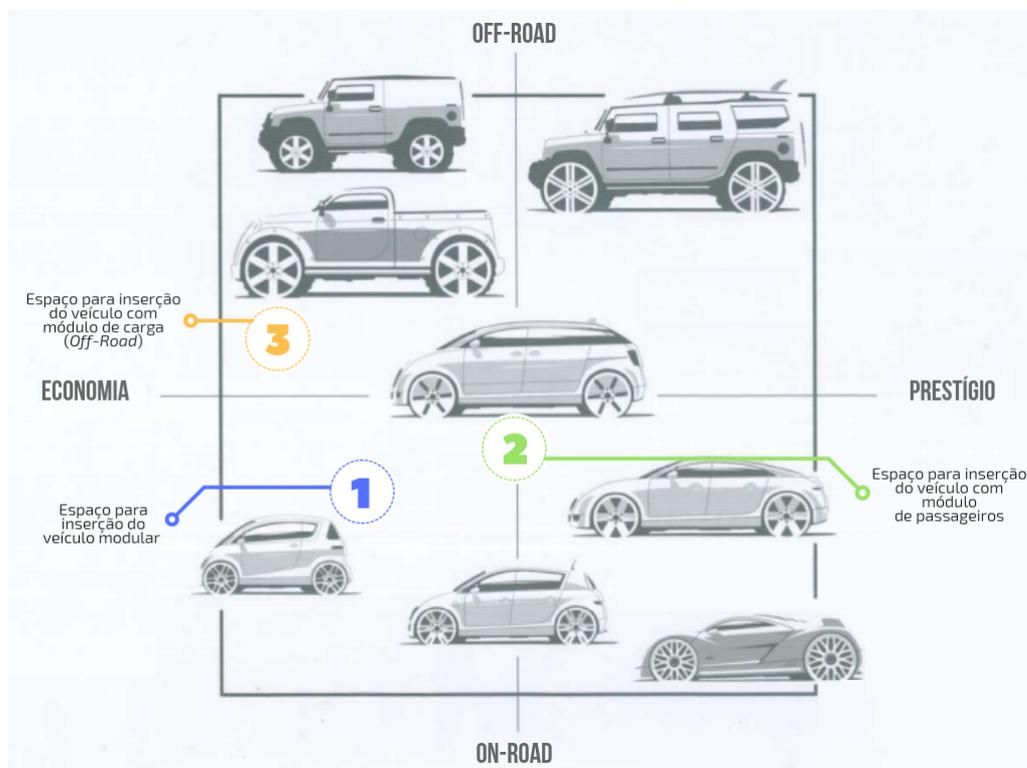


Figura 20 – Posicionamento de mercado demonstrando a possibilidade para inserção do veículo modular em 1, da versão com quatro portas em 2 e da versão *pick-up* em 3. Adaptado de: Macey, Wardle e Gilles(13).

Na Figura 20 também são apresentadas as demais possibilidades do veículo, deslocando o conceito "1" para a direção "Prestígio" e para "Off-road" devido à possibilidade de acoplamento com o módulo de passageiros em "2" e de carga em "3", respectivamente.

A Tabela 4 apresenta a configuração do conceito, com a categoria na qual ele está inserido de acordo com o módulo acoplado, além dos concorrentes de cada categoria.

Tabela 1 – Quadro de classificação do conceito (21).

SEGMENTO	CATEGORIA	CONCORRENTES
Micro compacto - 2 lugares (sem módulo acoplado)	Micro Carro	Smart ForTwo, Toyota i-Road, Renault Twizy.
Micro compacto - 4 lugares (com módulo de passageiros)	Mini Compacto	BMW i3, Fiat Cinquecento, Renault Twingo.
Micro compacto - 2 lugares (com módulo de carga)	Pick-up Pequena	Chevrolet Montana, Fiat Strada, Volkswagen Saveiro.

3.2 Concepção

Na etapa da criação de conceitos para compor o veículo modular, foi feita uma pesquisa de mercado a fim de encontrar projetos semelhantes para, além de prever os possíveis concorrentes, servir como inspiração do projeto. Também seguiu-se esses projetos base para o estudo das formas e conceitos dos componentes mecânicos e funcionalidades da proposta de um veículo modular elétrico.

O primeiro conceito aproveitado foi o One Car, mostrado na Fig. 21 (15).



Figura 21 – Conceito One Car (15).

O One Car é um veículo elétrico de dois lugares com duas rodas balanceadas por um giroscópio. Apresenta cinco possibilidades para acoplamento de módulos, uma com adição de dois assentos, outra com dois assentos mais um bagageiro, uma terceira com mais quatro assentos, uma opção para carga e a última para *hobby* (*pick-up*).

O segundo conceito utilizado como inspiração foi o Citi Transmitter, exibido na Fig. 22 (16).



Figura 22 – Conceito Citi Transmitter (16).

O Citi Transmitter, assim como o One Car, também apresenta motorização elétrica sobre duas rodas, porém com apenas um ocupante em seu módulo principal. Este modelo conta com quatro possibilidades de acoplamento, a primeira adiciona mais dois passageiros, as restantes para carga, sendo que uma delas conta com eixo traseiro com esteiras no lugar dos pneus para enfrentar terrenos fora de estrada.

3.2.1 Definição do Design

Após os levantamentos estatísticos e informativos, estudos populacionais e de público alvo e o *Brainstorming* realizado conforme a Seção 1.4.1, produziu-se em conjunto com membros da disciplina de Introdução ao Design Automotivo, na Universidade de Brasília, alguns esboços à mão, e *sketches* preliminares do veículo, conforme a Fig. 23.

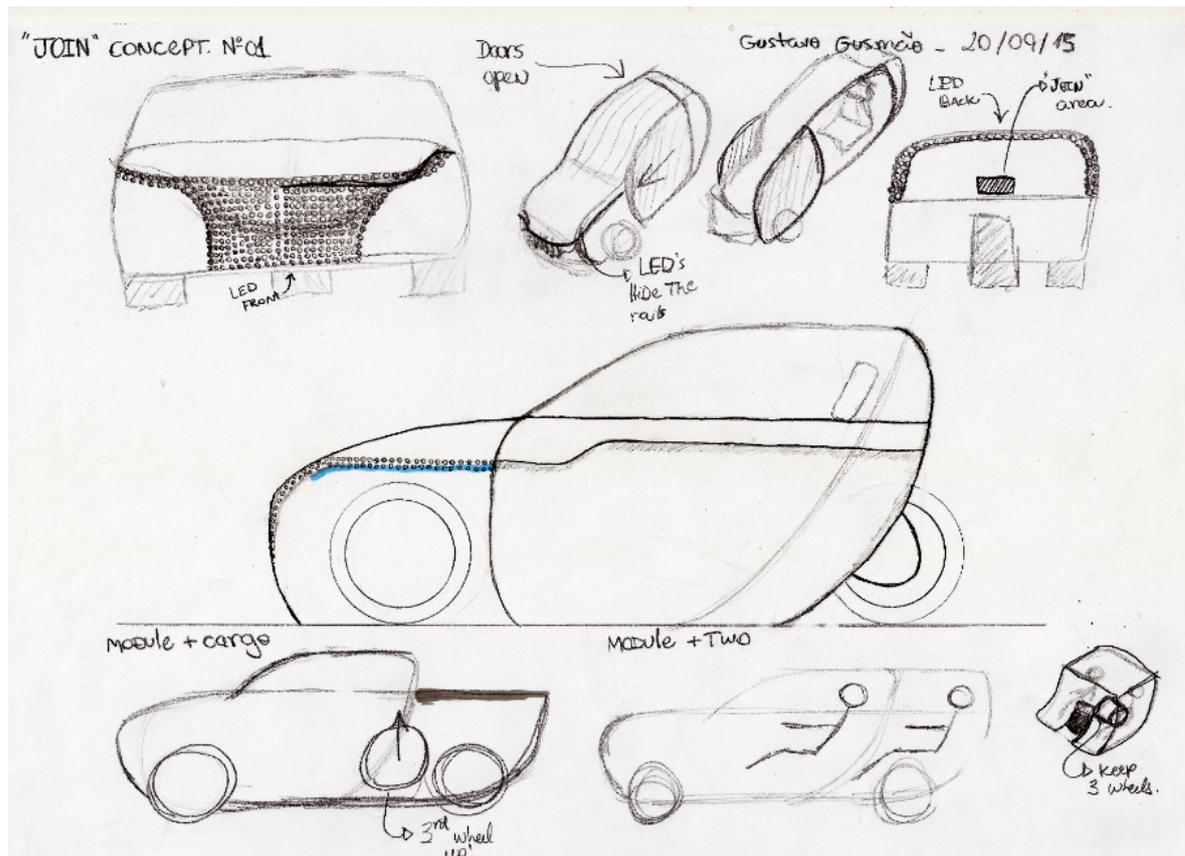


Figura 23 – Esboço manual preliminar. Fonte: Gusmão, G., 2015

O **Join**, “junte-se” em inglês, é concebido com um conceito baseado na energia limpa, modularização, hibridização/eletificação para um público carente de inovação no mercado e uma ideia de flexibilidade para usos diversos. Os módulos secundários seriam responsáveis por um número maior de passageiros transportados ou mais espaço para carga, adicionando mais autonomia ao veículo devido a *packs* de baterias contidos nos módulos.

Esses módulos poderiam ser adquiridos pelo consumidor, mas visando maior otimização coletiva, a ideia de implementar centrais de locação autônomas de módulos secundários sendo responsáveis por alugar módulos demandados pelo usuário ou, nessas centrais, realizar transporte autônomo de pessoas dentro da cidade, acoplando independentemente os módulos de acordo com a solicitação do cliente através, por exemplo, de um aplicativo de telefone.

3.2.2 Construção do Modelo em CAD

Com o auxílio do software de desenho industrial aplicado à automotiva, Catia V5R21, foi possível modelar em três dimensões o veículo que, até então possuía apenas vistas ortogonais bidimensionais conforme a Fig. 24.

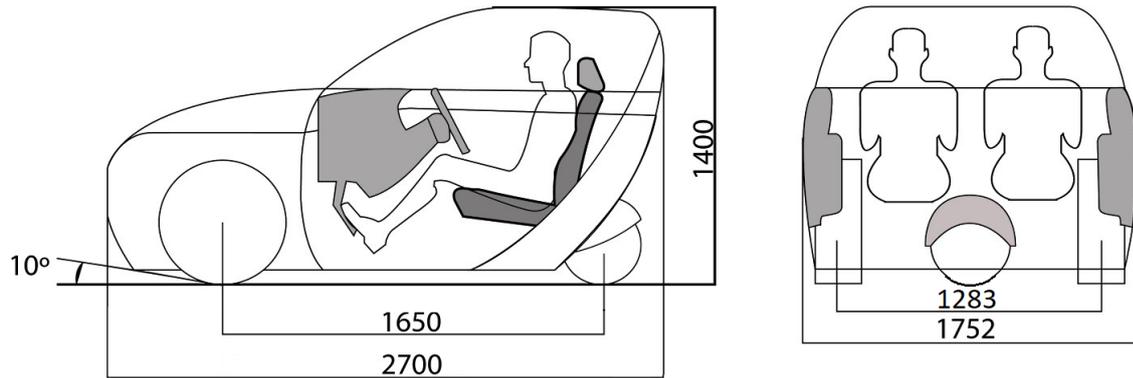


Figura 24 – Vistas ortogonais e *package* preliminar em 2D.

Os desenhos da Figura 24 foram usados como guias e foram inseridos em um cubo no ambiente *Imagine & Shape* para moldar cada plano de acordo com as formas do Join usando a ferramenta *Sketch Tracer*. Seguindo essa metodologia criou-se a forma do veículo partida ao meio, garantido que ao espelhar a outra metade a construção esteja simétrica, como mostra a Fig. 25.

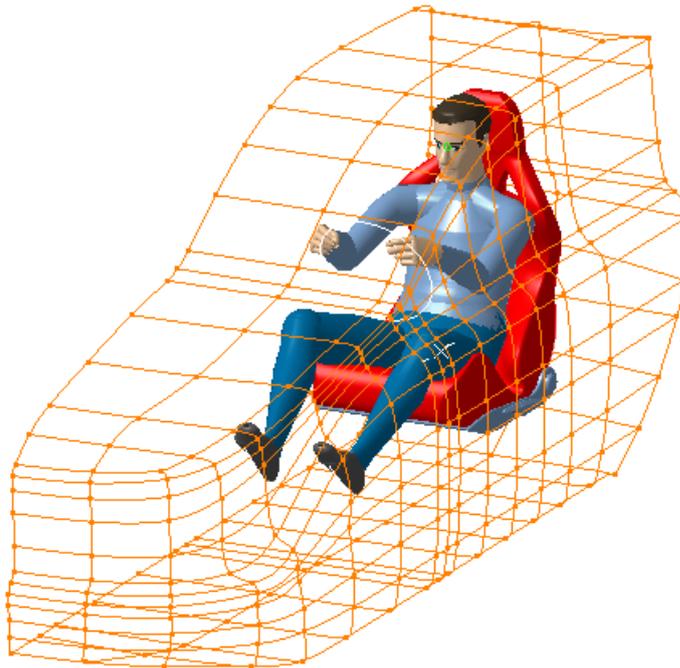


Figura 25 – Projeto em construção no *software* Catia.

As linhas guia foram construídas no ambiente *Generative Shape Design*, por ele permite-se a criação de superfícies (cascas) e não sólidos para compor a carroceria. As linhas foram desenhadas em 2D no *sketch* escolhendo sempre um plano de acordo com a profundidade, partindo da traseira à dianteira. Para garantir a conectividade entre uma linha e outra foi usado coincidência entre os pontos em comum de cada extremidade da curva.

Após moldá-lo foi usada a ferramenta *Simmetry*, ainda no ambiente *Generative Shape Design* para gerar a outra metade do carro e depois usando a ferramenta *Join* o módulo feito e a simetria foram unidas. Em seguida, foi usada a ferramenta *Extrud* que gera uma superfície de um determinado plano. Usando a ferramenta *Split* cortou-se as janelas, os faróis, parabrisas, caixa de roda, etc. como pode ser visto na Fig. 26 o corte do para-brisa *zenith*.

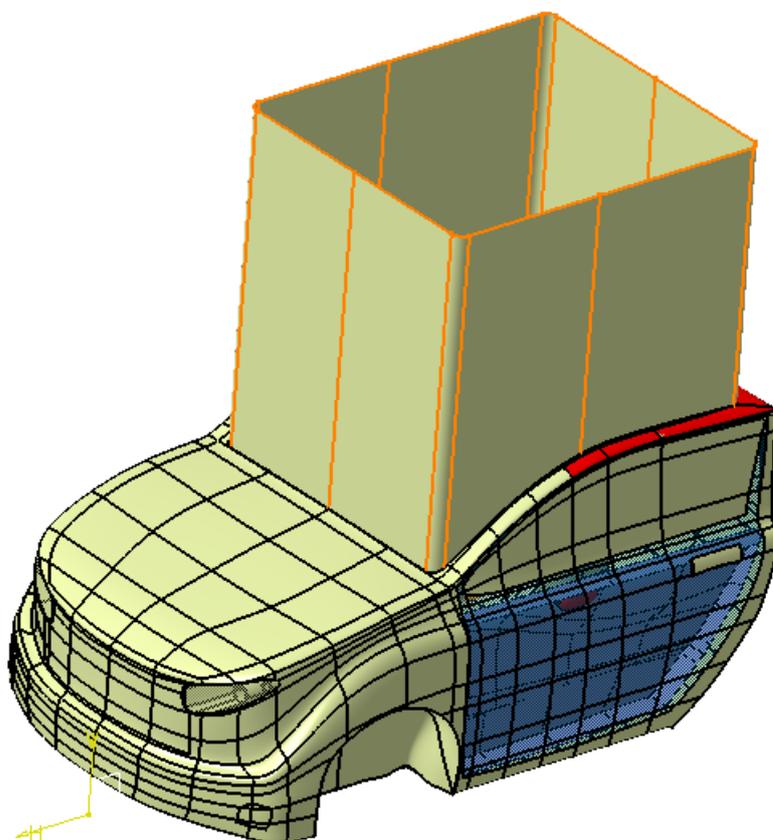


Figura 26 – Corte realizado na carroceria para o para-brisa do tipo *zenith*.

Inicialmente, por se tratar apenas do design e do conceito, o modelo *Join* foi projetado com um pneu em formato de esfera no lugar do eixo traseiro porém, ao considerar as tecnologias atuais e a ausência de referências bibliográficas com a aplicação desse componente, optou-se pela substituição desta por uma roda com pneu sem câmara de ar, semelhante àquela utilizada no eixo dianteiro.

Outra modificação no projeto preliminar foi no para-choque dianteiro. Tanto o projeto preliminar como o atual podem ser observados nas Figs. 27 a 30. O *Join* com os módulos de carga e de passageiros podem ser vistos nas Figs. 31 e 32, respectivamente.

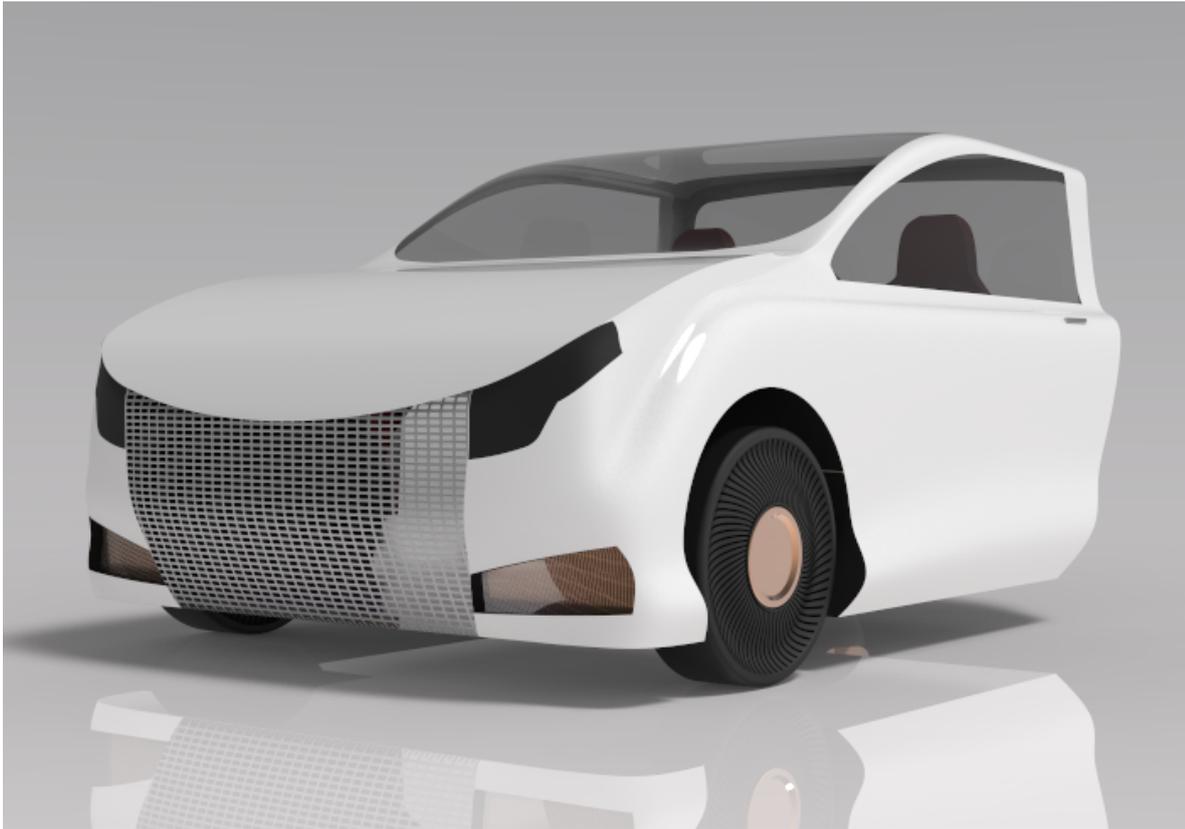


Figura 27 – Vista isométrica preliminar do Join em cor branca.

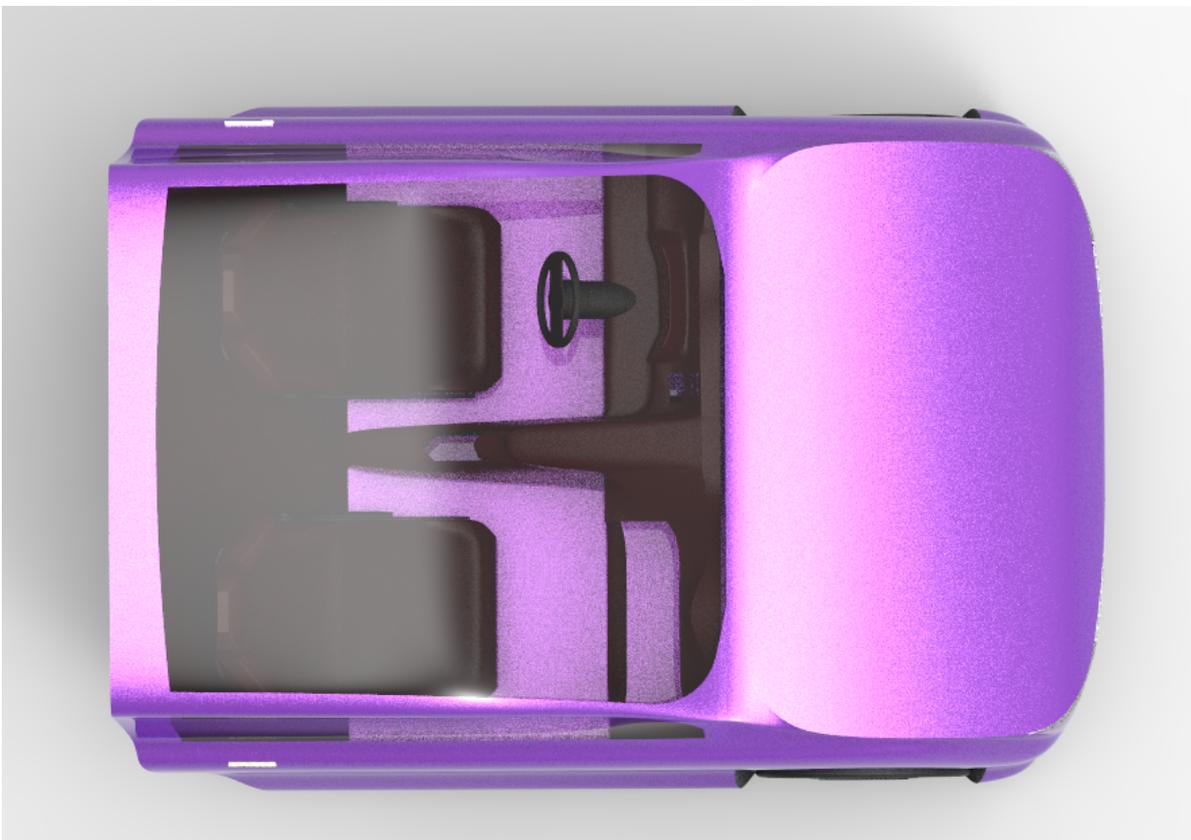


Figura 28 – Vista superior preliminar do Join em cor roxa.

