

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

KADU DE SOUZA ORIQUI

PROJETO PRELIMINAR E ANÁLISE ESTRUTURAL DE ASSOALHO PARA UM
CHASSIS DE VEÍCULO URBAN CONCEPT

Joinville

2023

KADU DE SOUZA ORIQUI

PROJETO PRELIMINAR E ANÁLISE ESTRUTURAL DE ASSOALHO PARA UM
CHASSIS DE VEÍCULO URBAN CONCEPT

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer

Joinville

2023

KADU DE SOUZA ORIQUI

PROJETO PRELIMINAR E ANÁLISE ESTRUTURAL DE ASSOALHO PARA UM
CHASSIS DE VEÍCULO URBAN CONCEPT

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 08 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Orientador
Presidente

Profa. Dra. Janaina Renata Garcia
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meus pais e a meu irmão, por todo o apoio, carinho e amor.

À toda a minha família.

À família Correa, que tem sido um pilar em minha vida. À Nicole, que tem sido a minha vida.

Agradeço à equipe Eficem, que me abriu as portas para a realização de projetos mecânicos.

A meus companheiros de equipe, e grandes amigos, Jefferson e Natan, por todo o apoio prestado ao longo do desenvolvimento desse trabalho, e pelos bons momentos que dividimos
fora dele.

À Tupy, que me acolheu e tornou possível a continuação e conclusão dos meus estudos.

RESUMO

Os aços avançados de alta resistência estão entre os materiais predominantes na indústria automotiva, especialmente em aplicações estruturais, pois favorecem o aumento da resistência e a redução de peso dos veículos e são, frequentemente, utilizados em veículos de passeio. Competições estudantis, como a *Shell Eco-marathon (SEM)*, promovem a criação e o desenvolvimento de veículos com características especiais, que utilizam soluções observadas na indústria, assim como novas propostas que podem, eventualmente, revolucionar alguma aplicação. A equipe Eficem UFSC, composta por alunos da Universidade Federal de Santa Catarina – Centro Tecnológico de Joinville (UFSC-CTJ), é uma das tradicionais participantes da SEM. Este trabalho apresenta um projeto preliminar para o assoalho de um veículo *Urban Concept*, uma classe da SEM com características similares à de veículos de passeio, para sua utilização pela equipe Eficem como solução para o chassi unibody idealizado. Foram realizadas simulações estruturais em ambiente CAD (Projeto Auxiliado por Computador), considerando a fabricação em aços AHSS (Aços Avançados de Alta Resistência) e HSLA (Aços de Alta resistência e Baixa Liga), visando redução de peso e aprimoramento estrutural que garantam maior eficiência energética. A estrutura analisada apresentou boa rigidez torcional para os aços AHSS, e foram identificadas regiões com alta tendência à falha, para otimização na etapa de projeto detalhado do chassi.

Palavras-chave: AHSS; *Urban Concept*; Assoalho automotivo; Simulação estrutural.

ABSTRACT

Advanced High Strength Steels are some of the prevalent materials in the automotive industry, especially in structural applications. Since those steels advantage higher resistance and lower weight vehicles, they're frequently used in passenger cars. Student competitions such as *SEM (Shell Eco-marathon)*, promote the creation and development of vehicles with special characteristics, which utilize solutions observed in the industry as well as new developments that might be revolutionary for some application. The team Eficem UFSC is composed by students from the *Federal University of Santa Catarina – Joinville Technologic Center (UFSC-CTJ)* and is one of the traditional participants of *SEM*. This work presents an underbody preliminary project for an *UC (Urban Concept)* vehicle, a *SEM* class with similar characteristics of passenger vehicles, with pretended usage by team Eficem as a solution for their conceptual unibody chassis. Structural simulations were developed on *CAD (Computer Aided Design)* environment and *AHSS (Advanced High Strength Steels)* and *HSLA (High Strength Low-Alloy)* steels are applied, aiming weight reduction and structural robustness to improve energy efficiency. The structure analyzed shows adequate torsional stiffness for *AHSS*, as it highlights zones with tendency to fail that shall be optimized in the chassis' detailed project.

Keywords: *AHSS; Urban Concept; Automotive underbody; Structural simulation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Protótipo Eletrônico da equipe EFICEM	18
Figura 2 – Protótipos (a) ARMAC Milhagem UFMG & (b) Drop Team IFRS.....	19
Figura 3 – Veículos UC apresentados em etapas da Europa e Ásia da SEM.....	20
Figura 4 – Modelo da geometria da carenagem do veículo UC idealizado.....	20
Figura 5 – Exemplo de um diagrama de Mudge	22
Figura 6 – Exemplo de uma matriz de Pugh	22
Figura 7 – Chassis Unibody	23
Figura 8 – Monocoque em fibra de carbono (Ferrari F70).....	24
Figura 9 – Chassis Tubular.....	25
Figura 10 – Chassis Skateboard para EV	25
Figura 11 – Layup do chassis do DNVFuelfighter2.....	26
Figura 12 – Assoalho do VW ID3 (plataforma MEB)	27
Figura 13 – Componentes de um chassis <i>Body-in-White</i>	27
Figura 14 – Deformações globais em um chassis.....	30
Figura 15 – Tipos de seção transversal do perfil de vigas.....	32
Figura 16 – Tipos de apoio em vigas e respectivos graus de liberdade.....	32
Figura 17 – Partes da viga de seção aberta.....	33
Figura 18 – Centro de cisalhamento em vigas de seção aberta	33
Figura 19 – Distribuição de aço no Brasil	34
Figura 20 – Diagrama de resistência à tração e alongamento para diferentes aços.....	36
Figura 21 – Chassis Unibody do Volvo XC90.....	37
Figura 22 – Diagrama de Mudge para o chassis.....	44
Figura 23 – Matriz de Pugh para o tipo de chassis.....	45
Figura 24 – Conceito inicial do chassis para o UC da equipe Eficem.....	46
Figura 25 – Assoalho isolado do chassis	46
Figura 26 – Matriz de Pugh para o material do chassis.....	47
Figura 27 – Matriz de Pugh para o perfil de viga.....	47
Figura 28 – Conceito inicial de sistemas veiculares para o UC da equipe Eficem	48
Figura 29 – Sistema de coordenadas SAE.....	49
Figura 30 – Sistema de coordenadas do projeto	49
Figura 31 – Dimensões dos perfis de viga aplicados na estrutura [mm].....	50

Figura 32 – Dimensões da carenagem em milímetros.....	51
Figura 33 – Dimensões iniciais do assoalho.....	51
Figura 34 – Modelo de rigidez das massas do veículo	53
Figura 35 – Propriedades da seção da área transversal (meia área)	55
Figura 36 – Propriedades da seção da área transversal (área completa)	56
Figura 37 – Condições de simulação no cenário A	59
Figura 38 - Condições de simulação no cenário B	60
Figura 39 – Condições de simulação no cenário C	60
Figura 40 – Malhas de elementos finitos.....	61
Figura 41 – Tensão resultante sobre a estrutura (Docol® 1700M, cenário A)	63
Figura 42 – Tensão resultante sobre a estrutura (Docol® 1700M, cenário B).....	64
Figura 43 – Tensão resultante sobre a estrutura (Docol® 1700M, cenário C).....	65
Figura 44 – Regiões críticas da geometria otimizada.....	67
Figura 45 – Deslocamento total, cenário C;β;Usibor® 2000 (vista lateral).....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Glossário dos componentes de um chassis <i>Body-in-White</i>	27
Quadro 2 – Destaques do regulamento da Shell Eco-marathon 2023	38
Quadro 3 – Cenários de simulação	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões do perfil de viga	50
Tabela 2 – Propriedades do material selecionado para a chapa plana.....	57
Tabela 3 – Seleção de materiais e suas propriedades	58
Tabela 4 – Resultados do cenário B para todas as configurações	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Alternative Current

AHSS – Advanced High Strength Steel

CG – Centro de Gravidade

CP – Complex-Phase

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

DC – Direct Current

DP – Dual Phase

EN-US – Inglês (Estados Unidos)

EV – Electric Vehicle (Veículo Elétrico)

EVE – Electric Vehicle Eficem

FB – Ferritic-Bainitic

GBT – Generalized Beam Theory

HF – Hot Formed

HSLA – High Strength, Low-alloy Steel

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MS/MART – Martensitic

PHS – Press Hardened Steel

PT-BR – Português (Brasil)

SAE – Society of Automotive Engineers

SEM – Shell Eco Marathon

SGM – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

TRIP – Transformation-Induced Plasticity

TWIP – Twinning-Induced Plasticity

UC – Urban Concept

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UHSS – Ultra High Strength Steel

LISTA DE SÍMBOLOS

φ – Ângulo de torção

A' – Área da seção transversal do elemento definido pela seção onde t é medido

I_e – Comprimento equivalente

ε – Deformação

X – Distância de frenagem

B – Distância normal ao plano neutro

\bar{y}' – Distância normal do eixo neutro ao centroide da área A'

t – Espessura das paredes da seção transversal

V – Força cortante

F – Força normal

W_t – Força peso total

F_{xt} – Força total de frenagem

λ – Índice de esbeltez

b – Largura da seção transversal da área no ponto de análise

M – Massa do veículo

E – Módulo de elasticidade

Q – Momento de inércia de primeira ordem da área

I – Momento de inércia de segunda ordem da área

I_e – Raio de giração

r – Raio interno da seção transversal

K_t – Rigidez torcional

τ – Tensão cisalhante

σ – Tensão normal

T – Torque

V_f – Velocidade final

V_o – Velocidade inicial

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	OBJETIVOS.....	16
1.1.1.	Objetivo geral	16
1.1.2.	Objetivos específicos	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1.	A EQUIPE EFICEM	18
2.2.	O VEÍCULO URBAN CONCEPT	19
2.2.1.	Projeto UC Eficem	20
2.2.2.	Tipos de chassis automotivos.....	23
2.2.3.	Componentes do chassis	26
2.2.4.	Rigidez torcional e resistência	29
2.2.5.	Vigas de paredes finas.....	30
2.2.6.	Aços na indústria automotiva.....	34
2.2.7.	Fabricação em aço avançado.....	36
2.2.8.	Regulamento Urban Concept na SEM.....	38
3.	METODOLOGIA DE PROJETO.....	42
3.1.	PLANEJAMENTO	42
3.2.	PREMISSAS DE PROJETO.....	43
3.2.1.	Definição de requisitos	43
3.2.2.	Dimensões de referência	48
3.2.3.	Forças aplicadas	52
3.3.	ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS INTERNOS	54
3.4.	SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	56
3.5.	SIMULAÇÃO PARA SOLUÇÃO NUMÉRICA	58
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1.	RESPOSTAS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO	62
4.2.	PROPOSTA DE FABRICAÇÃO	69
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
5.1.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	72

REFERÊNCIAS	73
ANEXO A – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	76

1. INTRODUÇÃO

Resolver o problema de consumo energético do planeta é uma inspiração para diversas inovações tecnológicas. A melhoria da eficiência da geração e da transformação de energia vem sendo pauta em diversos setores da indústria, onde a universidade exerce papel fundamental no esforço de incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de soluções. O espírito competitivo, por exemplo, que pode influenciar os acadêmicos de maneira satisfatória, muitas vezes é promovido por instituições públicas ou privadas em competições estudantis.

A equipe Eficem, do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), é uma equipe estudantil que desenvolve carros de alta eficiência energética. A equipe foi fundada em 2011 e desde então já participou de diversas maratonas e competições estudantis, estando presente em todas as edições da *Shell Eco-marathon (SEM) Brasil* e, até a data de produção deste trabalho, em 5 edições da *SEM Americas*, que acontece anualmente nos Estados Unidos. A equipe já foi contemplada em diversas oportunidades com premiações e posições no pódio, além de alcançar recordes como o de maior distância percorrida por um protótipo a bateria elétrica (363,6 km/kWh) no evento do Brasil.

A *Shell Eco-marathon* é uma competição automobilística, na qual equipes estudantis de eficiência energética, de todo o mundo, disputam o prêmio de veículo mais eficiente (Shell, 2022). A eficiência energética de um veículo está ligada a diversos fatores, como qualidade do combustível, perdas de desempenho, peso total do veículo, entre outros. Para otimizar um projeto do ponto de vista do consumo energético, normalmente a primeira ação adotada é reduzir o peso dos componentes essenciais, com possibilidade até de descartar os não essenciais, e nesse sentido os componentes estruturais do chassi costumam receber maior interesse, devido à grande parcela de peso que representam no veículo (Omer, 2015).

Desenvolver um chassi de baixo peso é uma tarefa complexa, que exige extensos estudos sobre cada sistema e componente do veículo. O regulamento da SEM tem exigências específicas em termos de segurança e conforto para a classe dos *Urban Concept (UC)*, na qual as equipes devem apresentar um veículo com quatro rodas e que apresente características similares a de veículos de passeio. Desse modo, esses projetos devem apresentar um comportamento estrutural adequado, que aumente a confiabilidade e proporcione segurança aos passageiros, e seja viável financeiramente para uma equipe estudantil sem fins lucrativos.

Uma solução comumente aplicada aos veículos que participam do evento é o chassi monobloco em fibra de carbono, um material com baixa densidade que proporciona uma

estrutura leve e resistente. No Brasil, no entanto, a fibra de carbono é um material de alto custo e os chassis monobloco e outros componentes feitos exclusivamente desse material são destinados a veículos de alto valor e desempenho, normalmente produzidos em baixa escala (Portilho *et al.*, 2016). Para aplicações em larga escala (veículos populares) é comum utilizar os aços avançados em chassis unibody, pois os processos produtivos têm menor custo e o comportamento estrutural obtido é altamente favorável, além da adaptabilidade a projetos semelhantes (England *et al.*, 2011).

O desenvolvimento de componentes estruturais em aços avançados possibilita aplicações mais amplas na indústria automotiva, e representa uma solução mais relevante para veículos da classe UC, ainda que a redução do peso total possa ser inferior à proporcionada pela fibra de carbono.

Este trabalho apresenta um projeto preliminar para o assoalho do veículo Urban Concept, um dos componentes estruturais do chassis, feito em aços avançados de 3ª geração. Os materiais utilizados foram aços do catálogo da Arcellormittal, a geometria do sistema foi desenhada no software *Solid Works*, e as simulações foram realizadas no software *Ansys*. As análises estruturais foram feitas considerando o modo de falha segundo o critério da Teoria da energia de distorção de von Mises-Hencky.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Apresentar um projeto preliminar para o assoalho de um chassis do tipo Unibody, com desempenho estrutural adequado e previsível, com a utilização de aços avançados de alta resistência, para aplicação em um veículo da classe Urban Concept da Shell Eco-marathon.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar os requisitos mecânicos e regulatórios de projeto do assoalho;
- Desenvolver a geometria para análise mecânica do componente;
- Selecionar o material adequado para a fabricação da estrutura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A indústria automotiva sempre foi palco de revoluções tecnológicas. O carro é um bem de consumo, e muitas vezes é aquele de maior valor agregado ao qual muitas pessoas terão acesso, e isso coloca sobre ele determinados requisitos. Quando se fala em requisitos do consumidor, a lista pode variar bastante de acordo com a classe do veículo, mas olhando para os requisitos dos órgãos reguladores de cada mercado em relação aos veículos de passeio, é visível que não há uma distinção por classes, mas sim uma crescente rigidez nos protocolos.

Novas leis, como as fases L7, P8 e L8 do programa nacional Proconve¹, já vêm causando grandes impactos na linhas de produção das montadoras, inclusive obrigando-as a adequar suas tecnologias de motorização e aposentar as que não cumprem os protocolos de emissão de poluentes (Nobre, 2022).

Ao longo das últimas décadas, algumas demandas têm crescido e se tornado determinantes para o sucesso ou fracasso de um projeto. A questão da redução de emissões de poluentes é uma delas, e provavelmente a que têm tido maior impacto e visibilidade, visto que grandes empresas já sofreram as consequências por não encontrarem soluções eficazes para esse problema. Já a redução de peso do veículo, vinculada à otimização do comportamento estrutural, é uma demanda com menos visibilidade pelo público, mas provavelmente uma das mais importantes e impactantes do ponto de vista regulatório para as montadoras, que vêm investindo em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para seus componentes (Loiola; Thesing, 2018).

Um dos desafios para as fabricantes do mercado automotivo, quando se trata de aplicações estruturais, é desenvolver componentes que apresentam melhores relações de resistência mecânica por peso total. Entre os principais materiais utilizados para esse fim, encontram-se os aços convencionais e, atualmente em grande escala, os aços avançados de alta resistência (*AHSS*), além de alumínio e fibra de carbono.

¹ O Conama publicou em 2018 as Resoluções 490 e 492, que trazem as novas fases do Proconve L7 e P8 a partir de 2022. A nova fase L7 trará redução significativa dos vapores de combustíveis que se perdem na atmosfera, enquanto a fase P8 deve reduzir significativamente a emissão dos óxidos de nitrogênio. Estas duas ações se complementam e deve ajudar na redução da formação dos compostos de oxidação na atmosfera dos grandes centros urbanos, sobretudo o gás ozônio. A nova fase L8 a partir de 2025 traz uma mudança metodológica para aprovação nos processos de licenciamento, que deixará de ser por modelo de veículo e passará a ser pela média corporativa, exigindo que os veículos comercializados de uma empresa apresentem uma média de emissão que atenda limites progressivamente mais restritivos (Emissão, 2023).

O estudo dos materiais e das geometrias dos componentes é algo de fundamental importância para o projeto automotivo, e pode ser aliado a estudos em ambientes computacionais para desenvolver projetos robustos e com alta confiabilidade.

2.1. A EQUIPE EFICEM

Criada em 2011, originalmente sob o nome de Equipe Catarina, a equipe EFICEM é uma iniciativa de alunos e professores do campus CTJ da UFSC para participação em competições de eficiência energética veicular (Neto, 2017). O ambiente inovador da equipe proporciona aos alunos uma oportunidade para se desenvolver na busca de soluções para a eficiência energética, o que levou a alguns avanços disruptivos em seus projetos, como sistema propulsivo com motor elétrico de cubo de roda; chassis monocoque de compósitos; estruturas em fibra de carbono; redução extrema de peso (Mika, 2021).

Entre os projetos que já foram desenvolvidos pela equipe, destaca-se o protótipo Eletronice, um dos veículos mais longevos da história da equipe e da competição SEM. A Figura 1 mostra um registro fotográfico da participação desse veículo na etapa SEM Brasil de 2023, que ocorreu na cidade do Rio de Janeiro, que contou com um resultado excepcional para a equipe com o 3º lugar na categoria Protótipo Elétrico, com o consumo registrado de 344,5 km/kWh.

Figura 1 – Protótipo Eletronice da equipe EFICEM



Fonte: Shell (2023)

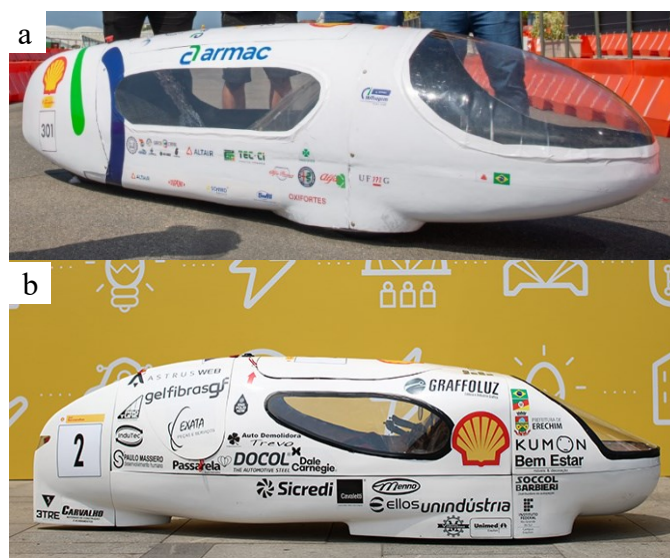
A participação do Autor deste trabalho na equipe Eficem ocorreu ao longo de três anos, iniciando em 2020 com o ingresso como membro interino. Em agosto de 2020, assumiu o cargo de líder de desenvolvimento do veículo Urban Concept, até janeiro de 2022 quando assumiu o cargo de capitão da equipe, o qual ocupou até o início de janeiro de 2023.

2.2. O VEÍCULO URBAN CONCEPT

A competição Shell Eco-marathon teve seu início em 1939, criada por funcionários da empresa Shell para fins de lazer, porém ao longo das décadas tomou proporções mundiais e, atualmente, ocorre anualmente em 3 continentes: Ásia, Américas e Europa. A SEM desafia equipes universitárias a construir carros de duas classes e variadas categorias de matrizes energéticas com um propósito: a ultra eficiência (Make, 2022).

A classe de protótipos da SEM é representada por veículos com características bastante distintas às de veículos de passeio, como a posição do piloto que deve ser obrigatoriamente na horizontal, além de sistemas mecânicos simplificados, uma vez que o objetivo desses veículos é alcançar a máxima eficiência energética para diferentes matrizes energéticas. A classe dos UC foi criada como uma alternativa à classe de protótipos para incentivar o desenvolvimento de veículos com maior similaridade à carros de passeio e, conseqüentemente, tecnologias e soluções com maior potencial de aplicação na indústria automotiva. Na Figura 2 são apresentados alguns modelos de veículos da classe de protótipos, e na Figura 3 são apresentados modelos da classe UC.

