

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

Felipe Inohira Ferreira
Guilherme Silva Rodrigues

**Resistência ao Impacto Lateral contra Poste de um
Veículo Híbrido Compacto para Ambientes Urbanos**

São Paulo
2022

FELIPE INOHIRA FERREIRA
GUILHERME SILVA RODRIGUES

Resistência ao Impacto Lateral contra Poste de um Veículo Híbrido Compacto para Ambientes Urbanos

— Versão Original —

Monografia apresentada à coordenação do curso de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Alves
Coorientador: Eng. Marcelo R. G. Duarte

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Ferreira, Felipe Inohira; Rodrigues, Guilherme Silva

Resistência ao Impacto Lateral contra Poste de um Veículo Híbrido Compacto para Ambientes Urbanos/ F. I. Ferreira; G. S. Rodrigues – São Paulo, 2022.

x p.

Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Segurança veicular 2. Resistência ao impacto 3. Veículo híbrido
4. Método dos elementos finitos 5. Modelo de corpo humano.
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Aos nossos pais e irmãos,
Antonio, Cristina e Julia;
Odair, Liliam e Lais.

Agradecimentos

Ao Professor Marcílio, pelo apoio durante a elaboração desta monografia e pelos valiosos ensinamentos durante toda a graduação. Suas aulas ficarão marcadas nas nossas vidas.

Ao Engenheiro Marcelo Duarte, pelo conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento do projeto, além da motivação e da amizade provida nos momentos difíceis.

À professora Larissa, pelo encorajamento dos alunos e das alunas de TCC.

À FIPT, pelo apoio financeiro prestado.

Felipe - Aos meus pais, Antonio e Cristina, pelo apoio incondicional, sem o qual não seria possível conceber este próprio texto que escrevo. À vocês devo grande parte dos meus valores como ser humano, integridade e amorosidade. À minha irmã, Julia, pelo companheirismo de sempre, sem o qual a vida seria muito mais ordinária e solitária.

Guilherme - Aos meus pais, Odair e Liliam, e à minha irmã, Lais, por todo o suporte afetivo durante toda a minha vida, sem o qual eu não conseguiria chegar onde cheguei. Por me apoiarem em tudo o que faço mesmo estando longe algumas vezes e por sempre acreditarem em mim. À todas as pessoas que conheci no Baja, por me darem um motivo para vir para Poli todos os dias nesses últimos 4 anos.

Out of the night that covers me,
Black as the pit from pole to pole,
I thank whatever gods may be
For my uncounquerable soul.

In the fell clutch of circumstance
I have not winced nor cried aloud.
Under the bludgeonings of chance
My head is bloody, but unbowed.

Beyond this place of wrath and tears
Looms but the Horror of the shade,
And yet, the menace of the years
Finds and shall find me unafraid.

It matters not how strait the gate,
How charged with punishment the scroll,
I am the master of my fate,
I am the captain of my soul.

— *William Ernest Henley*

Resumo

FERREIRA, F. I.; RODRIGUES, G. S. *Resistência ao Impacto Lateral contra Poste de um Veículo Híbrido Compacto para Ambientes Urbanos*. 2022. Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Este trabalho apresenta a análise do desempenho de um veículo híbrido-flex (VHF) compacto para ambientes urbanos em um cenário de impacto lateral contra poste, de acordo com os requisitos da norma UNECE R135. O estudo foi motivado pela situação alarmante das mortes no trânsito. A análise foi feita por meio de simulações em elementos finitos explícito utilizando o software LS-DYNA. Foram conduzidos testes de tração do material do veículo (aço AISI 1015) para alimentar o método constitutivo da estrutura, buscando maior fidelidade à dependência da taxa de deformação. Para as análises do impacto nos passageiros, foi utilizado o *dummy* WorldSID-50M. Além dos requisitos da norma UNECE R135, também foi analisada a segurança do conjunto de baterias, a fim de investigar possíveis deformações que pudessem gerar explosões ou causar danos aos passageiros. Além da análise do chassi do VHF, também foram estudadas duas outras configurações de estrutura, uma com um material mais resiliente (aço DP1000) e uma com um reforço tubular na lateral do veículo. A dissertação concluiu que o VHF falhou em cumprir com a UNECE R135, principalmente por causa dos ferimentos causados na cabeça, no ombro e na pelve, além da ausência de *airbags* laterais e de cortina. Há um desafio latente em países em desenvolvimento para melhorar a segurança de sua frota e investir em melhores regulamentações de trânsito.

Palavras-chave: Segurança veicular. Resistência ao impacto. Veículo híbrido. Método dos elementos finitos. Modelo de corpo humano.

Abstract

FERREIRA, F. I., RODRIGUES, G. S. *Pole Side Impact Crashworthiness of a Compact Hybrid Vehicle for Urban Environments*. 2022. Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. University of São Paulo, São Paulo, Brazil. 2022.

This work presents the analysis of the performance of a compact hybrid-flex vehicle (HFV) for urban environments in a pole side impact scenario, according to the requirements of the UNECE R135 standard. The study was motivated by the increasingly worrying road death rates. The analysis was performed through explicit finite element simulations using the LS-DYNA software. Tensile tests of the chassis material (AISI 1015 steel) were conducted to feed the structure's constitutive model, seeking greater fidelity to the strain rate dependency. For the analysis of occupant safety levels, the WorldSID-50M dummy was used. In addition to the UNECE R135 standard, the integrity of the battery pack was also evaluated to find out possible deformations that could lead to explosions or to passengers harm. In addition to the analysis of the current structure, two alternative configurations were also analyzed, one with a more resilient material (DP1000 steel) and one with an additional side tube. The dissertation concluded that the HFV failed to comply with the UNECE R135 requirements, mainly due to injuries sustained in the head, shoulder and pelvis and lack of side and curtain airbags. It remains a challenge for developing countries to strive for better vehicle safety measures and regulations.

Keywords: Vehicle safety. Crashworthiness. Hybrid Vehicle. Finite element method. Human body model.

Lista de Figuras

1.1	Número e taxa de mortes no trânsito por 100.000 habitantes: 2000-2016 . . .	2
1.2	Número e taxa de mortes no trânsito por 100.000 veículos: 2000-2016	2
1.3	Aderência de países às normas internacionais de segurança veicular	4
2.1	Primeira estrutura do VHF urbano	5
2.2	Terceira estrutura do VHF urbano	6
2.3	Estrutura típica de um veículo de passeio	8
2.4	Tipos de arquitetura do conjunto de baterias: (a) em "T" e (b) sob o assoalho .	8
2.5	Testes de impacto lateral (a) contra poste e (b) contra outro veículo	9
2.6	Gráficos do (a) esforço na região pélvica e da (b) aceleração da cabeça	11
2.7	Classificação por altura do impacto lateral	11
2.8	<i>Dummy</i> WorldSID-50M	12
2.9	Modelagem de órgãos internos da 6ª geração dos modelos THUMS	13
2.10	Componentes do tórax do WorldSID-50M	15
2.11	Detalhe das costelas do WorldSID-50M	16
2.12	Componentes da região pélvica do WorldSID-50M	16
3.1	Fluxograma da metodologia do projeto	18
3.2	Projeto em CAD da terceira geração do VHF urbano	19
3.3	Malha de simulação do VHF urbano com o WorldSID-50M	19
3.4	Elementos sólidos na malha base de simulação	20
3.5	Elementos de casca na malha base de simulação	21
3.6	Modelagem do cinto de segurança em elementos finitos	22
3.7	Variação das curvas tensão-deformação pelo efeito de $\dot{\epsilon}$	24
3.8	Região de análise do critério de performance no ombro	28
3.9	Região de análise do critério de performance na pelve	29
3.10	Região de análise do critério de performance nas costelas	29
4.1	Dimensões do corpo de prova segundo a ASTM E8	30
4.2	Variação das curvas tensão-deformação pelo efeito de $\dot{\epsilon}$	32
4.3	Configuração do cenário para os testes de tração	32
4.4	Captura de análise no GOM Correlate para $t = 0$ [s]	33
4.5	Captura de análise no GOM Correlate para $t = 41$ [s]	34
4.6	Captura de análise no GOM Correlate para $t = 56$ [s]	34
4.7	Captura de análise no GOM Correlate para $t = 66$ [s]	35
4.8	Diferenças entre tensão/deformação de engenharia e tensão/deformação real	36
4.9	Variação das curvas tensão-deformação pelo efeito de $\dot{\epsilon}$	36