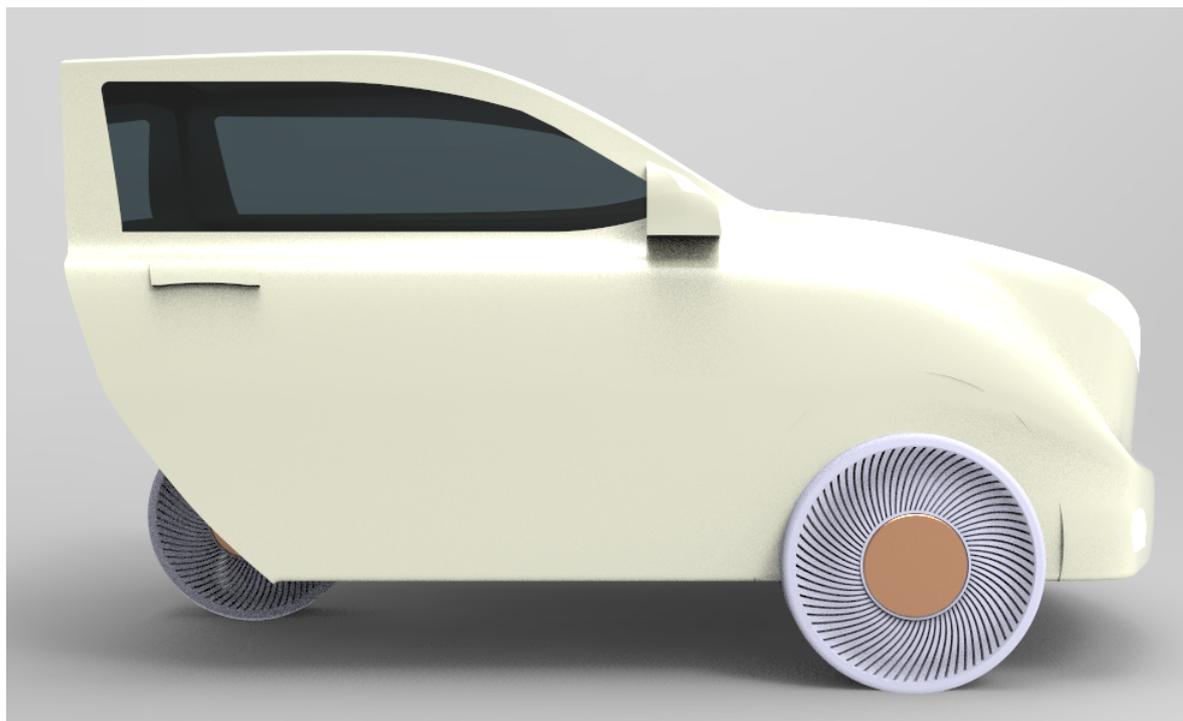


Figura 29 – Vista lateral atual do Join em cor branca.



Figura 30 – Vista frontal atual do Join em cor roxa.

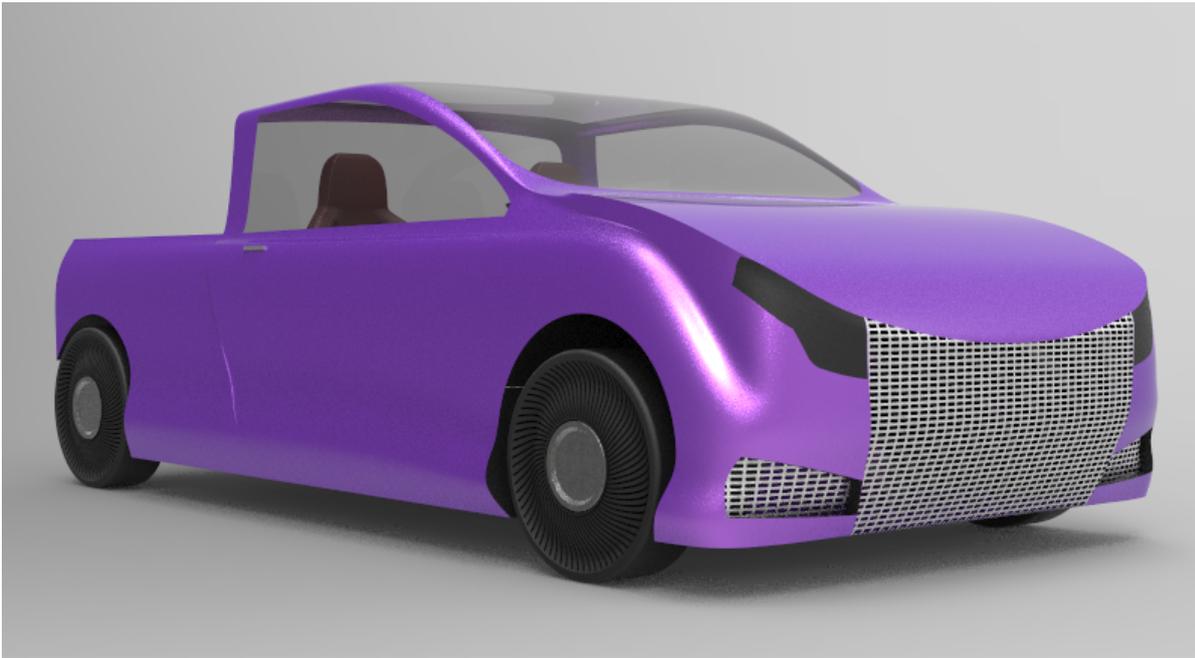


Figura 31 – Vista isométrica preliminar do Join com módulo de carga.

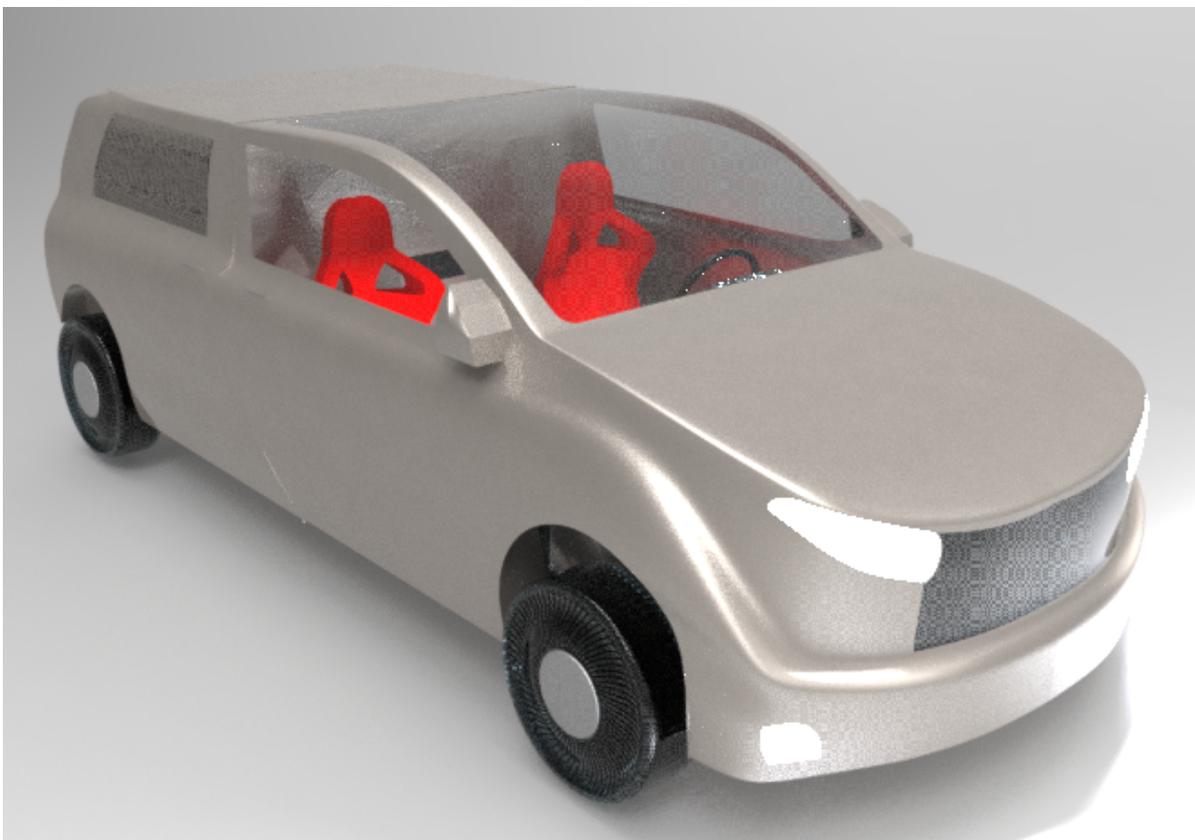


Figura 32 – Vista isométrica atual do Join com módulo de passageiros.

Parte III

ANÁLISE ERGONÔMICA, ESTRUTURAL E VIABILIDADE TÉCNICA

4 ANÁLISE DE ERGONOMIA

Este capítulo é delimitado ao *package* do veículo e a análise ergonômica. A partir das dimensões determinadas na norma SAE J1100 (28) a modelagem do exterior do veículo é apresentada na Fig. 33, dessa forma foi possível iniciar e analisar a disposição dos ocupantes dentro do interior do mesmo para definir os seguintes pontos de análise:

- O *package* proposto com os manequins para o módulo principal e o de passageiros;
- O *clearance* da cabeça através da abóbada construída seguindo a norma SAE J1052;
- As elipses dos olhos, construída de acordo com a norma SAE J941, para avaliar o campo de visão do motorista pela norma SAE J1050;
- A bolha de alcance da mão;
- A análise de RULA.

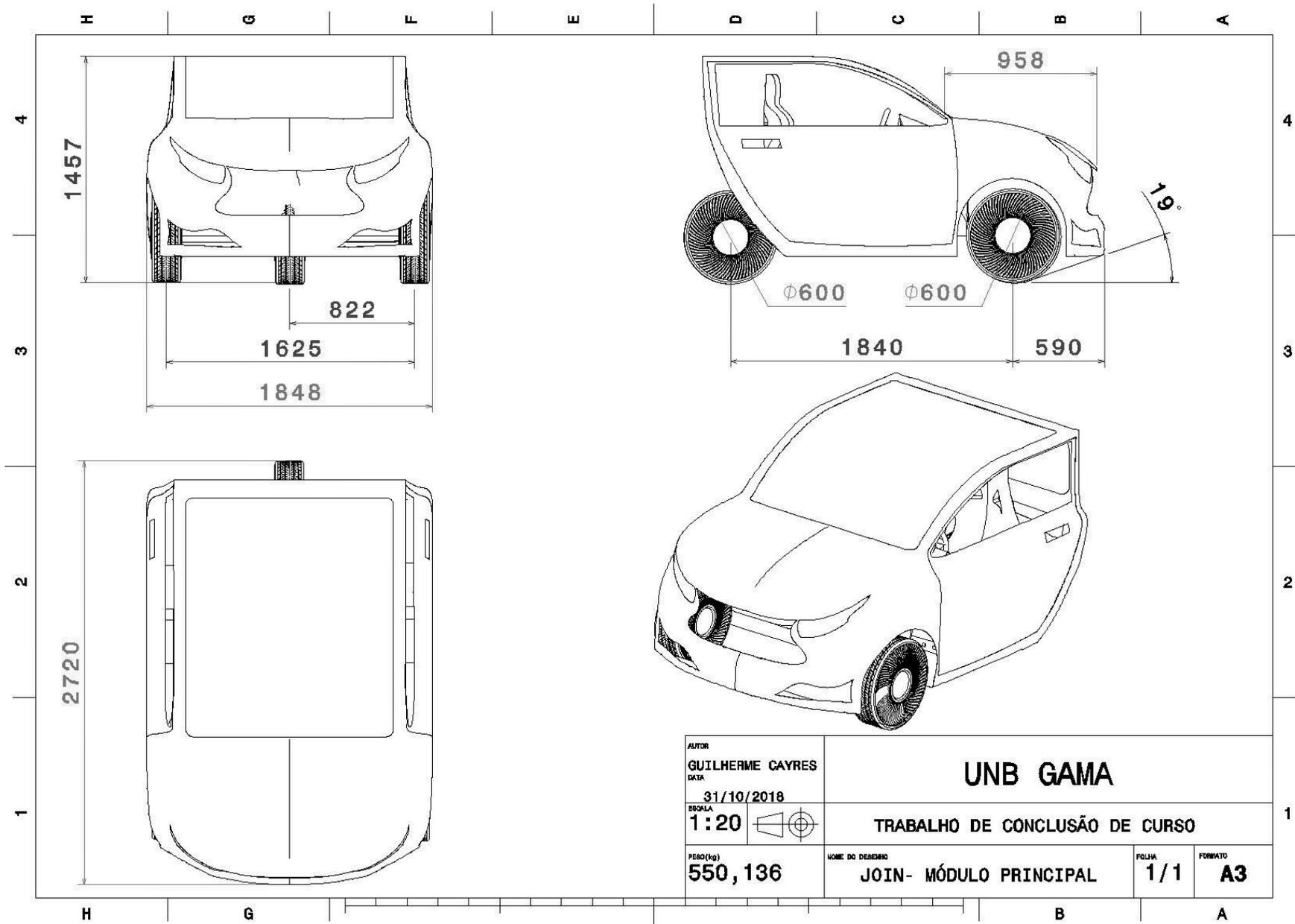


Figura 33 – Desenho técnico do veículo modular.

4.1 Package Proposto

O CATIA possui um ambiente com manequins que representam a figura humana para realização das análises ergonômicas e que podem simular seus movimentos, denominado *Human Builder*. Os manequins respeitam as características ergométricas de acordo com os dados populacionais dos seguintes países: Estados Unidos, Canadá, França, Japão e Coreia. Assim pode-se escolher o gênero do boneco (masculino ou feminino) e a porcentagem, com dados do IMC (índice de massa corpórea) do manequim de acordo com as características de sua nacionalidade.

A Figura 34 representa todas as cotas necessárias para construir o *package*, divididos em quatro seções: (a) assento; (b) volante; (c) pedal do acelerador e (d) descanso de pé.

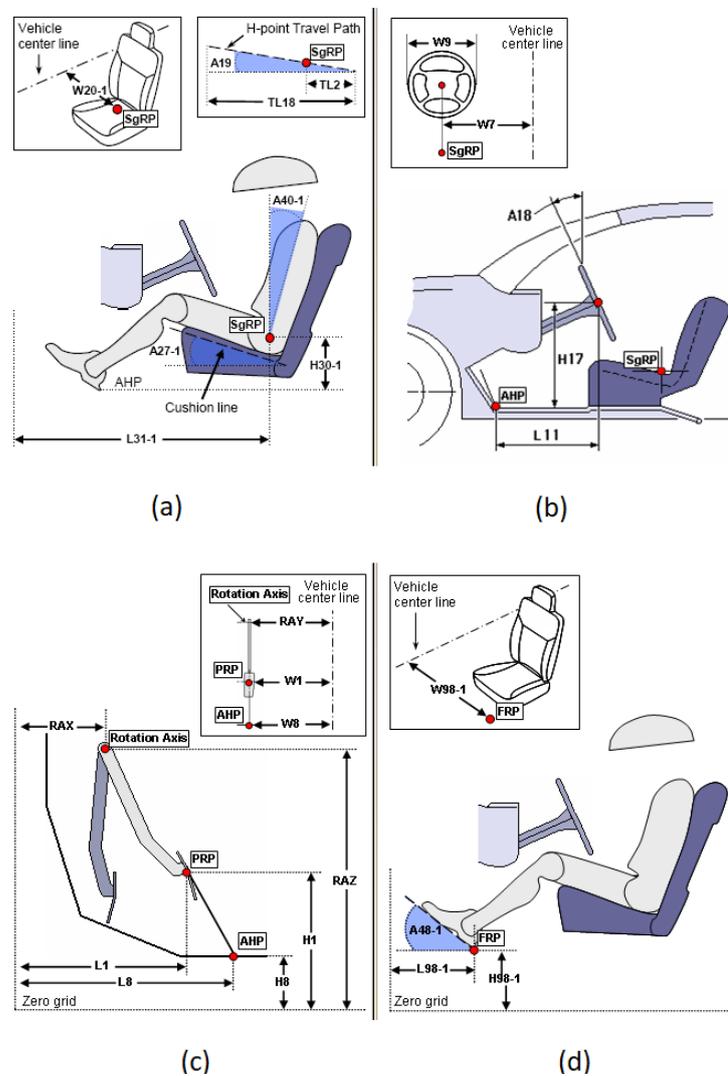


Figura 34 – Dados para *package*. Fonte: CATIA V5R21

Seguindo os dados da Figura 34 foi construído o *package* com os dados contidos na Tab. 2.

Tabela 2 – Valores package.

ASSENTO (a)	VALOR
L31-1	2005mm
W20-1	-400mm
H30-1	200mm
A19	25°
TL2	0mm
TL18	200mm
A27-1	15°
A40-1	15°
VOLANTE (b)	VALOR
L11	440mm
W7	-400mm
H17	580mm
W9	380mm
A18	20°
DIÂMETRO	30mm
PEDAL DO ACELERADOR (c)	VALOR
RAX	950mm
RAY	-250mm
RAZ	630mm
L1	1064mm
W1	-250mm
H1	521mm
L8	1200mm
W8	-250mm
H8	370mm
DESCANSO DE PÉ (d)	VALOR
L98-1	1200mm
W98-1	-550mm
H98-1	370mm
A48-1	48°

A altura do passageiro em relação ao solo respeitou as dimensões das baterias de lítio (279 x 182 x 71mm) entre o assoalho e o assento, as baterias utilizadas são baterias de alta performance da Voltronix de 180 Ah mostradas na Fig. 35 que são dispostas em células ao longo do assoalho do veículo.

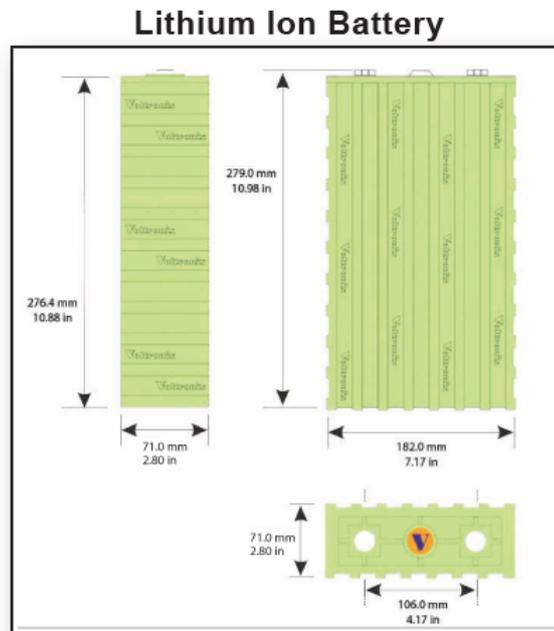


Figura 35 – Bateria de íon-lítio 180 Ah Voltronix (17).

Tendo-se como restrições as alturas do solo até o interior do veículo (172,9 mm) do assoalho até o topo das baterias (71mm) e do assento até o *H-point* (142,157mm) tem-se o comprimento da cota H70-1 com valor mínimo de 301,9 mm. Dessa forma, foram propostas as alturas do solo até o *H-point*, com valor de 571,7 mm demonstradas na Fig. 36.

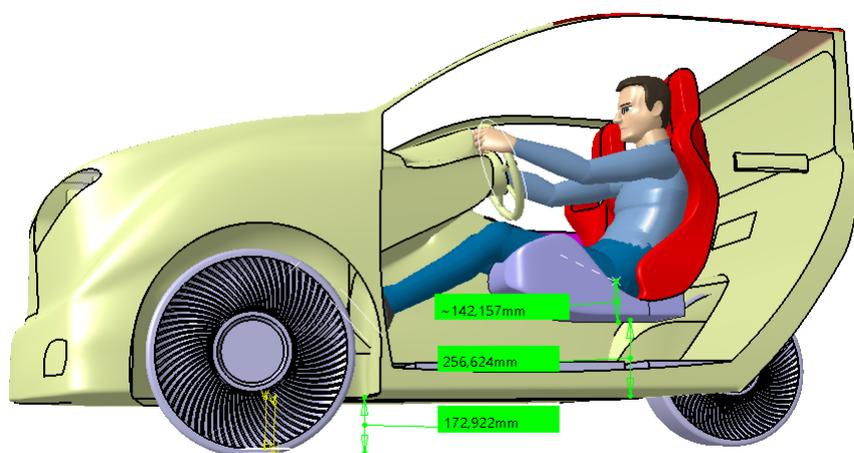


Figura 36 – Altura do *H-point* em relação ao solo.

Essas medidas foram obtidas utilizando a ferramenta *Measure Between* e dessa maneira pode-se saber, também, a área do assoalho capaz de comportar o banco de baterias. Otimizando sua disposição na área útil, 24 células de carga serão posicionadas agrupadas em 4 conjuntos, conforme as Figs. 37 e 38.