Figura 2 – Protótipos (a) ARMAC Milhagem UFMG & (b) Drop Team IFRS



Fonte: Milhagem UFMG (2023), Dropteam (2023)

Figura 3 – Veículos UC apresentados em etapas da Europa e Ásia da SEM



(a) DTU Supermileage

(b) TUCer Spyros Louis

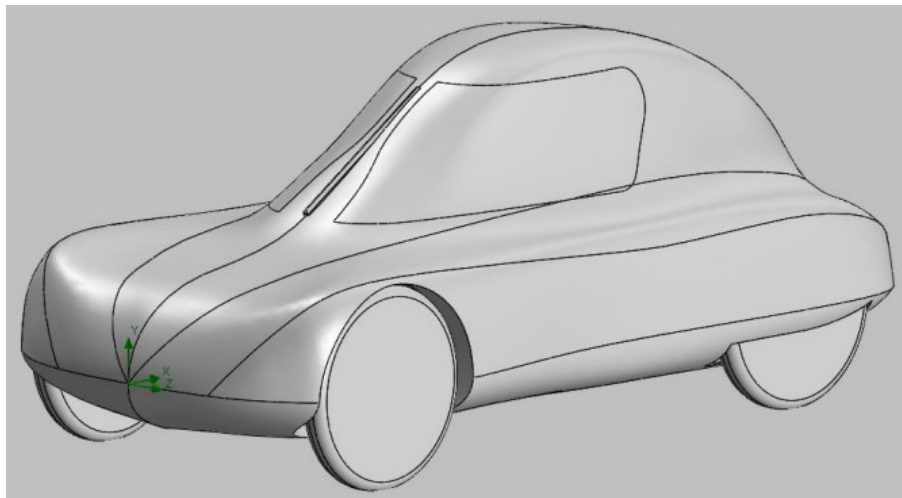
(c) KRUCE eco-car

Fonte: Shell (2023)

2.2.1. PROJETO UC EFICEM

Buscando a participação na categoria dos UC, em etapas regionais ou continentais da SEM, a equipe Eficem iniciou o desenvolvimento de seu primeiro veículo UC em 2017 com a criação de uma célula dedicada a esse propósito, passando pelas etapas do projeto informacional, conceitual e preliminar. No entanto, diante dos poucos recursos humanos e operacionais dedicados, o projeto teve um progresso considerável somente em 2021, quando a célula completou o projeto informacional conceitual e auxiliou o aluno Jefferson Mika, graduando de Engenharia Aeroespacial, na produção de seu trabalho de conclusão de curso sobre o desenvolvimento do projeto preliminar da carenagem do veículo, mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Modelo da geometria da carenagem do veículo UC idealizado



Fonte: MIKA (2021)

Um projeto pode ser desenvolvido seguindo uma sequência linear de etapas, conhecida como Engenharia Sequencial, ou opostamente, com etapas simultâneas e interrelacionadas, conforme a Engenharia Simultânea.

O *Project Management Institute* (PMI) apresenta um guia básico de boas práticas para o desenvolvimento de um projeto, o Guia PMBOK. Um projeto é definido como um esforço temporário (com início e fim) empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo, sendo que o produto pode ser um item final ou um componente de outro item (PMI, 2008).

O guia também organiza as etapas de um projeto em 5 macrofases: a Iniciação, o Planejamento, a Execução, o Controle e o Encerramento. As macrofases podem ser definidas como grupos de processos, uma vez que são compostas por diversos processos ou conjunto de ações e atividades inter-relacionadas, caracterizados por suas entradas, ferramentas e técnicas aplicáveis. Complementarmente, podem ser implementadas metodologias de projeto, para auxiliar no desenvolvimento de cada processo.

Back *et al.* (2008) propõe a implementação da metodologia PRODIP para o desenvolvimento de um projeto, baseada em experiências do Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da UFSC e no guia PMBOK. O modelo PRODIP possui três macrofases: o Planejamento, que envolve o planejamento do produto e do projeto, e define as ideias e os planos de desenvolvimento; a Projetação, composta pelos projetos informacional, conceitual, preliminar e detalhado; e a Implementação, constituída pelas etapas de produção, lançamento e validação do produto (UFSC, 2023).

Cane (2020) explica as fases de planejamento, execução e detalhamento do projeto, e correlaciona às 3 macrofases (planejamento, projetação e implementação) da metodologia de projeto PRODIP, além de aplicar ferramentas como o diagrama de Mudge e a matriz de Pugh.

O diagrama de Mudge é uma ferramenta utilizada para comparar os requisitos de um projeto, elencando conforme o grau de importância relativo de cada um. Nele, cada requisito é comparado com os outros individualmente, identificando e classificando as prioridades atribuindo um peso (1 – baixa, 3 – média ou 5 – alta) a elas.

A construção do diagrama de Mudge é exemplificada na figura 5. A soma dos pesos das prioridades considera todas as aparições do índice na matriz comparativa. Ao final, a soma é transformada em uma importância relativa ao dividir o peso total da necessidade pela soma de todos os pesos.

Figura 5 – Exemplo de um diagrama de Mudge

Índice	Necessidade		b	c	Soma	Import. Relativa
a	Necessidade 1	a	a1	a5	6	67%
b	Necessidade 2	b		b3	3	33%
c	Necessidade 3	c			0	0%
					9	100%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Já a matriz de Pugh é uma ferramenta complementar ao diagrama de Mudge, utilizada para comparar as possíveis soluções para um problema. Nela, os requisitos do projeto relacionados ao problema são valorados para cada solução proposta, gerando uma nota final para as soluções e possibilitando uma decisão direcionada e embasada, a partir de uma estrutura lógica e simples (Cane, 2020).

Essa estrutura é mostrada na Figura 6. As soluções são comparadas entre si e recebem um valor de atendimento ao requisito que, no caso deste trabalho, pode variar entre “-” (não atende), “0” (não afeta) e “+” (atende). Ainda, caso a solução tenha um efeito crítico sobre o requisito, o valor pode ser amplificado para “--” (não atende e afeta negativamente) ou “++” (atende e afeta positivamente). O maior valor total equivale à solução mais adequada ao requisito avaliado.

Figura 6 – Exemplo de uma matriz de Pugh

Requisito	Solução 1	Solução 2
A	0	+
B	+	-
C	0	0
Soma (+)	1	1
Soma (-)	0	1
Total	1	0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Nota-se que, tanto os pesos do diagrama de Mudge quanto os valores da matriz de Pugh, são definidos pelas pessoas da equipe envolvida no projeto informacional seguindo critérios técnicos, mas podem estar sujeitos à critérios subjetivos, eventualmente. A correta aplicação dessas ferramentas, ou de outras utilizadas como metodologia de projeto, é fundamental para proporcionar robustez e embasamento às decisões tomadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

2.2.2. TIPOS DE CHASSIS AUTOMOTIVOS

O chassi de um carro é tão essencial ao veículo quanto as rodas ou o motor que o movem. Ele carrega e suporta todos os componentes do carro e protege o motorista em caso de colisão. Elementos chave para um bom design de chassi são absorção eficiente de carregamentos, baixo peso e resistência estrutural para cargas de torção e flexão (Costin; Phipps, 1965).

Esse sistema possui várias formas e tamanhos, que são desenvolvidos para diferentes tipos de projeto automotivo de acordo com sua aplicação. O projeto estrutural do chassi de um veículo off-road pode ser bem diferente do projeto para veículos de passeio, afinal as cargas dinâmicas e os requisitos de cada projeto são completamente diferentes. Considerar o terreno e as situações a que o veículo estará sujeito são aspectos fundamentais para um projeto adequado do sistema estrutural.

No quesito layout, um design que vem sendo utilizado nas últimas décadas em projetos de veículos de passeio é o chassi unibody, também conhecido como monocoque. O termo em inglês remete ao conceito de união de várias partes em um único corpo, o que pode ser visualizado na Figura 7, onde várias peças feitas em materiais e processos diferentes são unidas para formar uma única estrutura (Genta; Lorenzo, 2009).

Figura 7 – Chassis Unibody



Fonte: Christodoulou (2017)

Esse design proporciona uma configuração mais compacta, porém espaçosa ao veículo. Aliado à utilização de aços avançados, esse conjunto tem sido a alternativa ideal para

a aplicação em carros de passeio, pois em larga escala proporciona altos níveis de resistência e segurança, além de bons custos de fabricação.

Um outro tipo de projeto de chassis que costuma ser visto como concorrente do unibody é o monobloco em fibra de carbono, mostrado na Figura 8, que apresenta vantagens como maior leveza e alta resistência, porém com alto custo de fabricação e aplicação limitada à pequena escala. Além disso, a fibra de carbono apresenta um comportamento frágil em situações de colisão, e não absorve a energia em uma deformação elástica ou plástica como os metais (Marchiori, 2017).

Essas características do chassis monobloco em fibra de carbono fazem com que essa tecnologia seja implementada em veículos de alto valor agregado, mas raramente encontrada em carros de passeio.

Figura 8 – Monocoque em fibra de carbono (Ferrari F70)



Fonte: Shawn (2012)

Um projeto comum para aplicações também em pequena escala é o chassis tubular, caracterizado por tubos metálicos soldados entre si, que forma uma estrutura única (Brown *et al.*, 2002), vide Figura 9. Esse tipo de projeto apresenta custos relativamente baixos de fabricação, com níveis de resistência consideráveis, porém dificilmente é encontrado em carros de passeio devido às limitações de posicionamento das barras que tornam seu layout pouco prático para o dia a dia.

Figura 9 – Chassis Tubular

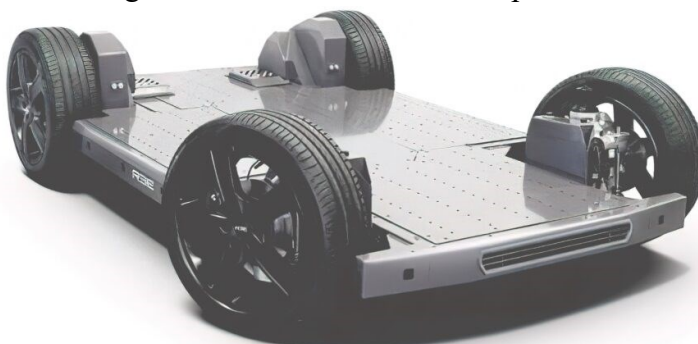


Fonte: The Challenge (2022)

As alternativas anteriores foram inicialmente desenvolvidas com intuito de aplicação em veículos convencionais de motores à combustão interna, porém carros elétricos possuem características especiais que abrem espaço para diferentes alternativas. Uma que vem sendo bastante implementada em veículos elétricos (EVs) é o chassis modular, também conhecido por chassis skate.

Esse tipo de design, mostrado na Figura 10, é caracterizado por apresentar uma estrutura plana e rígida formada por bateria e componentes de reforço, que garantem a resistência estrutural e os pontos de suporte necessários para montar o veículo sobre ela.

Figura 10 – Chassis Skateboard para EV

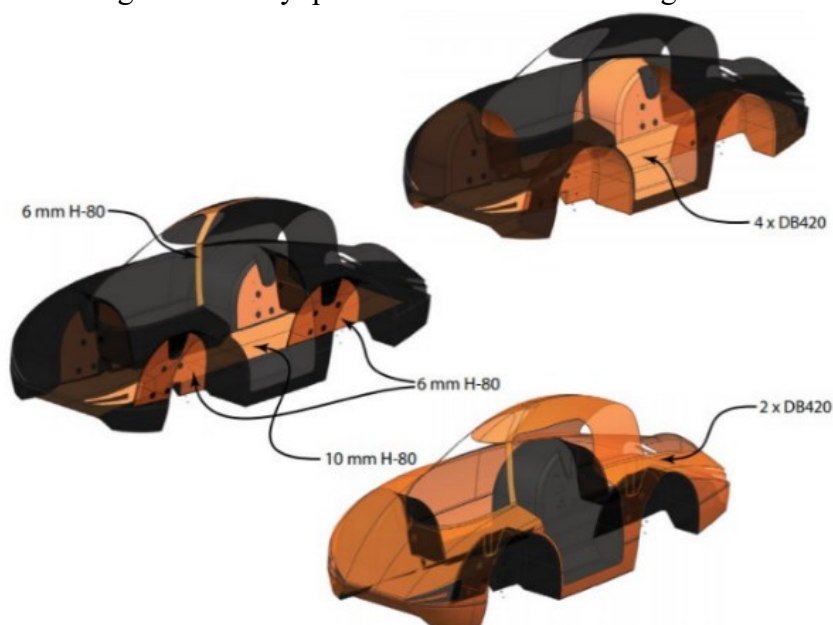


Fonte: Iochpe-Maxion (2020)

A disposição dos elementos estruturais em chassis de carros de passeio e de veículos UC pode ser similar, e algumas das soluções apresentadas acima já foram utilizadas por equipes participantes da SEM, especialmente em etapas dos continentes Asiático, Europeu e da América do Norte. Na Figura 11, por exemplo, é mostrado o modelo do chassis em fibra de carbono do UC *DNVFuelfighter2*, da equipe norueguesa NTNU. O layout da estrutura, em especial do

assoalho e da caixa de roda dianteira, foi uma das inspirações para o projeto desenvolvido neste trabalho.

Figura 11 – Layup do chassis do DNVFuelfighter2



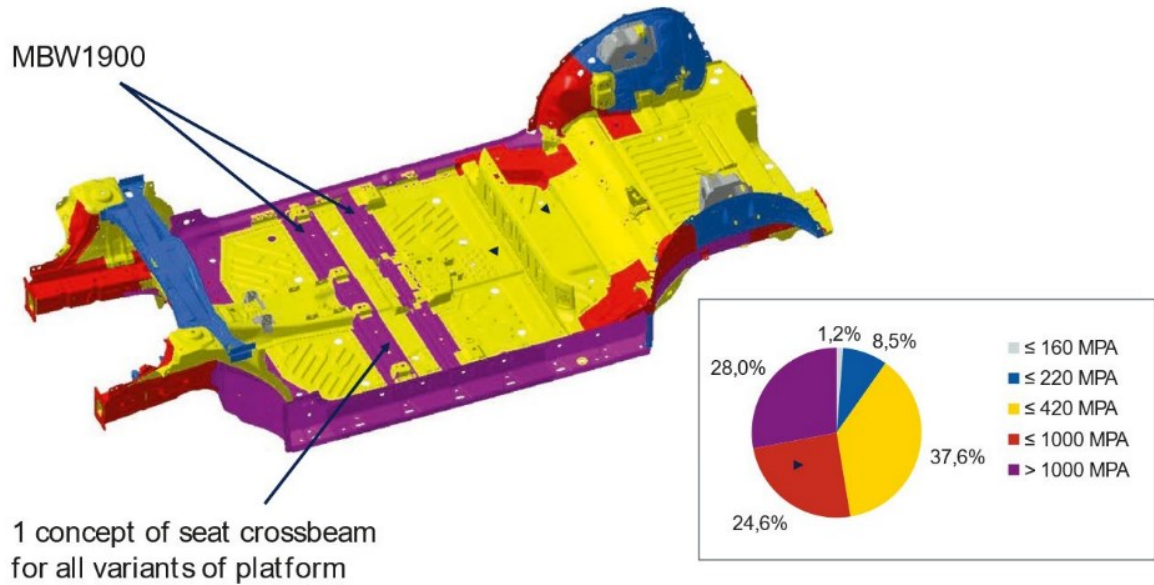
Fonte: Espeland *et al.* (2012)

2.2.3. COMPONENTES DO CHASSIS

A estrutura de um chassis unibody é composta de diversos elementos, com utilização de diferentes materiais para a fabricação de cada um, de modo a otimizar as propriedades às aplicações. As colunas laterais unem o teto ao assoalho, alguns componentes transversais internos favorecem a rigidez torcional e o assoalho é um dos principais componentes, no qual são fixados sistemas mecânicos, trem-de-força, tanque de combustível e/ou pacote de baterias etc. e, portanto, deve suportar grandes carregamentos. Em outros tipos de chassis, como no caso do chassis tubular, o assoalho trabalha apenas como uma proteção física ao interior do carro contra o ambiente externo.

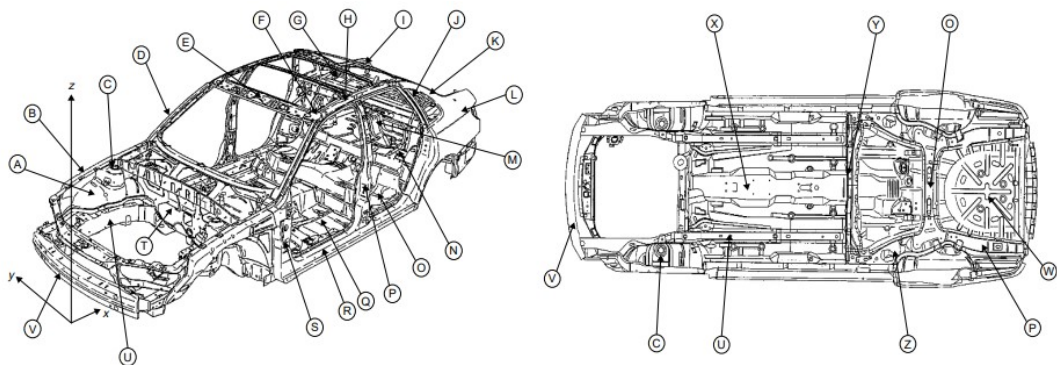
Na Figura 12 é mostrado um assoalho típico de veículos com chassis unibody, composto por uma ou mais chapas metálicas de diferentes materiais, os quais possuem diferentes características mecânicas, o que é evidenciado pelo gráfico pizza que destaca os limites de resistência de cada um.

Figura 12 – Assoalho do VW ID3 (plataforma MEB)



Fonte: World Auto Steel (2023)

Na Figura 13 são mostrados outros dos principais componentes de um chassi, devidamente referenciados no Quadro 1. Nota-se a quantidade de elementos com funções e geometrias diferentes, evidenciando a importância das ferramentas CAE para realização de análise numérica, uma vez que a análise analítica de cada elemento seria demorada e de extrema complexidade.

Figura 13 – Componentes de um chassi *Body-in-White*

Fonte: Brown *et al.* (2002)

Quadro 1 – Glossário dos componentes de um chassi *Body-in-White*

Item	Descrição PT-BR	Descrição EN-US
A	Painel lateral do compartimento do motor	Motor compartment side panel
B	Trilho superior do compartimento do motor	Motor compartment upper rail
C	Torre de choque	Shock tower

D	Coluna 'A'	'A'-pillar or windshield pillar
E	Travessa superior frontal	Windshield header or front header
F	Junta do arco superior	Roof bow
G	Tampa do porta-malas	Package shelf
H	Trilho lateral do teto	Side roof rail
I	Travessa superior traseira	Backlite header or rear header
J	Coluna 'C'	'C'-pillar
K	Coluna 'D'	'D'-pillar
L	Painel lateral traseiro	Rear quarter panel
M	Painel do compartimento traseiro	Rear compartment pan
N	Quadro de acesso do assento traseiro	Rear seatback opening frame
O	Painel do assento traseiro	Rear seatback panel
P	Coluna 'B'	'B'-pillar or center pillar
Q	Painel do assoalho	Floor pan
R	Trilho lateral inferior	Rocker or rocker panel
S	Coluna da dobradiça frontal	Front body hinge pillar (FBHP)
T	Painel de instrumentos	Dash panel
U	Trilho inferior do compartimento do motor	Motor compartment lower rail
V	Para-choque dianteiro	Front bumper
W	Painel do estepe	Spare tire well
X	Tunel do eixo cardã	Tunnel
Y	Barra transversal n°4	# 4 crossbar
Z	Barra transversal n°5	# 5 crossbar

Fonte: Brown *et al.* (2002)

Considerando os pontos apresentados, conclui-se que é de interesse do engenheiro responsável pelo projeto do chassi considerar todos os possíveis carregamentos sobre cada elemento estrutural, sejam eles estáticos ou dinâmicos, e os softwares de modelagem e simulação computacional são ferramentas que contribuem e facilitam essa análise. É importante, no entanto, que os projetos de todos os sistemas do veículo, principalmente os sistemas mecânicos que promovem carregamentos em outros sistemas, sejam realizados de forma simultânea.

Caso esse procedimento não seja seguido, podem ocorrer falhas no dimensionamento dos componentes, portanto, é de fundamental importância que sejam incluídos coeficientes de segurança conservadores nesse momento. Tal prática pode prejudicar a redução de peso do veículo, mas irá favorecer a segurança e a rigidez dos componentes estruturais.

2.2.4. RIGIDEZ TORCIONAL E RESISTÊNCIA

Os conceitos de resistência e rigidez estrutural estão ligados às propriedades dos materiais. Resistência do material é um parâmetro que indica a capacidade de um corpo de prova padrão desse material resistir a uma força antes de sofrer uma deformação permanente, ou plástica. Rigidez está ligada ao comportamento elástico do material, e é determinada em laboratório através da compressão de uma mola feita com o material em análise.

Esses conceitos são aplicáveis ao projeto do veículo, uma vez que a estrutura do chassi é submetida a diversos carregamentos e deve se comportar como um corpo rígido, o qual não deve colapsar e deve apresentar uma deformação mínima dos elementos (Castro, 2008).