5.1	Vista superior da simulação com estrutura de AISI 1015	38
5.2	Vista frontal da simulação com estrutura de AISI 1015	39
5.3	Aceleração na cabeça para estrutura inicial	40
5.4	Thorax performance criterion para estrutura inicial	40
5.5	Abdominal performance criterion para estrutura inicial	40
5.6	Aceleração na vertebra T12 para estrutura inicial	41
5.7	Vista superior da simulação com estrutura de DP1000	42
5.8	Vista frontal da simulação com estrutura de DP1000	43
5.9	Aceleração na cabeça para estrutura com DP1000	44
5.10	Thorax performance criterion para estrutura com DP1000	44
5.11	Abdominal performance criterion para estrutura com DP1000	44
5.12	Aceleração na vértebra T12 para estrutura com DP1000	45
5.13	Vista superior da simulação com estrutura de AISI 1015 e tubo lateral	46
5.14	Vista frontal da simulação com estrutura de AISI 1015 e tubo lateral	47
5.15	Aceleração na cabeça para estrutura com tubo na lateral	48
5.16	Thorax performance criterion para estrutura com tubo na lateral	48
5.17	Abdominal performance criterion para estrutura com tubo na lateral	48
5.18	Aceleração na vertebra T12 para estrutura com tubo na lateral	49
6.1	Impacto do poste com o a cabeça do <i>dummy</i>	50
6.2	Situação do compartimento das baterias na estrutura de AISI 1015	52
6.3	Situação do compartimento das baterias na estrutura de DP1000	52
6.4	Impacto do tubo lateral com o <i>dummy</i>	53

Lista de Tabelas

2.1	Comparação das deformações nos impactos laterais	11
2.2	Instrumentação do <i>dummy</i> WorldSID-50M	14
3.1	Unidades consistentes do modelo	23
3.2	Arquivos de simulação do modelo e suas funções	23
4.1	Casos investigados nos ensaios de tração	31
6.1	Comparação dos resultados das análises	51

Sumário

Lista de Figuras • vii

Lista de Tabelas • ix

Sumário • x

1 Introdução • 1

- 1.1 Panorama sobre segurança veicular • 1
- 1.2 Conceituação do VHF urbano • 3
- 1.3 Objetivos do projeto • 4

2 Estado da arte • 5

- 2.1 Evolução do VHF urbano • 5
- 2.2 Regulamentação em segurança veicular • 6
- 2.3 Resistência ao impacto lateral • 7
 - 2.3.1 Risco de explosão das baterias • 7
 - 2.3.2 Impacto lateral contra poste • 8
 - 2.3.3 Impacto lateral contra outro veículo • 9
 - 2.3.4 Comparação entre os tipos de impacto lateral • 9
- 2.4 Dispositivos Antropomórficos de Testes • 11
- 2.5 Requisitos • 12
 - 2.5.1 Critério de performance do compartimento das baterias • 12
 - 2.5.2 Critérios de performance da UNECE R135 • 13

3 Metodologia • 17

- 3.1 Projeto da geometria • 18
- 3.2 Geração da malha • 18
 - 3.2.1 Elementos sólidos • 20
 - 3.2.2 Elementos de casca • 20
 - 3.2.3 Elementos de viga • 21
 - 3.2.4 Elementos de cinto de segurança • 21
 - 3.2.5 Elementos discretos • 22
- 3.3 Pré-processamento • 22
 - 3.3.1 Materiais • 24
 - 3.3.2 Seções • 27
 - 3.3.3 Contatos • 27
 - 3.3.4 Condições iniciais • 27

3.4	Solver • 28
3.5	Pós-processamento • 28
4	Caracterização do Material • 30
5	Resultados • 37
5.1	Simulação da estrutura inicial • 37
5.2	Simulação da estrutura com DP1000 • 41
5.3	Simulação da estrutura com reforço de um tubo • 45
6	Discussão • 50
7	Conclusão • 54
	Referências • 55

Introdução

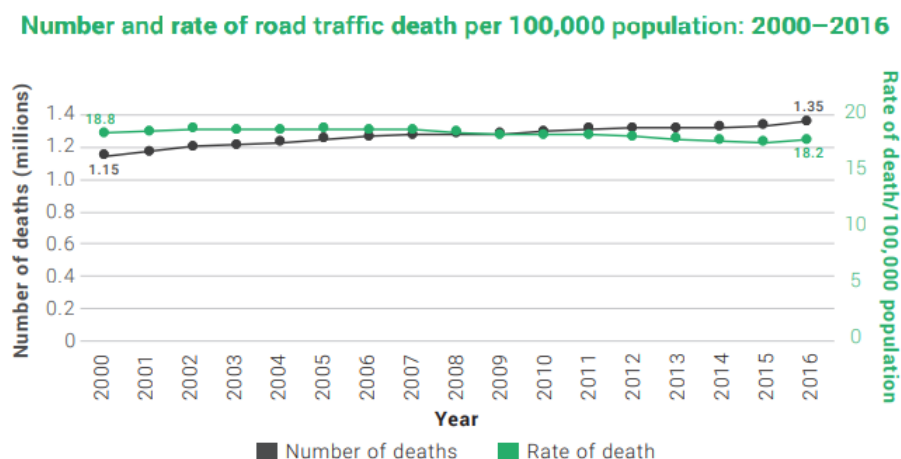
1.1 Panorama sobre segurança veicular

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), aproximadamente 1,35 milhão de pessoas morrem por ano devido a acidentes de trânsito, sendo a principal causa de óbito entre crianças e adultos com idades entre 5 e 29 anos (WHO, 2018). Além disso, acidentes de trânsito correspondem à oitava maior causa de morte entre todas as idades, à frente de doenças como a tuberculose e a diarreia. Apesar de a taxa de mortalidade por 100 mil habitantes ter permanecido praticamente constante entre 2000-2016, o número absoluto de fatalidades no trânsito vem crescendo, conforme mostra a Figura 1.1. Isso se deve ao fato de que a redução de mais de 50% na taxa de mortalidade por 100 mil veículos (Figura 1.2) foi superada pelo aumento de 150% no número absoluto de veículos no mesmo período. Devido ao problema global da segurança no trânsito, a Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu a meta de reduzir pela metade o número de mortes e ferimentos decorrentes de acidentes de trânsito até o ano de 2030 (A/RES/74/299).

Os principais fatores de risco no trânsito são ativos, quando dependem diretamente da ação do motorista, e.g. dirigir em alta velocidade, sob embriaguez, em estado de desatenção ou em conflito com leis de trânsito, e passivos, quando dependem apenas da segurança do veículo ou da qualidade da infraestrutura viária. É possível projetar a estrutura do veículo para que se deforme progressivamente a fim de absorver a maior quantidade de energia em um impacto e de reduzir as desacelerações experimentadas pelos passageiros e/ou pedestres. Veículos considerados seguros são cruciais para evitar ou reduzir a probabilidade de ferimentos graves em seus passageiros uma vez que, se projetados em conformidade com regulações de diferentes categorias de impacto e de mecanismos de segurança, comportam-se de forma eficaz em casos de colisão.

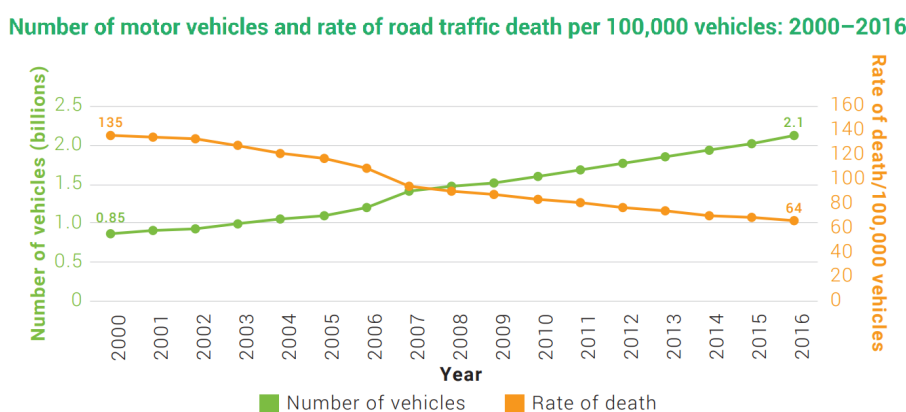
Grandes esforços ocorreram nos últimos anos com o propósito de elevar o nível de segurança veicular. Uma colisão envolvendo um carro com 18 ou mais anos aumenta o risco

Figura 1.1: Número e taxa de mortes no trânsito por 100.000 habitantes: 2000-2016



Fonte: (WHO, 2018)

Figura 1.2: Número e taxa de mortes no trânsito por 100.000 veículos: 2000-2016



Fonte: (WHO, 2018)

de fatalidade em 71% quando comparado a um carro com 3 anos ou menos (NHTSA, 2013). Dentre os esforços mencionados, destacam-se o desenvolvimento de novos materiais e de novas técnicas, com emprego de tubos de aço de alta resistência e de materiais compostos, o avanço de técnicas de otimização topológica (FANG et al., 2017), o aumento do número de *airbags* e da eficácia dos cintos de segurança, o desenvolvimento de sistemas de controle de tração, de estabilidade, de anti-travamento dos freios e de direção semiautônoma, assim como a coluna de direção com alta capacidade de absorção de energia. Em suma, todos esses progressos no âmbito técnico podem ser creditados pela performance superior na segurança de veículos modernos em relação a veículos de gerações anteriores.