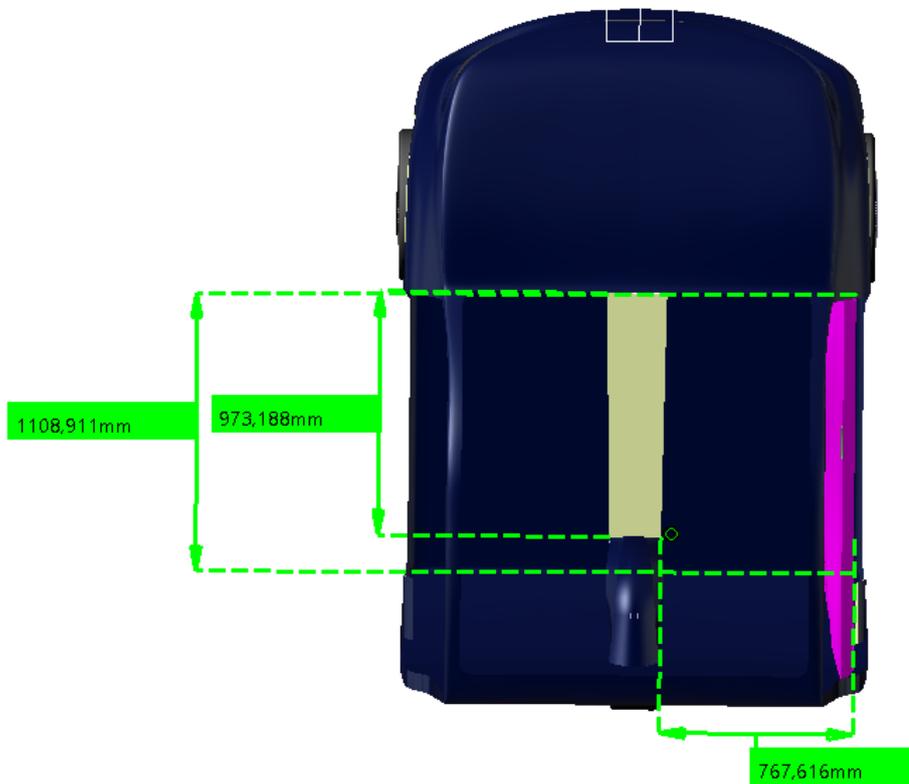


Figura 37 – Medida do espaço necessário para acomodação das baterias.

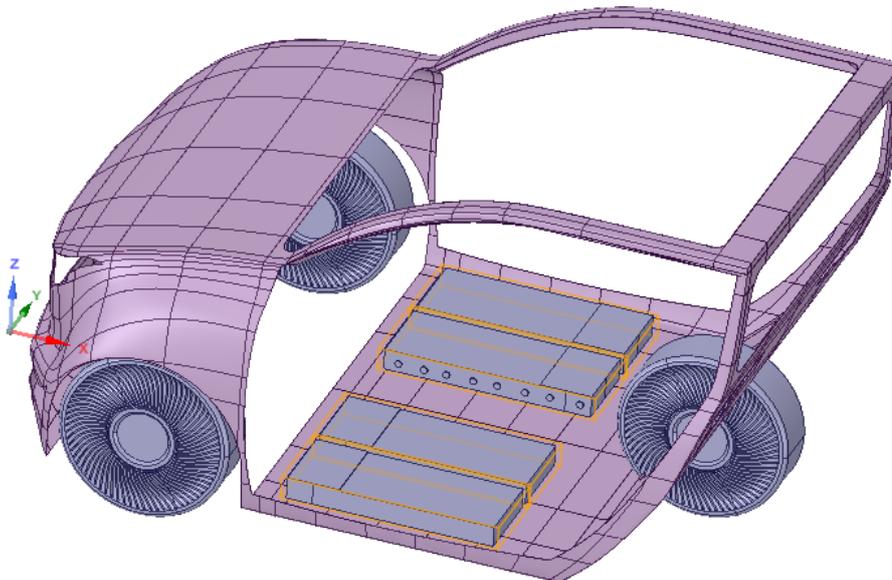


Figura 38 – Disposição das baterias no assoalho.

Definido esse espaço, é possível organizar todos os compartimentos internos do Join, assim como o volume, em litros, que esses ocupam. A Figura 39 mostra essa organização.

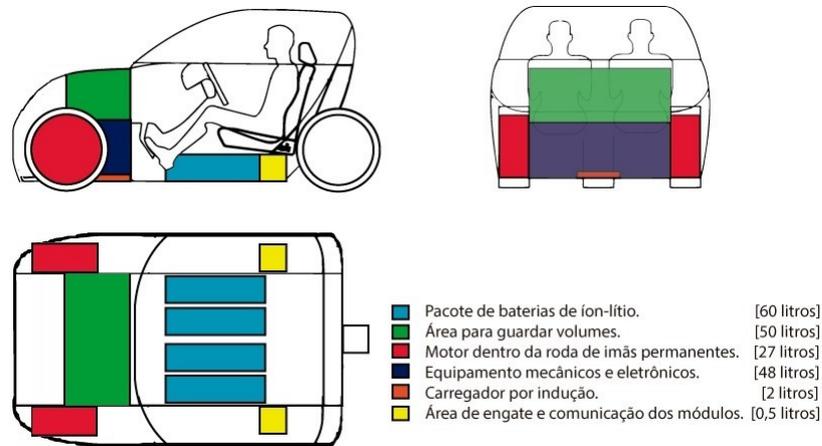


Figura 39 – Compartimentos Internos.

A Tabela 3 complementa as informações de *package* da Fig. 40 e seguem de acordo com classificação para microcarro (13). Os dados de *package* aplicados ao Join são mostrados com mais detalhe nos Apêndices C ao F.

Tabela 3 – *Package* para ocupantes.

	VALOR
HEEL TO GROUND	370mm
H30	200mm
H5	570mm
H61	863mm
H25	440mm
W3	1610mm
W20	400mm
W27	158mm
A60	45°
A61	5°
A40	25°

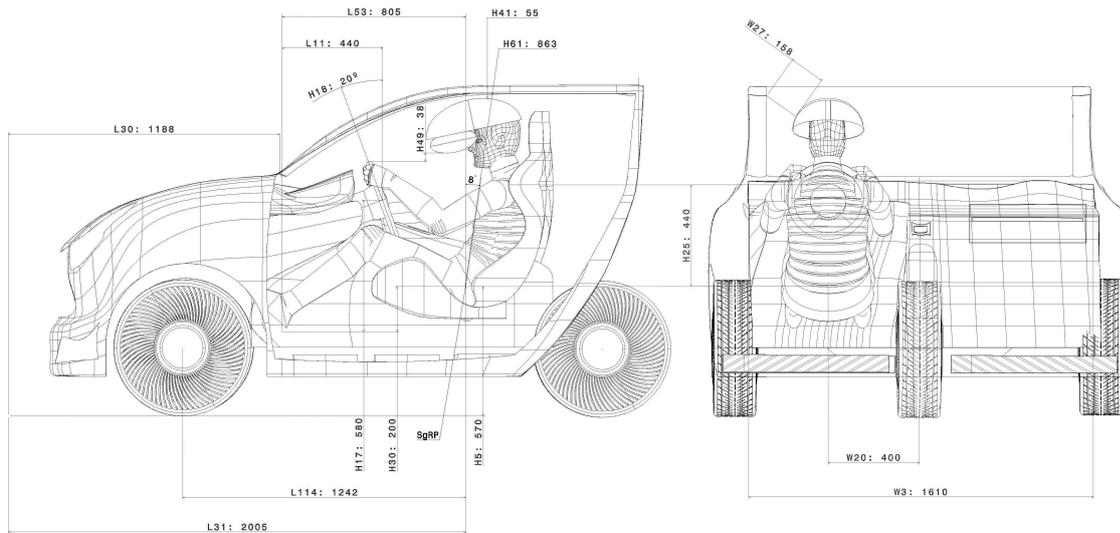


Figura 40 – Cotas internas para os ocupantes.

4.2 Módulo Principal com Manequins

Como já foi explicado na Seção 2.4.1, serão utilizados três manequins para a análise, um do gênero masculino americano com percentil 95, outro também masculino americano mas com percentil 50 e o feminino chinês com percentil 5.

4.2.1 Manequim Masculino Percentil 95

A primeira análise ergonômica foi realizada através de um manequim no CATIA com as seguintes características: Percentil 95, americano, sexo masculino, altura aproximada de 1,86 m e pesando 96,75 Kg. Ao fazer os ajustes no motorista, colocando-o na posição correta de sentar, apoiando seus pés aos pedais e ajeitando suas mãos ao volante obteve-se uma condição normal ao qual o condutor estará submetido quando estiver dirigindo o veículo. Essa representação é mostrada nas Figs. 41, 42 e 43.



Figura 41 – Veículo com motorista percentil 95 masculino. (Vista isométrica frontal)



Figura 42 – Veículo com motorista percentil 95 masculino. (Vista isométrica traseira)

Através da perspectiva do piloto, é mostrado na Fig. 43, uma ampla visão periférica para as laterais do veículo, com boa vista frontal e do painel.

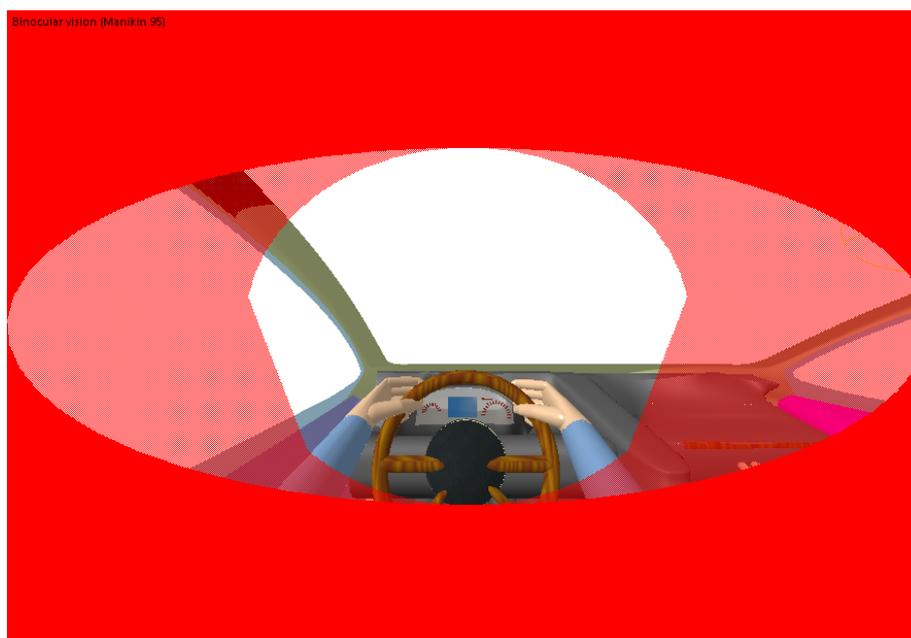


Figura 43 – Visão binocular (com visão periférica) do motorista percentil 95 masculino.

4.2.2 Manequim Masculino Percentil 50

Na segunda análise, o manequim apresentava as características médias da população: Percentil 50, americano, sexo masculino, altura aproximada de 1,75 m e pesando 78,5 Kg. Apresenta-se a posição de pilotagem nas Figs. 44 e 45 e a visão correspondente na Fig. 46.



Figura 44 – Veículo com motorista percentil 50 masculino. (Vista isométrica frontal)



Figura 45 – Veículo com motorista percentil 50 masculino. (Vista isométrica traseira)

Assim como o manequim 95, a visão periférica das laterais e a frontal para o painel são boas, como pode ser vista na Fig. 46.

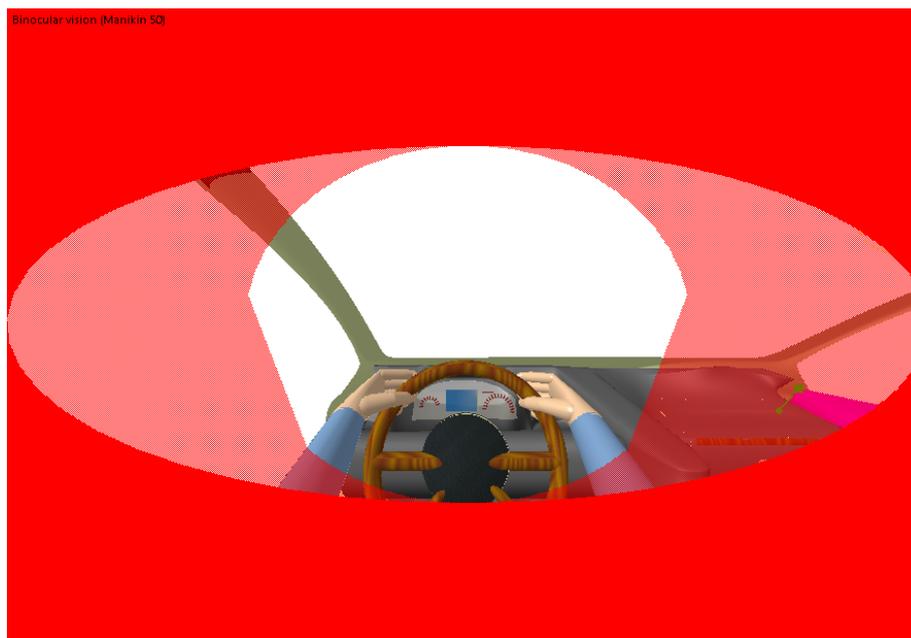


Figura 46 – Visão binocular (com visão periférica) do motorista percentil 50 masculino.

4.2.3 Manequim Feminino Percentil 5

Nesta análise ergonômica o manequim possuía as seguintes características: Percentil 5, chinesa, sexo feminino, altura aproximada de 1,48 m e pesando 43,02 Kg. Apresentou-se as posições e a visão de pilotagem como mostra as Figs. 47, 48 e 49, respectivamente.



Figura 47 – Veículo com motorista percentil 5 feminino. (Vista isométrica frontal)

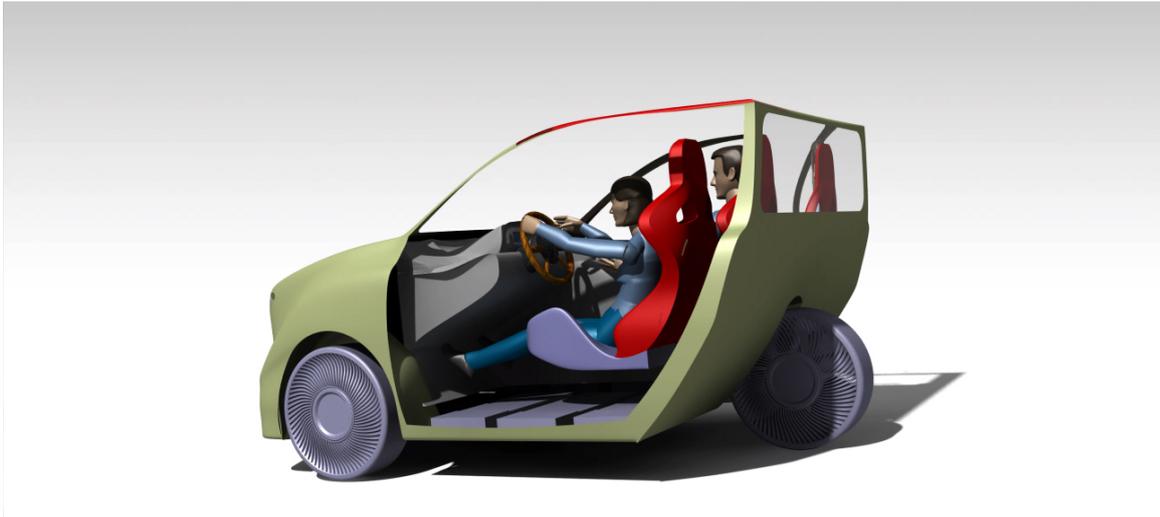


Figura 48 – Veículo com motorista percentil 5 feminino. (Vista isométrica traseira)

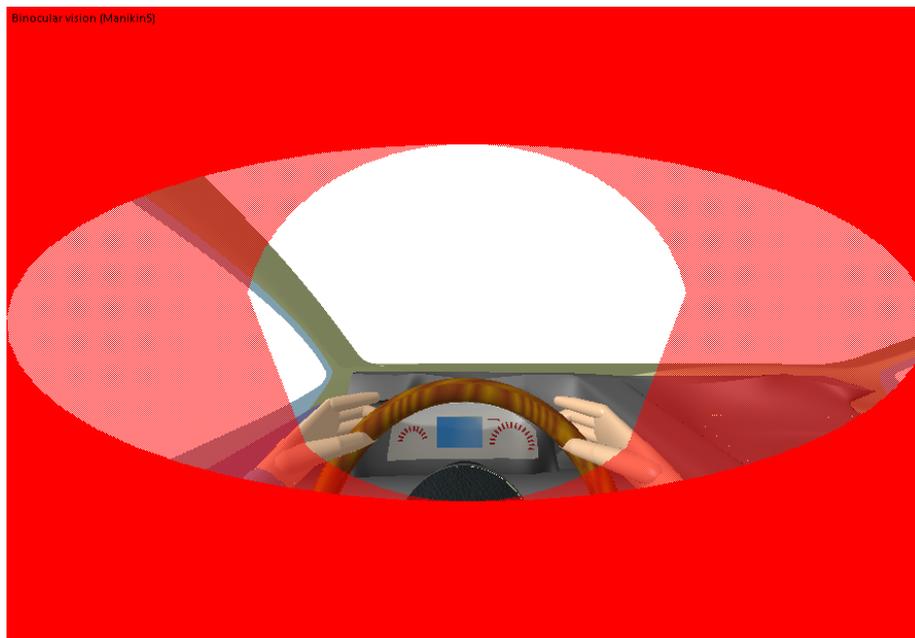


Figura 49 – Visão binocular (com visão periférica) da motorista percentil 5 feminino.

No caso da Fig. 49 a vista do painel é boa, porém com pequenas limitações na visão preiférica, demandando mais atenção durante a condução.

4.3 Módulo de Passageiros com Manequins

A análise necessária nesta seção será se o módulo de passageiros comporta confortavelmente dois manequins com percentil 95 e se não há choque de algum membro do corpo com algum componente estrutural. Os espaços livres neste módulo são mostrados na Fig. 39.

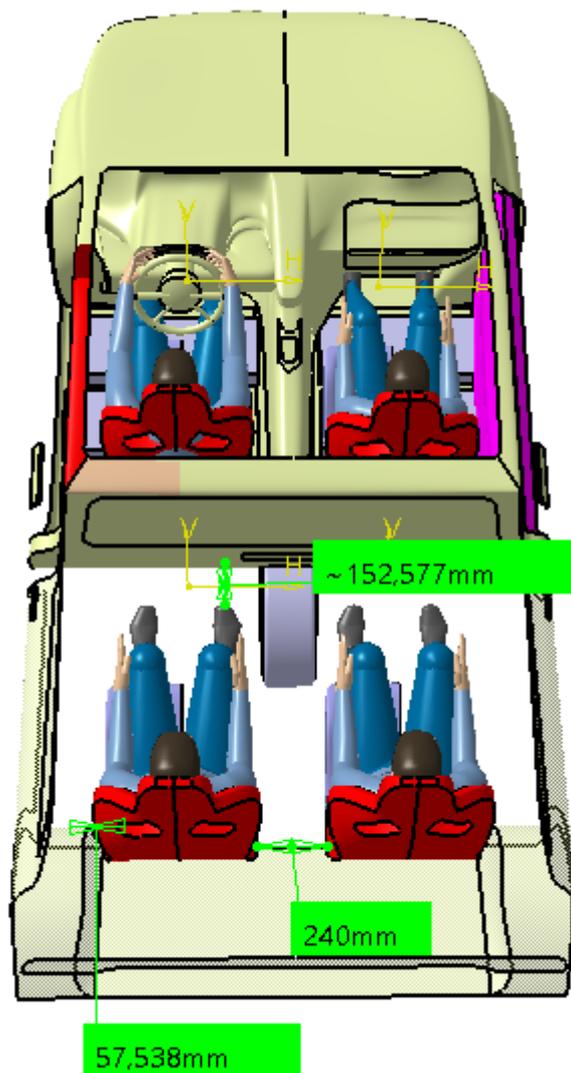


Figura 50 – Distancias entre passageiros traseiros.

Com esse espaço disponível no módulo de passageiros, é possível instalar mais acolchoamento no espaço entre a caixa de roda traseira e o forro das portas e entre os bancos individuais, porém não é possível acomodar confortavelmente três ocupantes nos bancos de trás.

4.4 Análise de Clearance da Cabeça

A análise de *clearance* da cabeça estuda a distância da cabeça até a estrutura superior para saber se a proximidade é segura, logo, aceitável. Segundo a norma SAE J1052 de Setembro de 2010, foram utilizados os dados da Fig. 51, esta que se baseia na postura do indivíduo e em seu percentil (95 ou 99), para calcular a abóbada que envolve a cabeça (*head contour*). Tal construção é um perímetro que delimita o espaço para que a cabeça não toque em partes do veículo. Sua aplicação para o percentil 95 é dada por algumas fórmulas que dependem das medidas do package, com isso a Tabela 4 foi montada gerando as medidas seguindo as fórmulas contidas na norma (18).

Tabela 4 – Localização do centróide da elipse. Adaptado de SAE(18).

POSIÇÃO	FÓRMULA (SAE J1052 - SET. 2010)	MEDIDA [mm]
x	$L1 + 664 + 0,587 \cdot (L6) - 0,176 \cdot (H30) + 90,6$	2041,88
y	$W20$	-400
z	$H8 + 638 + H30 + 52,6$	1260,6

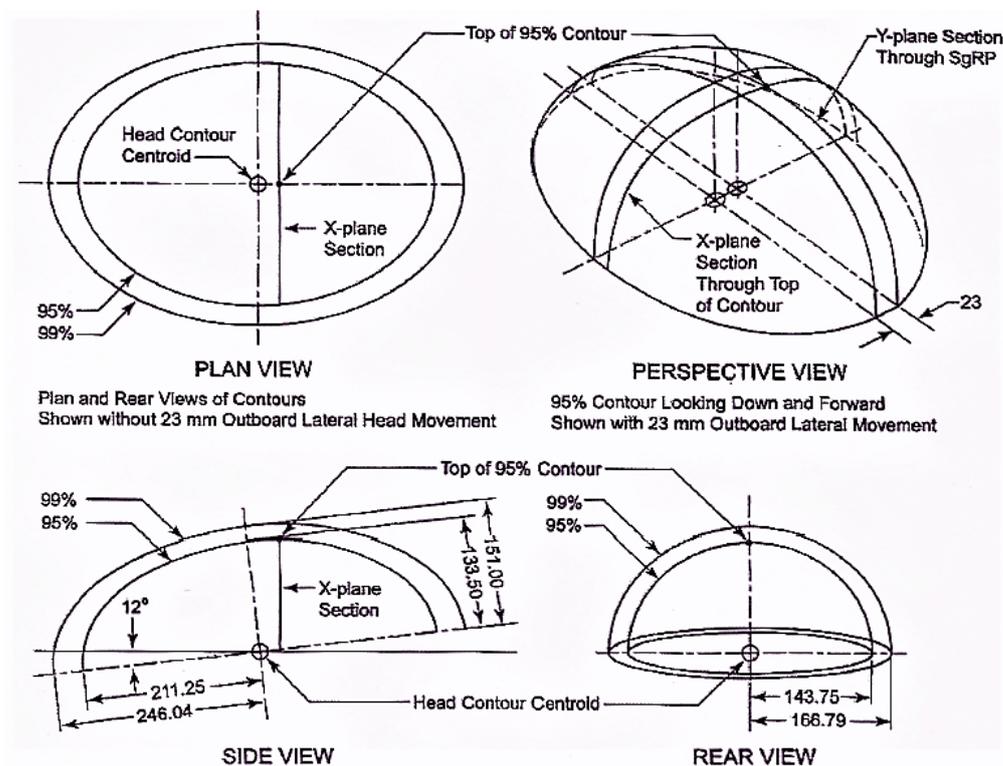


Figura 51 – Dimensões da elipse da cabeça (18).