A deformação torcional do chassi é definida como o movimento de torção em torno de seu comprimento, e pode ser observada em situações estáticas e dinâmicas, como uma ou mais rodas encontrando um obstáculo durante o percurso e alterando sua altura em relação às outras rodas, ou durante uma curva, na qual o centro de massa se desloca e provoca uma distribuição desigual da massa entre as rodas do veículo (Seward, 2014). A resistência à deformação torcional é chamada de rigidez torcional, e é um dos parâmetros mais importantes no projeto de um chassi (Singh, 2010).

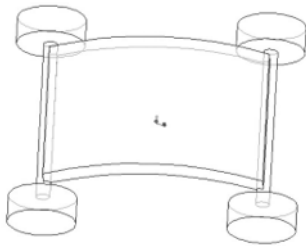
Uma boa rigidez torcional deve permitir que qualquer deformação elástica do chassi seja tão pequena que possa ser desprezada para os cálculos de manobrabilidade. Isso acontece porque um chassi com baixa rigidez torcional se comporta como uma mola em série com os elementos da suspensão, e compromete a estabilidade do veículo.

No caso de um veículo UC, as cargas estáticas são relativamente pequenas, devido ao peso limitado pelo regulamento da competição, assim como as cargas dinâmicas, uma vez que o percurso da pista é homogêneo e plano, e a velocidade máxima do veículo é limitada a um patamar reduzido para otimizar o consumo. Desse modo, a competição em si não proporciona solicitações de torção elevadas sobre o veículo.

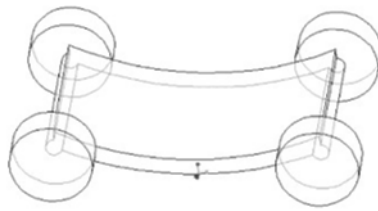
Durante a análise das cargas sobre um chassi automotivo, 3 deformações globais são observadas: a flexão vertical, ocasionada pelo peso da própria estrutura e dos componentes do veículo, mostrada na Figura 14.a; a flexão lateral, aplicável em situações de aceleração lateral, como curvas ou ventos intensos, mostrada na Figura 14.b; e a torção longitudinal, que é ocasionada pela realização de curvas ou pela presença de irregularidades ou obstáculos na pista, conforme mencionado anteriormente, mostrada na Figura 14.c (Riley; George, 2002).

Figura 14 – Deformações globais em um chassis

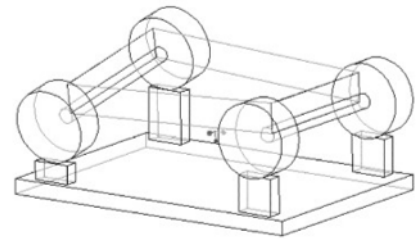
(a) Deformação por flexão vertical



(b) Deformação por flexão lateral



(c) Deformação por torção longitudinal



Fonte: Riley; George (2002)

A rigidez torcional K_t de uma estrutura é dada pela equação 1, onde T é o torque medido em [N.m] e φ é o ângulo de torção do ponto avaliado, medido em [rad]. A equação pode ainda ser simplificada ao calcular o torque sobre o ponto avaliado como o produto da força aplicada com a distância normal do ponto ao plano neutro.

$$K_t = \frac{T}{\varphi} = \frac{F \times B}{\varphi} \quad \text{Eq. (1)}$$

2.2.5. VIGAS DE PAREDES FINAS

Algumas estruturas apresentam elementos de paredes finas, os quais são projetados de modo a reduzir o peso da estrutura sem comprometer sua rigidez. Em geral, o termo *paredes finas* se refere à vasos de pressão ou tubos circulares cuja relação raio-espessura da parede é igual ou superior a 10 ($r/t \geq 10$). Para perfis com seção transversal aberta ramificada, podem ser consideradas *paredes finas* aquelas cuja espessura é pequena em relação à altura ou largura da seção total (Hibbeler, 2010).

Os elementos de paredes finas podem estar sujeitos a tensões de cisalhamento provocadas por momentos fletores, e o fluxo de cisalhamento, medido como força por unidade de comprimento, é um dos principais carregamentos atuantes nas estruturas. Em uma viga, o fluxo de cisalhamento (q) pode ser calculado relacionando a força de cisalhamento com o momento de inércia da área da seção transversal da viga e o momento de área no ponto de interesse, conforme a Equação 2.

$$q = \frac{V \times I}{Q} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde,

V = Força de cisalhamento

I = Momento de inércia de segunda ordem da área total

Q = Momento de inércia de primeira ordem da área abaixo do ponto de análise da tensão

O fluxo de cisalhamento deve ser analisado especialmente nas regiões de união entre diferentes elementos que compõem a estrutura, pois são pontos com alta probabilidade de ocorrência de falhas. Outro parâmetro importante na análise de elementos estruturais é o índice de esbeltez, aplicável em pilares ou vigas sob compressão axial, que mede a suscetibilidade do componente à flambagem, e que é definido como a razão entre seu comprimento equivalente e o raio de giração, conforme mostrado na equação 3. Quanto mais elevada a esbeltez da coluna, mais suscetível à flambagem é essa estrutura.

$$\lambda = \frac{I_e}{i} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde,

λ = Índice de esbeltez

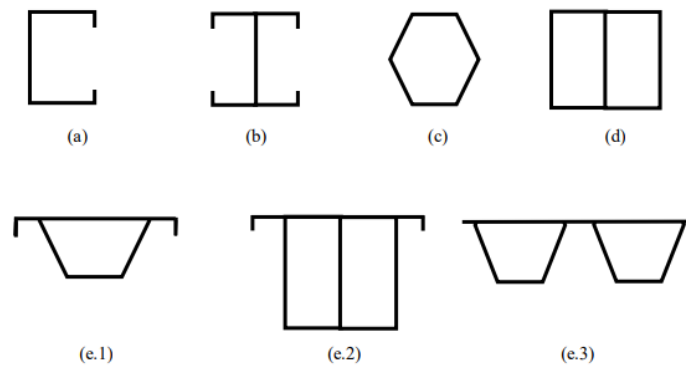
I_e = Comprimento equivalente

i = Raio de giração

Vigas são elementos com função estrutural caracterizados pela geometria de comprimento reto e esbelta, contendo um ou mais pontos de apoio e com possibilidade de receber carregamentos em qualquer direção, e as aplicações de elementos de viga são incontáveis. Sua essência está na construção civil, mas outros tipos de estruturas das mais diversas indústrias, que buscam robustez e rigidez, utilizam-se desses elementos.

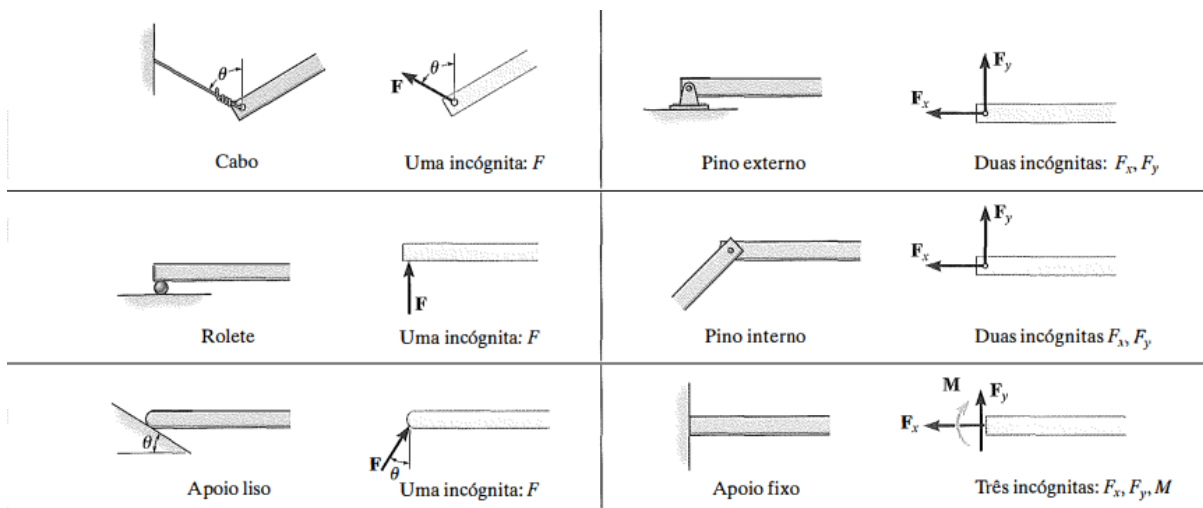
O perfil da seção transversal pode ser constante ou variável, aberto ou fechado e das mais diferentes disposições, e algumas são mostradas na Figura 15, assim como os tipos de apoio e fixação aplicáveis, mostrados na Figura 16, os quais determinam os graus de liberdade para movimento dos corpos.

Figura 15 – Tipos de seção transversal do perfil de vigas



Fonte: Dôres (2014)

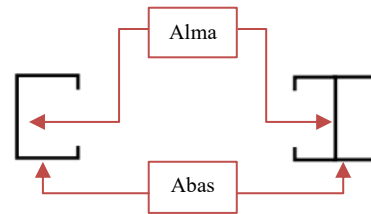
Figura 16 – Tipos de apoio em vigas e respectivos graus de liberdade



Fonte: Hibbeler (2010)

A Figura 15 mostra alguns dos diferentes perfis que uma viga pode apresentar, e a definição da geometria ideal depende de fatores como aplicação, requisitos de projeto e métodos de fabricação, a partir dos quais é possível definir a fixação ideal para os elementos. É importante observar que, para perfis de seção aberta, existe uma nomenclatura específica para cada região da geometria, sendo as partes horizontais chamadas de *Abas* e conectadas entre si pela parte vertical, chamada de *Alma*. A Figura 17 ilustra as regiões da viga.

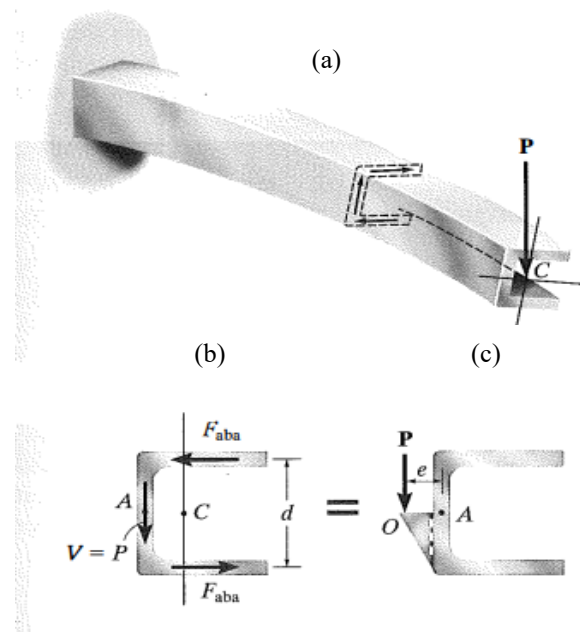
Figura 17 – Partes da viga de seção aberta



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

As vigas mostradas na Figura 17 possuem perfil enrijecido, caracterizado pela presença de uma dobra na ponta das abas, contrastando com o perfil simples, que não possui as dobras. Uma consideração importante para a aplicação de forças em vigas abertas é o ponto de aplicação. No caso de uma força externa cisalhante paralela à área da seção transversal, agindo sobre o centroide da área, existirá um momento de torção do perfil, o que não acontece em vigas de perfil fechado com simetria em relação a algum dos eixos no plano. Tal fenômeno é mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Centro de cisalhamento em vigas de seção aberta



Fonte: Hibbeler (2010)

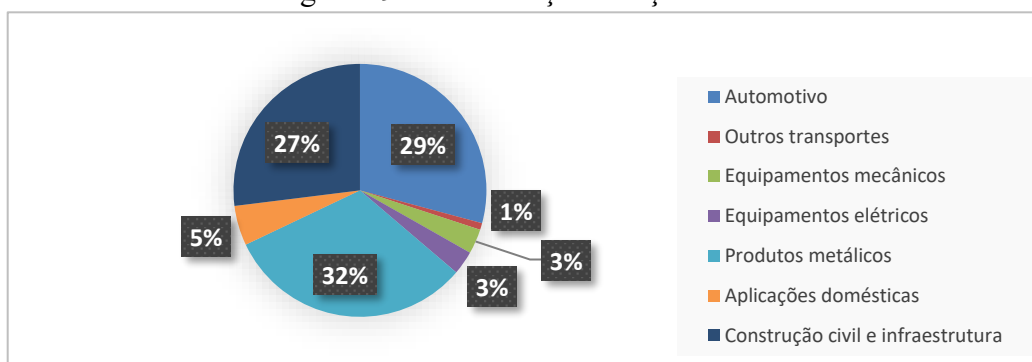
Hibbeler (2010) explica que, para evitar o momento de torção causado pela aplicação da força sobre o centroide da área, é necessário deslocar o ponto de aplicação da força a uma distância e da alma do perfil, como mostrado na Figura 18.c, que pode ser calculada como a razão entre a soma dos momentos na alma e a força P aplicada.

2.2.6. AÇOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Desde o surgimento do automóvel, uma parcela do consumo de metais extraídos do planeta tem sido direcionada à indústria automotiva. Em 2019, 12% do aço utilizado em todo o mundo foi destinado à indústria automotiva, ficando atrás apenas de equipamentos mecânicos (16%) e construção civil/infraestrutura (52%) (Statista Research Department, 2019). No Brasil, de 2016 a 2020 o setor automotivo foi responsável por 29% do consumo de aço, como mostrado no gráfico da Figura 19 (Brasil, 2020).

Os metais mais utilizados na extensa cadeia produtiva dos veículos são ferro fundido, alumínio e ligas de aço, cuja aplicação abrange peças estruturais, suportes, peças de segurança, componentes do motor, entre outros sistemas presentes em um veículo.

Figura 19 – Distribuição de aço no Brasil



Fonte: Brasil (2020, p. 32).

O aço tem sido utilizado na indústria automotiva desde o início do século XX. À época, esse material competia com o alumínio e a madeira pela predominância nos sistemas estruturais, mas devido ao seu baixo custo, à conformabilidade em geometrias complexas e à adequação a processos de soldagem, o aço rapidamente estabeleceu o posto de material preferido pela indústria. A partir da segunda metade do século XX, houve um rápido e constante avanço no desenvolvimento do aço e da indústria automotiva, devido aos desafios gerados por novas regulações e demandas de mercado, que exigiam veículos mais seguros, confiáveis, confortáveis e eficientes (Fekete; Hall, 2017).

Desde então, parte dos esforços para desenvolvimento tecnológico pela indústria automotiva têm sido direcionados ao sistema estrutural, conhecido como chassi. Responsável por suportar o peso do veículo, além de muitas cargas dinâmicas e estáticas, garantindo robustez

e segurança, o chassi costuma ser um dos sistemas mais pesados do automóvel, o que influencia diretamente nos níveis de consumo e emissões. Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e aumentar a eficiência energética, a indústria vem buscando variações de layout, design e materiais desse sistema, de modo a obter relações mais vantajosas de peso x resistência.

Segundo Keeler *et al.* (2017, tradução própria),

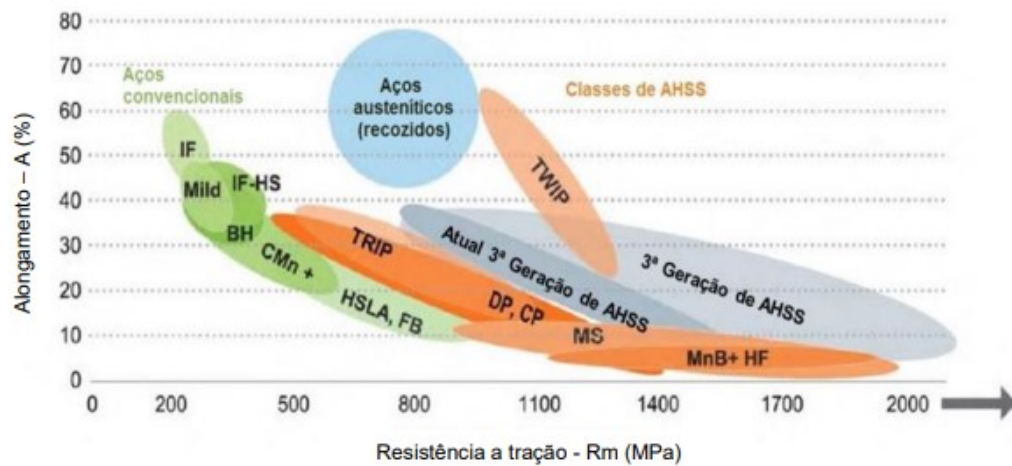
Em 1994 [...] foi iniciado o programa UltraLight Steel Auto Body (ULSAB) para projetar uma estrutura automotiva leve, em aço, que iria atender a um vasto espectro de objetivos em segurança e performance. A estrutura Body-in-white revelada em 1998 [...] provou ser leve, estruturalmente segura e executável, e financeiramente viável. Um dos maiores responsáveis pelo sucesso do ULSAB foi um novo grupo de aços chamado Advanced High-Strength Steels (AHSS). A família AHSS possuía microestruturas únicas, utilizando processos de deformação complexa e transformação de fase, além de equipamentos e métodos produtivos existentes para alcançar combinações nunca vistas de resistência e ductilidade. (p. 1-1).

É notória a transição, durante as duas primeiras décadas do século XXI, de estruturas de chassi *Body-on-frame* para *Body-in-white* (BIW) em veículos de passeio, devido aos esforços para otimização da segurança e de redução de emissões, o que levou ao desenvolvimento dos aços de alta resistência. Neste contexto, surgem inicialmente os aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), um grupo diferenciado pelas micro adições de Nb, Ti e V, que proporcionaram aumento da resistência mecânica por conta do refinamento da microestrutura ferrítica-perlítica.

No entanto, os processos de estampagem não atendiam às demandas desses aços, o que levou ao surgimento dos aços bifásicos (DP), os precursores da primeira geração da família de aços avançados de alta resistência (AHSS). Em seguida surgiram outras variações, como os *Transformation Induced Plasticity* (TRIP), de fase complexa (CP), os endurecidos por prensagem (PHS) etc., ainda de primeira geração. A segunda geração inclui aços como o *Twinning Induced Plasticity* (TWIP), com alto teor de manganês e baixo carbono (Cordeiro, 2022).

Os AHSS incluem todos os aços martensíticos e multifásicos com resistência à tração mínima de 440 MPa. A Figura 20 mostra algumas relações de resistência à tração e alongamento para os AHSS e aços convencionais. A alta resistência e baixo alongamento nos AHSS de primeira geração ainda hoje geram dificuldades de estampagem desses materiais, sendo necessária a utilização de processos de conformação à quente com matriz refrigerada, enquanto os TWIP, de segunda geração, possuem boa ductibilidade, possibilitando redução de custos operacionais, os quais acabam sendo compensados pelo elevado custo do material.

Figura 20 – Diagrama de resistência à tração e alongamento para diferentes aços



Fonte: World Auto Steel (2017)

2.2.7. FABRICAÇÃO EM AÇO AVANÇADO

Os *Advanced High-Strength Steels* (AHSS) são uma classe de aços de alta resistência e avançada tecnologia, desenvolvidos para atender às demandas crescentes da indústria automotiva e outras indústrias onde a relação entre resistência e peso é crítica. Esses aços oferecem características superiores de resistência, ductilidade e conformabilidade em comparação com os aços convencionais.

Em termos de propriedades metalográficas, pode ser observada nos aços avançados a presença de elementos de liga, como níquel, molibdênio ou boro, enquanto nos aços comuns são observadas composições químicas mais simples. Aços avançados também podem ter suas microestruturas e propriedades mecânicas otimizadas com a utilização de tratamentos térmicos, o que raramente se observa em aços comuns.

Os componentes de um chassi automotivo BIW são usualmente feitos em aços avançados, e devido às suas propriedades mecânicas superiores, esses aços precisam ser conformados de maneiras mais complexas do que os aços convencionais. A conformação dos aços avançados pode ser realizada por meio de estampagem, dobra, perfuração, entre outros processos. Para produção de peças seriadas (em larga escala) os processos mais vantajosos em termos de eficiência e economia estão relacionados à estampagem, podendo ser realizada a quente ou a frio, assistida por laser e hidroformadora.

No entanto, a estampagem pode ser inviável para projetos de baixa série e prototipagens, pois requer um ferramental e equipamentos de alto valor agregado, portanto, outros processos como a dobra ou a conformação incremental podem ser alternativas nesses

casos. A união de diferentes elementos também é um aspecto fundamental, pois as características de alta resistência e baixa ductilidade dos materiais torna a soldagem mais desafiadora. Processos de tratamento térmico como têmpera e revenimento também são utilizados ao longo da produção para alcançar propriedades mecânicas especiais.

No caso de automóveis comuns, a estampagem não é utilizada para gerar o chassi inteiro em uma única peça, pois as geometrias de seus componentes não permitem, além das dimensões do sistema, que extrapolam os limites dos equipamentos mais comuns. Normalmente várias peças de diferentes materiais são conformadas separadamente e unidas para formar um chassi Unibody, como mostrado na Figura 21. Diferentes técnicas de união são utilizadas, como soldas-ponto, solda laser ou por resistência e até colas de alta resistência.