Além da NHTSA, órgãos como a NCAP e a UNECE estabelecem regras para o projeto de novos veículos e realizam testes de impacto simulando diferentes situações, como colisões frontais, laterais ou traseiras contra outros corpos (veículos, postes, ciclistas

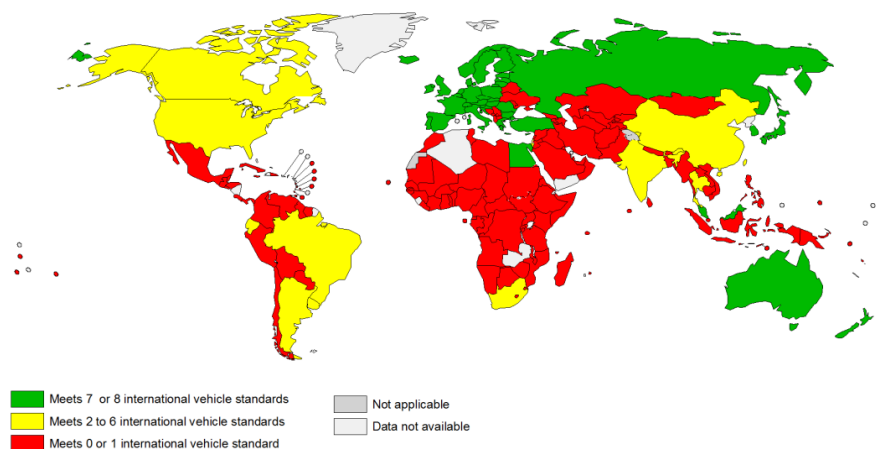
ou pedestres). Para atestar o cumprimento dos requisitos, são empregados Dispositivos Antropomórficos de Testes (DATs), que por sua vez replicam o comportamento do corpo humano e possibilitam a avaliação de critérios de performance. Cada regra se refere a um caso específico de colisão e utiliza um *dummy* adequado para o caso de estudo. Os critérios de performance também são específicos, mas geralmente seus parâmetros são comumente baseados nos tipos de ferimento mais letais ao corpo humano. Exemplos de critérios de segurança são a variação da velocidade no centro de massa da cabeça do *dummy*, a aceleração máxima na coluna vertebral e a deflexão máxima em cada costela.

1.2 Conceituação do VHF urbano

No contexto brasileiro, o Programa Rota 2030 (Lei nº 13.755/18) é um exemplo de projeto na direção de aumentar a eficiência energética, a sustentabilidade e a segurança de sua frota circulante. No país, a participação de veículos híbridos e elétricos ainda é muito pequena: de um total de 58 milhões de veículos, apenas 11 mil (0,025% do total) pertencem à categoria (SINDIPEÇAS, 2019). No quesito de aderência à normas internacionais de segurança veicular, o Brasil não ocupa o grupo de maior destaque, i.e. aquele que cumpre 7 ou 8 normas (Figura 1.3). Desde 2020, quatorze modelos foram testados pela Latin NCAP, dos quais apenas um recebeu nota máxima (5 estrelas) para passageiros adultos e criança (LATINNCAP, 2020). A performance dos carros híbridos ou elétricos em *crash tests* também é insatisfatória. Dentre os cinco veículos híbridos ou elétricos mais acessíveis comercializados no Brasil, apenas o Fiat 500e obteve rendimento satisfatório, de 4 estrelas, na Euro NCAP (EURONCAP, 2021b), enquanto o Renault Kwid E-Tech obteve 1 estrela (EURONCAP, 2021a), o Renault Zoe obteve zero estrelas (EURONCAP, 2021c) e o JAC E-JS1 também obteve zero estrelas (LATINNCAP, 2022a), tornando-se o primeiro elétrico a ser testado pela Latin NCAP. Até o final de 2022, o Chery iCar não havia sido testado por agências reconhecidas, portanto, sua performance não pode ser incluída a tempo deste trabalho. Vale mencionar que, no Brasil, a comercialização de veículos pode ocorrer sem obrigatoriedade de aprovação por entidades avaliadoras de segurança veicular.

A fim de contribuir para o propósito descrito, universidades brasileiras propuseram um veículo híbrido-flex urbano (VHF urbano) em parceria com o Programa Rota 2030 e com a Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (FIPT). O objetivo do grupo consiste em conceber um automóvel de uso urbano e de baixo custo, com elevados níveis de eficiência energética e de segurança, capaz de transportar dois passageiros.

Figura 1.3: Aderência de países às normas internacionais de segurança veicular



Fonte: (WHO, 2018)

1.3 Objetivos do projeto

Com apoio do Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto de Estruturas (GMSIE-USP), o objetivo principal do projeto é avaliar o desempenho da estrutura mais recente do VHF urbano com relação à norma da UNECE para impacto lateral contra poste, a R135 (UNECE, 2015). Além disso, o objetivo secundário do trabalho é garantir a integridade do compartimento de baterias seguindo o critério apresentado no estado da arte.

A avaliação da resistência ao impacto lateral contra poste do veículo conforme a norma foi realizada por meio de simulações do método dos elementos finitos (MEF) em *software* comercial (LS-Dyna). O uso desta ferramenta é vantajoso pois permite investigar critérios de performance durante as fases iniciais do ciclo de projeto, sem necessidade de testes destrutivos. Na indústria automotiva, o número de testes destrutivos com veículos é otimizado de forma a equilibrar o gasto de recursos e o padrão de qualidade desejado.

Devido à natureza da análise numérica, é importante ressaltar que os resultados obtidos das simulações podem divergir significativamente da realidade, por motivos desde erros na modelagem dos materiais e dos contatos até problemas de manufatura na etapa de fabricação. Sendo assim, em um contexto de desenvolvimento de produto, a fase de validação, i.e. *crash tests*, não deveria ser substituída pelas simulações. Apesar de desprovido de validação, este trabalho se mostrou relevante enquanto prova de conceito e instrumento norteador para os próximos passos do projeto estrutural do VHF urbano.

Estado da arte

2.1 Evolução do VHF urbano

O projeto original do VHF urbano foi iniciado em 2016 com o objetivo de atender os requisitos da UNECE para impactos frontal e traseiro (LIMA, 2016). A Figura 2.1 representa a estrutura de Lima, com tubos de aço de seção circular. O resultado foi um veículo compacto, com dimensões externas de apenas 2,53 m de comprimento, 1,49 m de largura e 1,70 m de altura, adequadas para ambientes urbanos. Uma característica atípica do projeto que contribuiu para a redução da largura total do veículo e permaneceu nas versões seguintes foi a disposição dos assentos, posicionados diagonalmente entre si.

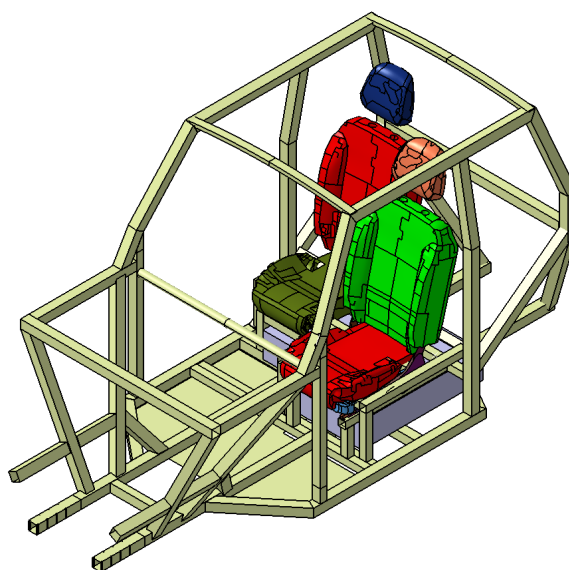
No entanto, devido às dificuldades de fabricação, a estrutura concebida por Lima teve de ser alterada. Essas dificuldades foram observadas durante a construção do primeiro protótipo do veículo, quando se constatou que os processos de dobragem de tubos em múltiplos planos e de estampagem de peças não seriam possíveis fora de uma planta

Figura 2.1: Primeira estrutura do VHF urbano



Fonte: (DUARTE, 2021)

Figura 2.2: Terceira estrutura do VHF urbano



Fonte: Dos autores

industrial com maquinário adequado. Sendo assim, na segunda versão do projeto, Duarte modificou a estrutura a fim de permitir processos de manufatura mais simples, eliminando a necessidade de estampagem e substituindo tubos de elevada curvatura por outros de menor curvatura (DUARTE, 2021). Além disso, expandiu o desenvolvimento para agregar novos casos de colisão, visando atender os requisitos de normas da UNECE para proteção de pedestre contra atropelamento, impacto frontal e impacto lateral contra poste.