Foi construído um *part* no CATIA do modelo onde pode ser analisada a distância entre o contorno da cabeça e a área interna do veículo. Primeiro analisou-se conforme a norma de Abril de 1997 em seguida adaptou-se à norma de Setembro de 2010. São analisadas a menor distância até a coluna A, conforme Figs. 52 e 53; e a distância do topo da abóbada ao teto, Figs. 54 e 73.

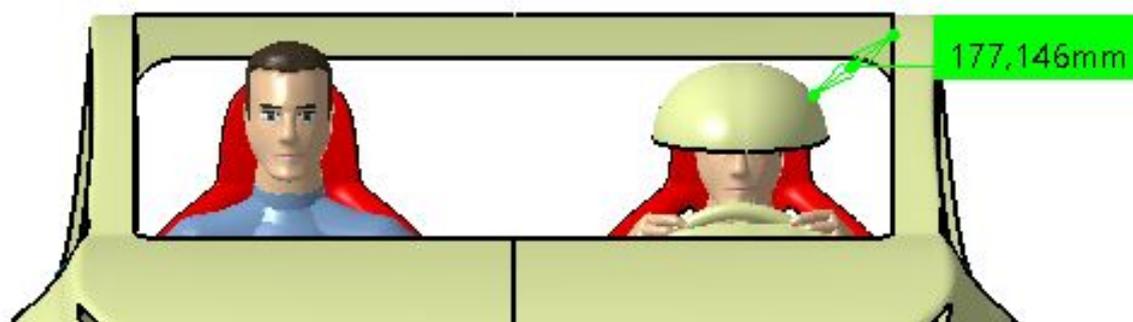


Figura 52 – Distância abóbada à coluna do veículo, segundo norma de 1997.

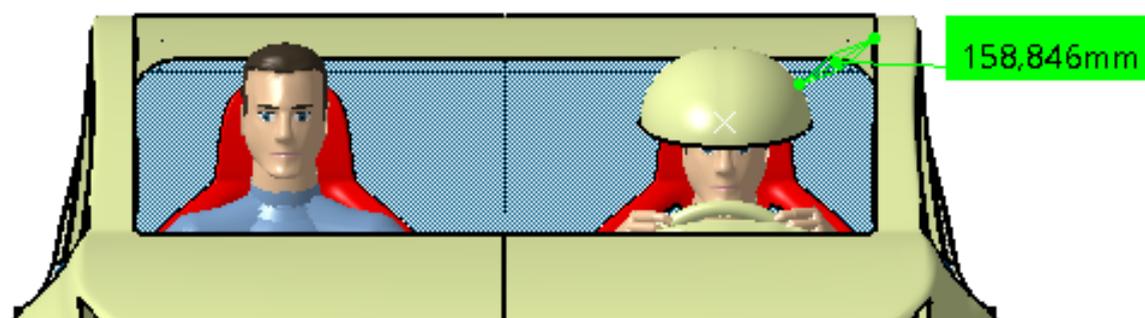


Figura 53 – Distância abóbada à coluna do veículo, segundo norma de 2010

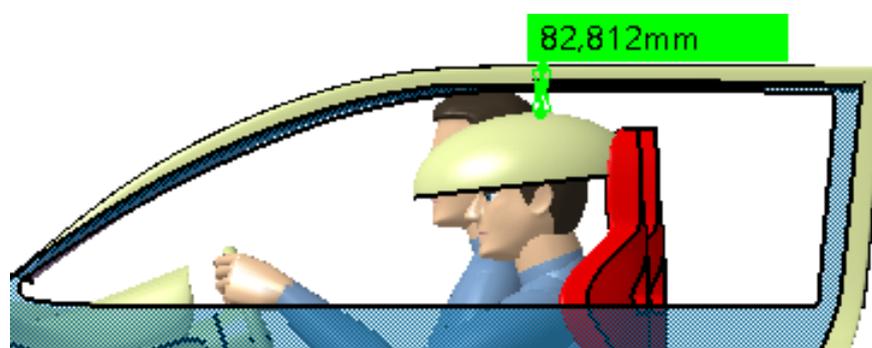


Figura 54 – Distância ao teto do veículo, segundo norma de 1997.



Figura 55 – Distância ao teto do veículo, segundo norma de 2010.

Após avaliar a distância até a coluna A, obteve-se aproximadamente 159mm de espaço livre, já a distância até o teto ficou em aproximadamente 55mm, considerando a espessura de 6mm do para-brisa, tem-se 49mm de *clearance* até o teto.

4.5 Análise com Elipse dos Olhos

A norma SAE J941 de Setembro de 2002 estabelece a localização dos olhos dos motoristas dentro de um veículo com o objetivo de medir o campo de visão do motorista através de modelos elípticos (26). De acordo com as dimensões do veículo e a posição do *package* do motorista, foi possível definir os valores de *Eye Points*, *Neck Pivot Point* (P1, P2, P3, P4) e do centróide das elipses. No qual podem ser visto nas Tabelas 5 a 7. Com a definição desses valores, foi possível modelar as elipses dos olhos de acordo com a norma.

Tabela 5 – Pontos do centróide

	TL18 > 133mm
X	1951,28mm
Y _e	-432,5mm
Y _d	-367,5mm
Z	1208mm

Tabela 6 – Quadro para *Eye Point*

	P1	P2
X	1951,28mm	1977,48mm
Y _e	-439,8mm	-411,9mm
Y _d	-374,8mm	-346,9mm
Z	1187,5mm	1187,5mm

Tabela 7 – Pontos *Neck Pivot*

P1	X	1951,28mm	2049,28mm
	Y	-407,3mm	-407,3mm
	Z	1187,5mm	1187,5mm
P2	X	1977,48mm	2075,48mm
	Y	-379,4mm	-379,4mm
	Z	1187,5mm	1187,5mm
P3	X	2142,28mm	
	Y	-411,2mm	
	Z	1230,5mm	
P4	X	2142,28mm	
	Y	-388,8mm	
	Z	1230,5mm	

Tendo construído uma superfície no CATIA para representar as *Eyellipses* e o “T” dos olhos, foram definidos os ângulos de visibilidade do motorista para a parte externa do veículo, para a parte interna (visão do painel) e o nível de obstrução pela coluna A, segundo a norma SAE J1050 de Fevereiro de 2009 (27).

O ângulo de obstrução foi medido determinando uma seção transversal horizontal da coluna A, na altura do olho do motorista. Considerando que a coluna está a esquerda do motorista, foi usado o *neck pivot point* P1 e o *neck pivot* como referência, foi criado uma linha de visão, que depois foi rotacionada até tangenciar o ponto mais externo da coluna. O ângulo de obstrução da coluna A medido foi definido entre a linha de visão rotacionada e uma linha tangenciando um ponto interno da coluna, conforme demonstra a Fig. 56.

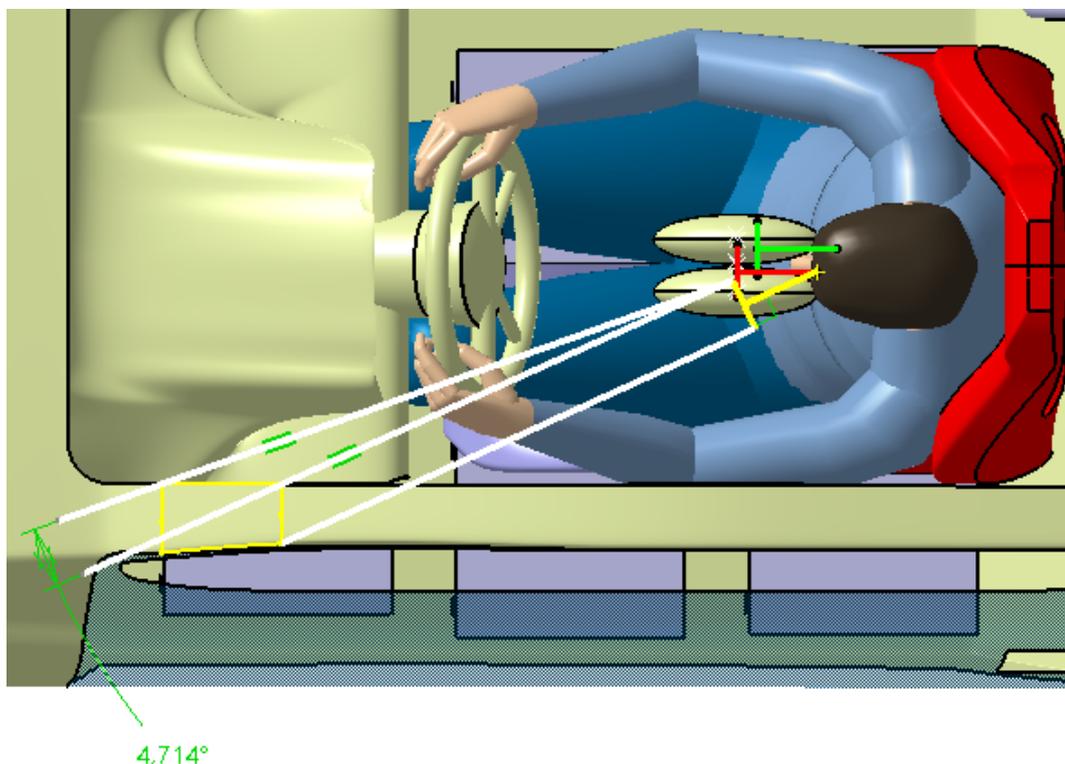


Figura 56 – Definição do ângulo de obstrução da coluna A.

O ângulo medido foi igual a $4,714^\circ$, de acordo com a exigência da norma SAE J1050, na qual informa que o ângulo de obstrução pode ser de no máximo 5° . Esse valor se manteve adequado mesmo após o reforço feito nas colunas da carroceria.

Para verificação do ângulo de visão externa do motorista, foi traçada uma linha tangente à parte de cima da *eyellipse*, até um ponto de máxima visão para cima (veículo possui para-brisa panorâmico) e uma linha tangente à parte de baixo da *eyellipse* que também tangenciasse a parte de cima do aro do volante até o capô do carro. A Fig. 57 demonstra a elipse criada e o ângulo de visão.

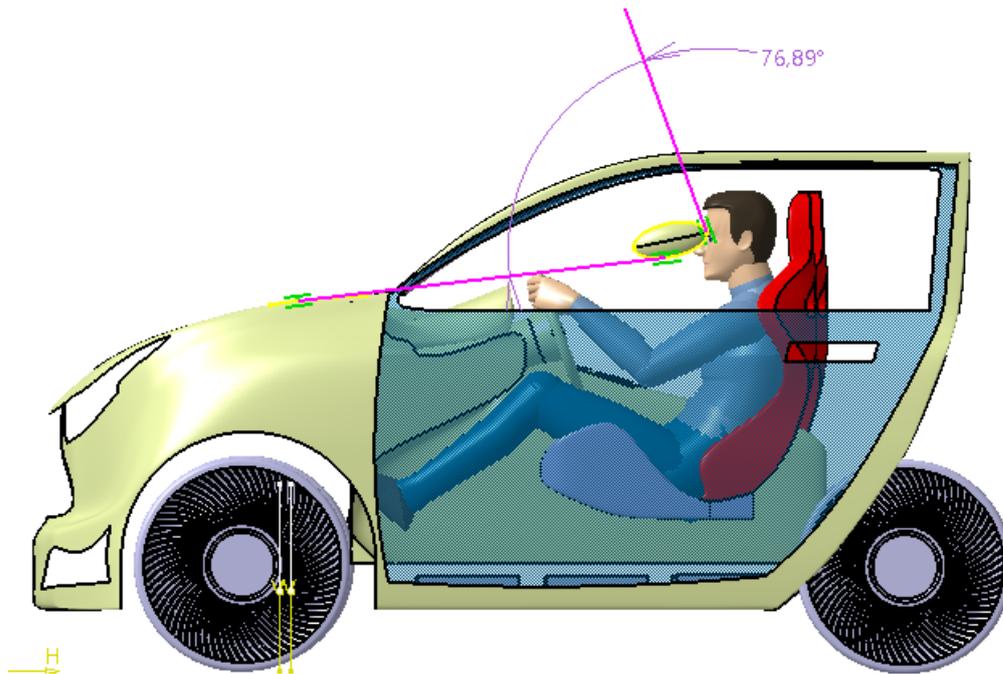


Figura 57 – Ângulo de visão externa à frente do carro.

O ângulo gerado entre essas duas linhas traçadas é o ângulo de visão que o motorista possui à frente do veículo, igual a aproximadamente 77° .

Para medir a visibilidade interna do painel de instrumentos, foi traçado uma reta tangente a parte de baixo da *eyellipse* que tangenciasse a parte de baixo do aro do volante, outra linha, também tangente à parte de baixo da *eyellipse*, mas dessa vez tangenciando a parte do meio do volante (área da buzina).

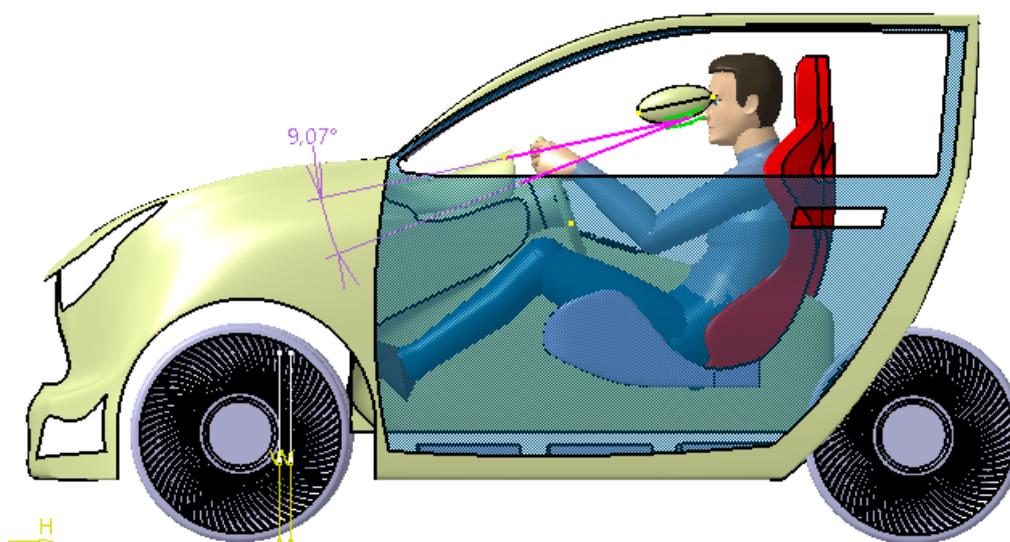


Figura 58 – Ângulo de visão interna do painel de instrumentos.

O ângulo medido entre essas duas linhas foi igual a $9,07^\circ$ e a para complementar a análise de visibilidade do painel, realiza-se a de alcance do motorista na Seção 4.6.

4.6 Análises de Alcance do Motorista

Observando a bolha de contato do motorista apresentada na Fig. 59 é possível inferir que seu alcance máximo passa da linha do painel de instrumentos facilmente. A instrumentação básica é toda alcançável sem muitos esforços.

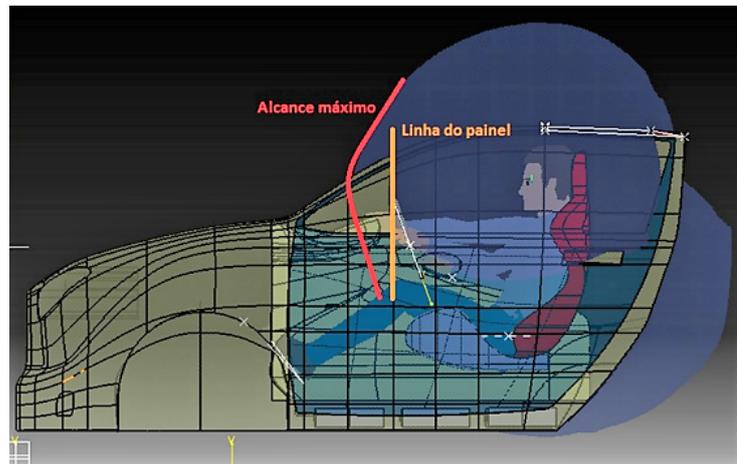


Figura 59 – Bolha de alcance do motorista.

A maçaneta da porta está dentro do campo de contato, o que pode ser observado na Fig. 60.



Figura 60 – Alcance maçaneta da porta.

Vale ressaltar na Figura 60 a angulação feita pelo antebraço e o bíceps, pois o fácil alcance nesse componente é importante para o conforto do motorista. Nota-se que seu braço está em uma posição de pouco esforço, porém a análise intermitente do conforto na posição de condução será analisada na Seção 4.7.

4.7 Análises RULA

A análise RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*) é um método desenvolvido para investigar os esforços dos membros superiores ao exercer uma atividade. É uma ferramenta que avalia a carga biomecânica e postural em todo o corpo, com mais foco no pescoço, tronco e membros superiores. A avaliação do RULA gera uma lista de ações que indica o nível de intervenção necessária para reduzir o risco de ferimentos devido à fadiga do operador, seu resultado varia entre 0 e 7. A descrição de cada nota está descrita nas Tabelas 8 e 9 (45).

Tabela 8 – Descrição do significado do *Score* Rula

RULA	DESCRIÇÃO DO RESULTADO
1-2	Postura aceita por pouco tempo
3-4	Investigação futura necessária podendo haver mudanças
5-6	Investigação e mudanças devem ser realizadas em breve
7	Investigação e mudanças devem ser realizadas imediatamente

Tabela 9 – Associação de cores à pontuação de cada item do RULA.

SEGMENTO	PONTUAÇÃO	COR ASSOCIADA À PONTUAÇÃO					
		1	2	3	4	5	6
BRAÇO	1 a 6	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Vermelho
ANTEBRAÇO	1 a 3	Verde	Amarelo	Vermelho			
PUNHO	1 a 4	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho		
TORÇÃO DO PUNHO	1 a 2	Verde	Vermelho				
PESCOÇO	1 a 6	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Vermelho
TRONCO	1 a 6	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Vermelho

Realizou-se a análise de RULA existente no *software* CATIA para os manequins de percentil 95 masculino, 50 masculino e 5 feminino. Como parâmetros, adotou-se uma postura intermitente, com opções ativas de braços apoiados, trabalhando simetricamente e balanceados. O resultado é demonstrado na Fig. 61 para o percentil 95, na Fig. 62 para o percentil 50 e na Fig. 63 para o percentil 5.

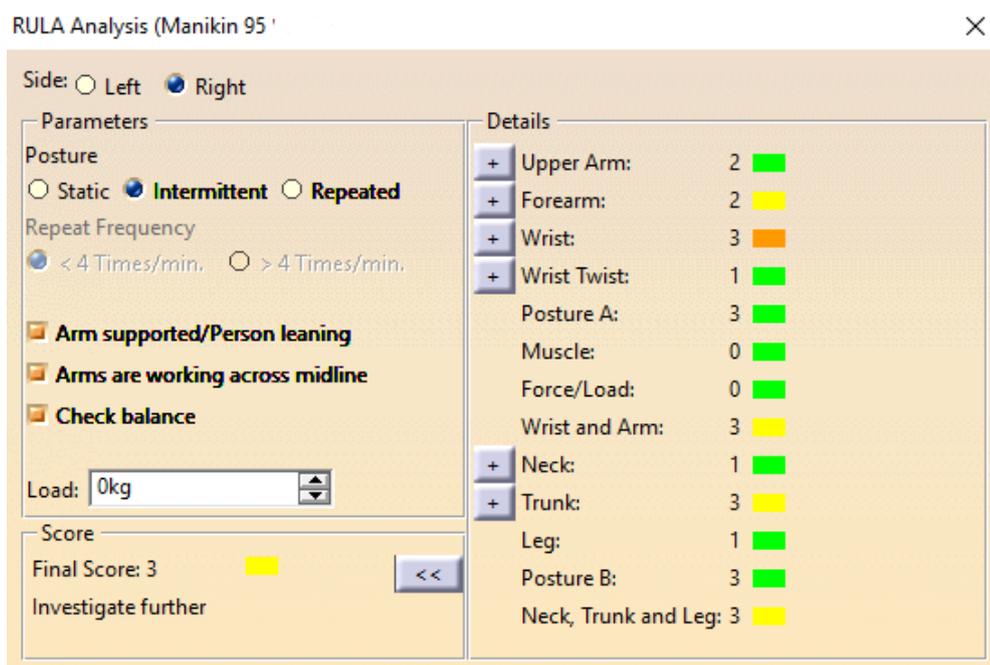


Figura 61 – Análise RULA, percentil 95 masculino.

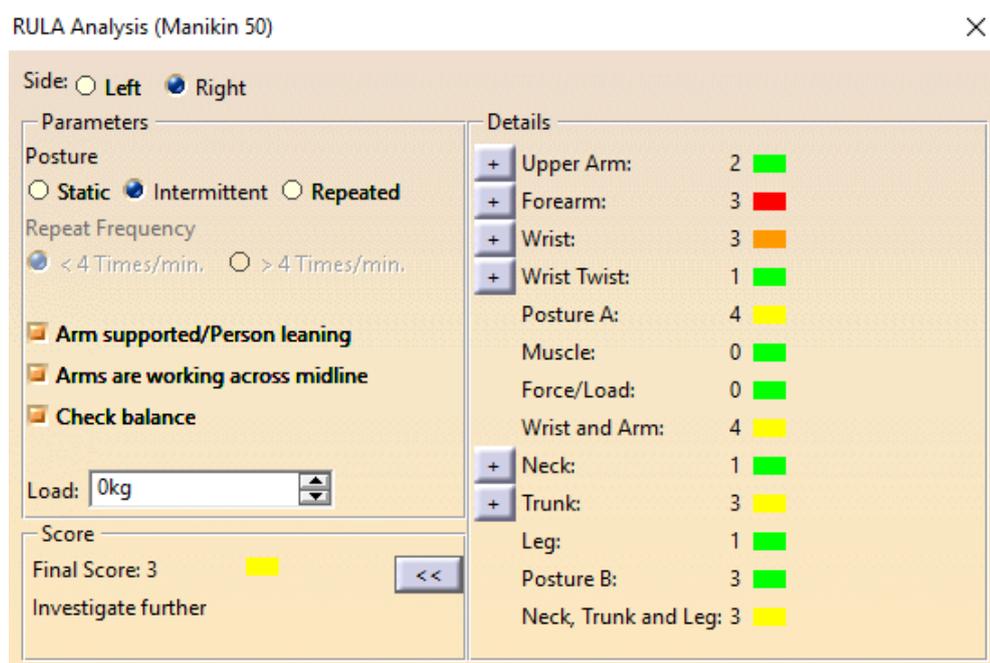


Figura 62 – Análise RULA, percentil 50 masculino.