Figura 21 – Chassis Unibody do Volvo XC90



Fonte: World Auto Steel (2017)

Uma das propriedades importantes para o processo de conformação é o Módulo de elasticidade E , também conhecido como Módulo de Young, o qual pode ser calculado segundo a Lei de Hooke pela equação 4 (Norton, 2013) como a razão entre a tensão normal σ e a deformação ε .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq. (4)}$$

Outra característica que determinará a conformabilidade do material é o grau do aço. No caso de aços avançados existem graus específicos para cada aplicação, dos quais destacam-se: o martensítico (M), que apresenta uma excelente relação entre conformabilidade e resistência; os endurecidos por prensagem (PHS), que podem ser conformados em geometrias complexas com pouca recuperação elástica e alta resistência à tração; os de fase complexa (CP) que apresentam altas taxas de expansão de furo; os bifásicos (DP) que apresentam boa relação

entre ductilidade e absorção de energia; os aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) que possuem boas relações de resistência-peso e capacidade de dobra e soldagem; entre outros (SSAB, 2023).

2.2.8. REGULAMENTO URBAN CONCEPT NA SEM

A competição promovida pela Shell encoraja e incentiva a criatividade das equipes participantes, inclusive premiando em categorias conhecidas por *Off-tracks* as principais inovações apresentadas no evento. Ainda assim, existe um regulamento aplicável a todos os projetos, garantindo a padronização em certos aspectos e uma competição justa e segura.

As normas aplicadas sobre cada categoria dependem da classe do veículo, que pode ser um protótipo ou um UC, e da matriz energética utilizada, que pode variar entre os motores de combustão interna, movidos a etanol, diesel e gasolina, e motores elétricos, alimentados por bateria ou célula de hidrogênio, ou até por supercapacitor, no caso de um veículo híbrido.

Analisando o regulamento da etapa do ano de 2023, os artigos mostrados no Quadro 2 podem ser destacados, uma vez que se aplicam à classe UC e estão relacionados direta ou indiretamente com os componentes estruturais do veículo. Outros artigos do regulamento, que são aplicáveis aos UC, mas não estão relacionados aos componentes estruturais do veículo, não foram incluídos.

Quadro 2 – Destaques do regulamento da Shell Eco-marathon 2023

Artigo 14: Pushing the Vehicle	Em nenhum momento durante o circuito os pilotos estão autorizados a empurrar/puxar o veículo, assim como ter ele empurrado/puxado.
Artigo 20: Driver Weight	O peso mínimo do piloto deve ser 70,0 kg. Caso o piloto não atinja o peso mínimo, deverá ser incluído um lastro metálico com formato retangular ou de disco, localizado fora do compartimento do piloto.
Artigo 25: Vehicle Design	a) O veículo deve possuir exatamente quatro rodas, que devem estar em constante contato com o solo; c) o veículo não deve conter apêndices externos ao seu corpo que possam ser perigosos aos participantes, incluindo partes pontiagudas do veículo, as quais devem possuir raio mínimo de 50,0 mm; e) o interior do veículo não deve conter quaisquer objetos que possam ferir o motorista em caso de colisão; f) o compartimento de energia (motor/transmissão/bateria) deve ser de fácil acesso para uma inspeção rápida; g) todas as partes do trem-de-força devem estar localizadas nos confinamentos da carenagem; h) todos os objetos no veículo devem estar montados com segurança, sendo proibida a utilização de cordas e materiais elásticos para sustentar objetos pesados; i) o veículo deve possuir

	<p>assoalho e estrutura rígidos, que impeçam contato do motorista com o solo; l) está proibida a utilização de amianto ou materiais que contenham amianto.</p>
Artigo 26: Chassis Solidity	<p>a) O chassis deve proteger com segurança o corpo do piloto, incluindo zonas deformáveis para absorção de energia, no evento de uma colisão frontal, lateral ou capotamento; b) o chassis do veículo deve ser equipado com uma barra de rolagem que envolva o capacete do piloto, com uma distância mínima de 50,0 mm quando sentado na posição de pilotagem com os cintos de segurança afivelados, a qual não deve prejudicar a visibilidade do piloto; c) a largura da barra de rolagem deve superar a largura dos ombros do piloto, quando sentado na posição de pilotagem, e pode ser utilizada uma barra tubular metálica, ou um painel rígido, integrado ao chassis do veículo e separando o compartimento do piloto do compartimento de energia; d) a barra de rolagem deve ser capaz de sustentar um carregamento estático de 700 N, aplicado nas direções vertical, horizontal e perpendicular, sem apresentar qualquer deformação; e) o veículo deve possuir um ponto de apoio na carroceria para ser levantado, o qual deve estar devidamente identificado.</p>
Artigo 27: Propulsion and Energy Storage System Isolation	<p>a) Um anteparo rígido deve isolar e selar, de forma segura, os sistemas de propulsão e de armazenamento de energia do compartimento do piloto; b) o anteparo deve proteger o piloto em caso de incêndio no compartimento de energia; c) o anteparo deve impedir o acesso ao compartimento de energia pelo compartimento do piloto.</p>
Artigo 28: Visibility	<p>O piloto deve ter um campo de visão de 180° no sentido longitudinal, sendo permitida a movimentação da cabeça para alcançar o arco completo, de modo que o capacete permaneça a todo momento a 50,0 mm de distância da barra de rolagem.</p>
Artigo 29: Safety Belts	<p>O assento do piloto deve ser equipado com um cinto de segurança de 5 pontos, sendo que em cada ponto de fixação do cinto, este deve ser capaz de suportar um carregamento de 200,0 N em qualquer direção.</p>
Artigo 34: Clutch and Transmission	<p>Todo veículo com um motor de combustão interna deve ser equipado com um sistema de embreagem.</p>
Artigo 44: UC Class - Definition	<p>A classe dos UC oferece uma oportunidade para desenvolver veículos de eficiência energética com aparência similar a carros de passeio, com foco na condução <i>stop and go</i>. Durante a competição, é permitida a presença de apenas um ocupante dentro do veículo, independentemente da quantidade de assentos disponíveis.</p>
Artigo 45: Dimensions	<p>a) Altura: entre 1000 mm e 1300 mm; b) Largura (exceto retrovisores): 1200 mm e 1300 mm; c) Comprimento: 2200 mm e 3500 mm; d) Bitola dianteira: mínimo 1000 mm, traseira: mínimo 800 mm; e) Entre-eixos: mínimo 1200 mm;</p>

	<p>f) Compartimento do piloto: altura mínima: 880 mm, largura mínima (altura dos ombros): 700 mm;</p> <p>g) Altura do solo (carregado): mínimo 100 mm;</p> <p>h) Peso máximo (excluindo piloto): 225 kg;</p>
Artigo 46: Vehicle Body	<p>d) O acesso do piloto deve ser fácil e prático, similar ao de carros de passeio. O veículo deve possuir duas portas, uma em cada lado do compartimento do piloto. Cada porta deve possuir uma dimensão mínima de 500 x 800 mm.</p> <p>h) O veículo deve possuir um compartimento para bagagem, com dimensões de 500 x 400 x 200 mm (L x H x W). Este deve ser facilmente acessível pelo lado de fora, e deve possuir paredes que mantenham a bagagem segura e imóvel durante a movimentação do veículo.</p> <p>j) O veículo deve possuir um suporte para reboque na região frontal, que pode ser rígido ou flexível (cabo ou fita). Caso seja rígido, deve ser posicionado inteiramente sob o corpo do veículo. Deve possuir uma resistência à tração equivalente ao peso do veículo, e abertura mínima de 30 mm.</p>
Artigo 47: Turning Radius and Steering	<p>a) O direcionamento do veículo deve ser operado predominantemente pelas rodas dianteiras.</p> <p>b) O sistema de direção deve ser operado por um volante circular, o qual deve possuir conexão física com as rodas.</p> <p>c) Barras de direção, perfilhos, joysticks e sistemas elétricos ou indiretos não são permitidos.</p> <p>d) O raio de conversão deve ser igual ou inferior a 6 m.</p>
Artigo 51: Braking	<p>d) A efetividade do sistema de frenagem será testada. O veículo deverá manter-se imóvel em uma inclinação de 20% com o piloto no interior e freio principal acionado. Uma inspeção dinâmica pode ser solicitada.</p> <p>e) É obrigatório o uso de um freio de estacionamento que mantenha o veículo parado durante a inspeção técnica, que deve fornecer uma força de frenagem de, no mínimo, 50 N.</p>
Artigo 57: Vehicle Electrical Systems	<p>b) Para qualquer tipo de matriz energética, é permitido apenas uma bateria presente no veículo.</p> <p>c) A bateria deve ser colocada fora do compartimento do piloto, atrás do anteparo. Baterias montadas diretamente sob o assento do piloto não são permitidas.</p>
Artigo 59: Propulsion	<p>Não existe restrição para o tipo e design do motor de combustão interna, no entanto, ele deve operar somente com o combustível fornecido pela organização, e não deve consumir óleo (motores de dois tempos não são permitidos).</p>
Artigo 60: Other on-board energy sources	<p>d) A temperatura do motor pode ser regulada com água desmineralizada ou líquido de refrigeração pressurizados, em um sistema de refrigeração controlado por uma bomba elétrica.</p>

Artigo 61: Fuel Tanks (ICE vehicles)	<p>a) O veículo deve ser equipado com apenas um dos seguintes tanques de combustível, aprovados e fornecidos pelos organizadores: 30, 100, 250 ou 350 cc.</p> <p>c) O tanque deve ser montado em posição acessível e completamente vertical, sem qualquer inclinação, de modo que possibilite o abastecimento <i>in situ</i> com uma bureta de aproximadamente 1 m de altura.</p> <p>d) A posição do topo do tanque deve ter no mínimo 50 mm de distância abaixo da barra de rolagem e em qualquer direção para qualquer parte móvel, baterias e fontes de calor e ignição.</p>
Artigo 63: Vehicles using hybrid technology	<p>a) Um supercapacitor é o único dispositivo de armazenamento de energia permitido para veículos híbridos. O armazenamento de energia mecânico ou hidráulico não é permitido. A utilização de qualquer bateria no sistema híbrido de propulsão é proibida.</p> <p>b) Esse capacitor deve ser a única fonte de energia armazenada para o motor elétrico que move o veículo.</p>
Artigo 64: Starter	<p>a) Um motor de arranque elétrico deve ser utilizado durante a competição. O arranque manual é proibido.</p>

Fonte: Shell (2023)

O cumprimento das normas indicadas no regulamento pelo projeto do veículo é avaliado nas etapas de inspeção técnica, sendo elas a etapa pré competição, realizada virtualmente por meio da submissão de documentos específicos, e etapa presencial, realizada durante a competição para avaliar se o carro está seguindo o regulamento e apto a adentrar a pista.

3. METODOLOGIA DE PROJETO

O chassis de um veículo UC é um sistema complexo composto por diversos componentes. Apesar de uma análise simultânea ser recomendada para o desenvolvimento do projeto detalhado, permitindo avaliar as interações de cada componente com seus pares, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise isolada do assoalho, de forma a propor um projeto preliminar apenas para esse componente.

Neste capítulo: são detalhadas as premissas, com a identificação dos requisitos, dimensões de referências e forças atuantes sobre o veículo; as ferramentas, explicando as condições de modelagem da geometria e configuração da simulação; e as saídas desejadas para análise dos resultados.

3.1. PLANEJAMENTO

A fase inicial do projeto, como mencionado no capítulo 2, requer um planejamento adequado, utilizando ferramentas de gerenciamento que possibilitam um bom desenvolvimento das etapas informacional e conceitual do projeto. No caso do UC da equipe Eficem, os membros da equipe foram consultados de modo a levantar os requisitos dos stakeholders envolvidos.

Entre os membros participantes do projeto, alguns ficaram responsáveis por avaliar o regulamento da SEM, e outros por identificar os requisitos e as características necessárias na visão da própria equipe. Etapas do guia PMBOK foram utilizadas, como o a criação do Termo de Abertura do Projeto e a implementação de metodologias complementares, utilizando ferramentas como o diagrama de Mudge e a matriz de Pugh, de modo a definir as prioridades do início do projeto.

A equipe também utilizou um diagrama de Gantt para definir e acompanhar os prazos das tarefas. Nesse documento, que dispõe de uma ordenação cronológica das tarefas, ficou definido que as etapas de identificação e valoração dos requisitos estariam seguidas de uma fase de criação do design preliminar do veículo, o qual seria submetido a testes em ferramentas computacionais para validação dos conceitos.

A fase seguinte consistiu na pesquisa de mercado para algumas das peças, com o intuito de encontrar soluções existentes para componentes e sistemas que não precisariam ser desenvolvidos pela equipe, conforme estabelecido no regulamento. Alguns dos itens incluídos nesse quesito foram: rodas, motor, mangas de eixo, braços de suspensão, amortecedores, caixa

de direção, pedais de freio e aceleração, acionadores elétricos e volante. Uma informação importante sobre cada um dos componentes mencionados que foi obtida é o peso bruto, pois ajudará a calcular as massas suspensa e não suspensa do veículo, o que impacta diretamente nas análises estruturais realizadas neste trabalho, parte da fase seguinte, que contou também com análises aerodinâmicas.

As fases de análise seriam seguidas de validação dos conceitos e detalhamento do projeto, com a definição das geometrias e seus respectivos desenhos técnicos, possibilitando o início da fabricação do veículo.

3.2. PREMISSAS DE PROJETO

As premissas do projeto são as definições que norteiam o desenvolvimento de suas etapas. Uma boa estrutura de premissas garante um desenvolvimento robusto e com menor incidência de erros imprevistos. O objetivo dessa etapa no projeto em questão é definir o layout inicial do assoalho e as condições de simulação em que serão realizadas as análises estruturais.

As etapas de projeto apresentadas a seguir foram realizadas integralmente pelo autor deste trabalho e, eventualmente, com o apoio de outros membros da célula de desenvolvimento do projeto.

3.2.1. DEFINIÇÃO DE REQUISITOS

Para a fase informacional foram levantados os principais requisitos de projeto a partir de uma análise criteriosa do regulamento da SEM. Entre os requisitos encontrados estão características básicas do veículo, como o número de rodas, que deve ser obrigatoriamente 4, a posição do piloto, que deve estar sentado, e o design geral, que deve apresentar similaridade visual e operacional à um veículo de passeio.

Para o desenvolvimento da fase conceitual do projeto foram utilizadas algumas metodologias de gerenciamento, como: Scrum, através de reuniões rotineiras para acompanhamento e definição das metas individuais, realizadas virtual e remotamente visto que o período coincidiu com a fase de isolamento social devido à pandemia do coronavírus; e Kanban, por meio da ferramenta Trello, para visualização e acompanhamento de todas as tarefas do processo.

Nessa etapa foram registradas as principais necessidades do produto e comparadas utilizando o diagrama de Mudge, sendo um para cada sistema, de modo a ampliar o detalhamento da análise. A matriz referente ao chassis é mostrada na Figura 22.

Figura 22 – Diagrama de Mudge para o chassis

Índice	Necessidade		b	c	d	e	f	g	h	Soma	Import. Relativa
a	Estrutura rígida e resistente	a	a1	a5	a5	a3	a3	g1	a3	20	26%
b	Baixo peso	b		b3	b3	b3	f3	g3	b1	10	13%
c	Baixo custo de material	c			d5	e3	f3	g5	h1	0	0%
d	Baixo custo de fabricação	d				e1	f3	g3	h1	5	6%
e	Layout versátil	e					f5	g3	h3	3	4%
f	Reduzir a emissão de poluentes	f						g1	f3	17	22%
g	Ter boa confiabilidade dos componentes	g							g1	17	22%
h	Ergonomia para o piloto	h								5	6%
										77	100%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A ordem de importância das necessidades foi identificada, com a rigidez da estrutura no topo da lista, seguida pela confiabilidade dos componentes e redução de emissões, as quais foram traduzidas em requisitos de projeto com parâmetros mensuráveis, mostrados abaixo:

- a: A = Limite de resistência ao escoamento mínimo: 300 MPa
- b: B = Peso máximo agregado ao veículo: 15 kg
- c: C = Disponibilidade no mercado regional
- d: D = Investimento inicial inferior a R\$ 5 mil
- e: E = Adaptável a diferentes matrizes energéticas
- f: F = Ciclo de vida com baixo impacto ambiental
- g: G = Previsibilidade nos modos de falha
- h: H = Piloto na posição sentado com inclinação de 70° e folga no espaço para os ombros

Para a seleção de soluções para cada sistema do carro foi utilizada a ferramenta da matriz morfológica de Pugh, na qual diferentes conceitos são concebidos pela combinação de diferentes soluções para cada requisito, e valorados de modo a determinar o peso de cada solução e o valor final de cada conceito, proporcionando uma decisão por um produto robusto desde o início. Os sistemas veiculares do carro são compostos por chassis, carenagem, direção, suspensão e trem-de-força.

A definição das soluções se iniciou pela escolha do tipo de chassis mais adequado aos requisitos levantados, utilizando a matriz de Pugh mostrada na Figura 23.

Figura 23 – Matriz de Pugh para o tipo de chassis

Requisito	Monocoque	Unibody	Modular	Tubular
A	++	++	-	+
B	++	0	-	0
C	-	+	0	+
D	-	-	-	+
E	-	0	++	-
F	?	0	--	0
G	0	+	0	+
H	+	+	+	-
Soma (+)	5	5	3	4
Soma (-)	3	1	5	2
Total	2	4	-2	2

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

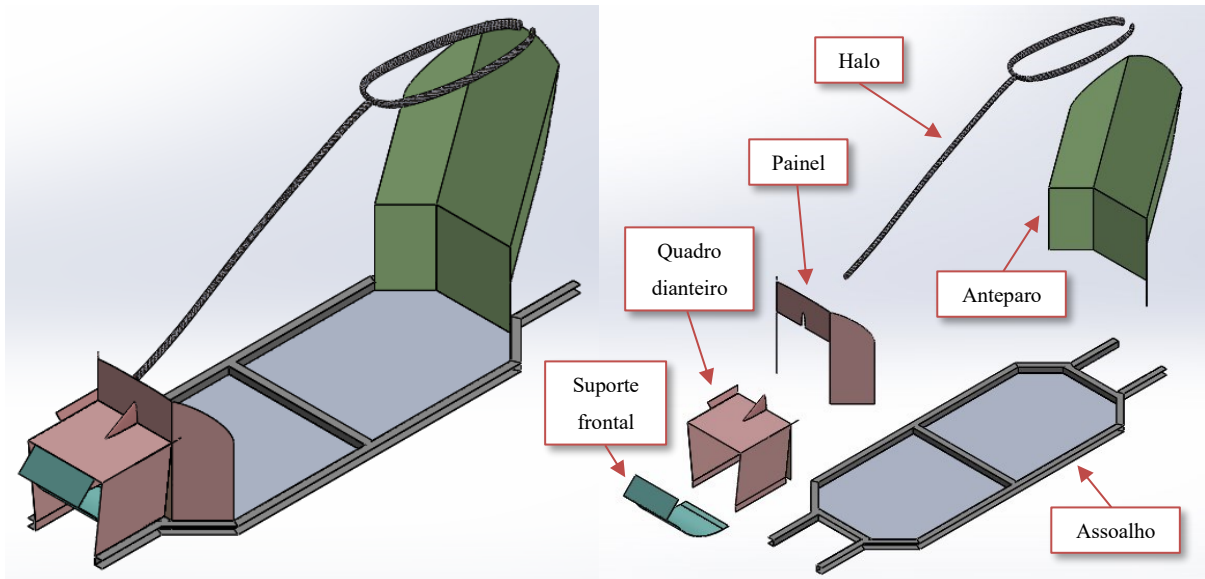
O tipo de chassis selecionado, assim como soluções para outras características relacionadas, como material e geometria, foram:

- Tipo: unibody simplificado;
- Material: componentes em aços avançados, aços comuns e compósitos em fibra com resina;
- Geometria: perfis simples, com fabricação de baixo custo e união por solda-laser ou por resistência.

Uma vez definido o tipo do chassis, foram identificados os componentes do sistema, já abordados no tópico 2.2.3. Um chassis Unibody apresenta uma característica peculiar em relação aos outros tipos: diversos componentes com geometrias complexas. Devido a esse aspecto, que envolve estudos individuais para cada componente, decidiu-se realizar um estudo preliminar apenas do Assoalho.

Inicialmente, foi criado um conceito de design para o chassis pelo autor deste trabalho, utilizando a ferramenta Solid Works, o qual é mostrado na Figura 24, juntamente a uma vista explodida destacando cada componente. Essas geometrias foram posteriormente otimizadas e submetidas a testes mecânicos em ferramentas computacionais para avaliar os conceitos.