Com a aprovação do projeto no âmbito do programa Rota 2030, a estrutura foi novamente remodelada por Duarte para possibilitar sua fabricação na oficina da Universidade de São Paulo. A Figura 2.2 ilustra o projeto base para a terceira versão do veículo. Em relação à geração anterior, as alterações mais significativas foram no material, com a mudança do aço estrutural DP1000 para o aço AISI 1015, no perfil dos tubos, com a mudança de seção circular para seção quadrada, e na eliminação dos tubos com curvatura. Com relação à manufatura da nova estrutura, foi possível conceber um chassi mais viável, cuja construção passou a depender somente de processos de corte e de soldagem.

2.2 Regulamentação em segurança veicular

As normas de segurança veicular são essenciais para promover a redução das mortes no trânsito. Em 1958, a UNECE publicou um documento para a adoção de condições uniformes de aprovação e de reconhecimento recíproco de aprovação para veículos automotores e suas partes e sistemas, estabelecendo um marco na história da regulamentação veicular (UNECE, 1958). O Acordo de 1958 simbolizou o primeiro esforço no sentido

de criar um conjunto de normas internacionais de segurança e de sustentabilidade na indústria automotiva, contendo uma série de requisitos para a fabricação de veículos nos países signatários. Inicialmente, a regra permitia apenas a assinatura de países membros da UNECE, o que foi alterado, em 1995, a fim de incluir outras nações interessadas. Atualmente, 64 países compõem a lista de signatários, da qual o Brasil não faz parte.

A evolução das normas anexadas ao Acordo se confunde com a própria evolução da indústria de veículos automotores, uma vez que o texto se manteve atualizado no decorrer dos anos por meio de adendos, agregando requisitos mesmo para as últimas tecnologias, como por exemplo as normas para sistemas anti-travamento de freios (ABS), em 1990, e de controle eletrônico de estabilidade, em 2007. Até 2015, cento e trinta e cinco normas faziam parte do rol do Acordo. A UNECE se mantém como um organismo influente no contexto automotivo, promovendo o Fórum Mundial para a Harmonização de Regulamentações Veiculares (WP.29). Por isso, suas normas são referências mundiais.

2.3 Resistência ao impacto lateral

Existem duas preocupações principais no caso de impacto lateral de um carro híbrido compacto. Uma é o risco de explosão das baterias, cujo compartimento deve resistir à intrusão de um poste ou de outro veículo na estrutura. A outra é o risco de ferimentos diretos aos passageiros, principalmente aqueles que estão sentados do lado em que ocorre a colisão. Mecanismos de redução da força experimentada pelo *dummy* em uma colisão lateral se concentram primariamente em um projeto estrutural eficiente, que se dá pela escolha de materiais, espessura de componentes, geometria e preenchimento de componentes com espuma metálica, além do emprego de *airbags* laterais e de cortina (DU BOIS et al., 2004). As próximas subseções discutem esses temas com base na literatura recente, ressaltando os desenvolvimentos mais relevantes que tem permitido elevar o nível de segurança passiva de veículos, sobretudo os que possuem baterias sob o assoalho.

2.3.1 Risco de explosão das baterias

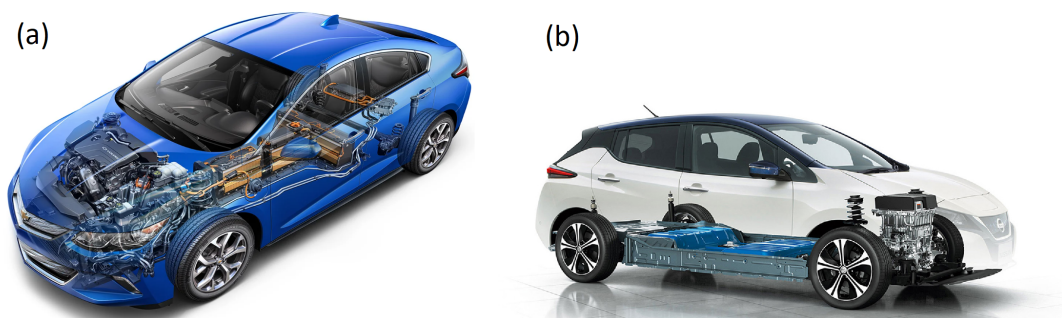
Baterias de íon lítio são dispositivos capazes de armazenar uma elevada densidade de energia. Além disso, estão amplamente disponíveis em diferentes produtos atualmente, desde celulares até carros de passeio. A construção dessas baterias consiste em três elementos: o anodo, o catodo e uma interface de separação, sendo esta última a camada mais importante em termos de segurança. Ela evita que o dispositivo tenha um curto-circuito interno, mas, apesar de robusta, pode ser rompida no caso de impacto severo. Esse rompimento causa um aumento drástico de temperatura das baterias, podendo provocar

Figura 2.3: Estrutura típica de um veículo de passeio



Fonte: (TESLA, 2017)

Figura 2.4: Tipos de arquitetura do conjunto de baterias: (a) em "T" e (b) sob o assoalho



Fonte: (a) (GM, 2016); (b) (NISSAN, 2021)

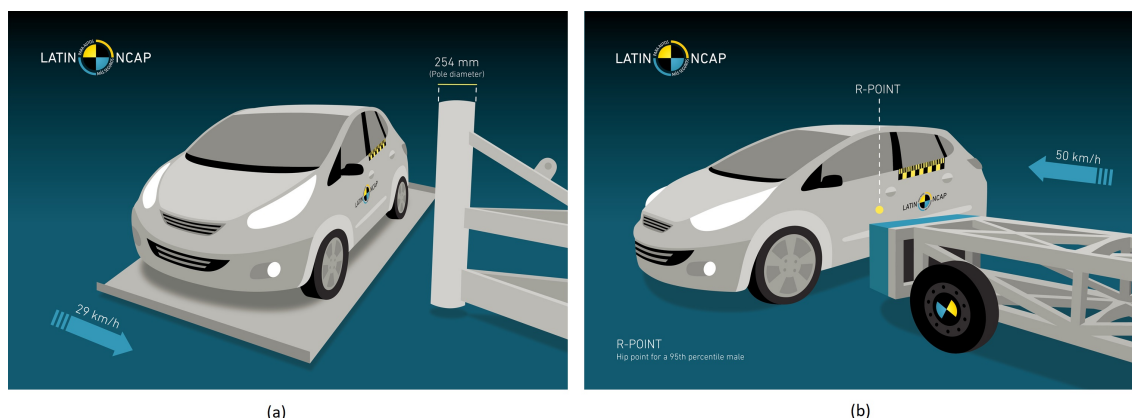
incêndios e explosões. Greve e Fehrenbach constataram que a deformação crítica que baterias de íon lítio podem suportar é de até 23 *mm* (GREVE; FEHRENBACH, 2012).

A topologia mais comum em automóveis com trem de força elétrico dispõe o conjunto de baterias no assoalho, a fim de reduzir o centro de massa do veículo e permitir uma melhor distribuição dos componentes internos, como os assentos. Ao contrário da arquitetura em "T", que concentra as baterias mais próximas ao eixo longitudinal do veículo, a disposição planejada sob o assoalho não possui seu entorno estrutural otimizado contra impacto lateral, dependendo quase completamente do peitoril (Figura 2.3) e da coluna "B" (Figura 2.3) para absorver a energia da colisão. Apesar disso, do ponto de vista de produto, torna-se uma solução mais empregada pelo fato de que carros urbanos precisam ser confortáveis e compactos (a arquitetura em "T" ocupa mais o espaço das pernas, principalmente dos ocupantes do banco de trás, já que possui uma coluna central elevada e restringe a altura do passageiro que se senta no assento intermediário). A Figura 2.4 mostra as diferenças entre os tipos de arquitetura em veículos elétricos comerciais.