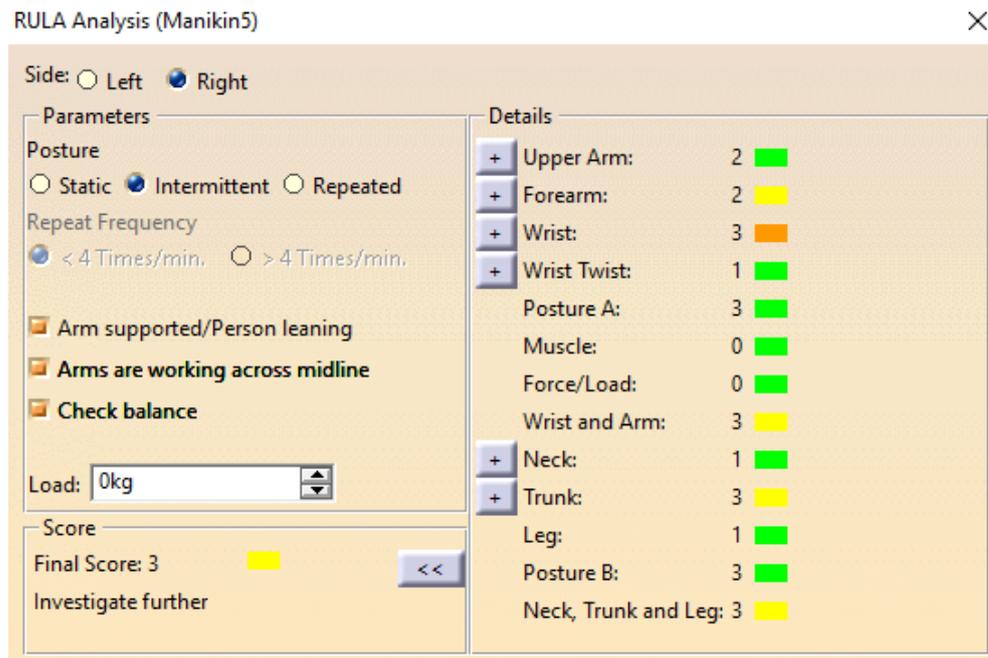


Figura 63 – Análise RULA, percentil 5 feminino.

O resultado da análise foi satisfatória para os três percentis com *score* final igual a três. Um ponto importante para a avaliação do *score* final é o fato que o veículo transita dentro da cidade, podendo ser alugado por um curto período de tempo, sendo possível melhorar ainda mais o *score*.

5 ANÁLISE ESTRUTURAL

Este capítulo é delimitado às análises estruturais do chassi, da carroceria e do dispositivo de acoplamento do conceito, sendo estes analisados sob os seguintes critérios:

- Análise estática, modal, harmônica e transiente do chassi;
- Projeto e simulação do dispositivo de acoplamento entre módulos;
- Cálculo da propensão ao capotamento da carroceria;
- Cálculo da rigidez à torção da carroceria.

Inicialmente é importante para as análises localizar o centro de gravidade (CG) do veículo, como mostra a Fig. 64 e construir uma estrutura para fixar as baterias e suportar cargas de flexão e torção, apresentada na Fig. 65. O CG foi calculado com o veículo vazio, com peso igual a 550,4 kg e também carregado com dois ocupantes percentil 95, cerca de 97 kg cada, mais duas bagagens de 23 kg cada, totalizando 790 kg de peso. As posições em milímetros para os eixos x e z foram encontradas pela razão entre o momento e o peso conforme Tab. 10.

Tabela 10 – Quadro para cálculo do CG.

COMPONENTE	PESO (kg)	POSIÇÃO x (mm)	POSIÇÃO z (mm)	MOMENTO M_{Gx}	MOMENTO M_{Gz}	CG	POSIÇÃO x (mm)	POSIÇÃO z (mm)
CARRO VAZIO	550,14	1447,6	202,2	796382,664	111238,308	CARREGADO	1553,9	325,2
2 OCUPANTES PERCENTIL 95	193,5	2005	570	387967,5	110295			
CARGA	46	927,7	766,3	42674,2	35249,8	VAZIO	1447,6	202,2
TOTAL	789,64	-	-	1227024,364	256783,108			

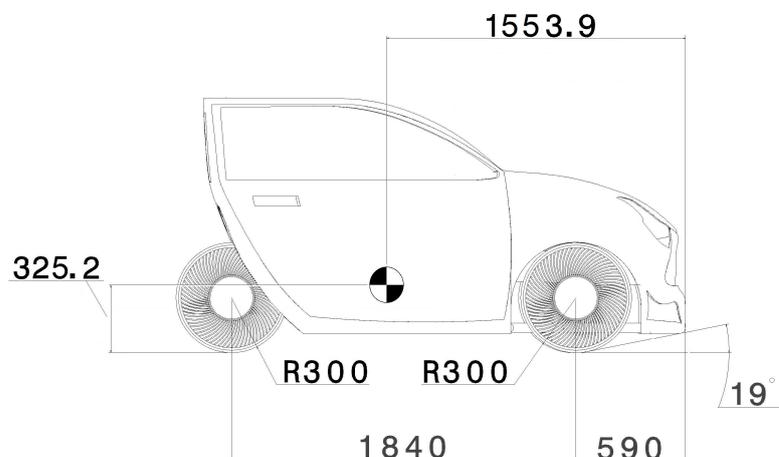


Figura 64 – Vista lateral evidenciando o centro de gravidade (CG) em mm do veículo carregado.

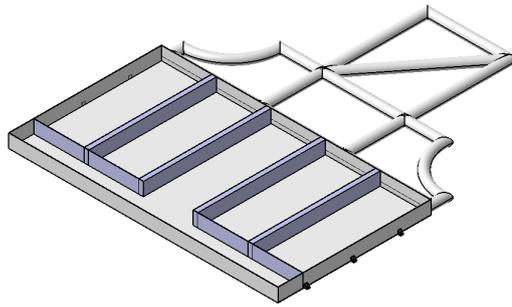


Figura 65 – Chassi tubular vinculado ao suporte das baterias.

A estrutura da Fig. 65 é composta por elementos tubulares de seção circular com duas polegadas de diâmetro e dois milímetros de parede e elementos de chapa com dois milímetros de espessura. O desenho técnico dessa estrutura encontra-se no Apêndice A.

5.1 Análise Estática

O material empregado no projeto do chassi foi aço estrutural ASME BVP com uma densidade de 7850 kg/m^3 , resistência máxima à tração de 460 MPa , resistência ao escoamento de 250 MPa , módulo de elasticidade de 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0,266.

Para a realização das simulações computacionais é necessária a discretização da geometria em pequenos elementos unidos por nós através da malha de elementos finitos. O tipo de elemento utilizado no chassi foi o Solid185 com ordem linear e uniforme. A variação do tamanho de elemento ficou entre 10 e 1 mm . Na Fig. 66 evidencia-se a qualidade de elemento do refinamento aplicado no ponto de fixação, variando de 0,05 até 0,99.

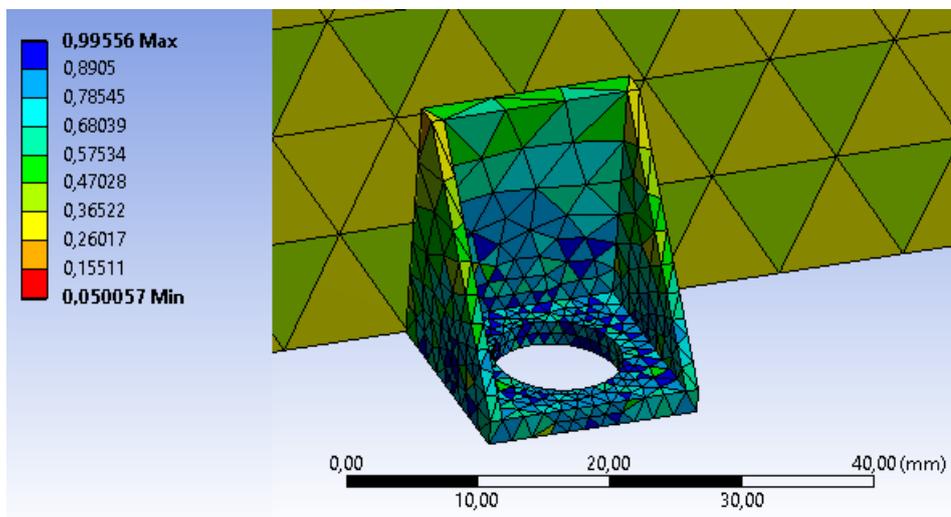


Figura 66 – Vista em detalhe da malha gerada na fixação do chassi na carroceria.

A função de proximidade e curvatura foi usada no ponto onde é fixado o suporte das baterias mostrado na Fig. 66. Além disso foi feito um refinamento de malha do tipo H, o qual aumenta-se o número de elementos até que um valor de interesse convirja e este não se altere conforme continua-se a aumentar a quantidade de elementos. Na Fig. 67 é mostrado o gráfico desse refinamento que convergiu após três iterações para o valor de tensão equivalente de von Mises.

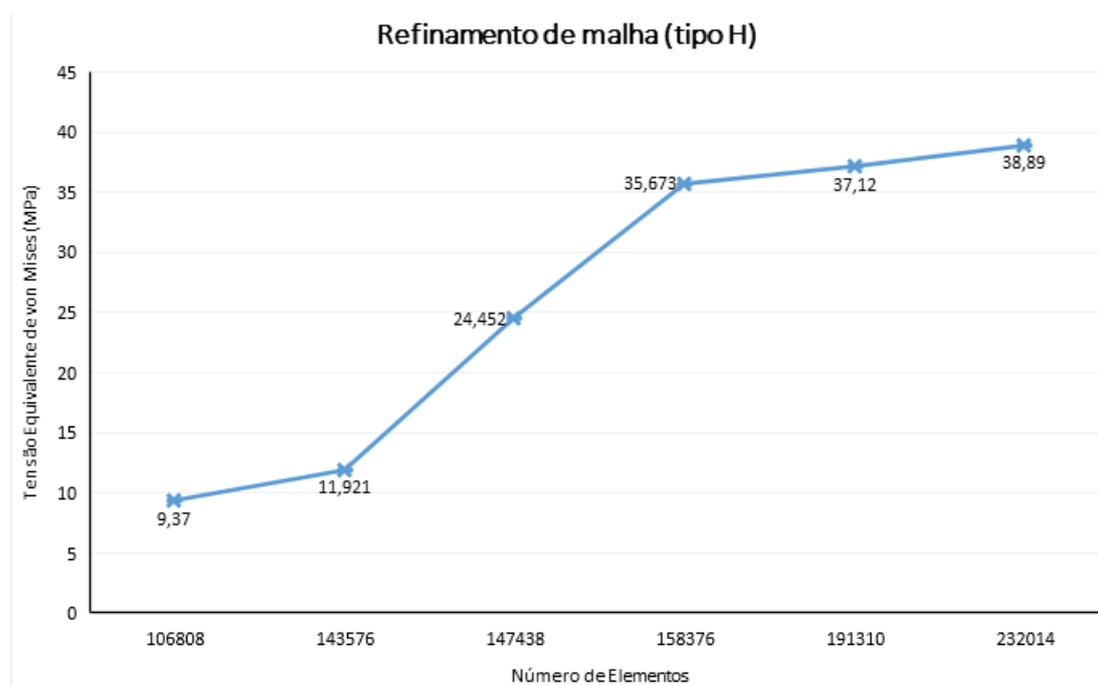


Figura 67 – Gráfico de refino de malha do tipo H.

5.1.1 Teste de Flexo-Torção

A análise de flexo-torção é uma condição bastante severa ao chassi, na qual o próprio peso do veículo é suportada apenas por dois pontos diagonalmente opostos, por exemplo, pneu dianteiro esquerdo e traseiro direito. Nesse caso, as cargas aplicadas foram do veículo vazio ($5500,4 N$) e carregado ($7900 N$), ambas distribuídas por toda a área superior do chassi, com suportes cilíndricos de liberdade radial nos pontos de fixação do chassi na carroceria do lado esquerdo e no elemento de fixação da suspensão do lado direito.

Os resultados das análises estáticas quanto à flexo-torção apresentaram o valor máximo de tensão equivalente de von Mises igual a $144,23 MPa$ para o veículo vazio e $206,73 MPa$ com o carregamento, sendo a condição mais crítica evidenciada na Fig. 68.

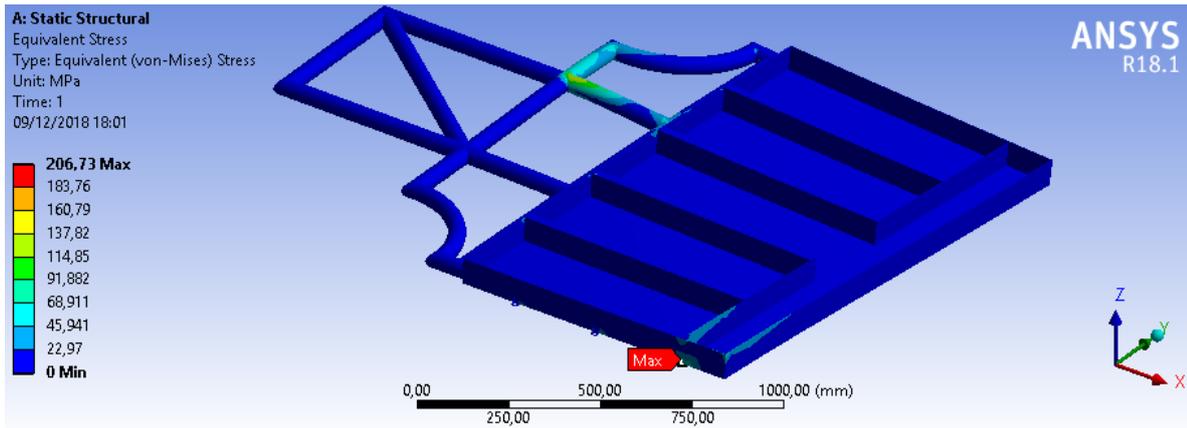


Figura 68 – Tensão equivalente de von Mises para flexo-torção.

Ambos os valores encontrados são menores que a tensão de escoamento do aço estrutural, 250 MPa , portanto o projeto estático do chassi é seguro.

5.2 Análise Dinâmica

Além das cargas estáticas do veículo, o chassi também está constantemente sujeito a cargas dinâmicas, ou seja, variando amplitudes, sentidos e direções no tempo. Tais ações geram vibrações na estrutura e com isso podem gerar avarias, fadiga nos materiais e perda de desempenho, sendo necessária na análise estrutural a avaliação do comportamento dinâmico (47).

O peso de 376 Kg sobre o eixo dianteiro foi o carregamento externo aplicado nas análises das Seções 5.2.2 e 5.2.3, esse valor foi encontrado de acordo com a Eq. 5.1 adaptada de Gillespie(5), onde W é 790 Kg , b tem valor de 876 mm e L é igual a 1840 mm .

$$W_{fs} = W \frac{b}{L} \quad (5.1)$$

$$W_{fs} = 790 \cdot \frac{876}{1840}$$

$$W_{fs} = 376 \text{ kg} \approx 3760 \text{ N}$$

A carga escolhida foi com o veículo carregado pois esta é uma situação mais severa dinamicamente. A condição de contorno do tipo cilíndrica com liberdade radial foi utilizada como suporte para os seis pontos de fixação do chassi na carroceria.

5.2.1 Análise Modal

A análise modal viabiliza a construção de modelos matemáticos simplificados de sistemas mecânicos, permitindo descrever as equações de movimento através dos chamados parâmetros modais, que são as frequências naturais, os fatores de amortecimento e os modos de vibração do sistema (48). Com a estrutura presa aos pontos de fixação obtiveram-se as dez primeiras frequências naturais que excitam o sistema, apresentadas na Tab. 11.

Tabela 11 – Frequências de ressonância do chassi.

Nº DE MODOS	FREQUÊNCIA (Hz)
1	27,57
2	42,708
3	81,648
4	109,56
5	138
6	194,59
7	199,57
8	231,18
9	242,63
10	285,07

Para completar a análise modal é necessário verificar o impacto de cada modo de vibração associado às frequências naturais determinadas ao serem excitadas por uma força externa. Essa verificação é feita através da análise harmônica na Seção 5.2.2.

5.2.2 Análise Harmônica

Para esta segunda análise dinâmica, foram requeridos o método de análise harmônica, definido como *full*; a faixa de frequências, de 1 a 300 Hz; trinta *substeps*, ou seja, a quantidade de pontos em que serão extraídos resultados, de forma a serem obtidos valores de amplitude a cada 10 Hz. As forças aplicadas foram definidas com amplitude de 3760 N na direção negativa no eixo z .

As respostas do sistema no domínio da frequência para deformação são apresentadas na Fig. 69 onde é possível identificar as frequências mais críticas do sistema que são aquelas do 1º, 2º, 6º e 7º modos de vibração. Vale ressaltar que não foi aplicado nenhum amortecimento ao sistema.

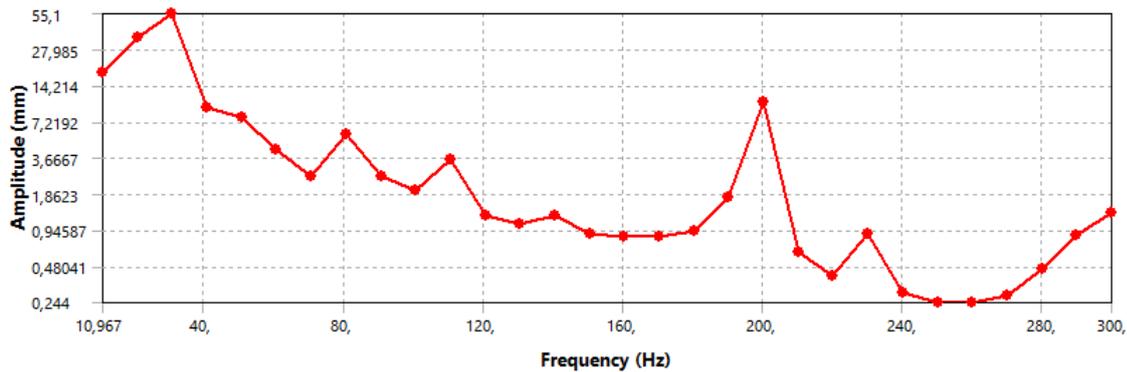


Figura 69 – Resposta harmônica para deformação.

5.2.3 Análise Transiente

A próxima etapa consiste na análise no regime transiente, na qual são analisadas as variações da resposta dinâmica do modelo ao longo do tempo. As curvas de resposta no domínio da frequência correspondem ao fator de amplificação dinâmica e são chamadas, acelerância, mobilidade e receptância, respectivamente relacionados à aceleração, velocidade e deslocamento. São parâmetros de relevância pois afetam diretamente no conforto e na performance do veículo (48).

A modulação da carga neste caso é um sinal degrau (*step*) que representa por exemplo uma imperfeição de pista como um buraco ou um quebra-molas. A mesma força de 3760 *N* foi aplicada, porém com aumento gradual (10 passos) no tempo até os 10 *s* conforme Tab. 12.

Tabela 12 – Carregamento do tipo Degrau.

PASSOS	TEMPO (s)	FORÇA (N)
1	1	1
2	2	417,77
3	3	835,55
4	4	1253,3
5	5	1671,1
6	6	2088,9
7	7	2506,7
8	8	2924,4
9	9	3342,2
10	10	3760

Para uma análise mais precisa, cada passo foi subdividido com intervalo 0,05 *s* entre eles, totalizando 20 *substeps* por segundo. As curvas de respostas totais para acelerância, mobilidade e receptância são apresentadas nas Figs 70 a 72.

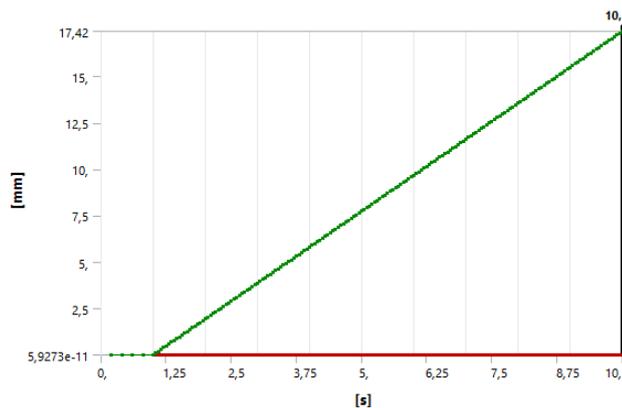


Figura 70 – Fator de amplificação dinâmica em função da deformação (Receptância).

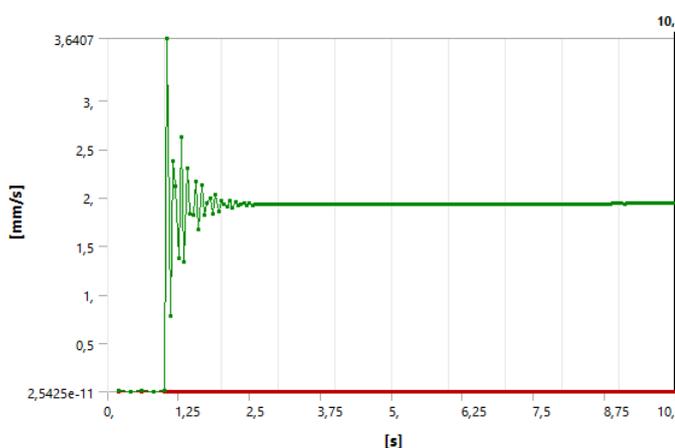


Figura 71 – Fator de amplificação dinâmica em função da velocidade (Mobilidade).