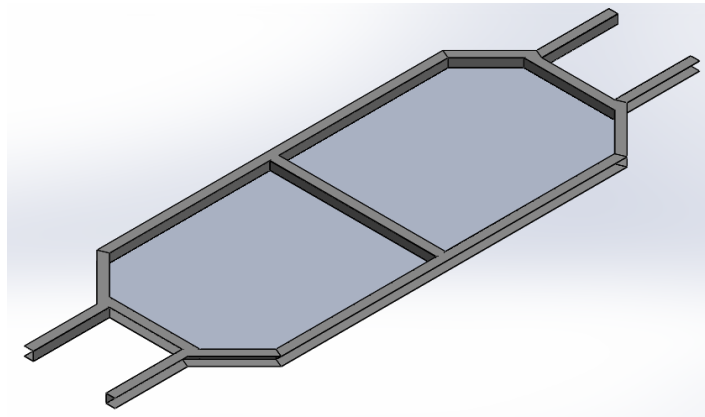
Figura 24 – Conceito inicial do chassi para o UC da equipe Eficem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Isolando o assoalho do conceito inicial (Figura 25), nota-se que o componente é composto por dois subcomponentes: uma estrutura vazada de caminho fechado formada por vigas, e uma estrutura plana formada por uma chapa fina, preenchendo a região central.

Figura 25 – Assoalho isolado do chassi



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Para seleção das soluções aplicáveis ao assoalho, foram feitas duas matrizes de Pugh adicionais para o subcomponente de vigas: uma para escolha de material e outra para escolha das características geométricas, mostradas nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Figura 26 – Matriz de Pugh para o material do chassi

Requisito	Fibra carbono	Aço avançado	Alumínio
A	++	++	-
B	++	0	+
C	--	+	+
D	-	0	+
F	0	0	+
G	0	+	-
Soma (+)	4	4	4
Soma (-)	3	0	2
Total	1	4	2

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 27 – Matriz de Pugh para o perfil de viga

Requisito	Perfil aberto	Perfil fechado
A	0	+
B	+	-
C	0	0
D	+	-
G	-	+
Soma (+)	2	2
Soma (-)	1	2
Total	1	0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Para o material da estrutura foram selecionadas 3 opções para análise, as quais são observadas com frequência em veículos similares. A fibra de carbono é um material muito utilizado em veículos pequenos de baixa série, e possui muitos benefícios como baixo peso e alta resistência, porém é penalizado pelos altos custos de aquisição e complexidade de fabricação. O alumínio é um material bastante comum, leve e barato, porém apresenta níveis de rigidez e resistência inferiores aos outros dois, e principalmente baixa resistência à fadiga, uma característica importante em aplicações dinâmicas.

A escolha do aço avançado se deve à utilização já estabelecida dessa classe de materiais na indústria automotiva para componentes estruturais, além da disponibilidade em fornecedores regionais, reduzindo custos de aquisição e fabricação. Com relação ao perfil de viga, o perfil aberto apresenta vantagens e desvantagens em relação ao perfil fechado. Entre as vantagens estão:

- Redução da massa com a largura reduzida das chapas
- Fabricação facilitada com dobragem e redução de linhas de solda

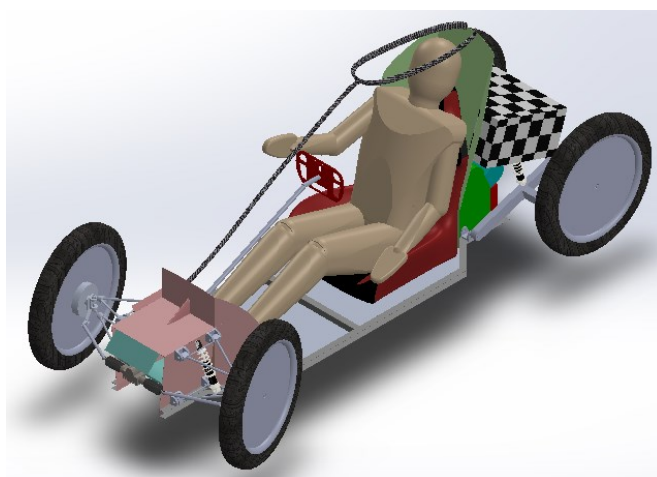
Algumas das desvantagens do perfil aberto em comparação com o fechado, no entanto, estão relacionadas à confiabilidade do projeto, como:

- Menor resistência à deformação
- Deslocamento do centro de cisalhamento da área transversal da viga

Apesar de uma redução da confiabilidade ser indesejada, a aplicação não deve gerar grandes solicitações sobre a estrutura, uma vez que o peso total do carro é limitado em 225 kg e a pista da competição tem um traçado simples, com poucas curvas. Como mencionado anteriormente, o objetivo do presente trabalho é justamente avaliar e validar a estrutura conceitual, estabelecendo os limites de operação.

Após a aplicação de matrizes e definição das soluções para cada sistema, os componentes individuais foram desenvolvidos preliminarmente por modelagem matemática, para efeito de visualização do conceito. O modelo inicial dos sistemas mecânicos do veículo é mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Conceito inicial de sistemas veiculares para o UC da equipe Eficem



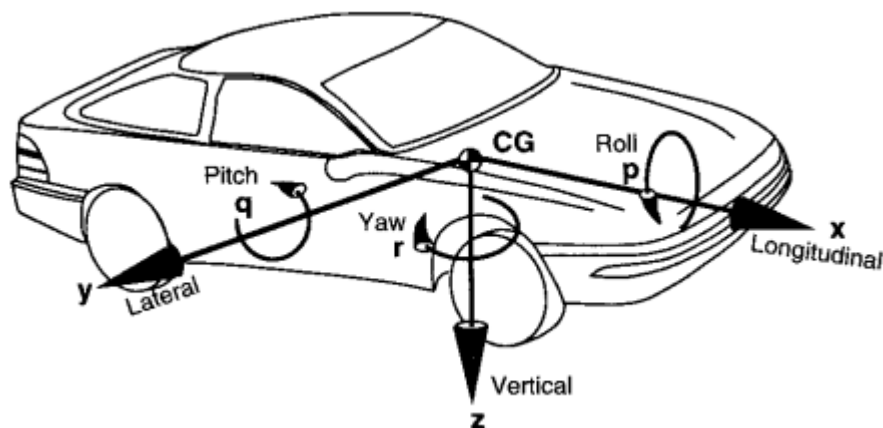
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

3.2.2. DIMENSÕES DE REFERÊNCIA

O projeto do chassi e seus subcomponentes foi desenvolvido de modo a comportar a montagem da carenagem de Mika (2021). Desse modo, suas dimensões estão dentro dos limites

físicos do modelo da carenagem. Antes de listar as dimensões de referência, é importante determinar o sistema de coordenadas utilizado. O sistema universal para projetos automotivos adotado pela SAE considera o eixo X na direção longitudinal apontando para a frente do veículo, o eixo Y na direção horizontal apontando para a lateral direita, e o eixo Z na vertical apontando para o solo, como mostrado na Figura 29.

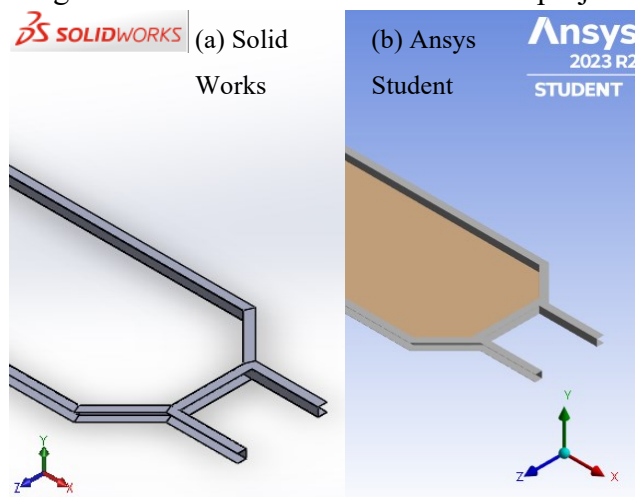
Figura 29 – Sistema de coordenadas SAE



Fonte: Gillespie (1992)

Nota-se que o sistema SAE está relacionado ao comportamento dinâmico do veículo, pois agrega os momentos gerados em cada eixo durante a movimentação. Entretanto, para efeitos de modelagem matemática, foi utilizado o sistema cartesiano padrão, com o eixo Y na vertical apontando para cima e o eixo Z na horizontal apontando para a lateral, o mesmo utilizado pelos softwares de desenho e simulação, como mostrado nas Figuras 30.a e 30.b.

Figura 30 – Sistema de coordenadas do projeto



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O dimensionamento da estrutura iniciou pela definição das dimensões do perfil da viga, com a utilização de referências tabeladas, padronizadas e disponibilizadas por grande parte das fornecedoras de perfis de aço. A preferência em utilizar dimensões tabeladas se deve ao fato de reduzir a quantidade de cálculos necessários para o projeto, uma vez que as referências tabeladas determinam o centro de cisalhamento para dimensões específicas das abas, da alma e da espessura de parede. Foi escolhido usar uma viga com as características apresentadas na Tabela 2.

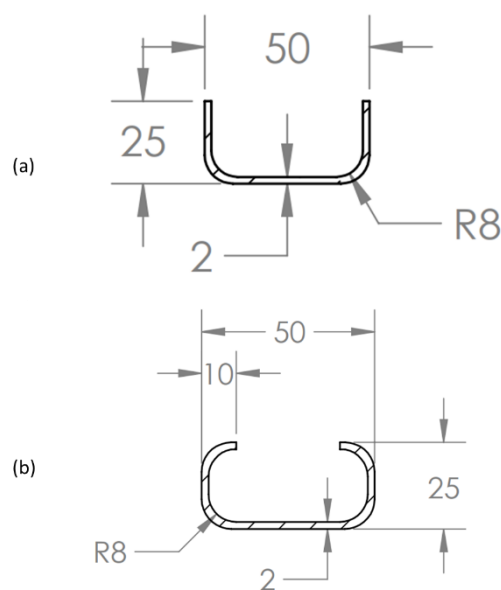
Tabela 1 – Dimensões do perfil de viga

Dimensão	Descrição	Valor [mm]
a	Comprimento da Alma	50,0
b	Comprimento das Abas	25,0
t	Espessura de parede	2,0
r	Raio das dobras	0,8
x_e	Distância horizontal entre o centro de cisalhamento e o centro da alma	9,0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Durante as simulações serão utilizadas, além do perfil U convencional, vigas com perfil U enrijecido. Os dois perfis de análise são mostrados nas Figuras 31.a e 31.b, respectivamente.

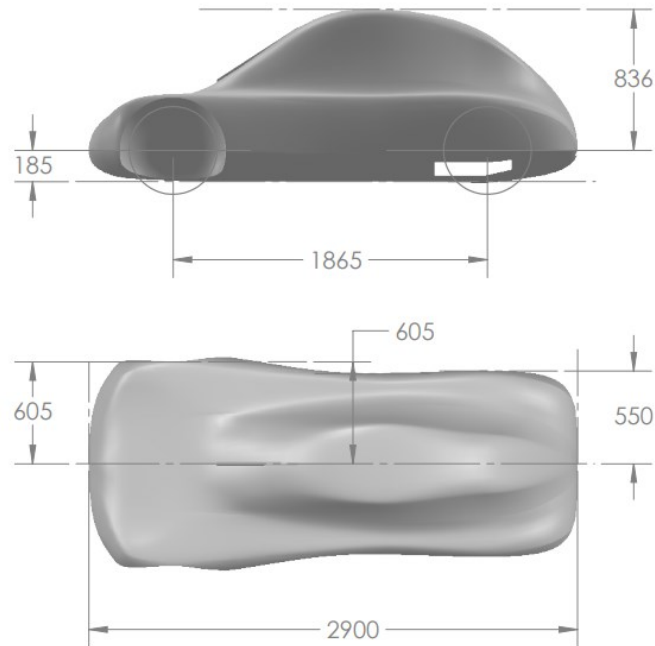
Figura 31 – Dimensões dos perfis de viga aplicados na estrutura [mm]



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Com relação às dimensões externas da estrutura, como já mencionado anteriormente, foram definidas de acordo com os limites físicos da carenagem, os quais são mostrados na Figura 32.

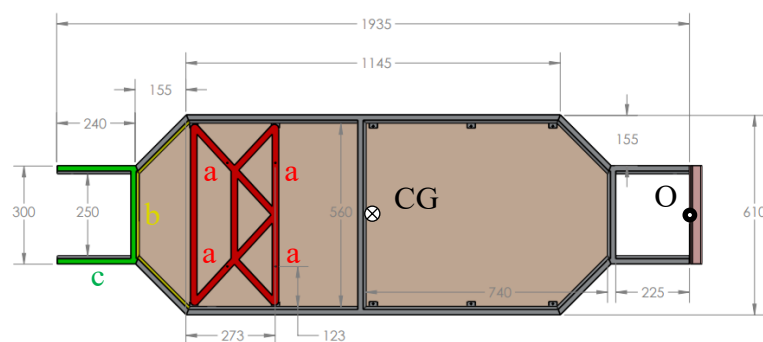
Figura 32 – Dimensões da carenagem em milímetros



Fonte: Mika (2021)

Algumas dimensões internas também são importantes para o desenvolvimento do layout inicial, como a localização dos pontos de fixação do sistema de powertrain, do anteparo traseiro e do assento do piloto. A fixação da direção, apesar de importante não refletirá em carregamentos críticos à estrutura, devido à natureza de baixa intensidade do peso dos componentes e das cargas dinâmicas atuando sobre esse sistema. As dimensões da estrutura são mostradas na Figura 33.

Figura 33 – Dimensões iniciais do assoalho



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Os pontos de apoio do assento estão identificados pela letra *a* e destacados em vermelho. A fixação do anteparo, o qual será soldado à estrutura de vigas, será feita ao longo de uma linha, identificada pela letra *b* e destacada em amarelo. A fixação do powertrain será feita sobre uma chapa apoiada na área destacada em verde *c*. A união dos elementos de viga foi realizada através de chanfros nas extremidades.

A localização do CG da estrutura também é fundamental para a análise, pois algumas situações dinâmicas serão simplificadas com cálculos envolvendo essa referência. A determinação do ponto pode ser feita diretamente no software CAD, o qual indicou que o ponto está deslocado em 996,3 mm da origem, indicada pelo ponto *O* da Figura 33.

3.2.3. FORÇAS APLICADAS

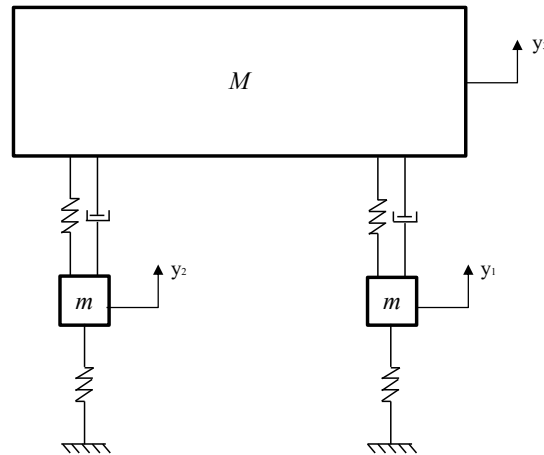
A definição dos carregamentos aplicados sobre a estrutura é uma etapa fundamental para o projeto, pois permite configurar corretamente a simulação e garantir o funcionamento adequado dos componentes com previsibilidade dos seus limites e modos de falha. Algumas das cargas aplicadas sobre o veículo já estão indicadas no próprio regulamento da competição, o qual estabelece o limite máximo para o peso do veículo e mínimo do piloto, além de cargas de teste para avaliação da estrutura. Conforme o artigo 20, o peso mínimo do piloto deve ser 70,0 kg. O artigo 45 determina que o peso máximo do veículo, excluindo o piloto, deve ser 225,0 kg. O artigo 26 indica que será aplicada uma força de 700,0 N sobre a barra de rolagem em variadas direções, de modo a avaliar a segurança da estrutura.

Considerando os valores indicados, podemos calcular a força peso total do veículo, W_t :

$$W_t = (225 + 70) \cdot 9,81 + 700 = 3.594 \text{ N} \quad \text{Eq. (5)}$$

Essa força não estará concentrada em um ponto único da estrutura, mas distribuída entre os pontos de sustentação que, no caso de um carro, são localizados nos contatos pneu-solo das quatro rodas. Uma observação importante é que a força total sobre a estrutura do chassis será inferior à força calculada, uma vez que parte do peso total do veículo consiste nos conjuntos suspensão-rodas, chamados de massa não-suspensa. Os conjuntos de suspensão dos eixos dianteiro e traseiro podem ser agrupados entre si, e representados apenas por dois objetos de massa não suspensa em um modelo matemático da rigidez do veículo, mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Modelo de rigidez das massas do veículo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O modelo matemático com representação da rigidez e do amortecimento das massas é fundamental em uma análise dinâmica, porém, para fins de simplificação, neste trabalho todas as forças foram aplicadas considerando o equilíbrio estático do veículo. O carregamento em cada eixo, em uma situação estática, ao nível do solo e pode ser calculado como:

$$W_f = W \cdot \frac{c}{L} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$W_r = W \cdot \frac{b}{L} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde W , W_f e W_r representam as forças peso do veículo atuando no CG, no eixo dianteiro e no eixo traseiro, respectivamente, L representa a distância entre-eixos, b representa a distância do eixo dianteiro ao CG, e c a distância do eixo traseiro ao CG. As forças resultantes de situações dinâmicas foram simplificadas em forças de equilíbrio estático, portanto, a análise dos modos vibracionais foi desconsiderada. Para isso, a força resultante em uma situação de frenagem foi calculada em relação ao CG conforme a Equação 8 (Gillespie, 1992).

$$\frac{V_0^2 - V_f^2}{2} = \frac{F_{xt}}{M} \cdot X \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

V_0 = Velocidade inicial

V_f = Velocidade final

F_{xt}	=	Força total de frenagem
X	=	Distância de frenagem
M	=	Massa do veículo

Considerando a velocidade inicial de 50 km/h, velocidade final nula e distância de frenagem de 5 m, podemos substituir na Equação 7 e encontrar uma força total de frenagem igual a 7.068 N. Essa força deverá atuar nas quatro rodas, e deve haver uma transferência de peso entre os eixos dianteiro e traseiro durante a frenagem, a qual dependerá das características dinâmicas do veículo.

Para simplificação, será considerada uma distribuição de aproximadamente 80%-20% entre os eixos dianteiro e traseiro, respectivamente, e a força deve possuir vetores nas direções X e Y referentes à reação do solo e do peso do veículo. Simplificando os vetores para a mesma intensidade, ou seja, um ângulo de 45° entre o vetor da força total e o solo, encontramos a força máxima aproximada no eixo dianteiro na direção vertical $F_{xt,f} \approx 4.000$ N, equivalente a 408 kg.

3.3. ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS INTERNOS

Uma vez calculadas as forças aplicadas sobre a estrutura, é possível determinar as resultantes dos esforços internos do corpo, o que é fundamental para dimensionar corretamente a estrutura e selecionar os materiais. Os esforços não dependem das propriedades do material, porém os cálculos dependem da sua característica de falha, ou seja, se é dúctil ou frágil. Nesse caso, os esforços internos devem ser calculados para os dois subcomponentes do assoalho, tanto para o elemento de vigas quanto para o elemento de chapa plana.

Para início dos cálculos, é necessário que seja definida uma espessura preliminar para as paredes da viga, nesse caso foi escolhida a espessura de 2,0 mm uma vez que esse valor é observado no fornecimento de diversos aços avançados e, portanto, não restringe a seleção de materiais a poucas opções. A fórmula para a tensão máxima de cisalhamento atuando na área transversal da viga é mostrada na Equação 9.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V \times Q}{I \times b} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

V = Força cortante

Q = Momento de inércia de primeira ordem da área superior ou inferior ao ponto de interesse

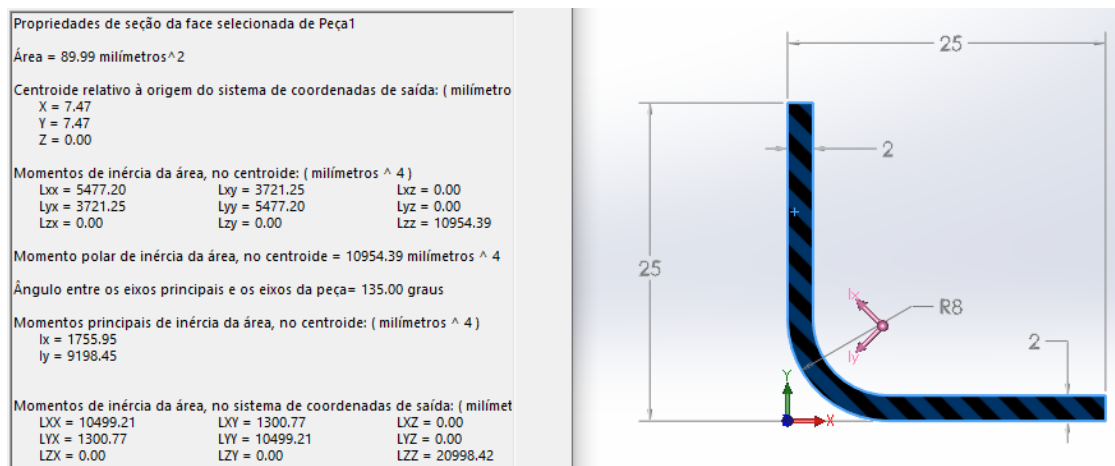
I = Momento de inércia de segunda ordem da área

b = Largura da seção transversal da área no ponto de análise da tensão

A força cortante V pode ser encontrada fazendo uma análise de equilíbrio estático na viga. Para isso, considera-se uma viga engastada em uma extremidade, com a força externa sendo aplicada na extremidade oposta. Não havendo qualquer outro ponto de apoio ou força aplicada, a reação na extremidade engastada terá a mesma intensidade da força aplicada e, portanto, da força cortante ao longo do comprimento da viga, sendo V igual a 4.000 N para o caso crítico da análise.