2.3.2 Impacto lateral contra poste

De acordo com a UNECE R135 (UNECE, 2015), o impacto lateral contra poste deve ocorrer do lado do motorista, com o veículo a uma velocidade de 26 *km/h*, de tal forma que seu

Figura 2.5: Testes de impacto lateral (a) contra poste e (b) contra outro veículo



Fonte: (LATINNCAP, 2022b)

eixo longitudinal forme um ângulo de 75° com a linha de centro do poste, que deve ser metálico e ter diâmetro de $254 \pm 6 \text{ mm}$. Além disso, deve-se garantir que o centro de gravidade da cabeça do *dummy* esteja alinhado com a linha de centro do poste, como esquematizado na Figura 2.5a. Para a segunda iteração do VHF urbano, Duarte concebeu uma estrutura compatível com os critérios de segurança da norma (DUARTE, 2021).

2.3.3 Impacto lateral contra outro veículo

De acordo com a UNECE R95 (UNECE, 2011), o teste de impacto lateral contra outro veículo deve ocorrer do lado do motorista, de tal forma que o carro seja atingido por uma barreira deformável móvel (MDB) a 50 km/h , com uma massa de $950 \pm 20 \text{ kg}$. O veículo deve estar em repouso no momento do impacto, assim como esquematizado na Figura 2.5b. Além disso, o teste deve ser realizado em um ambiente com espaço suficiente para que o veículo se desloque após o impacto, sem que haja um segundo impacto com a MDB.

2.3.4 Comparação entre os tipos de impacto lateral

Casos de impacto lateral não são tão frequentes como os de impacto frontal, mas podem causar ferimentos mais graves aos ocupantes (PINTAR; MAIMAN; YOGANANDAN, 2007). Em um estudo realizado com 53 casos CIREN¹ de acidentes de colisão lateral contra poste ou árvore, foram analisados padrões de ferimentos nos ocupantes. Desses

¹Crash Injury Research and Engineering Network é um programa liderado pela NHTSA que reúne dados de acidentes de trânsito. Seu objetivo é ajudar na prevenção e tratamento de ferimentos clinicamente relevantes decorrentes desses acidentes. Os casos CIREN são catalogados com informações sobre modelo do veículo, danos ao veículo, ferimentos do ocupante e uso de cinto ou de *airbags* (NHTSA, 2017-2021).

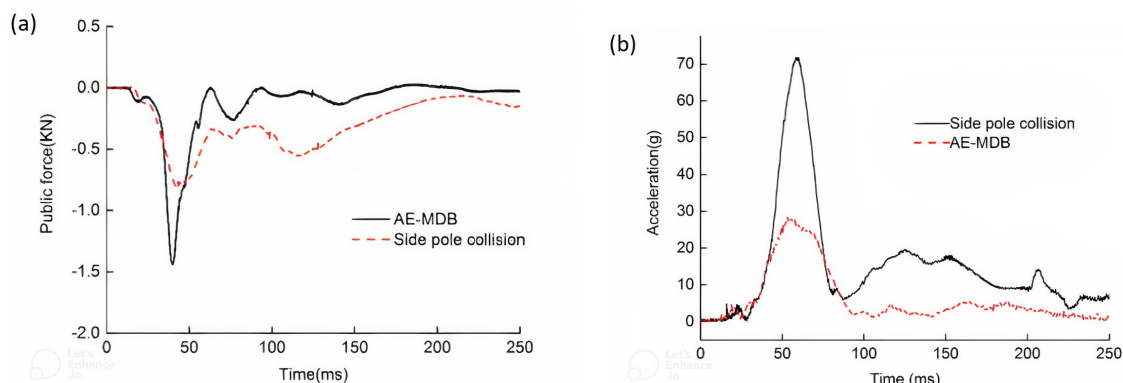
casos, ao menos metade apresentou lesões severas (AIS₃₊)² no peito ou na cabeça, sendo que 70% dos ocupantes que sofreram lesões no peito também sofreram lesões na cabeça. Dentre os tipos de ferimentos mais comuns, destacaram-se hemorragias internas, fraturas no crânio, nas costelas e contusões nos pulmões, sempre do lado do corpo em que ocorreu a colisão. Além disso, foram notados padrões únicos de lesões, decorrentes de carregamento oblíquo (anterolateral) no peito. As causas desses ferimentos foram associadas ao fato de que, no impacto lateral contra poste, a intrusão na cabine é maior do que em outros casos de impacto lateral. Isso aumenta a probabilidade de o ocupante ser atingido diretamente pelo poste ou pela porta (sem que haja amortecimento pelo ombro), resultando em um mecanismo de trauma que pode danificar órgãos vitais, como os pulmões ou o coração. Por último, é importante ressaltar que, dentre os 53 casos analisados, apenas quatro veículos dispunham de *airbags* laterais, um recurso que poderia ter reduzido o número de lesões severas. Os resultados indicaram que, dentre os acidentes nos quais houve acionamento dos *airbags* laterais, nenhum ocupante sofreu ferimentos na cabeça, mas metade sofreu algum tipo de trauma no peito ou no abdômen.

Huang comparou os testes de colisão lateral contra poste seguindo a norma da Euro NCAP e de colisão lateral contra outro veículo seguindo a norma da C-NCAP (HUANG, 2020). O impacto contra outro veículo provocou ferimentos mais graves somente na região da pélvis (Figura 2.6)a. Por outro lado, os resultados indicaram que o impacto lateral contra poste causou lesões mais graves na cabeça, no tórax e nas costelas abdominais. Na região da cabeça do *dummy*, o pico de aceleração no primeiro caso ultrapassou o dobro do pico de aceleração do segundo caso, assim como observado na Figura 2.6b. Wang et al também compararam os testes de colisão lateral contra poste seguindo a norma da Euro NCAP e de colisão lateral contra outro veículo seguindo a norma da UNECE (WANG et al., 2006). O estudo concluiu que a energia absorvida e a deformação foram maiores no impacto contra poste, mas a aceleração foi maior no caso de impacto contra outro veículo. Infere-se que isso se deve à diferença na área de colisão, pois o poste concentra as forças em uma região menor do que a MDB, o que também favorece a intrusão na cabine dos ocupantes. A Tabela 2.1 mostra como se distribuem as máximas deformações nas diferentes áreas do carro, classificadas de acordo com a Figura 2.7. O poste provocou deformações maiores em todas as regiões, principalmente nas extremidades do veículo.

Portanto, por demonstrar-se um tipo de colisão mais severo nos quesitos de ferimentos ao motorista e de resistência estrutural, o impacto lateral contra poste foi definido como prioridade para compor a avaliação da segurança do chassi atual do VHF urbano.

² *Abbreviated Injury Scale* é um sistema de pontuação criado pela *Association for the Advancement of Automotive Medicine* que classifica cada ferimento por região do corpo. Consiste em uma escala de seis pontos, que varia desde AIS₁ para lesão leve até AIS₆ para lesão atualmente intratável (AAAM, 2008).

Figura 2.6: Gráficos do (a) esforço na região pélvica e da (b) aceleração da cabeça



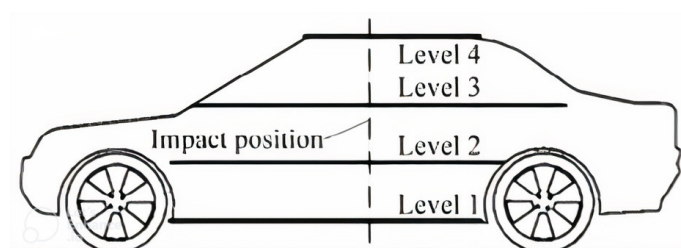
Fonte: (HUANG, 2020)

Tabela 2.1: Comparação das deformações nos impactos laterais

Level	Pole (mm)	MDB (mm)	Decrease Ratio (%)
4	166	65	35,80
3	326	251	23,00
2	368	246	33,20
1	300	61	79,70

Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2006)

Figura 2.7: Classificação por altura do impacto lateral



Fonte: (WANG et al., 2006)

2.4 Dispositivos Antropomórficos de Testes

Os DATs são projetados por especialistas da indústria e de agências regulatórias para replicar as respostas do corpo humano em situações de impacto, permitindo a avaliação de risco de ferimentos e o estudo da interação veículo-ocupante. Nos testes reais, são utilizados *dummies* específicos para cada norma, a fim de associar os mecanismos de cada caso ao dispositivo mais adequado em termos de antropometria ³ e de instrumentação.