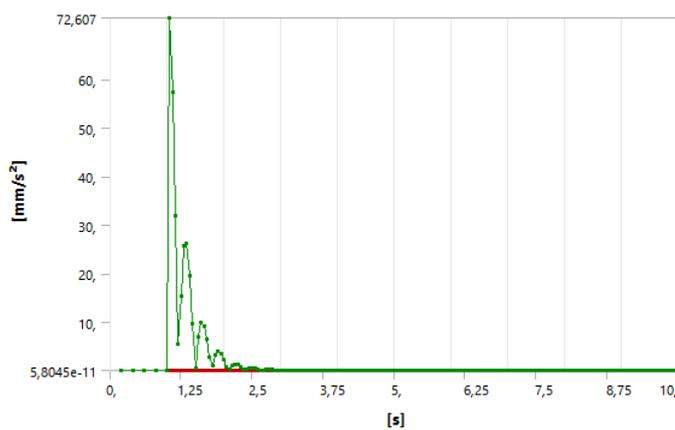


Figura 72 – Fator de amplificação dinâmica em função da aceleração (Acelerância).

É notável que o chassi se comporta como um sistema subamortecido por isso se faz necessário o projeto de uma suspensão ou de um amortecimento para as baixas frequências de ressonância desse chassi.

5.3 Dispositivo de Acoplamento

Para cumprir o objetivo da modularização do conceito é necessário o projeto de um dispositivo capaz de unir o módulo principal aos módulos secundários e estes permaneçam como um único veículo, estável e rígido. Pensando nisso foi pensado no dispositivo mostrado na Fig. 73.

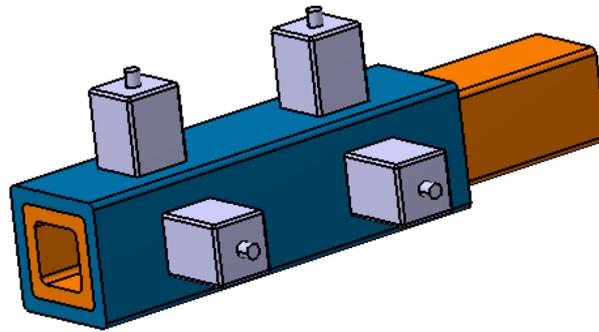


Figura 73 – Dispositivo para acoplamento entre módulos.

Feito com o mesmo aço estrutural ASME BPV com propriedades descritas na Seção 5.1, é composto por um tubo de seção quadrada $40 \times 40 \text{ mm}$ com 5 mm de parede fixado no módulo principal, evidenciado em azul na Fig. 73, outro tubo quadrado interno, em laranja, $30 \times 30 \text{ mm}$ com mesma espessura de parede é localizado no módulo secundário e a união desses dois elementos é feita por quatro solenoides NF com pinos guia de $5 \times 40 \text{ mm}$.

A Figura 74 apresenta uma das possíveis localizações do dispositivo no chassi do veículo e o desenho técnico do mesmo encontra-se no Apêndice B.

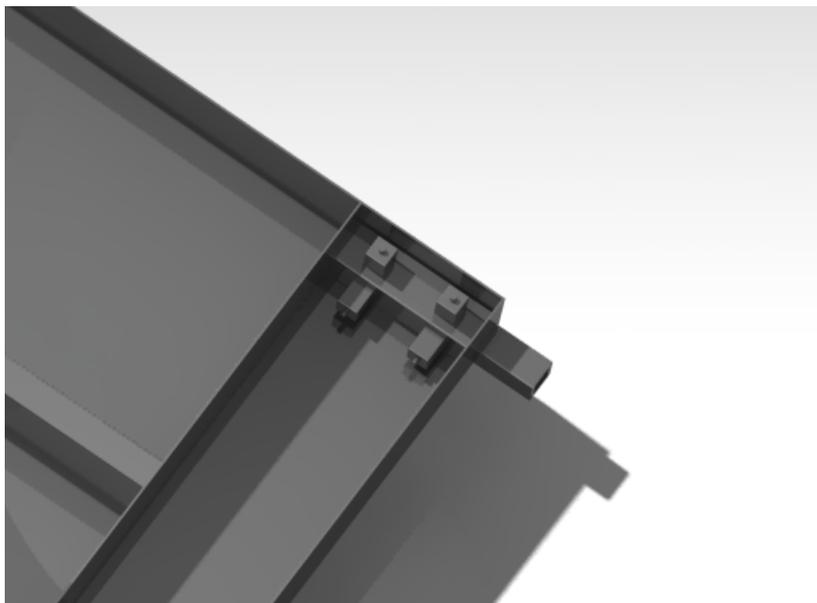


Figura 74 – Componente fixado na extremidade traseira direita do chassi.

O acoplamento foi construído com seção quadrada a fim de minimizar a torção entre os módulos e a condição de contorno para carregamento mais relevante é a Capacidade Máxima de Tração (CMT) e o “Valor D” (49). Logo, foi avaliada a integridade do conjunto ao ser submetido a um carregamento axial estático e dinâmico, simulando a união com o módulo de passageiros carregado com dois ocupantes percentil 95 e dois *packs* de baterias com seis células cada, somando 310 *kg*.

Foi aplicada uma carga de 3100 *N* na extremidade do tubo interno na direção do eixo *x*, e restringiu-se com suporte cilíndrico os quatro pinos guia. As configurações de malha seguiram semelhante à Seção 5.1. O contato entre as superfícies foi de Não Separação na qual as faces permanecem unidas e o resultado para a estática é apresentado na Fig. 75.

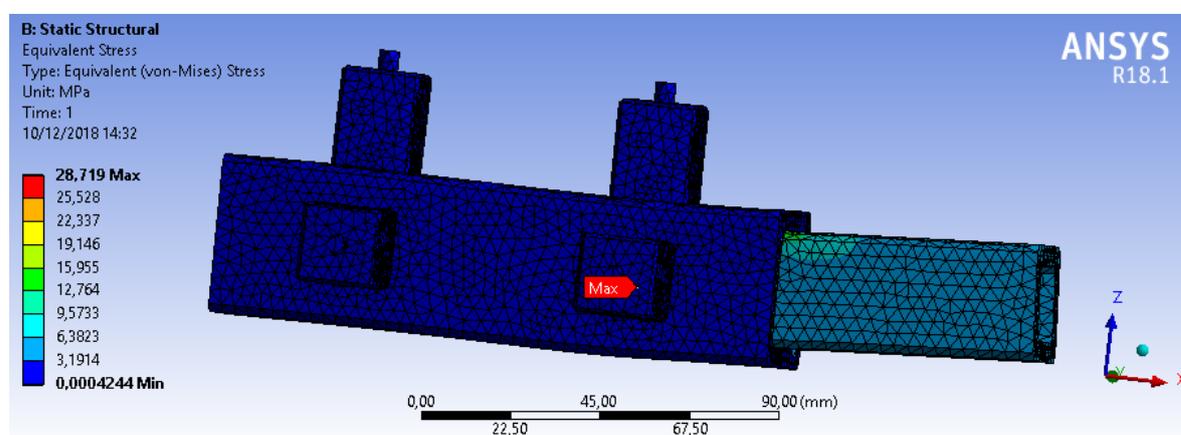


Figura 75 – Tensão equivalente de von Mises para carregamento axial estático.

A tensão máxima equivalente de von Mises foi 28,72 *MPa* localizada no pino guia, valor menor que 1/4 da tensão de escoamento do material (62,5 *MPa*), portanto o projeto é seguro.

5.3.1 Análise de Fadiga

Para a análise de fadiga foi aplicado o critério de Gerber, por ser o menos conservador, o modo de aplicação de carga completamente reversível, variando a magnitude da tensão em seu sinal positivo (tração) e negativo (compressão). Foi aplicado também um fator de escala igual a 2 obtendo-se os resultados para vida em fadiga e coeficiente de segurança.

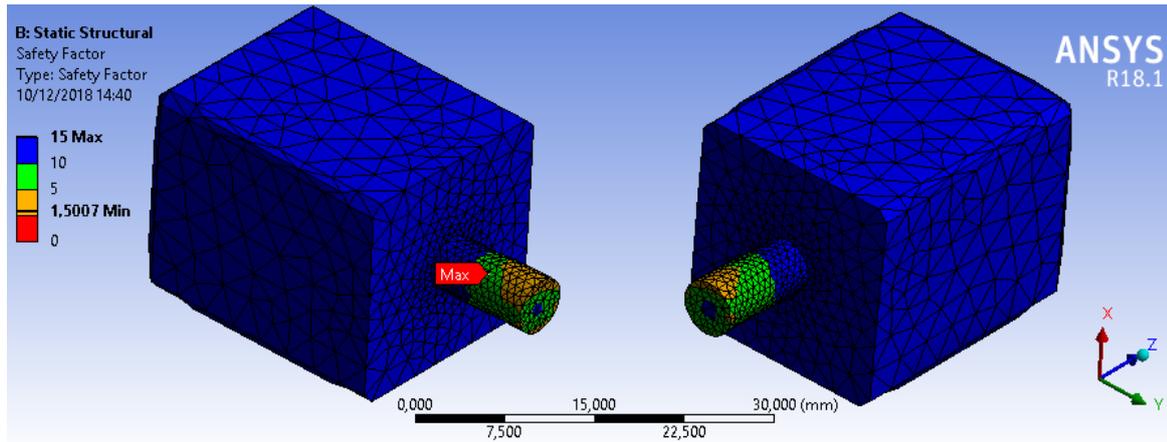


Figura 76 – Vista em detalhe dos pontos com menor fator de segurança.

A Figura 76 apresenta o ponto mais crítico, porém seguro, com fator de segurança igual a 1,50. A vida em fadiga segundo Pontalti(49) e Silva(50) para este tipo de conjunto deveria estar acima de $2 \cdot 10^6$ ciclos, o valor encontrado foi metade disso, $1 \cdot 10^6$ ciclos, porém este acoplamento foi projetado para ser utilizado nas duas extremidades traseiras do veículo, com possibilidade de inserção de mais, tornando satisfatória a análise. O CMT de cada dispositivo é definido então como 310 *Kg*, totalizando 620 *Kg* no módulo trativo principal.

5.4 Propensão ao Capotamento

O capotamento pode ser definido como a rolagem de um veículo que gira mais de 90° em relação ao seu eixo longitudinal, em seguida, devido a tal movimento o impacto com o solo é eminente. Embora esse fenômeno seja de alta complexidade, alguns parâmetros de projeto podem diminuir os riscos da própria rolagem e, caso ela ocorra, diminuir o risco à segurança dos ocupantes (51).

5.4.1 Fator de Estabilidade Estática

A resistência ao capotamento, segundo NHTSA(52), é uma característica crucial no caso da batida de um veículo. Para isso considera-se um fator de estabilidade estática (SSF) como parâmetro de comparação dos veículos na propensão ao capotamento que leva em consideração a razão entre a média de distância das bitolas (T) com o dobro da altura do CG, conforme Eq. 5.2.

$$SSF = \frac{T}{2H} \quad (5.2)$$

O veículo do tipo *tadpole* possui valor positivo de bitola apenas no eixo dianteiro, logo a média de T para os dois eixos é $1625/2 = 812,5 \text{ mm}$. O dobro do valor da altura do CG é $201,2 \cdot 2 = 402,4 \text{ mm}$. Portanto, o valor de SSF para o veículo modular é 2,02, o que classifica o Join como 5 estrelas de acordo com a classificação do NHTSA(52) e garante um risco de apenas 10% de capotamento em caso de colisão.

5.4.2 Risco de Lesão dos Ocupantes

A fim de avaliar o risco de lesão dos ocupantes do Join e a resistência ao esmagamento do teto do carro, realizou-se o teste 216 da *Federal Motor Vehicle Safety Standard* nas configurações 25-5 e 45-10, neste teste é aplicado um carregamento de até 60000 N distribuído em uma placa de $1829 \times 762 \text{ mm}$, conforme Fig. 77 (19).

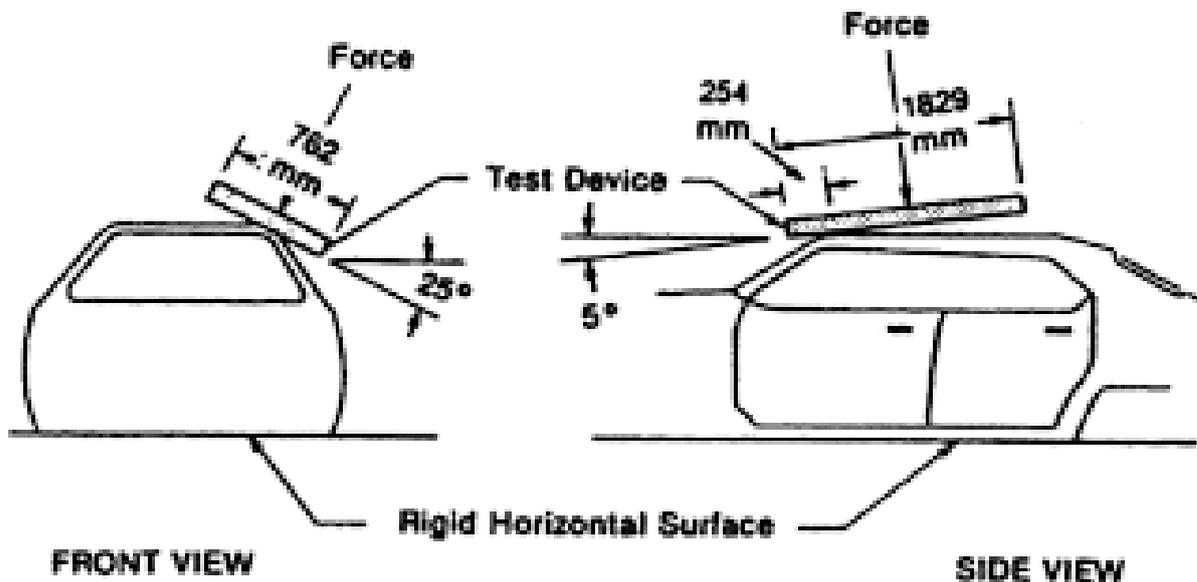


Figura 77 – Configuração 25-5 do teste FMVSS 216 (19).

A diferença entre a configuração 25-5 e 45-10 são os ângulos de esmagamento da prensa, onde 25 e 45 são ângulos de rolagem (*roll*), 5 e 10 são ângulos de arfagem (*pitch*). Utilizou-se a carga máxima para o teste (60000 N) multiplicada pela área da placa, totalizando uma pressão de $43,06 \text{ kPa}$.

Esse valor de pressão foi distribuído por toda a área da coluna A do Join e aplicada com os eixos de referência rotacionados de acordo com a configuração do teste, mostrado na Fig. 78. O assoalho do veículo foi fixado para a simulação, completando as condições de contorno, por fim, o resultado para deformação é mostrado na Fig. 79.

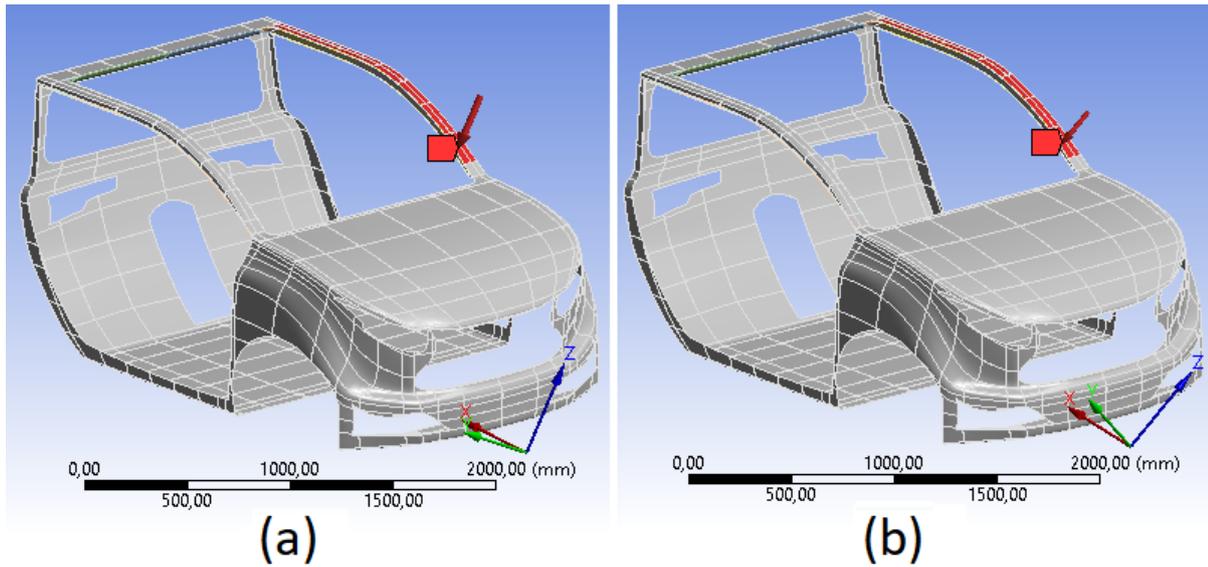


Figura 78 – Condições de contorno para esmagamento da coluna A, destacada em vermelho. Em (a), aparece a configuração 25-5 e em (b), a 45-10.

Os deslocamentos locais apresentados nas etiquetas da Fig. 79 foram comparados com a distância até a abóbada de *clearance* da Seção 4.4, obtendo-se 99 mm (191 - 92) de distância da máxima deformação da coluna até a abóbada da cabeça.

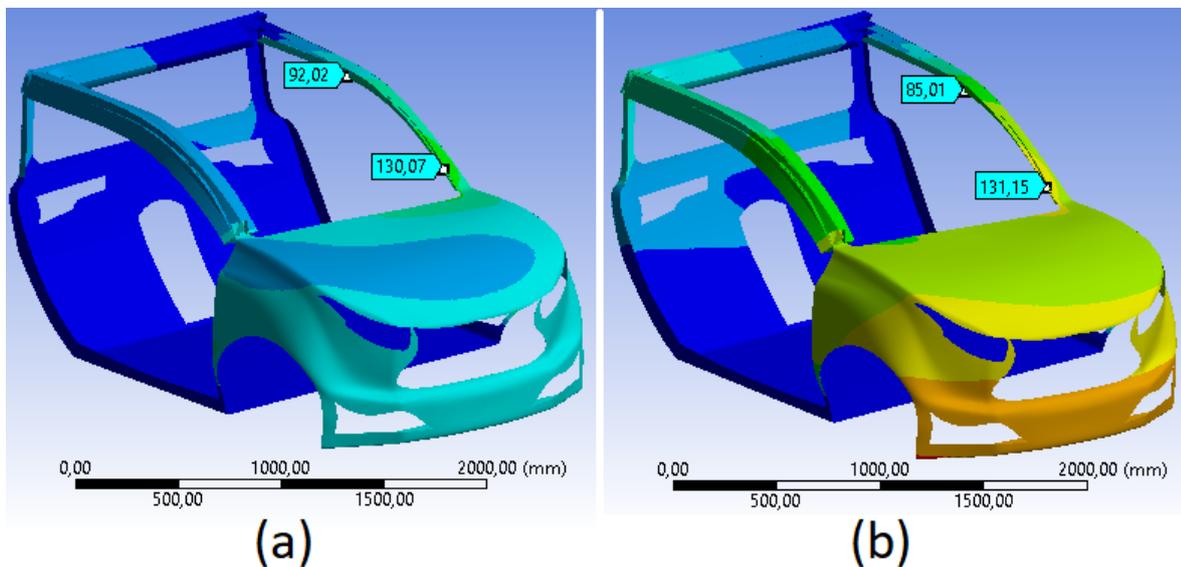


Figura 79 – Deformação em milímetros em dois pontos de risco para os ocupantes na configuração 25-5 (a) e 45-10 (b).

O resultado para o teste FMVSS 216 foi satisfatório mas também pode ser melhorado ao adicionar as portas com os vidros e o pára-brisas.

5.5 Rigidez à Torção

A rigidez a torção é uma característica importante no projeto da estrutura, impactando diretamente na dirigibilidade e conforto, bem como no desempenho do veículo (53). A Eq. 5.3 proposta por Genta e Morello(14) comumente descreve a rigidez torcional (k_t) e leva em consideração o momento de rolagem (M_x); a variação da posição vertical de cada roda (z) nos lados direito (d) e esquerdo (s), nos eixos dianteiro (a) e traseiro (p); por fim as duas bitolas (t_a e t_p).

$$k_t = \frac{M_x}{\arctan\left(\frac{z_{da}+z_{sa}}{t_a}\right) + \arctan\left(\frac{z_{dp}+z_{sp}}{t_p}\right)} \quad (5.3)$$

O momento aplicado (M_x) foi gerado a partir de uma força lateral imposta de 1000 N no sentido do eixo y no centro de gravidade do veículo, gerando com sua altura em z , um momento de 325190,1 (N.mm). Este momento foi aplicado nos dois elementos de fixação da suspensão no chassi e na carroceria foi fixada semelhante à Seção 5.4.2 obtendo os seguintes valores para z_{da} e z_{sa} da carroceria iguais a -0,092 e 0,345 mm e para o chassi, -0,360 e 0,465 mm. O valor de t_a é 1625 mm, já os valores para o eixo traseiro se anulam pois a bitola traseira do Join é nula. A Eq. 5.4 refere-se a rigidez torcional da carroceria (k_{tc})

$$k_{tc} = \frac{325190.1}{\arctan\left(\frac{-0.277+0.558}{1625}\right) + \arctan(0)} = 32.82 \cdot 10^6 \left(\frac{N \cdot mm}{rad}\right) \quad (5.4)$$

A Equação 5.5 apresenta a rigidez torcional do chassi (k_{tt})

$$k_{tt} = \frac{325190.1}{\arctan\left(\frac{-0.5812+0.7521}{1625}\right) + \arctan(0)} = 53.96 \cdot 10^6 \left(\frac{N \cdot mm}{rad}\right) \quad (5.5)$$

Segundo Genta e Morello(14) a rigidez equivalente do conjunto chassi e carroceria (k_t) é obtido somando os valores de k_{tc} e k_{tt} , resultando no valor final de $86,78 \cdot 10^6$ N.mm/rad

Deve-se realizar uma conversão de variável para N.m/deg por motivo de comparação com os demais modelos de veículos do mercado obtendo-se 1515 N.m/deg de rigidez torcional, um valor baixo ao ser comparado com o concorrente Renault Twingo (14,200 N.m/deg) porém esse valor aumentaria ao acoplar um módulo de carga ou de passageiros.