O ponto de interesse, no qual deseja-se avaliar a tensão máxima, fica localizado no eixo de simetria da área. A distância entre o centroide da área do elemento definido pela seção onde b é medido e o eixo neutro pode ser calculada pela modelagem da área no SolidWorks, conforme a Figura 35. O valor encontrado para \bar{y}' foi de 17,53 mm, e Q pode ser determinado pela Equação 10.

Figura 35 – Propriedades da seção da área transversal (meia área)

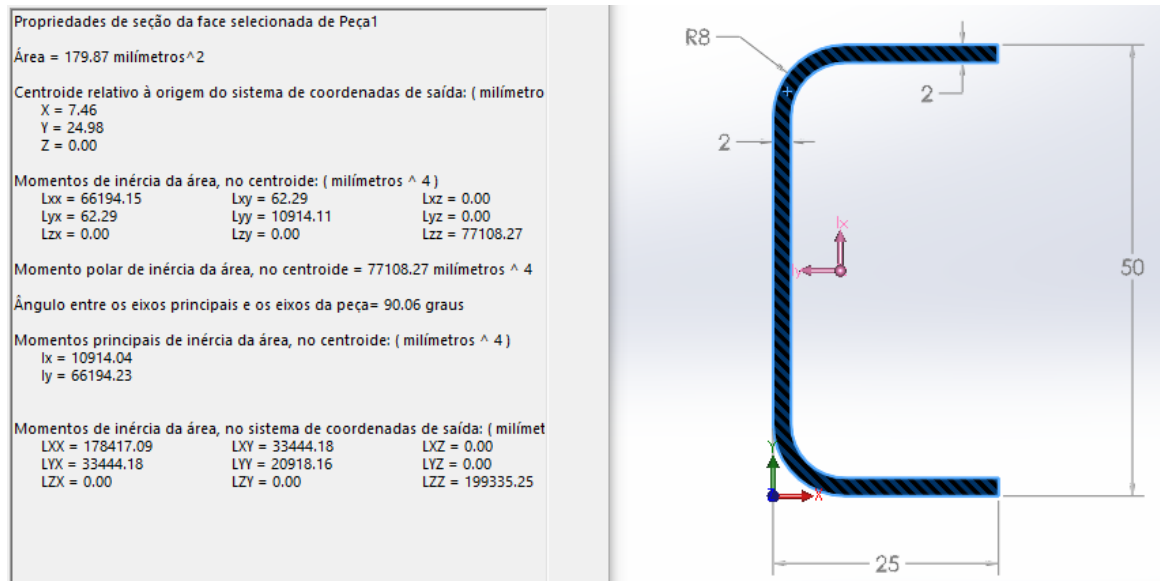


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

$$Q = \int_{A'} y dA' = \bar{y}' A' = (25 - 7,47) \times 89,99 = 1.577,5 \text{ mm}^3 \quad \text{Eq. (10)}$$

A Figura 36 mostra o momento de inércia I da área total, indicado no SolidWorks como o Momento principal de inércia da área em relação ao eixo X (M_x).

Figura 36 – Propriedades da seção da área transversal (área completa)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Como a análise da tensão será realizada no ponto de simetria da área total, o valor da largura b coincide com o da espessura t da viga, igual a 2 mm. A tensão cisalhante na direção Y da área da seção transversal será, portanto:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V \times Q}{I \times b} = \frac{4.000 \times 1.577,5}{10.914,0 \times 2,0} = 289 \text{ MPa} \quad \text{Eq. (11)}$$

Os cálculos realizados acima foram simplificados, de modo que não representam com precisão as forças de reação da estrutura e, portanto, são apenas referências utilizadas como pré-requisitos para a seleção de materiais.

3.4. SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção dos materiais para análise e aplicação na estrutura é uma etapa fundamental, e exige que haja um conhecimento prévio das solicitações externas ao corpo e das respostas internas do material. O módulo da tensão de cisalhamento máxima pode ser considerado um fator limitante na escolha, pois o módulo da resistência ao escoamento do material deve ser superior à tensão máxima à qual estará submetido.

Todavia, é necessário considerar um coeficiente de segurança para os limites mecânicos do material, de modo que haja margem para a ocorrência de falhas, e um dos critérios

preferidos para a determinação do coeficiente é a Teoria da energia de distorção de von Mises-Hencky (NORTON, 2013), a qual determina que, para um cenário de cisalhamento puro, a tensão normal de escoamento σ_y deve ser:

$$\sigma_y = \tau_{m\acute{a}x}/0,577 = 501 \text{ MPa} \quad \text{Eq. (12)}$$

O critério acima é válido apenas para materiais dúcteis, e foi adotado como pré-requisito na escolha dos materiais da estrutura. Os materiais devem, portanto, possuir especificações técnicas que indiquem uma tensão limite de escoamento igual ou superior a 522 MPa. A tensão limite de ruptura será, naturalmente, superior a esse valor.

Vale ressaltar que as características mecânicas do material que irão influenciar o resultado da simulação estrutural estática, em termos de tensão interna e alongamento resultantes, não estão atreladas aos limites de escoamento e fratura, mas sim ao módulo elástico e ao coeficiente de Poisson de cada material. Outras características também podem influenciar, contudo, não foram disponibilizadas pelos fabricantes e, portanto, consideradas nessa análise.

Para o caso do elemento de chapa plana, o material escolhido foi a liga de titânio Ti-6Al-4V, pois a equipe Eficem possui uma chapa em seu estoque e pretende utilizar no projeto, e de acordo com as propriedades do material, mostradas na Tabela 3, sua aplicação é adequada.

Tabela 2 – Propriedades do material selecionado para a chapa plana

Material	Tensão de escoamento	Coefficiente de Poisson	Peso específico
Ti-6Al-4V	846 MPa	0,34	4.429 kg/m ³

Fonte: Granta (2023)

Para o material do elemento de vigas, foi realizada uma pesquisa exploratória de fornecedores de aços avançados e suas opções disponíveis no mercado nacional, dos quais foram selecionados 3 materiais para avaliação. Os materiais possuem diferentes graus de microestrutura e limites de resistência mecânica, possibilitando uma análise ampla dos limites da estrutura. A Tabela 4 detalha as principais características dos materiais utilizadas (Anexo A).

Tabela 3 – Seleção de materiais e suas propriedades

Material	Usibor® 2000	Docol® 1700M	Docol® HR550LA
Tensão de escoamento	1.462 MPa	1.350 MPa	550 MPa
Tensão de Ruptura	1.848 MPa	1.700 MPa	610 MPa
Módulo de Young	110 GPa	200 GPa	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,27	0,28	0,28
Faixa de espessuras	0,8-2,0 mm	1,0-2,1 mm	2,0-6,0 mm
Massa específica	N/D	7.850 kg/m ³	7.850 kg/m ³
Grau do aço	PHS – Endurecido por prensagem	MS – Martensítico	HSLA – Alta resistência, baixa liga

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

É importante observar que os materiais possuem requisitos de processamento determinados pelo fabricante. Para o aço Docol® 1700M, considerando a espessura t de 2,0 mm, é determinado o raio de dobra mínimo para uma conformação de 90° igual a quatro vezes a espessura (SSAB, 2022). Esse é o maior valor entre os materiais em questão, portanto, foi utilizado como referência na construção dos perfis de viga.

3.5. SIMULAÇÃO PARA SOLUÇÃO NUMÉRICA

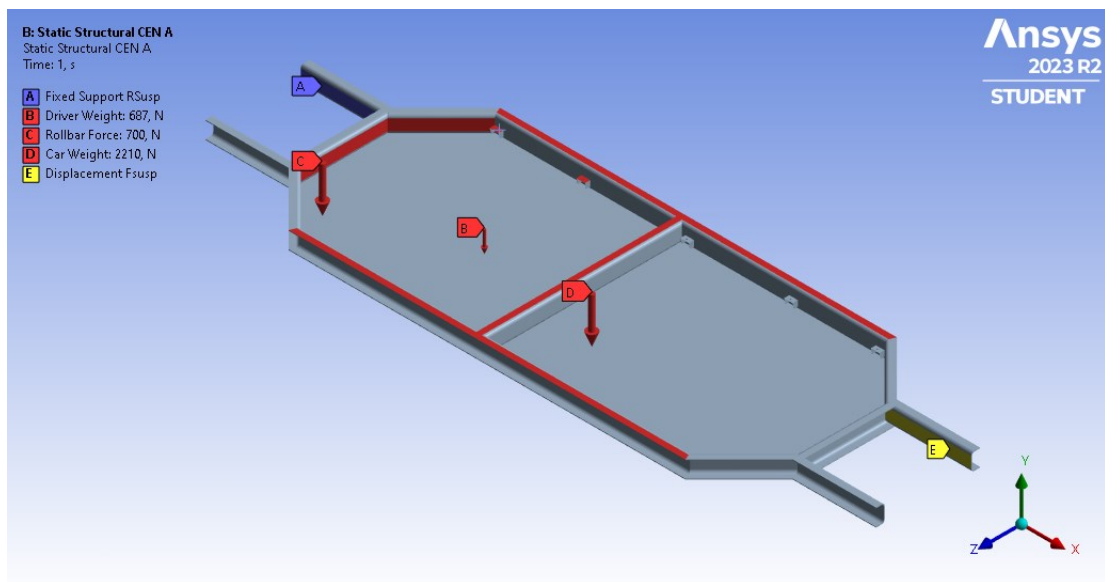
A análise do componente foi realizada integralmente nas ferramentas computacionais SolidWorks 2017 e Ansys Student 2023 R2, para desenvolvimento da geometria (CAD) e realização das simulações estruturais (CAE), respectivamente. A geometria do componente é composta por dois sólidos, e as dimensões utilizadas no desenvolvimento do modelo foram detalhadas no tópico 3.2.2. Os materiais selecionados no tópico anterior foram incorporados à biblioteca de materiais do Ansys, e individualmente atribuídos ao modelo, contabilizando três cenários de simulação para o material.

Para análise da estrutura, foram considerados ainda: dois cenários de geometria, o primeiro com a geometria original, denominada α e o segundo com uma geometria otimizada, denominada β , com a inclusão de um para-choques como componente de reforço e utilização

de perfil de viga enrijecido; e os cenários de carregamento externo A, B e C, descritos a seguir, contabilizando 18 configurações distintas de simulação.

- A - Região de suporte da suspensão traseira fixadas (A) e suporte da suspensão dianteira apoiada com liberdade para movimentar-se no eixo X (E), com aplicação das cargas referentes ao peso total do veículo no CG (D), à força de teste da barra de rolagem nas superfícies de contato com o anteparo (C), e ao peso do piloto em um ponto remoto representando o suporte do assento (B), submetendo a estrutura à flexão vertical, conforme Figura 37;

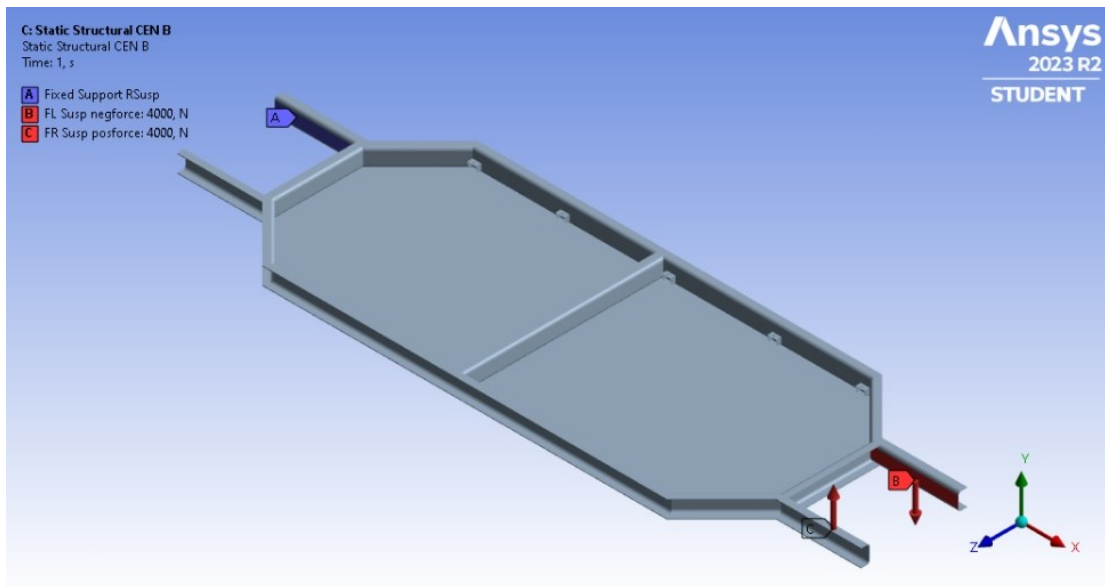
Figura 37 – Condições de simulação no cenário A



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

- B - Regiões de suporte da suspensão traseira fixadas (A), cargas de módulo igual à componente vertical da força de frenagem aplicadas em nós específicos, localizados nas faces de apoio dos suportes de suspensão dianteiros, em direções opostas (B, C), criando um momento torçor ao longo do eixo longitudinal, conforme Figura 38. Ainda foram incluídas as medições de alongamento no eixo Y para os nós das extremidades dos suportes de suspensão dianteiro;

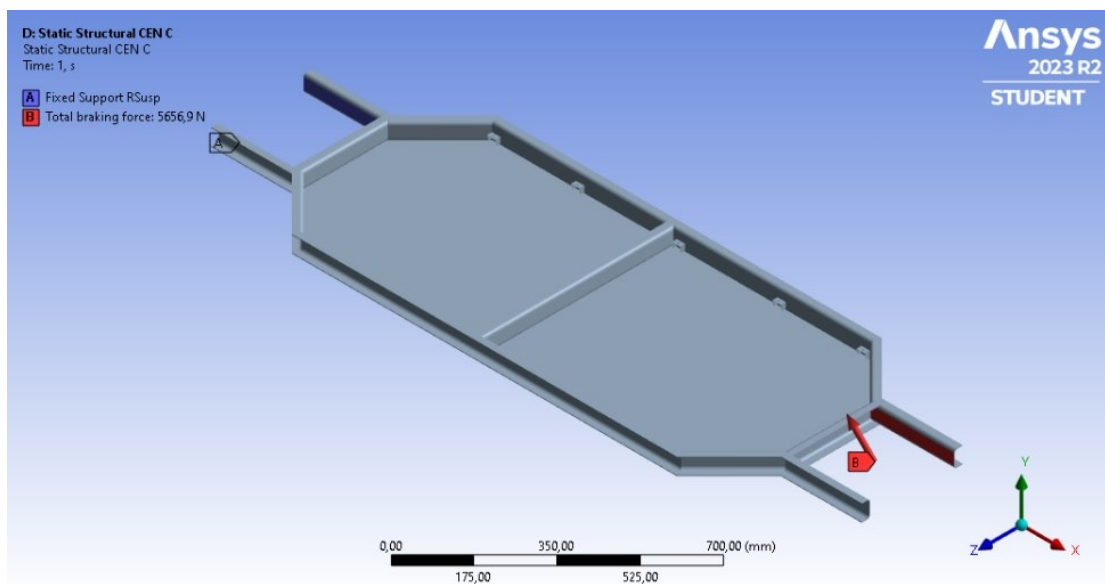
Figura 38 - Condições de simulação no cenário B



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

C - Regiões de suporte da suspensão traseira fixadas (A), carga referente à força total de frenagem aplicada na extremidade dianteira (B), conforme Figura 39.

Figura 39 – Condições de simulação no cenário C



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

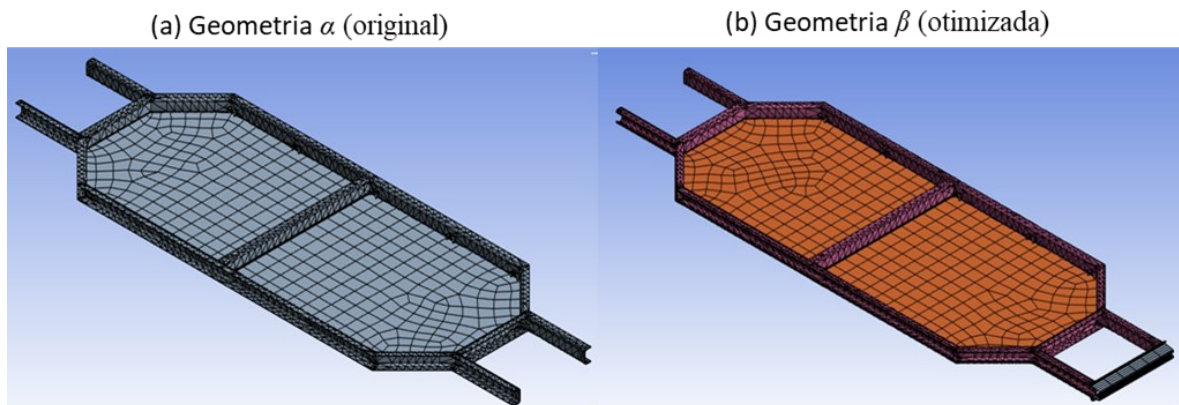
Os 3 cenários de aplicação de forças são mostrados de maneira resumida no Quadro 3.

Quadro 3 – Cenários de simulação

Cenário A	Condições de teste da inspeção técnica (peso do veículo e do piloto + força sobre o anteparo): $F_y = -3.594 \text{ N}$
Cenário B	Teste torcional: $F_{y,1} = 4.000 \text{ N}$, $F_{y,2} = -4.000 \text{ N}$, $d = 125 \text{ mm}$
Cenário C	Teste de frenagem crítica: $F_y = 4.000 \text{ N}$, $F_x = -4.000 \text{ N}$

A construção da geometria de elementos finitos foi realizada utilizando uma malha automática do sistema, configurada para elementos tetraédricos com tamanho máximo de 50 mm, de ordem controlada pelo programa. A malha da geometria α , mostrada na Figura 40.a, ficou com 26,3 mil nós e 11,4 mil elementos, e a malha da geometria β (Figura 40.b) com 42,1 mil nós e 18,6 mil elementos.

Figura 40 – Malhas de elementos finitos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante as simulações estruturais realizadas no Ansys, em regime estático e com configurações de material versus carregamento variadas, conforme os cenários indicados no final do capítulo anterior. A análise se desdobrará sobre os resultados de alongamento e tensão de von Mises, configurados como as saídas desejadas para cada cenário, de modo que seja possibilitada uma comparação entre os três materiais nesses dois parâmetros e o cálculo da rigidez torcional para cada caso. O parâmetro alongamento deve indicar o deslocamento máximo dos nós críticos da malha, e a tensão de von Mises irá indicar as regiões críticas para ocorrência de falhas por escoamento.

A análise de alongamento é importante para estimar os deslocamentos da estrutura do assoalho ocasionados pelas cargas externas, pois permite calcular a rigidez torcional do corpo e localizar os pontos de ancoragem das estruturas complementares do chassi, que evitarão deformações excessivas. A análise da tensão exerce um papel igualmente fundamental para o projeto do componente, afinal os resultados de tensão devem explicitar as regiões da estrutura que estarão sujeitas a uma resultante interna superior aos limites mecânicos do material.

Portanto, os resultados apresentados a seguir refletem uma etapa anterior ao projeto detalhado da estrutura, na qual os pontos críticos e passíveis de otimizações são identificados e qualificados, de modo que as decisões tomadas durante as etapas seguintes para melhorias de projeto possam ser aplicadas estrategicamente.

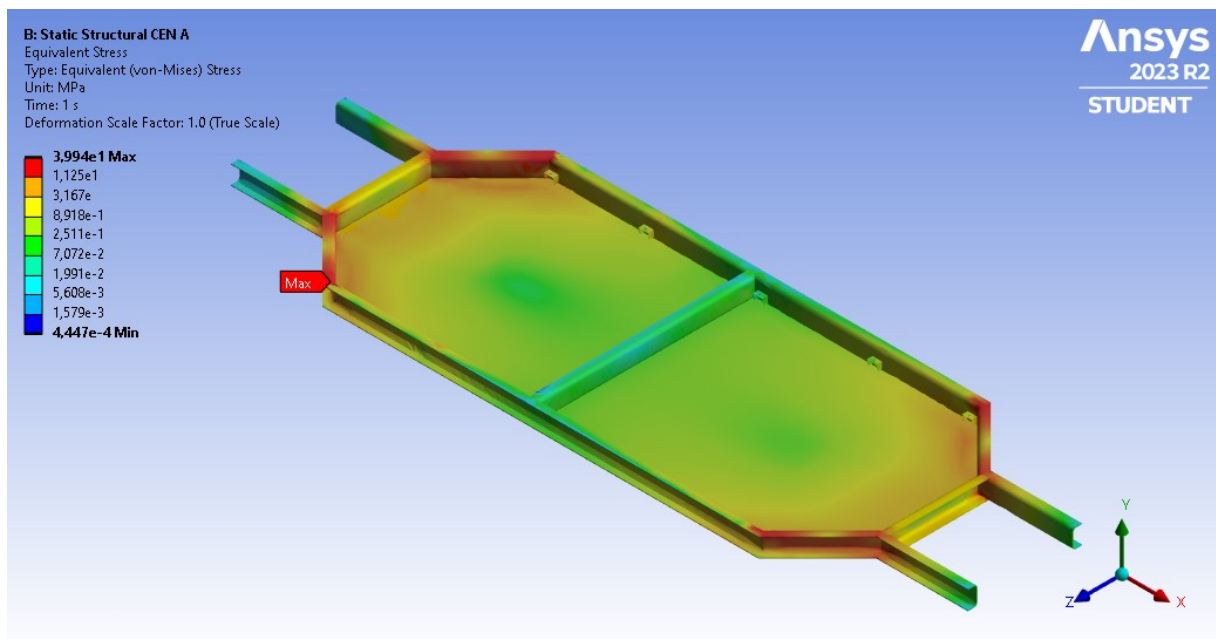
4.1. RESPOSTAS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

A simulação da estrutura fornece os dados de tensão e deformação absolutos para cada nó da malha. Esses dados podem ser analisados de forma numérica ou gráfica em um plano, ou até em três dimensões, através da plotagem sobre o modelo geométrico. Essas análises devem ser vistas como complementares, pois a verificação dos valores individuais nos nós pelo método numérico permite interpretar com precisão os valores nos pontos de interesse, identificados visualmente pelo método gráfico.