O desenvolvimento de novos *dummies* e modelos de elementos finitos capazes de capturar as nuances do comportamento humano em casos de colisão representa uma

³Parte da antropologia física que estuda as dimensões, a forma e a composição do corpo humano.

Figura 2.8: *Dummy* WorldSID-50M

Fonte: (HUMANETICS, 2022)

preocupação de igual importância ao desenvolvimento de novos veículos. Atualmente, a Toyota projeta alguns dos modelos mais avançados de corpo humano existentes (TOYOTA, 2022). Chamados de THUMS (*Total Human Model for Safety*), os modelos de última geração são dotados de sistemas para replicar fraturas de ossos, danos cerebrais e inclusive respostas ativas dos músculos em cenários de colisão, além de expandir a variabilidade em termos de idade, peso, altura e gênero dos ocupantes. Esse progresso é válido na medida em que preenche o vácuo deixado pelas normas vigentes de impacto que, apesar de extremamente úteis, necessitam de atualizações, como é o caso da UNECE R135, que reflete seus critérios com base em somente um perfil de corpo humano, o de um homem adulto mediano. A Figura 2.9 exibe o nível de detalhe da 6ª geração dos modelos THUMS.

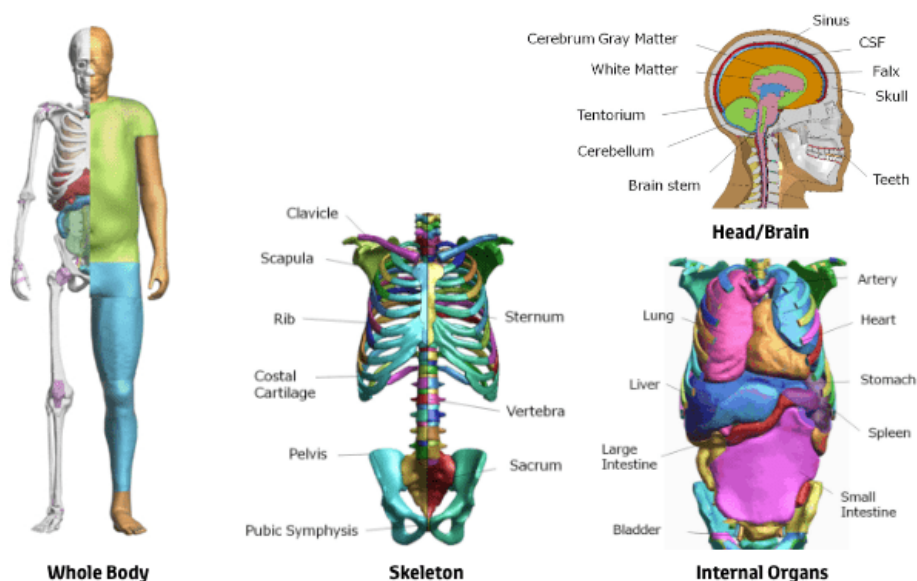
2.5 Requisitos

Esta seção foi dividida em duas partes: critérios de performance das baterias e critérios de performance da norma. A seção de Metodologia explica as analogias entre o DAT físico e o modelo virtual, demonstrando como os requisitos foram avaliados nas simulações.

2.5.1 Critério de performance do compartimento das baterias

A deformação máxima no compartimento das baterias não deve exceder 23 *mm*, em decorrência do risco de incêndios ou explosões, assim como exposto na subseção 2.2.1.

Figura 2.9: Modelagem de órgãos internos da 6ª geração dos modelos THUMS



Fonte: (TOYOTA, 2022)

2.5.2 Critérios de performance da UNECE R135

Analogamente aos DATs reais, os critérios também podem ser verificados nos modelos de elementos finitos. A Figura 2.8 mostra o WorldSID-50M, *dummy* de um homem adulto mediano utilizado na UNECE R135. A Tabela 2.2 contém os sensores físicos presentes no WorldSID-50M, por meio dos quais são analisados os critérios de performance da norma. Tahan et al (TAHAN et al., 2018) validaram cada um de seus subsistemas com sete tipos de ensaios: *head drop test* (cabeça), *neck pendulum test* (pescoço), *shoulder pendulum test* (ombros), *thorax with/without half arm pendulum test* (tórax), *abdomen pendulum test* (abdômen) e *lumbar spine and pelvis pendulum test* (coluna e pélvis). A LST disponibiliza o modelo e sua documentação para o LS-Dyna, bastando utilizar o pós-processador para obter e visualizar resultados nos nós/elementos de interesse (LSTC, 2022).

A UNECE R135 estabelece critérios de performance para a cabeça, o ombro, as costelas e a coluna. A descrição e o método de cálculo de cada regra são explicados a seguir.

- HIC36 não deve exceder 1000;
- A força lateral de pico no ombro não deve exceder 3 *kN*;
- A deflexão máxima nas costelas torácicas não deve exceder 55 *mm*;
- A deflexão máxima nas costelas abdominais não deve exceder 65 *mm*;
- A aceleração resultante na vértebra T12 (última vértebra torácica) não deve exceder 75 *g*, exceto em intervalos que acumulem duração entre picos menor do que 3 *ms*;

Tabela 2.2: Instrumentação do *dummy* WorldSID-50M

Linear Accelerometers	Rotational Accelerometers	Tilt Sensor	Load Cells	Load Cells	Displacement Transducers
Head Axyz	Thorax ω'_{xyz}	Thorax θ_{xy}	Lower Neck Fxyz, Mxyz	Mid Femur L/R Fxyz, Mxyz	Knee L/R Angle θ_y
Thorax Upper Axyz	Pelvis ω'_{xyz}	Pelvis θ_{xy}	Shoulder L/R Fxyz	Femoral Neck L/R Fxyz	
Thorax Lower Axyz			Elbow Mxy	Knee L/R contact Fy	
Thorax ea. Rib (6x) Ay			Lumbar Fxyz, Mxyz	Upper Tibia Fxyz, Mxy	
Pelvis Axyz			Sacroiliac Fxyz, Mxyz	Lower Tibia Fxyz, Mxy	

Fonte: Adaptado de (HUMANETICS, 2022)

- A força de pico na sínfise púbica não deve exceder $3,36 \text{ kN}$.

Head Injury Criterion (HIC) 36

O critério de performance na cabeça é o máximo valor calculado a partir da expressão:

$$HIC36 = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{R,H} dt \right]^{2,5} \quad (2.1)$$

Onde:

- a_R é a aceleração resultante no baricentro da cabeça em termos de $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
- t_1 e t_2 são instantes contidos no intervalo do impacto, com $|t_2 - t_1| \leq 36 \text{ ms}$.

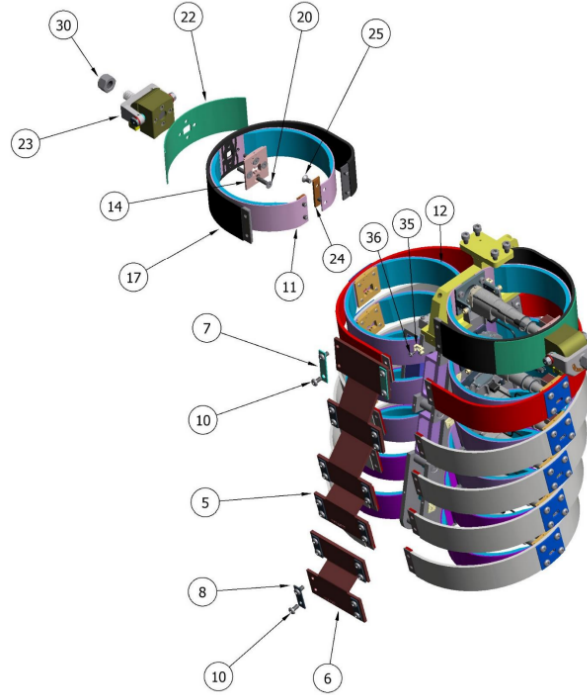
A aceleração $a_{R,H}$ é calculada por:

$$a_{R,H} = \sqrt{a_{x,H}^2 + a_{y,H}^2 + a_{z,H}^2} \quad (2.2)$$

Shoulder performance criterion

A força lateral de pico no ombro é a força lateral máxima na direção y (transversal) medida pela célula de carga montada entre os componentes 22 e 23 ilustrados na Figura 2.10.