6 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

6.1 Raio de Giro

O raio de giro é o raio que um veículo é capaz de realizar em uma curva de baixa velocidade sem derrapar e pelo Join se tratar de um veículo incomum por possuir três rodas em uma configuração *tadpole*, é importante calcular esse valor. Porém, a condição cinemática de esterçamento, também chamada de geometria de Ackerman, não é afetada pelo eixo traseiro em um veículo de esterçamento dianteiro, portanto, o cálculo para o raio de giro do Join segue igual ao dimensionamento para um veículo usual de quatro rodas, conforme demonstra a Fig. 80 (20).

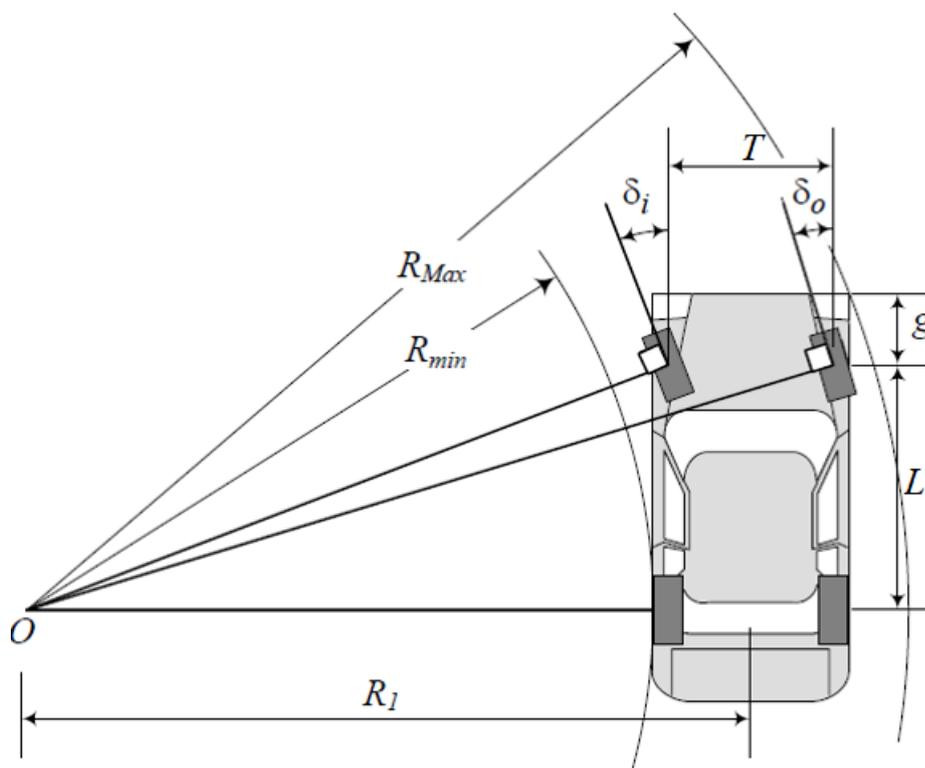


Figura 80 – Obtenção do ângulo máximo de esterçamento da roda interna do veículo em curva para a esquerda (20).

A geometria de Ackerman ideal para o Join possui valor igual a 0,883 de acordo a diferença da cotangente do ângulo de esterçamento externo (δ_o) com a do ângulo interno (δ_i) ou com a razão entre a bitola (T) pelo entre eixos (L), como mostra a Eq 6.1.

$$\cot\delta_o - \cot\delta_i = \frac{T}{L} = \frac{1625}{1840} = 0,883 \quad (6.1)$$

A fim de encontrar o valor do ângulo de esterçamento da roda interna (δ_i), foi utilizada uma aproximação linear para máxima angulação de esterçamento, que usualmente ocorre em carros convencionais, quando as rodas atingem o limite máximo de esterçamento. Esse valor foi chamado de d e possui 230 mm , mostrado na Fig. 81. O valor r corresponde ao raio do pneu do veículo de 300 mm (54).

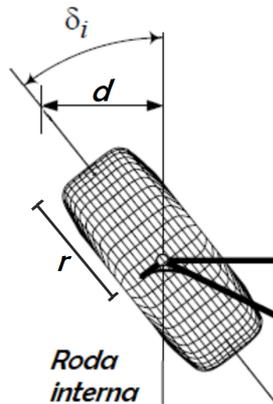


Figura 81 – Obtenção do ângulo máximo de esterçamento da roda interna do veículo em curva para a esquerda.

$$\text{sen}(\delta_i) = \frac{d}{r} \quad (6.2)$$

$$\delta_i = \text{sen}^{-1} \left(\frac{230}{300} \right) = 50^\circ$$

Obtido o valor de δ_i é possível encontrar o mínimo raio de giro do veículo pela Eq. 6.3 em milímetros.

$$R_{MÍN} = \frac{L}{\tan(\delta_i)} \quad (6.3)$$

$$R_{MÍN} = \frac{1840}{\tan(50^\circ)} = 1544\text{mm}$$

A fim de comparar com seus concorrentes, o valor do raio mínimo deve ser somado à metade da bitola dianteira, conforme a Eq.

$$R_1 = R_{MÍN} + \frac{T}{2} \quad (6.4)$$

$$R_1 = 1544 + \frac{1625}{2} = 2356\text{mm}$$

O valor de raio de giro igual a 2,3 metros é bom tomando como comparação seu concorrente Renault Twizy com 3,4 metros.

6.2 Pacote de Baterias

As baterias de íon-lítio (Li-Ion) se mostram como as melhores baterias atualmente, não-tóxicas, com capacidade de carga duas vezes maior que as de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) e três vezes maior que as de níquel cádmio (NiCd) (55). Tendo isso em vista foram escolhidas as baterias de íon-lítio de 180 Ah da Voltronix para alimentar o Join, as características do modelo são mostradas na Fig. 83.

Model # V-LYP180Ah	
Operating Voltage: 2.8-4.0	Cycle Life: (80%DOD): 2000
Nominal Voltage: 3.2	Cycle Life: (70%DOD): 3000
Nominal Capacity: 180Ah @ 48A	Energy Density: 230-380 Wh/L
Max Discharge Current (Continuous): 540A	Specific Power: 600-1000 W/KG
Max Discharge Current (Pulse): 1800A	Weight 5.9 kg; 13.00 lbs
Maximum Charge Current: $\leq 3C$	Dimensions: 279 x 182 x 71 mm
Operating Temp Charging: -18-75 degrees C	Discharge Rate: $\ll 3\%$ monthly



Figura 82 – Características da bateria de 180 Ah.

Para estimar a autonomia do veículo elétrico inicia-se calculando a tensão total do pacote (*pack*) de baterias através da Eq. 6.5. O conjunto contém 24 células, com 3,2 V cada (56).

$$24 \cdot 3,2V = 76,8V \quad (6.5)$$

Em seguida é calculada a potência útil do *pack*, em *kWh*, obtido pelo produto da tensão total pela corrente nominal. A fim de estender a vida útil das baterias, estas não são descarregadas mais que 80%, também considerado na Eq. 6.6.

$$76,8V \cdot 180Ah \cdot 0,8 = 11,06kWh \quad (6.6)$$

De acordo com Warner(57) o consumo de potência de um Smart ForTwo, concorrente do Join, com baterias de íon-lítio é 101,5 Wh/km e a autonomia em km é dada pela razão entre a potência útil e o consumo por quilômetro, mostrado na Eq. 14.

$$\frac{11,06kWh}{101,5Wh/km} = 108,9km \quad (6.7)$$

A autonomia de 109 quilômetros depende de condições de condução do carro e do clima porém é satisfatória para o projeto do veículo elétrico urbano. O acoplamento de módulos pode favorecer essa quilometragem pois é possível associar mais baterias nos módulos de carga e de passageiros.

6.3 Motor Elétrico Veicular

A eletrificação dos automóveis é uma tendência não só pela escassez do petróleo daqui a alguns anos, mas também pelas enormes vantagens que trazem às cidades e à mobilidade urbana. Os motores elétricos poluem bem menos, tanto em quantidade de CO_2 como em decibéis, não necessitam de sistema de lubrificação, são mais baratos de produzir que o motor à combustão e também não necessitam de caixa de marcha (58).

Pelas diversas vantagens da utilização de motores elétricos são utilizados no Join dois motores Active Wheel da Michelin dentro de cada roda dianteira, com 30 kW de potência totalizando 80 cv diretamente nas rodas, ou seja, sem perda de potência por dissipação da energia mecânica (43).

A relação peso/potência de um veículo é um bom meio de comparação da performance do motor de um automóvel, foi calculada pela razão entre o peso total em kg do veículo em plena carga e a potência do motor em cv . Esse valor para o veículo modular em kg/cv é dado pela Eq. 6.8.

$$\frac{790kg}{80cv} = 9,87 \quad (6.8)$$

Esse valor de 9,87 kg/cv é adequado ao ser comparado com o concorrente direto do Join, o Smart ForTwo 1.0 Turbo que apresenta 9,17 kg/cv . Assim como existe a possibilidade de aumentar a autonomia do automóvel pela modularização, a potência também pode ser aumentada para até 160 cv com mais dois motores contidos em cada roda dos módulos.

Parte IV

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi proposto o projeto conceitual de um veículo modular elétrico de dois lugares, capaz de acoplar módulos de acordo com necessidade do cliente. Foram discutidas todas as opções de estruturas, sendo escolhido o chassi escada, pois mesmo se tratando de um veículo de pequeno porte, a carroceria é unida a uma estrutura mais rígida que deve suportar grandes cargas de flexão e torção devido ao acoplamento dos módulos e ao peso das baterias.

No decorrer deste projeto passou-se pelas fases de pesquisa e análise de mercado, modelagem 3D e renderizações com auxílio de *softwares* específicos. Através das análises ergonômicas foi possível adequar o produto confortavelmente, visível na análise RULA, para mais de 95% de possíveis clientes, além de lidar com condições reais de projeto no cumprimento das normas regulamentadoras.

Nas análises computacionais, buscou-se simular a maior quantidade de situações que esse chassi enfrentaria durante sua vida útil, estática e dinamicamente; foi desenvolvido um dispositivo que atende à proposta inovadora da modularização, mostrando-se seguro e confiável com vida útil de dois milhões de ciclos. A carroceria também atendeu os requisitos de segurança apresentando menos de 10% de chance de capotamento e a viabilidade técnica constatou que o veículo modular elétrico têm plena capacidade de competir no mercado automotivo e ser líder no seu segmento.

Ao finalizar a segunda etapa deste trabalho de conclusão de curso, alguns pontos que agregam conhecimento para a construção e evolução do veículo modular são evidenciados pelos itens a seguir:

- **Projeto de Suspensão:** Com o projeto de uma suspensão específica para o Join, espera-se sanar as frequências de ressonância abaixo de 60 *Hz* encontradas ao excitar o chassi. Porém a utilização do motor elétrico *in-hub* da Michelin fica indisponível, demandando então o projeto de outra motorização.
- **Controlador para Suspensão Ativa:** Como [Happian-Smith et al.\(31\)](#) descreve em seu capítulo referente à suspensão ativa, ao utilizar um atuador hidráulico no lugar do amortecedor e da mola é possível controlar as frequências até 60 *Hz*, podendo neste caso utilizar a Active Wheel com o projeto de um controlador para a suspensão específico para o chassi do Join.

- **Ensaio de Impacto Frontal:** Tendo em vista a importância do teste 216 da FMVSS para esmagamento do teto realizado na Seção 5.4.2, é relevante realizar o ensaio de impacto frontal da NCAP, podendo ser tanto de barreira rígida como deformável. Outros testes também validam o projeto da estrutura, como o impacto lateral em barreira móvel e em poste fixo da NCAP e o teste 301 da FMVSS para impacto traseiro com barreira deformável.
- **Prototipagem Rápida:** A construção de um protótipo em escala reduzida feito em impressora 3D para, além de apresentação e divulgação do conceito, demonstrar como seria o esquema, tanto de montagem do chassi dentro da carroceria, como do acoplamento dos módulos.

Referências

- 1 SANTOS, F. A. N. V. d. *MD3E (Método de Desdobramento em 3 Etapas): uma proposta de método aberto de projeto para uso no ensino de Design Industrial. 2005. 168 f.* Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)–Programa de Pósgraduação em Engenharia de Produção–PPGEP, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 15, 34, 35 e 57.
- 2 TESLA. *Tesla Model S P100D*. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.tesla.com/content/dam/tesla-site/sx-redesign/img/models/performance/powertrain/trainDMP.png>>. Acesso em: 22 mai. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 40.
- 3 BMW. *BMW i8 Híbrida*. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=DQcL-j2zUcY>>. Acesso em: 22 mai. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 41.
- 4 PAGANELLI, L. Integração entre o sistema de carro compartilhado e políticas públicas de planejamento urbano. 2013. IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. Disponível em: <http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/10/07/8F0C3760-9914-45B8-B0AE-D758E535AE15.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 15, 31 e 42.
- 5 GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. [S.l.]: SAE International, 1992. ISBN 978-1-56091-199-9. Citado 3 vezes nas páginas 15, 43 e 94.
- 6 CHEVROLET. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.freewaychevrolet.com/img/awards/1500-trans.jpg>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 43.
- 7 CHASSI Monobloco. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://carrosinfoco.com.br/wp-content/uploads/2018/04/cc38.png>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 44.
- 8 DMC. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://planetcarsz.com/assets/uploads/DELOREAN%20DMC%2012%20PROTOTYPE%201976%2014.jpg>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 45.
- 9 MERCEDES. *spaceframe*. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://2.bp.blogspot.com/-xgwSXirnyP4/UyDRQ56AHoI/AAAAAAAAAKb0/1K75L0b44r0/s1600/Mercedes+W194+spaceframe.jpg>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 45.
- 10 UNBAJA, E. *Protótipo Tupã-Yato*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 46.
- 11 HALDERMAN, J. D. *Diagnosis and troubleshooting of automotive electrical, electronic, and computer systems*. [S.l.]: Pearson Higher Ed, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 47.
- 12 ERGONOMICS. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM30008A-EcoErgo/Ergonomics/images/data-stature.png>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 50.

- 13 MACEY, S.; WARDLE, G.; GILLES, R. *H-point: The Fundamentals of Car Design & Packaging*. Art Center College of Design, 2009. ISBN 9781933492377. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=qx1cPgAACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 15, 51, 58 e 75.
- 14 GENTA, G.; MORELLO, L. *The Automotive Chassis: Volume 1: Components Design*. Springer Netherlands, 2008. (Mechanical Engineering Series). ISBN 9781402086762. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ZBrg8iwcRfsC>>. Citado 6 vezes nas páginas 15, 52, 53, 54, 55 e 103.
- 15 ONE Car - Modular Vehicle Project. 2016. Disponível em: <<https://launchforth.io/OneCar/onecar-modular-vehicle-project/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 59.
- 16 CHAN, V. [Designstudie] *Citi.Transmitter von Vincent Chan » Zukunft Mobilität*. 2015. Disponível em: <<https://www.zukunft-mobilitaet.net/138139/zukunft-des-automobils/elektromobilitaet/designstudie-citi-transmitter-vincent-chan/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 60.
- 17 VOLTRONIX. *Battery Management Systems | Lithium batteries | Power Inverters | Mining Equipment | BMS equipment | Electric EV products*. 2018. Disponível em: <<http://voltronixusa.com/products/>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 73.
- 18 SAE. *Motor Vehicle Driver and Passenger Head Position*. [S.l.], 1997. Disponível em: <https://www.sae.org/standards/content/j1052_199704/>. Citado 4 vezes nas páginas 16, 19, 34 e 82.
- 19 CENTER, F. . N. N. C. A. *Occupant Motion and Injury Risk Analysis In Rollover Accident*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 101.
- 20 JAZAR, R. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Springer, 2008. (Engineering (Springer-11647; ZDB-2-ENG)). ISBN 9780387742434. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Pvsv78xj7UIC>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 105.
- 21 EPA, U. S. *Title 40 of the Code of Federal Regulations*. 2017. Disponível em: <<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2017-title40-vol32/xml/CFR-2017-title40-vol32-sec600-315-08.xml>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 59.
- 22 CASTRO, B. H. R. d.; BARROS, D. C.; VAZ, L. F. H. Panorama da engenharia automotiva no brasil: inovação e o apoio do bndes. *Produção BNDES - Artigos*, 2014. BNDES Setorial. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1643>>. Acesso em: 20 mar. 2018. Citado na página 31.
- 23 BAXTER, M. *Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos*. 2. ed. [S.l.]: Edgard Blücher, 2000. São Paulo. Citado 3 vezes nas páginas 33, 39 e 40.
- 24 LONGO, R. *2040: humanos só dirigirão carros em pistas de recreação e games*. 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/2MpDU7I>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 57.
- 25 DEBASTIANI, C. A. *Definindo escopo em projetos de software*. [S.l.]: Novatec Editora, 2016. Citado na página 33.
- 26 SAE. *Motor Vehicle Drivers' Eye Locations*. [S.l.], 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/J941_200209>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 84.

- 27 SAE. *Describing and Measuring the Driver's Field of View*. [S.l.], 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/J1050_200902>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 85.
- 28 SAE. *Motor Vehicle Dimensions*. [S.l.], 2001. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 69.
- 29 FREYRE, G. *Homens, engenharias e rumos sociais*. [S.l.]: É Realizações, 2010. ISBN 9788588062900. Citado na página 39.
- 30 LARICA, N. *Design de Transportes: Arte em Função da Mobilidade*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003. PUC. Citado na página 39.
- 31 HAPPIAN-SMITH, J. et al. *An Introduction to Modern Vehicle Design*. Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 9780750650441. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=36kg2DJiy7cC>>. Citado 3 vezes nas páginas 40, 49 e 111.
- 32 ENERGY., U. S. D. of. All-electric vehicles (evs). 2014. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>>. Acesso em: 21 mai. 2018. Citado na página 40.
- 33 VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. d. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. *BNDES Setorial, Rio de Janeiro*, n. 41, 2015. Citado na página 41.
- 34 ROSA, F. *Carro elétrico conquista ruas de Paris*. 2018. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/mundo/carro-eletrico-conquista-ruas-de-paris-9191b27q4yxu5vv3rp6y4a0en>>. Citado na página 42.
- 35 OLIVEIRA, F. C. G. d. et al. Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica. Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 43, 44, 45 e 52.
- 36 CHANDRA M. R., S. S. H. S. T. Modeling and structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections. *Mechanical and Production Trans Stellar*, 2012. Citado na página 44.
- 37 MICHAEL, C.; DAVID, P.; ALLINGTON, J. Racing and sports car chassis design. *BT Batsford Ltd*, 1966. Citado na página 45.
- 38 COSTA, P. G. Bíblia do carro. *Oficina e Cia*, 2002. Citado na página 46.
- 39 SOBEY, E. *A field guide to automotive technology*. [S.l.]: Chicago Review Press, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- 40 ROCHA, L. H. *Carro Elétrico—Desafios para sua Inserção no Mercado Brasileiro de Automóveis*. Tese (Doutorado) — Dissertação para obtenção do título de Especialista em Gestão e Tecnologias Ambientais. Escola Politécnica da USP, 2013. Citado na página 48.
- 41 MORAES, L. C. B. d. et al. Tração elétrica como alternativa energética: uma proposta para a conversão de veículos automotivos de uso urbano. [sn], 2007. Citado na página 48.

- 42 DENTON, T. *Automobile Electrical and Electronic Systems*. 3. ed. [S.l.]: Routledge, 2007. Citado na página 48.
- 43 LEPISTO, C. *Michelin Unveils Active Wheel in Affordable Electric Car*. 2018. Disponível em: <<https://www.treehugger.com/cars/michelin-unveils-active-wheel-in-affordable-electric-car.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 108.
- 44 BREMBECK, J. et al. *Romo-the robotic electric vehicle*. 2011. Citado na página 48.
- 45 DALVI, P. H. *Projeto conceitual de um veículo para todo terreno*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 88.
- 46 ROEBUCK, J. *Anthropometric Methods: Designing to Fit the Human Body, Human Factors and Ergonomics Society*. [S.l.: s.n.], 1995. Citado na página 49.
- 47 SORIANO, H. L. *Introdução à Dinâmica das Estruturas*. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014. Citado na página 94.
- 48 MOURA, H. G. D. *Métodos de Identificação de Forças em Sistemas Vibroacústicos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 95 e 96.
- 49 PONTALTI, A. *Análise de Fadiga e Estimativa de Vida do Garfo de Engate Automático para Veículos Tratores e Roboques*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 99 e 100.
- 50 SILVA, M. R. da. *AVALIAÇÃO DE DISPOSITIVO DE ACOPLAMENTO POR MÉTODOS DE ENSAIO DE FADIGA, TRAÇÃO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 100.
- 51 VALDES, E. G. *Um Estudo da Dinâmica do Capotamento Veicular*. [S.l.: s.n.], 2016. (CON-2016-1121). Citado na página 100.
- 52 NHTSA. *Federal Motor Vehicle Safety Standards: Rollover Resistance*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 100 e 101.
- 53 DUTTA, P. *DESIGN AND ANALYSIS OF THREE WHEELED VEHICLE CHASSIS*. [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://edu.authorcafe.com/academies/7825/design-and-analysis-of-three-wheeled-vehicle-chassis>>. Citado na página 103.
- 54 RIBEIRO, W. A. *Projeto GNU do Cerrado Kart-Cross: Descrição, Ergonomia e Análise Estrutural*. [S.l.: s.n.], 2014. 89 - 92 p. Citado na página 106.
- 55 CIRIACO, D. *Baterias: tudo o que você precisa saber sobre elas*. 2018. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/notebook/2827-baterias-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-elas.htm>>. Citado na página 107.
- 56 2018. Disponível em: <<http://www.ev-propulsion.com/EV-calculations.html>>. Citado na página 107.

57 WARNER, M. *The Electric Vehicle Conversion Handbook HP1568*. Penguin Publishing Group, 2011. ISBN 9781101515792. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=3LL-0e5NdqUC>>. Citado na página 107.

58 LUCENA, G. *Os prós e contras dos carros elétricos*. 2018. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/os-pros-e-contras-do-carro-eletrico/>>. Citado na página 108.