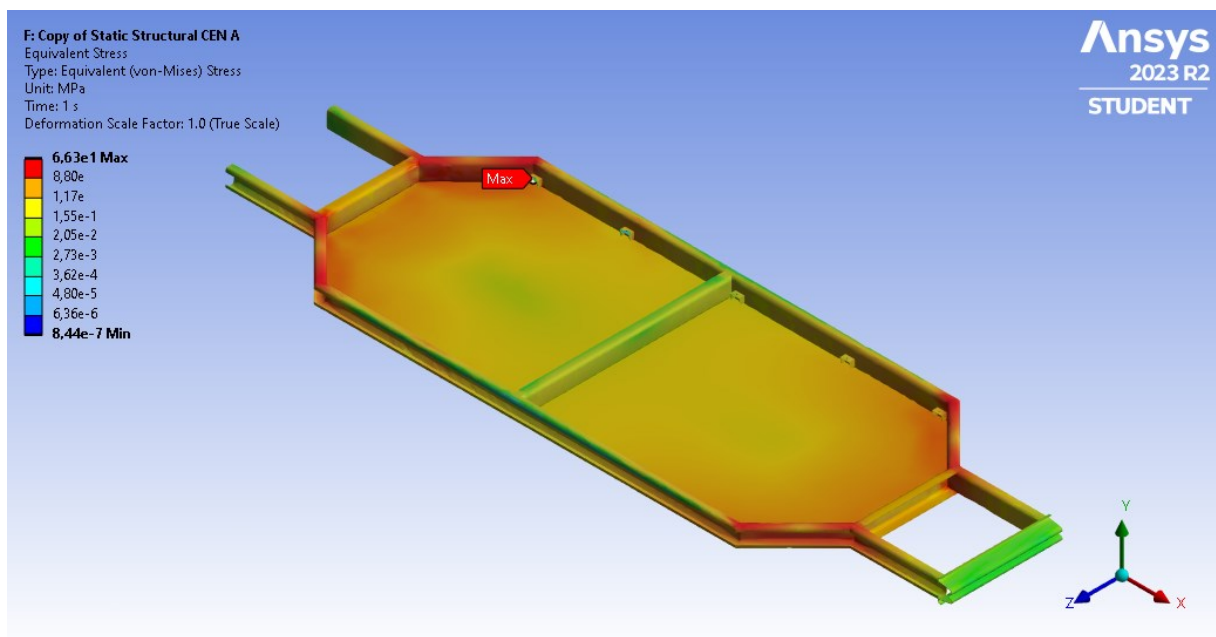
As Figuras 41, 42 e 43 mostram as regiões de tensão na estrutura, para as geometrias original e otimizada, com o material Docol[®] 1700M e em cada um dos três cenários simulados, respectivamente.

Figura 41 – Tensão resultante sobre a estrutura (Docol® 1700M, cenário A)

(a) Geometria original



(b) Geometria otimizada



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

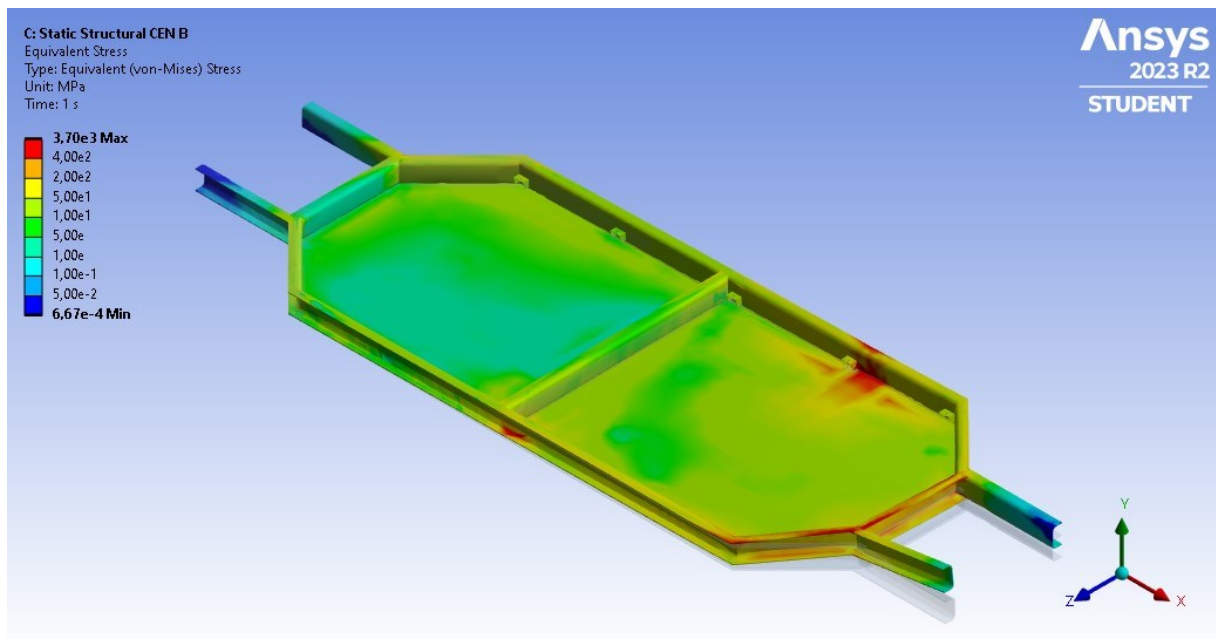
As respostas do cenário A foram condizentes com o nível inferior de forças aplicadas, apresentando pequenas deformações e baixas tensões resultantes, conforme mostrado na Figura 41. A geometria α apresentou tensões máximas entre 40 MPa e 66 MPa, e deformações de até 0,15 mm, que podem ser considerados resultados com efeitos desprezíveis, enquanto β apresentou resultados ainda mais atenuados. Isso indica que os limites mecânicos do

componente são seguros para situações estacionárias, com sustentação somente do próprio peso do veículo.

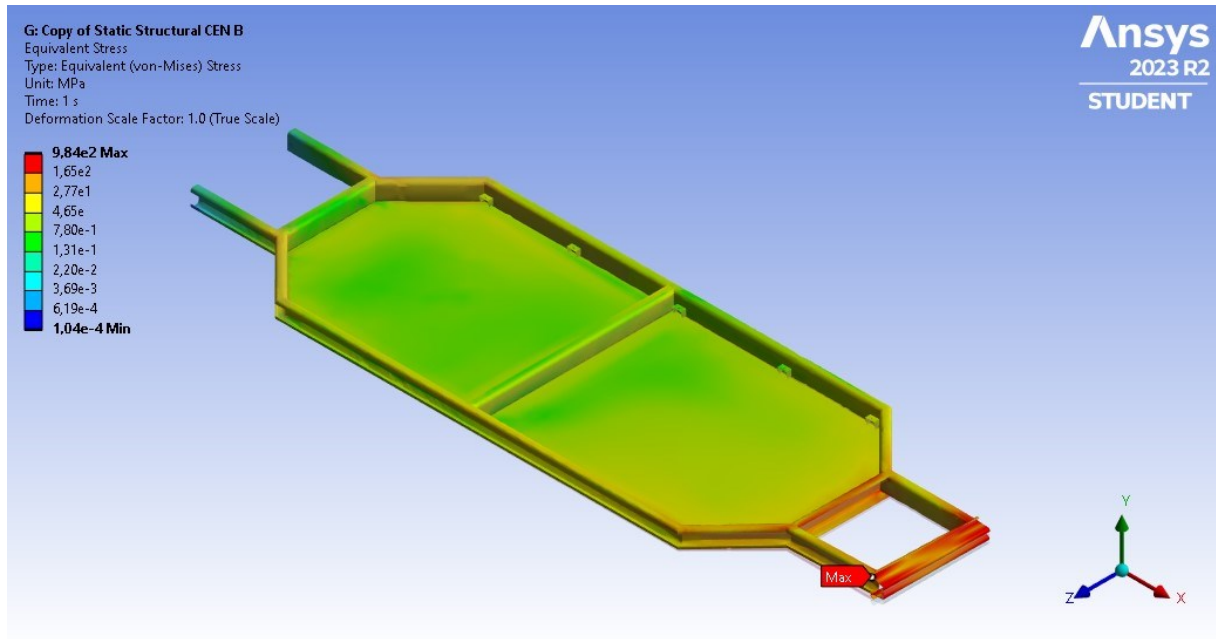
Analisando as Figuras 42 e 43, observa-se que os cenários B e C, referentes à aplicação de carga torcional e carga flexional sobre o eixo dianteiro, respectivamente, provocaram tensões internas que extrapolam o limite de escoamento teórico, calculado na seção 3.4, fenômeno que foi observado também na simulação dos outros materiais. O cenário B, no entanto, apresentou tensões resultantes máximas inferiores aos limites mecânicos dos materiais Usibor[®] 2000 e Docol[®] 1700M para a geometria otimizada, o que não foi observado na geometria original, que apresentou tensões máximas entre 3,6 GPa e 4,1 GPa, respectivamente.

Figura 42 – Tensão resultante sobre a estrutura (Docol[®] 1700M, cenário B)

(a) Geometria original



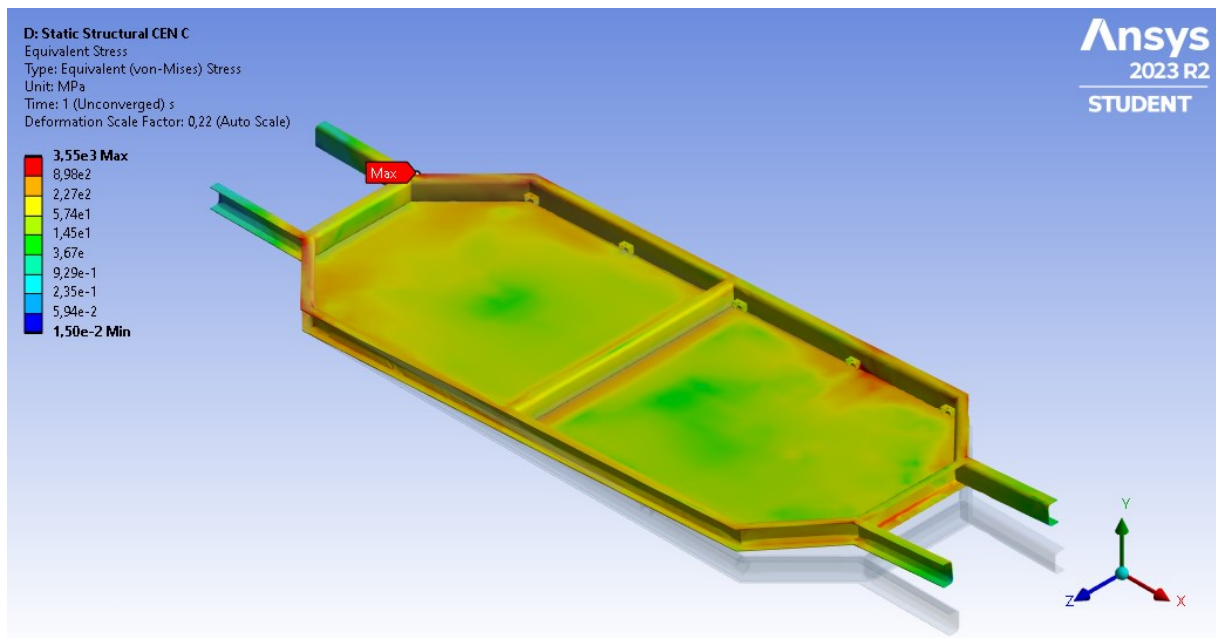
(b) Geometria otimizada



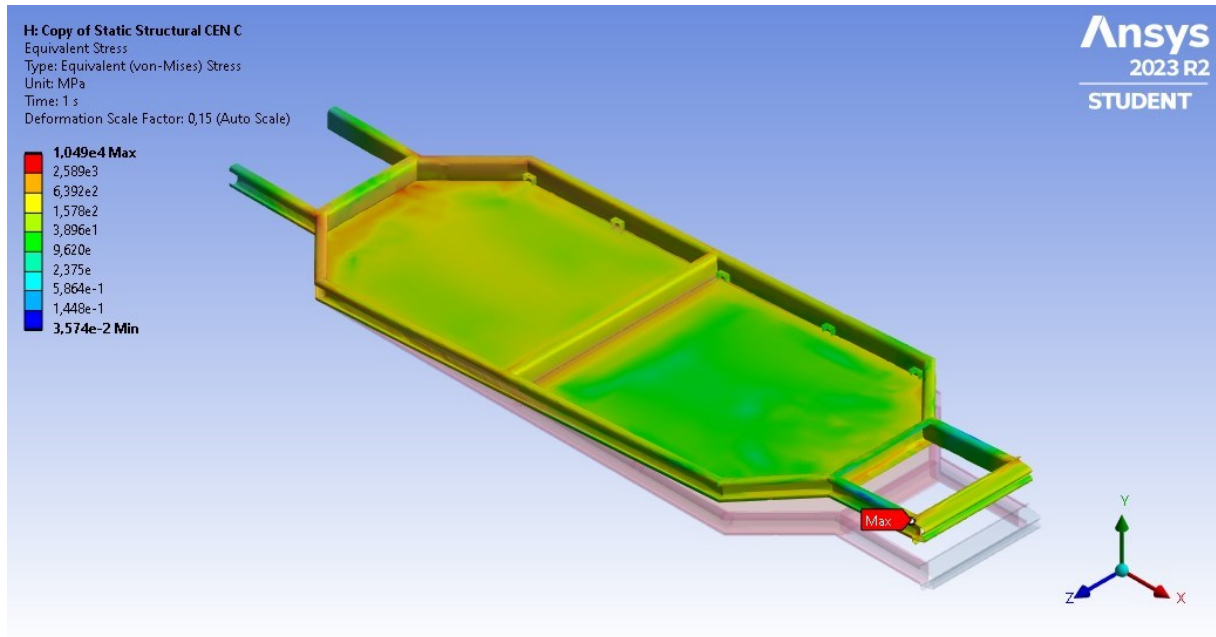
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 43 – Tensão resultante sobre a estrutura (Docol® 1700M, cenário C)

(a) Geometria original



(b) Geometria otimizada



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Dentre os três cenários, o C foi o único que apresentou tensões resultantes e deformações extravagantes, de até 10,4 GPa para o Usibor[®] e 5,4 GPa para os aços Docol[®], mostrando que há sensibilidade na estrutura a cargas axiais combinadas com cargas de flexão.

Como mencionado no capítulo anterior, os parâmetros dos materiais selecionados que realmente influenciam os resultados da simulação são o módulo de Young E e o coeficiente de Poisson ν , enquanto os limites de escoamento e ruptura ajudam a identificar se o material estará sujeito a falhas considerando os resultados observados. Na Tabela 4 são mostrados os valores máximos de tensão e deslocamento observados no cenário B, a quantidade percentual de nós da malha que estão sujeitos a tensões acima dos limites de escoamento de cada material, além da rigidez torcional no eixo longitudinal (X).

Tabela 4 – Resultados do cenário B para todas as configurações

Material	Usibor [®] 2000		Docol [®] 1700M		Docol [®] HR550LA	
	Original	Otimizada	Original	Otimizada	Original	Otimizada
Tensão máxima [MPa]	3.696,5	983,9	4.096,5	981,7	4.096,5	981,7
Tensão média [MPa]	68,2	23,7	80,2	23,4	80,2	23,4

Nós sujeitos a tensões críticas [%]	0,12	0,0	0,28	0,0	1,9	0,24
Deslocamento máximo [mm]	67,5	14,4	45,8	6,1	45,8	6,1
Rigidez torcional [N.m/rad]	1.009,8	4.340,8	1.424,3	10.154,3	1.424,3	10.154,3

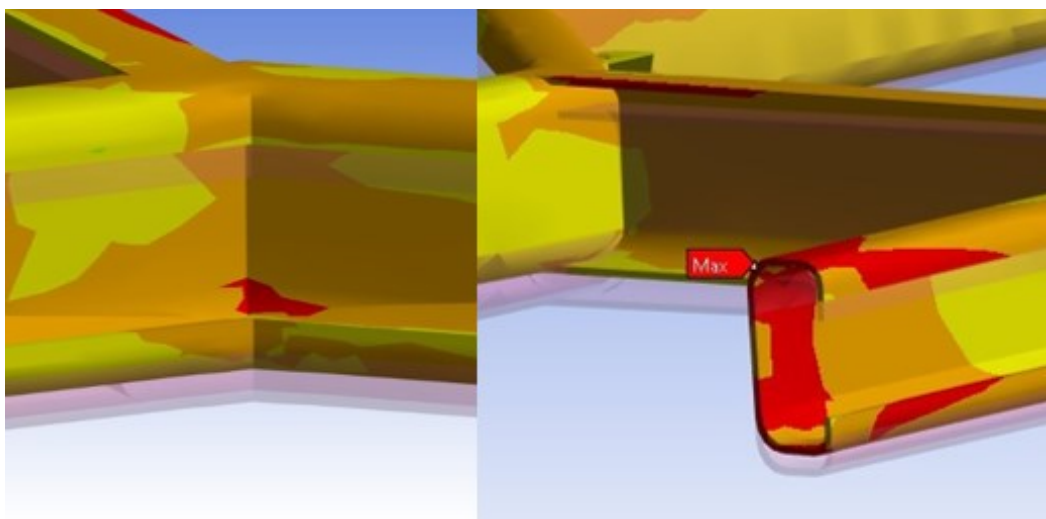
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A geometria reforçada apresentou melhor comportamento que a original no teste torcional, e no caso do aço Docol[®] 1700M os melhores resultados de alongamento e rigidez torcional, além de uma margem aceitável entre as maiores tensões resultantes e a resistência mecânica do material. A deformação máxima apresentada, caracterizada pela razão entre o deslocamento dos nós e o comprimento total, foi de aproximadamente 2%.

O aço Usibor[®] 2000 apresentou deslocamentos maiores que os demais, sendo que o valor máximo representa uma deformação superior a 6%, além da menor rigidez torcional. No entanto, a margem entre a tensão máxima resultante e a tensão de escoamento do material é adequada, o que qualifica o aço em questão como adequado para a aplicação.

Já o aço Docol[®] HR550LA não pode ser considerado inadequado por apresentar pontos de tensão acima do limite de escoamento do material, afinal o chassi deve ser composto por elementos estruturais adicionais, que podem otimizar o comportamento e evitar a falha. A Figura 44 destaca algumas das regiões de tensão limite na geometria reforçada, observadas no cenário B para os três materiais.

Figura 44 – Regiões críticas da geometria otimizada



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

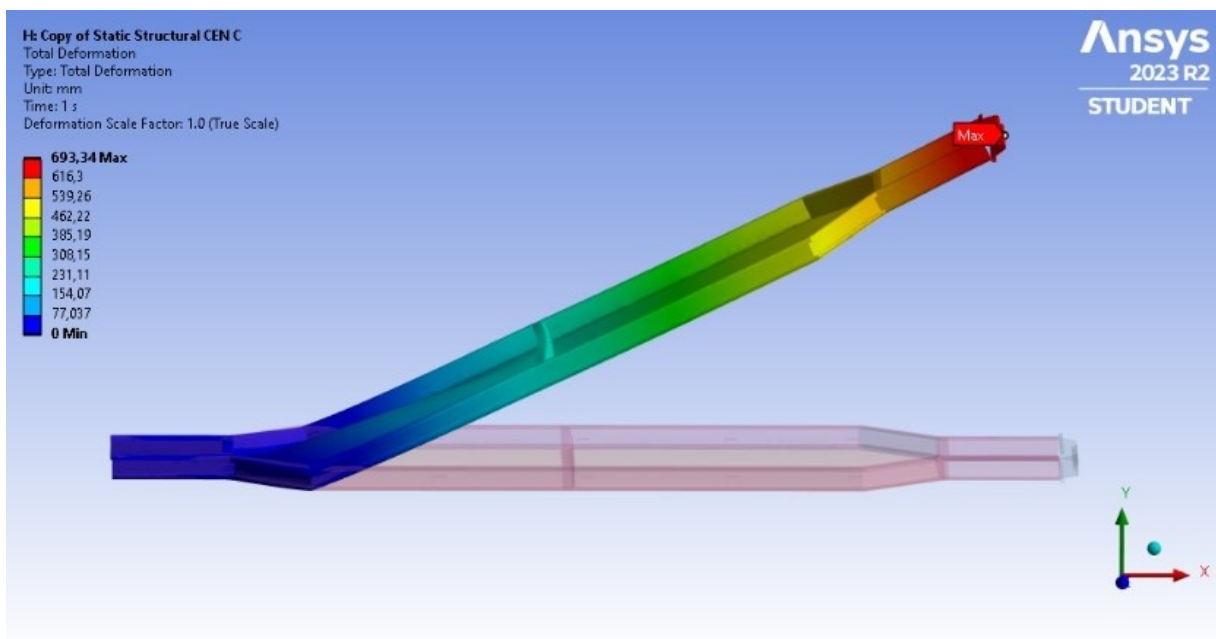
Nota-se que algumas regiões de concentração de tensão são localizadas em quinas e cantos vivos, o que pode ser agravado pela qualidade reduzida da malha. Do mesmo modo, outra região crítica é a face de contato entre a extremidade da viga e o para-choque, que pode não representar a interação real entre os dois elementos.