Figura 2.10: Componentes do tórax do WorldSID-50M



Fonte: (HUMANETICS, 2018)

Thorax performance criterion

A deflexão máxima nas costelas torácicas é a maior deflexão de qualquer costela torácica (inferior, média ou superior). Deve ser medida pelo sensor de deflexão montado em cada uma das costelas do lado atingido na colisão. Os sensores das costelas do tórax estão representados, de cima para baixo, como o segundo, terceiro e quarto pistões IR-TRACC (*Infra-Red Telescoping Rod for the Assessment of Chest Compression*) na Figura 2.11.

Abdominal performance criteria

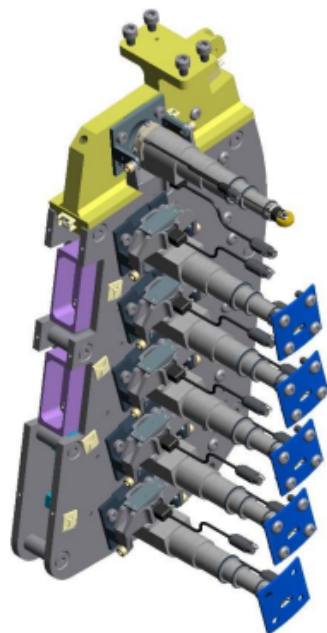
A deflexão máxima nas costelas abdominais é a maior deflexão de qualquer costela abdominal (inferior ou superior). Deve ser medida pelo sensor de deflexão montado em cada uma das costelas do lado atingido na colisão (últimos dois pistões na Figura 2.11). A aceleração resultante na vértebra T12 complementa essa avaliação e é calculada por:

$$a_{R,T12} = \sqrt{a_{x,T12}^2 + a_{y,T12}^2 + a_{z,T12}^2} \quad (2.3)$$

Pelvis performance criterion

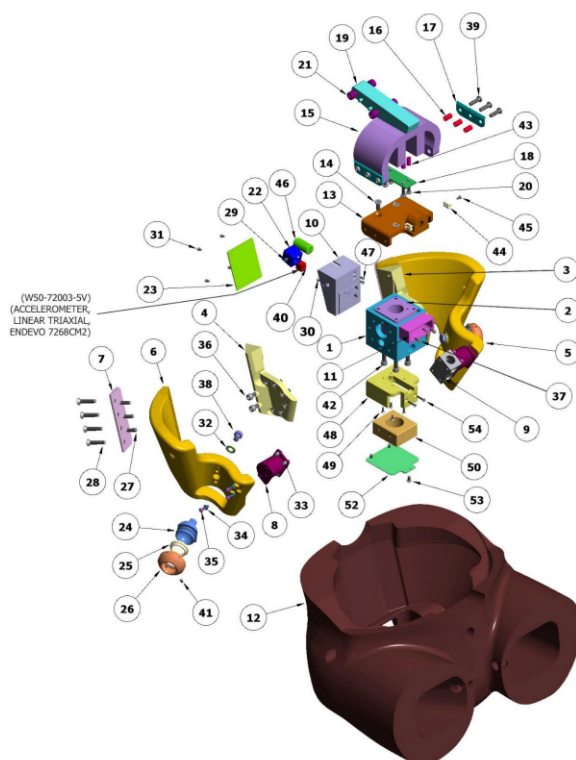
A força de pico na sínfise púbica é a força máxima medida pela célula de carga montada na sínfise púbica da pelve, assim como indicado pelo componente 9 da Figura 2.12.

Figura 2.11: Detalhe das costelas do WorldSID-50M



Fonte: (HUMANETICS, 2018)

Figura 2.12: Componentes da região pélvica do WorldSID-50M



Fonte: (HUMANETICS, 2018)

Metodologia

Neste trabalho, foi adotada a metodologia representada pelo fluxograma da Figura 3.1. A primeira etapa foi realizada com o auxílio de um *software* CAD¹, consistindo no projeto da geometria dos componentes do VHF urbano. As quatro etapas seguintes foram realizadas com o auxílio de *softwares* CAE², consistindo: na geração da malha de simulação, no pré-processamento, na execução do *solver* e no pós-processamento dos resultados.

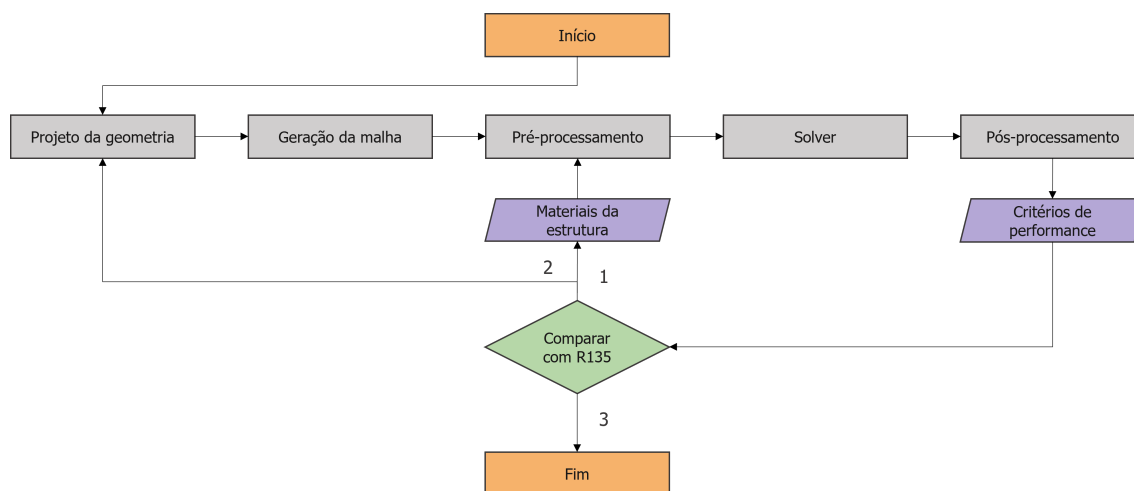
Esta seção foi organizada com o propósito de detalhar o passo a passo da metodologia, com ênfase na etapa de pré-processamento, na qual parâmetros importantes como os modelos constitutivos, as seções transversais e os contatos entre os componentes foram especificados. Na modelagem do material da estrutura, foram realizadas simulações utilizando dois aços diferentes, AISI 1015 e DP1000. Pelo fato de o AISI 1015 ter sido o material escolhido para a construção do protótipo da terceira geração do VHF urbano, a análise foi estendida para utilizar dados experimentais no modelo virtual. Desse modo, foram fabricados corpos de prova segundo a norma ASTM E8 (ASTM, 2016) e realizados testes de tração no GMSIE-USP. A metodologia experimental dos ensaios com o AISI 1015 pode ser conferida em maiores detalhes na seção seguinte, de Caracterização do Material. A análise com o DP1000 foi realizada com o objetivo de formar uma base de comparação (*benchmark*), uma vez que é um aço avançado de alta resistência e que foi empregado nas duas gerações anteriores do veículo, fornecendo resultados satisfatórios. Além disso, foi realizada uma proposta de alteração na geometria a fim de investigar sua influência.

Por fim, a subseção de pós-processamento expõe os locais no modelo virtual do *dummy* onde os critérios foram determinados, i.e. quais nós/elementos da malha foram utilizados para se calcular acelerações, forças e deslocamentos. Como não houve mudanças no DAT entre uma simulação e outra, as referências (*IDs*) dos nós/elementos se mantiveram.

¹Computer Aided Design é uma ferramenta computacional para o projeto de modelos 2D e 3D.

²Computer Aided Engineering é um grupo de ferramentas computacionais para simulação e análise de problemas de engenharia, como resistência dos materiais, transferência de calor e mecânica dos fluidos.