Anexos

ANEXO A – Apêndice A

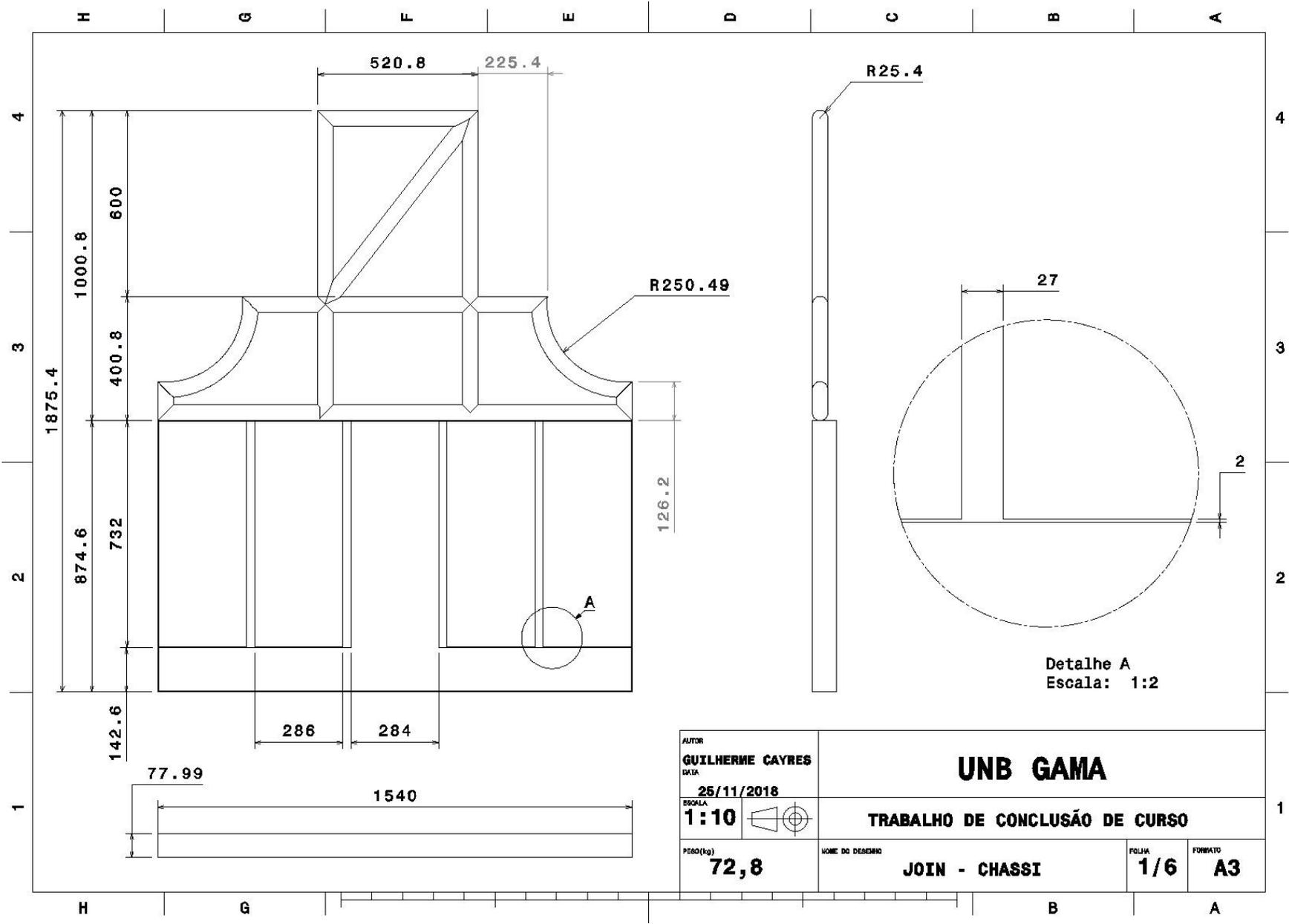


Figura 83 – Desenho técnico do chassi.

ANEXO B – Apêndice B

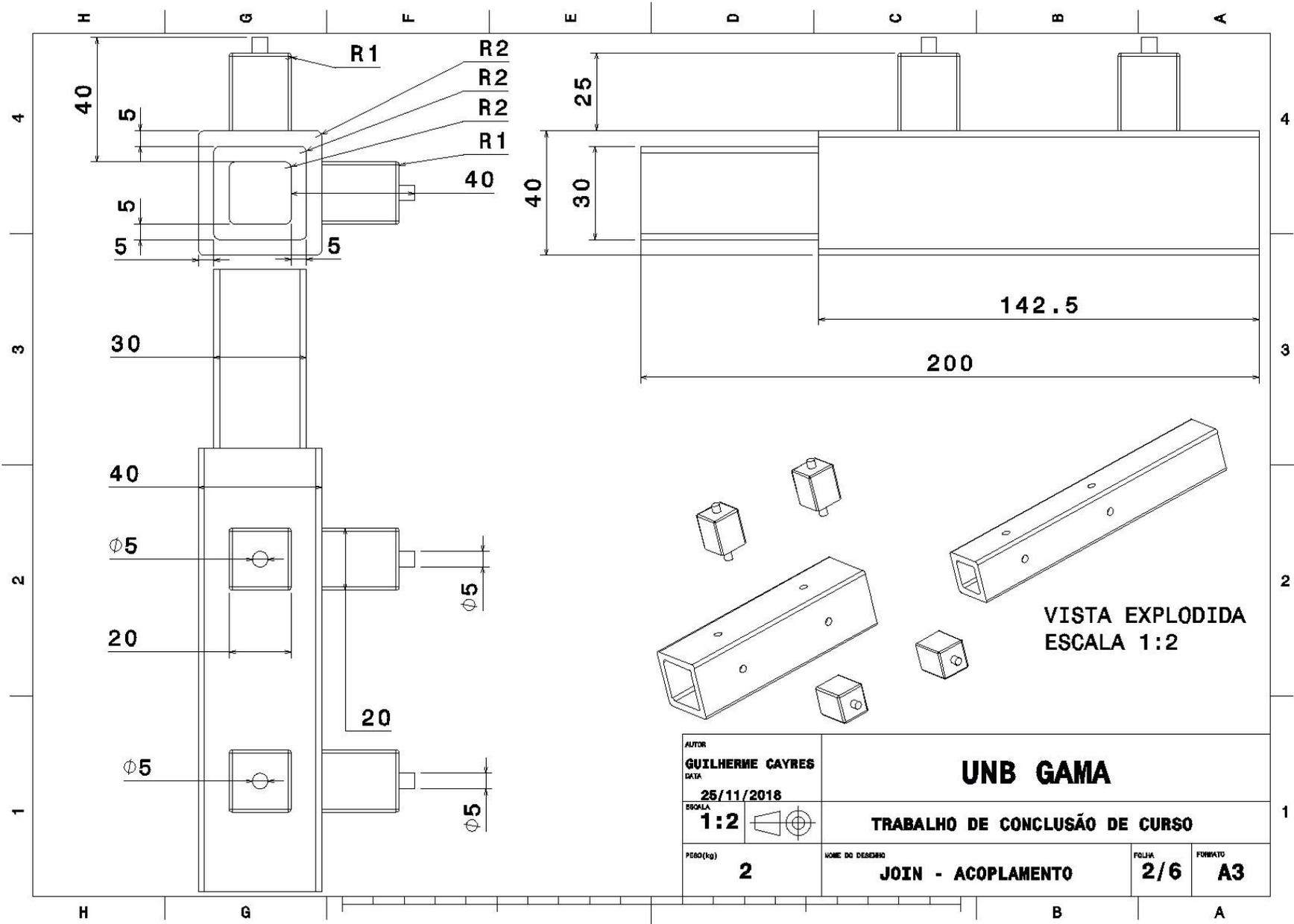


Figura 84 – Desenho técnico do acoplamento.

ANEXO C – Apêndice C

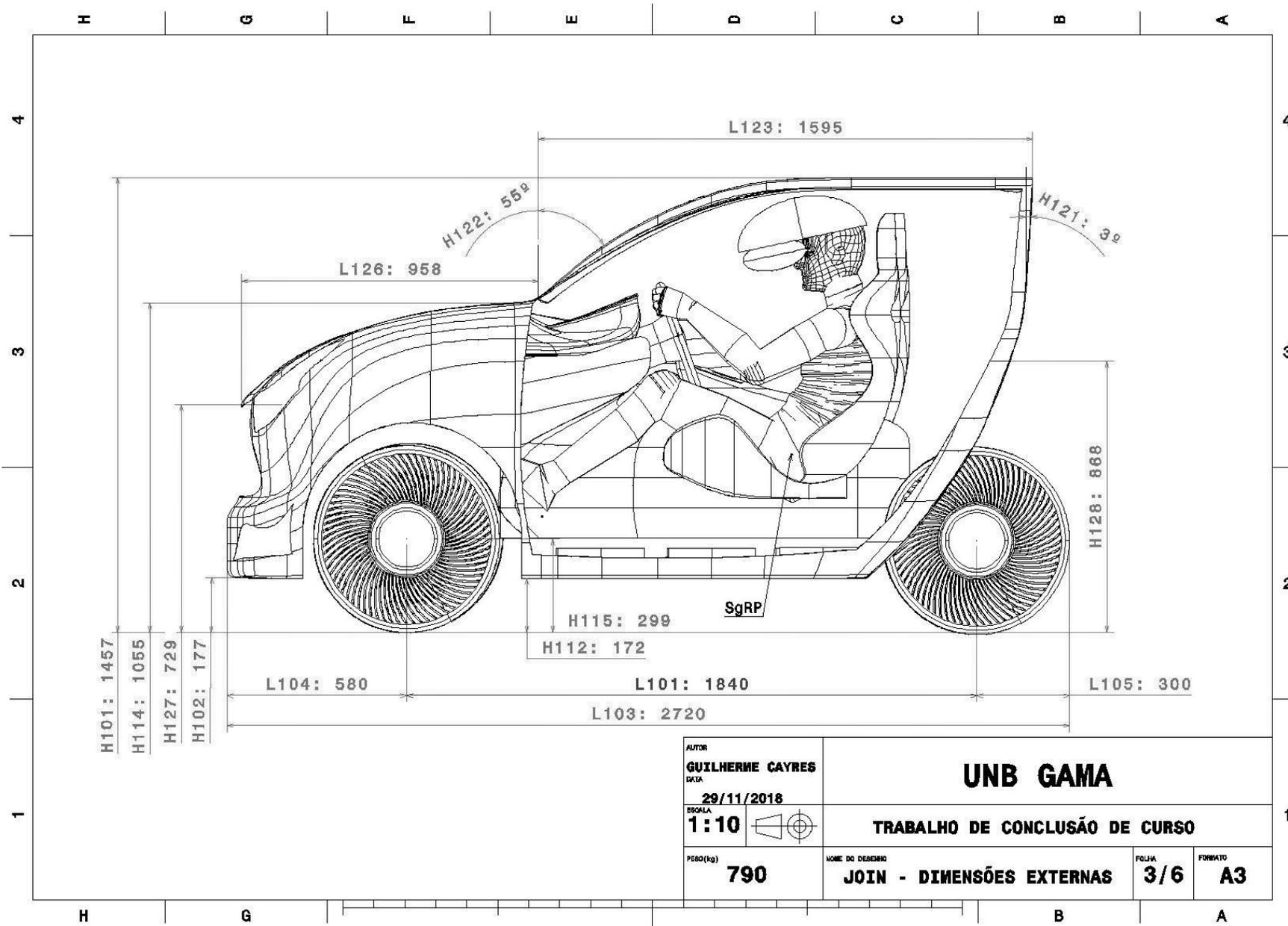


Figura 85 – Vista lateral com dimensões externas.

ANEXO D – Apêndice D

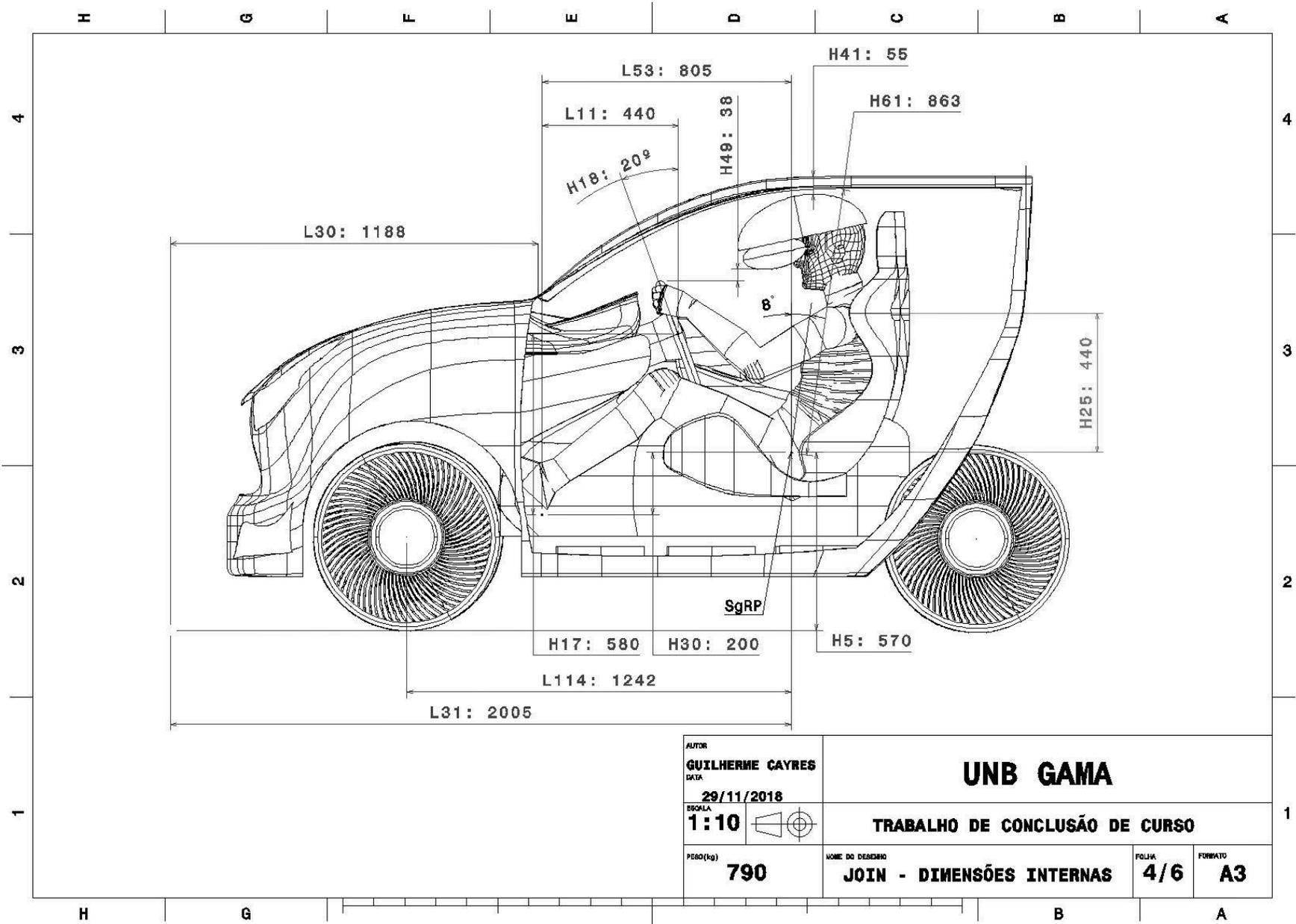


Figura 86 – Vista lateral com dimensões internas.

ANEXO E – Apêndice E

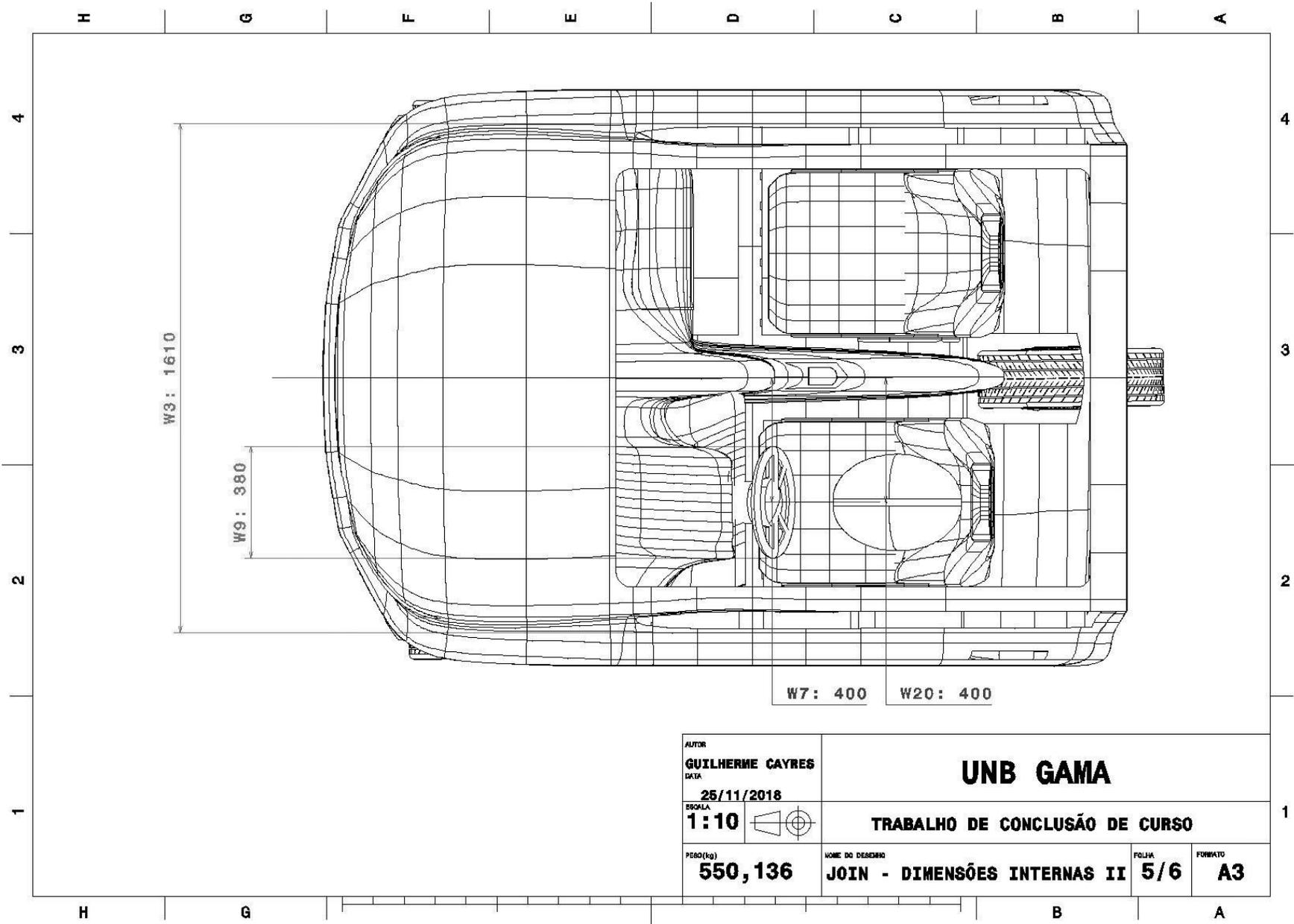


Figura 87 – Vista superior com dimensões internas.

ANEXO F – Apêndice F

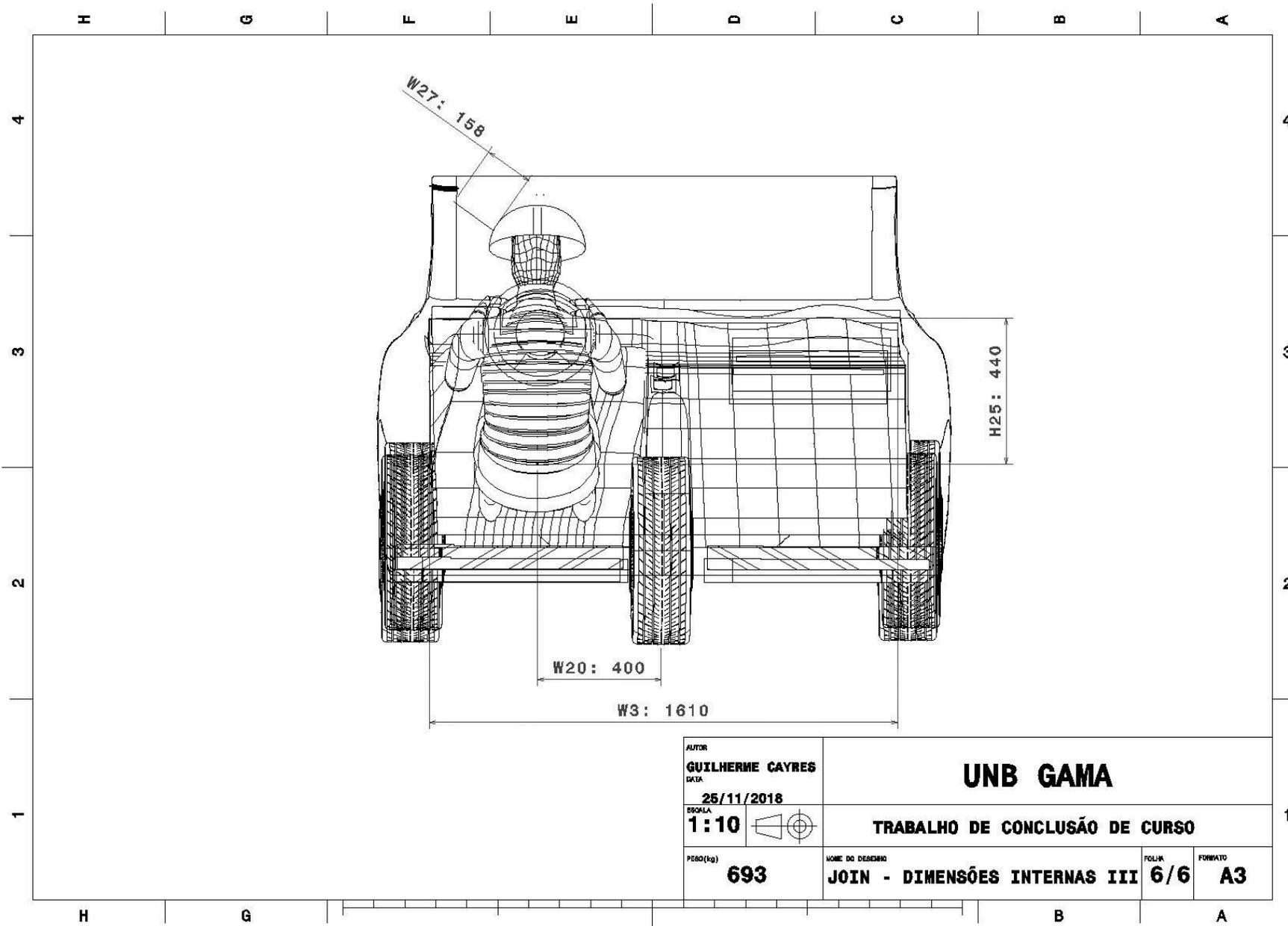


Figura 88 – Vista traseira com dimensões internas.