A qualidade da malha foi impactada pelo limite de número de elementos imposto pela versão estudantil do Ansys, o que acabou reduzindo a definição da geometria e gerou pequenas faces anguladas onde deveria haver apenas uma face curva. Essa característica promove um efeito de pequenos pontos de concentração de tensão, e aumenta a resultante interna da região.

Partindo para uma comparação entre as geometrias, é notável o comportamento favorável da geometria otimizada, exibindo níveis muito mais baixos de tensão e elementos críticos, além de deformações minimizadas que aumentam a rigidez torcional. Isso indica que a utilização de viga enrijecida e componentes de reforço pode ser favorável para o comportamento final da estrutura.

O cenário C contrastou com A, uma vez que as tensões e deformações resultantes extrapolaram significativamente os limites aceitáveis. A Figura 45 mostra o deslocamento resultante da geometria β . Nota-se que a estrutura flexionou na região de união do elemento de viga diagonal com os elementos longitudinais.

Figura 45 – Deslocamento total, cenário C; β ;Usibor[®] 2000 (vista lateral)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Essa reação é especialmente importante para o projeto preliminar, uma vez que fornece ao projetista a possibilidade de propor soluções para o problema observado. Dentre as possíveis abordagens da solução, duas se podem ser destacadas: a otimização geométrica e a otimização de material da região.

A abordagem geométrica requer que o componente seja reforçado por um aumento de espessura ou um incremento de elementos na estrutura, enquanto a abordagem de material requer que o material da região seja alterado para resistir a maiores esforços, ou que o material de outra região seja alterado para resistir a menos esforços e, portanto, falhar antes. Para falhas substanciais, como a observada, é importante que as duas abordagens sejam utilizadas, de modo a potencializar a solução.

A adição de elementos de reforço pode ser realizada através da ancoragem dos outros elementos do chassi em pontos específicos, ligados às extremidades do elemento de viga diagonal, por exemplo. A alteração de material, por sua vez, pode ser aplicada em um dos elementos frontais substituindo-o por um com maior ductilidade, induzindo um local de deformação controlada que mantenha a cabine segura, no entanto, deve ser corretamente dimensionado para não deformar em operação normal, apenas em casos de acidentes.

Um dos objetivos da utilização de aços de alta resistência na estrutura do veículo foi obter perfis de menor espessura, com conseqüente redução de peso dos componentes, uma vez que a massa total do veículo é limitada pelo regulamento da SEM. No caso dos materiais analisados, apenas o fornecedor SSAB divulga publicamente as características de densidade de seus produtos, as quais foram incluídas na Tabela 3. Desse modo, o peso da estrutura pode ser estimado no próprio programa CAD, relacionando a massa específica com o volume total, alcançando um valor de 14,9 kg para a geometria original.

4.2. PROPOSTA DE FABRICAÇÃO

Os produtos avaliados neste trabalho são fornecidos pelos fabricantes no formato de bobinas, que podem ser laminadas à quente ou à frio. Aços laminados à quente possuem melhor conformabilidade e limites reduzidos de dureza e resistência mecânica, enquanto os aços laminados à frio são encruados durante o processo e apresentam propriedades mecânicas mais elevadas, todavia, sua conformação é dificultada.

Os aços avançados de alta resistência normalmente são fornecidos apenas laminados à frio, como é o caso do aço Usibor[®], e necessitam equipamentos especiais para realizar o corte da bobina e a conformação da chapa. É importante mencionar que o Usibor[®] deve ser

conformado à quente para apresentar as propriedades mecânicas utilizadas neste trabalho, conforme indicado no catálogo do fabricante (Anexo A), o que pode ser uma limitação para alguns equipamentos.

Há alguns métodos para realizar a conformação, sendo que entre os mais difundidos e comuns no mercado são a estampagem, a perfilação e a dobra, os quais também podem ser realizados à quente ou à frio. A estampagem é um processo encontrado com frequência em linhas de produção em série, pois apresenta uma taxa produtiva muito elevada, porém pode ser inadequada para volumes pequenos de produção visto o alto valor do equipamento, composto por uma matriz e uma cavidade com custo bastante elevado.

O processo de perfilação consiste na conformação contínua da chapa de aço ao longo de uma linha de roletes. Diferentemente da laminação, a chapa não é conformada entre dois rolos exercendo pressão entre si, mas sim com roletes posicionados nas extremidades laterais, conformando a chapa das extremidades para o centro ao longo de uma linha. Esse processo, apesar de não exigir um equipamento com formato exclusivo, também é de difícil acesso devido à natureza de grandes dimensões da máquina.

Nesse contexto, o dobramento se mostra uma solução vantajosa, uma vez que o equipamento é bastante comum e não exige ferramentas exclusivas para o produto. O dobramento pode ser realizado por uma máquina como a *prensa dobradeira*, composta por uma matriz e uma barra de pressão com estanco (punção), e a força exercida pode ser calibrada eletronicamente para o material de trabalho.

Outro fator fundamental é a dimensão da chapa inicial, também conhecido por *blank*. Para a geometria original, a chapa inicial deve ter dimensões de 5,2 m por 0,1 m, a qual deverá ser cortada em seções variadas, conforme as dimensões da Figura 33, e unidas através de processos avançados que favoreçam as propriedades mecânicas do material. A solda laser pode ser uma solução adequada, visto que pode ser realizada com precisão e gerar uma zona termicamente afetada pequena, similarmente à solda por resistência, igualmente adequada para esse propósito.

Outros processos de união podem ser explorados, principalmente aqueles que não envolvem aplicação de calor, como a utilização de colas especiais ou elementos de união rígida, como parafusos ou rebites.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto preliminar de um sistema ou componente é uma etapa fundamental do estudo de engenharia. Ele permite explorar e avaliar os conceitos idealizados para as soluções propostas e identificar os pontos de atenção, e então antecipar eventuais problemas de projeto para que sejam resolvidos antes da fabricação.

O conceito inicial de assoalho automotivo avaliado neste trabalho se mostrou potencialmente adequado para a aplicação, e destacou as regiões críticas da estrutura durante aplicação de carregamentos estáticos. Apesar de alguns dos materiais selecionados possuírem limites elevados de resistência mecânica, os resultados das simulações indicaram a necessidade de otimização em certas regiões da estrutura, para que os limites não sejam extrapolados.

A utilização de vigas retas unidas com angulações em suas extremidades provocou concentração de tensão nessas regiões, que se mostraram sensíveis ao carregamento com componentes axial e fletor. O alongamento excessiva observada no cenário C é interpretada como uma falha, e as regiões críticas devem ser reavaliadas durante o projeto detalhado, para que não fiquem sujeitas a esse tipo de carregamento, ou para que sejam reforçadas.

Os materiais de ultra-alta resistência são as soluções preferidas, pois podem garantir alto desempenho da estrutura, mas também apresentar complexidade e altos custos na fabricação. O material com limite inferior, no entanto, não suporta os carregamentos previstos sem que ajustes geométricos sejam feitos no componente, porém seu desempenho pode ser adequado caso parte das tensões resultantes sejam dissipadas para o restante da estrutura do chassi, como as colunas laterais e as longarinas do teto, que irão reforçar a rigidez torcional do veículo.

O autor ressalta que a análise foi realizada de forma simplificada, e vários parâmetros que certamente afetam o desempenho da estrutura não foram avaliados, como as cargas dinâmicas que atuam sobre o veículo durante sua movimentação, ou a interação dos outros componentes e sistemas com a estrutura do assoalho. Todavia, o objetivo do presente trabalho foi avaliar de forma prática o conceito inicial da estrutura idealizada para o veículo da equipe Eficem. Os resultados devem auxiliar a equipe nas tomadas de decisão referentes à estrutura do chassi, tanto em termos geométricos quanto em seleção de materiais.

A velocidade teórica do veículo foi reduzida em relação ao real potencial, uma vez que o UC deve apresentar similaridades a um veículo de passeio, é correto supor que ele deva atingir velocidades de até 60 km/h, comuns em vias urbanas. Contudo, a análise não é inválida por esse

fator, afinal a velocidade de operação durante a competição SEM deve ser inferior, uma vez que a velocidade média dos veículos participantes não excede os 35 km/h.

Todas as análises realizadas neste trabalho devem ser interpretadas como orientativas, e não refletem as condições reais de operação do componente. Alguns fatores limitantes para a precisão do projeto preliminar foram o baixo poder computacional disponível, tanto em termos de hardware como de software, e a inexistência de projetos preliminares dos outros componentes do chassi e dos sistemas que exercem influência mecânica sobre ele, para que as condições de interação fossem avaliadas.

5.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A próxima etapa do desenvolvimento do componente é o projeto detalhado, com as dimensões da geometria final, os materiais e os processos de fabricação definidos. As informações deste trabalho devem ser utilizadas como orientativas para as tomadas de decisão relacionadas a esses aspectos. Novas etapas de simulação devem ser realizadas, com as regiões de melhoria geométrica que foram identificadas neste trabalho ajustadas e a uma nova malha com maior número de elementos e, portanto, maior qualidade deve ser gerada.

Os estudos futuros devem compreender toda a geometria do chassi, e analisar as interações entre os componentes estruturais, além incluir as análises de cargas dinâmicas, com a geometria e os pontos de fixação da suspensão definidos, assim como o layout final do veículo e de todos os sistemas ligados ao chassi. Idealmente, o chassi do veículo é o último sistema a ser projetado, uma vez que deve abrigar todos os outros, os quais possuem requisitos que podem influenciar em demandas do chassi, geométricas ou de outra natureza.

Outros materiais, aços ou alternativos, devem ser avaliados, especialmente para os elementos adicionais de reforço, com ênfase em boas relações de peso-resistência. O detalhamento das características mecânicas dos materiais analisados é imprescindível, para garantir que as simulações de operação em campo e de processos de fabricação sejam precisas.

Uma estimativa adequada dos carregamentos sobre cada componente do chassi deve ser feita para favorecer a precisão das análises. O método de Superfícies Estruturais Simples (SSS) é recomendado para a estimativa, e métodos numéricos podem ser aliados para otimizar as aproximações.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário estatístico 2021, setor metalúrgico**. Brasília: SGM, 2020.

BROWN, J. C.; ROBERTSON, A. J.; SERPENTO, S. T. **Motor vehicle structures: Concepts and fundamentals**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

CANE, R. I. **Projeto informacional e conceitual para a eletrificação de um protótipo de um veículo de passeio**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Automotiva) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

CASTRO, M. S. **Uma metodologia para melhoria da rigidez torcional de componentes estruturais automotivos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico da UFSC, Florianópolis, 2008.

EMIÇÃO veicular – Proconve. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB**. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>. Acesso em: 7 dez. 2023.

CORDEIRO, B. C. C. **Avaliação da influência dos revestimentos utilizados como proteção em aço de ultra alta resistência no processo de estampagem à quente**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

COSTIN, M.; PHIPPS, D. **Racing and Sports Car Chassis Design**. Londres: B. T. Batsford LTD, 1965.

CHRISTODOULOU, P. **Effect of retained austenite transformation on the fatigue behaviour of aluminum containing trip steels**. 2017. Tese (Doutorado em Filosofia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Thessaly, Volos, 2017.

DÔRES, A. G. R. **Análise de elementos estruturais com seção transversal de parede fina aberta ramificada utilizando a teoria generalizada de vigas**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto, 2014.

ENGLAND, J. C. *et al.* Design of automotive metal and composite chassis structures. **Recent patents on mechanical engineering**, Londres, v. 15, n. 3, p. 211-225, mar. 2011.

ESPELAND, A. B. *et al.* **Development and construction of vehicle for participation in the Shell Eco-marathon competition**. Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Design and Materials, Trondheim, jun. 2012.

FEKETE, J. R.; HALL, J. N. Design of auto body: materials perspective. *In*: RANA, R.; SINGH, S. B. **Automotive steels: design, metallurgy, processing and applications**. Duxford: Woodhead Publishing, 2017. p. 1-16.

GENTA, G.; LORENZO, M. **The automotive chassis volume 1: components design**. Torino: Springer, 2009.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale: SAE Inc., 1992.

GRANTA. Materials data for simulation. **Ansys Student 2023 R2**. 2023. Disponível em: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>. Acesso em: 2 set. 2023.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

IOCHPE-MAXION forma parceria estratégica para desenvolver e fabricar rodas e chassis para veículos elétricos. **Portal Aquecimento Industrial**. 11 nov. 2020. Disponível em: <https://www.aquecimentoindustrial.com.br/iochpe-maxion-forma-parceria-estrategica-para-desenvolver-e-fabricar-rodas-e-chassis-para-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 13 jul. 2022.

KEELER, S.; KIMCHI, M.; MOONEY, P. **Advanced high-strength steels application guidelines**. 6. ed. Middletown: World Auto Steel, 2017.

LOIOLA, E. M.; THESING, L. A. Metais usados na indústria automobilística para redução do peso. *In: XX SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO*, Universidade Federal do Pampa, **Anais de Iniciação Científica**. Santana do Livramento, 6 a 8 de novembro de 2018. Disponível em: https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/17477/seer_17477.pdf. Acesso em: 13 jul. 2022.

MAKE the future. **Shell Eco-marathon**. Disponível em: <https://www.makethefuture.shell/en-gb/shell-eco-marathon>. Acesso em: 02 jul. 2022.

MARCHIORI, G. **Análise estrutural utilizando o método de elementos finitos de um chassis para veículos de eficiência energética construído com material compósito**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Automotiva) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

MIKA, J. **Concepção de uma carenagem e análise aerodinâmica de um conceito de veículo elétrico urbano da equipe eficem**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Aeroespacial) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

NETO, S. B. **Modelo para gestão de projetos: o caso da equipe eficem**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Automotiva) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

NOBRE, K. 9 tendências esperadas para o mercado automotivo em 2022. **A Gazeta**, 18 jan. 2022. Motor. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/motor/9-tendencias-esperadas-para-o-mercado-automotivo-em-2022-0122>. Acesso em: 13 jul. 2022.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OMER, M. **Design and analysis of composite chassis for shell eco marathon prototype vehicle 2016 using finite element analysis**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel

em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia, *German University of Technology in Oman*, Muscat, 2015.

PORTILHO, J. R. S. *et al.* Fibra de Carbono: Propriedades mecânicas, químicas, processo de fabricação e as dificuldades de aplicação em larga escala. *In: IX CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. **Anais**. Fortaleza, 21 a 25 de agosto de 2016. Disponível em: <https://eventos.abcm.org.br/conem2016/>. Acesso em: 13 jul. 2022.

WORLD AUTO STEEL. Press hardened steels - phs grades over 1500 mpa. **AHSS Insights**. Disponível em: <https://ahssinsights.org/tag/press-hardening/>. Acesso em: 9 ago. 2023.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Guia PMBOK**: um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos. 4. ed. Pennsylvania: PMI, 2008. p. 5.

RILEY, W. B.; GEORGE, A. R. Design, analysis and testing of a formula sae car chassis. **SAE Motorsports Engineering Conference and Exhibition**, Indianapolis, v. 2002-01-3300, p. 382, dec. 2002.

SHAWN, T. Ferrari debuts carbon-fiber tub for enzo replacement, we go in-depth [2012 Paris auto show]. **Car and Driver**, 28 set. 2012. Disponível em: <https://www.caranddriver.com/photos/g17946822/ferrari-debuts-carbon-fiber-tub-for-enzo-replacement-we-go-in-depth-2012-paris-auto-show-gallery/?slide=5>. Acesso em: 13 jul. 2012.

SHELL ECO MARATHON. **2023 Official rules**. Disponível em: <https://www.makethefuture.shell/en-gb/shell-eco-marathon/global-rules>. Acesso em: 10 set. 2022.

SSAB. **Graus de aço automotivo em destaque**. Disponível em: <https://www.ssab.com/pt-br/marcas-e-produtos/docol/graus-de-aco-automotivo>. Acesso em: 19 out. 2023.

SSAB. **Grades and mechanical properties for docol martensitic steel**. Disponível em: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/docol/automotive-steel-grades/martensitic-steel>. Acesso em: 20 out. 2023.

STATISTA RESEARCH DEPARTMENT. **Distribution of steel end-usage worldwide in 2019, by sector**. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1107721/steel-usage-global-segment/> Acesso em: 18 jun. 2022.

THE CHALLENGE car frame and chassis. **Factory Five Racing**. Disponível em: <https://www.factoryfive.com/roadster/challenge-car/design/>. Acesso em: 13 jul. 2022.

TSIROGIANNIS, E. C. *et al.* Lightweight design and welding manufacturing of a hydrogen fuel cell powered car's chassis. **Challenges**, Basel, Suíça, v. 9, n. 1, p. 25, jun. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos. **Modelo prodip**. Disponível em: <https://nedip.ufsc.br/sessao/modelo-prodip-1>. Acesso em: 14 out. 2023.

WORLD AUTO STEEL. **Advanced high-strength steel (AHSS) definitions**. 2017. Disponível em: <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/> Acesso em: 22 abr. 2021.

ANEXO A – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

1) Usibor[®] 2000 – Arcelor Mittal

Mechanical properties

Indicated mechanical properties after hot stamping (1) + paint baking (2)

Cold rolled steel		Hot rolled steel					
Show all		Hide	Hide	Hide	Hide	Hide	Hide
ArcelorMittal name	Direction	Yield stress Rp0.2 (MPa) (1)(2)	Tensile strength Rm (MPa) (1)(2)	Type 1 Min. A50mm (%) (3)	Type 2 Min. A80mm (%) (3)	Type 3 Min. A50mm (%) (3)	Bending angle at Fmax (1)(2)(4)
Usibor [®] 2000	RD	≥ 1400	≥ 1800	5	5	5	≥ 40

2) Docol[®] 1700M – SSAB

General Product Description

A martensitic steel for automotive applications, Docol 1700M allows for increased crashworthiness, lightweight design and cost-efficient production methods for the automotive industry. Docol 1700M is one of the strongest cold rolled advanced high-strength steels on the market and has become the material of choice for automotive applications such as bumper systems and structural components.

Dimension Range

Cold rolled / UC: thickness 1.00-2.10 mm, width up to 1250 mm.

Mechanical Properties

	Standard	Coating	Test direction	Yield strength Rp0.2 (MPa)	Tensile strength Rm (MPa)	Elongation A ₉₀ (min %)	BH ₂ (min MPa)	Min. inner bending radius for a 90° bend
Docol CR 1350Y1700T-MS	VDA 239-100	UC	L	1350 - 1700	1700 - 2000	3	30	4.0 x t

3) Docol[®] HR550LA – SSAB

General Product Description

The Docol 550LA steels are high-strength low-alloy steels that offer consistent properties for modern, rapid production methods. Typical applications include bent profiles. Docol HR550LA-UC can after agreement be adapted and delivered as dual certified with S550MC according to EN 10149-2.

Dimension Range

Hot rolled / UC: thickness 2.00-6.00 mm, width up to 1600 mm.

Hot rolled / GI: thickness 2.00-5.00 mm, width up to 1500 mm.

Slit strip and cut to length sheets are available upon request.

Grade and coating specific restrictions on available dimensions may occur.

Mechanical Properties

	Standard	Coating	Test direction	Yield strength Rp0.2 (MPa)	Tensile strength Rm (MPa)	Elongation A ₉₀ ¹⁾ (min %)	Elongation A ₅ ³⁾ (%)	Min. inner bending radius for a 90° bend ⁴⁾
Docol HR 550LA	VDA 239-100	UC, GI*	L	550 - 670	610 - 750	12 ²⁾	16 ²⁾	1.0 x t

* Available upon request.

¹⁾ A₉₀ value applies for thicknesses < 3.00 mm.

²⁾ For GI coatings the minimum elongation value is reduced by 1 unit.

³⁾ A₅ value applies for thicknesses ≥ 3.00 mm.

⁴⁾ In some cases tight bending radius may cause micro-cracking of the coating in the bend area. Where design permits, users are encouraged to employ larger radius.