Figura 3.1: Fluxograma da metodologia do projeto



Fonte: Dos autores

3.1 Projeto da geometria

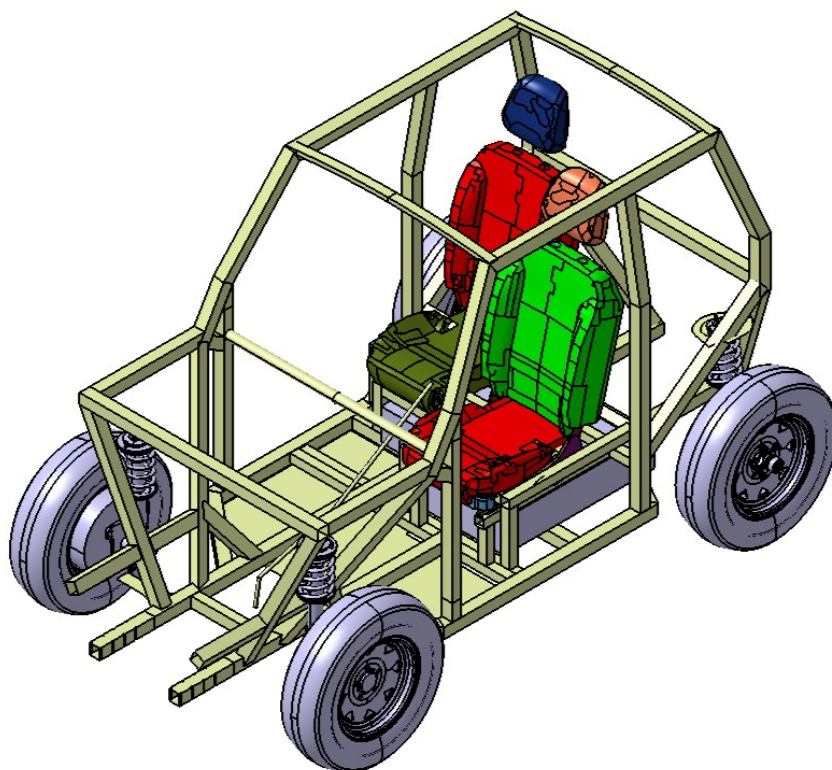
O CATIA V5 foi o *software* selecionado para a modelagem em CAD. A escolha foi motivada principalmente pela disponibilidade nas máquinas do GMSIE-USP e pela presença de módulos para projeto superfícies complexas e para geração de desenhos de fabricação, ferramentas mais utilizadas durante as etapas de concepção e fabricação do VHF urbano. A Figura 3.2 ilustra o projeto da terceira geração do carro realizado por Duarte.

3.2 Geração da malha

A malha base de simulação foi gerada por Duarte no *software* Hypermesh. Alguns componentes, como pneus, rodas, assentos e o próprio *dummy* tiveram seus modelos discretizados obtidos da CCSA (CCSA, 2022) e da LSTC (LSTC, 2022), respectivamente. Já partes como os motores, o cinto de segurança e as soldas foram criadas diretamente no LS-PrePost. A Figura 3.3 mostra a malha do VHF urbano com o WorldSID-50M sentado na posição do motorista, dispondo de um total de quase um milhão de elementos.

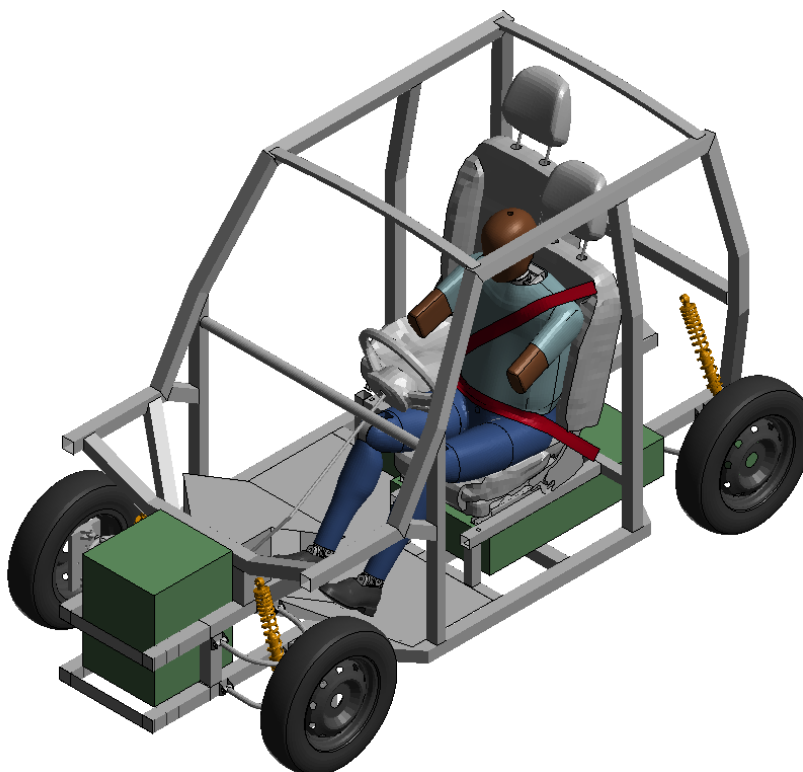
Com relação à natureza dos elementos da malha, foram utilizados cinco tipos: sólidos, cascas, elementos de viga, elementos discretos e elementos de cinto de segurança.

Figura 3.2: Projeto em CAD da terceira geração do VHF urbano



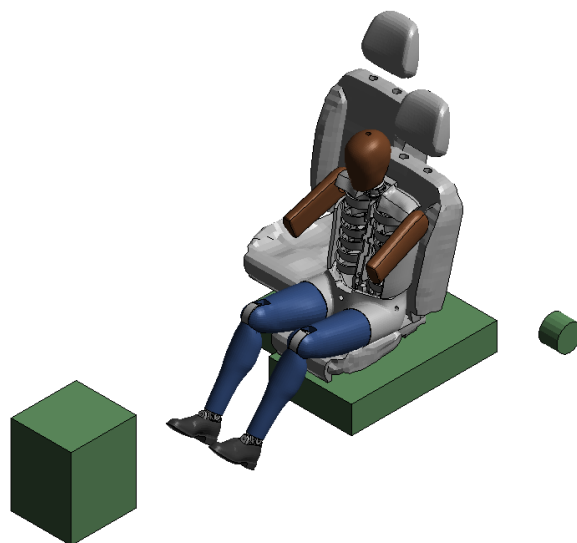
Fonte: Dos autores

Figura 3.3: Malha de simulação do VHF urbano com o WorldSID-50M



Fonte: Dos autores

Figura 3.4: Elementos sólidos na malha base de simulação



Fonte: Dos autores

3.2.1 Elementos sólidos

Os elementos sólidos empregados no modelo são entidades com 8 nós, um ponto de integração e controle de *hourglass*³. A Figura 3.4 mostra os componentes do modelo que foram discretizados com esse tipo de elemento. No total, foram gerados 454805 elementos.

Esses elementos foram utilizados em estruturas tridimensionais nas quais as três dimensões eram comparáveis em ordem de grandeza ou de relevância, como no caso dos órgãos internos e membros do WorldSID-50M. As partes em verde se referem: ao motor à combustão (posicionado à frente do *dummy*), ao conjunto de baterias (posicionado abaixo do *dummy*) e aos motores elétricos (um por roda traseira). A modelagem dessas partes foi simplificada para replicar apenas os atributos mais relevantes para o modelo, i.e. volume, massa e posição, uma vez que não tem função estrutural significativa nos impactos.

3.2.2 Elementos de casca

Os elementos de casca empregados no modelo são entidades com 3 ou 4 nós, com a formulação padrão de Belytschko-Tsay, a mais econômica e recomendada para o LS-Dyna (LS-DYNA, 2022), à exceção de alguns elementos do *dummy* e das rodas, cujos modelos

³*Hourglass* são modos de deformação não-físicos e de energia nula (espúrios) que aparecem em elementos com integração reduzida, e.g. elementos sólidos com apenas um ponto de integração (LS-DYNA, 2022). O controle de modos espúrios é de suma importância nos problemas de elementos finitos, uma vez que o emprego da integração reduzida afeta a matriz de rigidez global, causando singularidades (SCHULZ, 1997). As vantagens são a rapidez e a estabilidade da simulação, principalmente em cenários com grandes deformações, como impactos. As formulações de Flanagan e Belytschko (FLANAGAN; BELYTSCHKO, 1981) e de Belytschko et al (BELYTSCHKO et al., 1984) são algumas das mais utilizadas para correção da matriz de rigidez global, introduzindo termos de viscosidade artificial ou de rigidez artificial, respectivamente.

Figura 3.5: Elementos de casca na malha base de simulação



Fonte: Dos autores

de elementos finitos foram obtidos de terceiros. A Figura 3.5 mostra os componentes que foram discretizados com esse tipo de elemento. No total, foram gerados 446735 elementos.

Frequentemente, elementos de casca são utilizados em cenários que demandem o tratamento de contatos entre estruturas finas. Por isso, os tubos da estrutura, assim como outros componentes (direção, assoalho, rodas, massa não-suspensa e assentos) são compostos por cascas, sendo a espessura da seção de cada parte definida posteriormente.

3.2.3 Elementos de viga

Os elementos de viga empregados no modelo são entidades com 2 nós. Foram amplamente utilizados na criação de soldas. No modelo, cada solda entre dois componentes foi definida por meio da seleção das duas faces a serem conectadas e de uma quantidade de conexões (vigas) a serem geradas, como pontos de solda. No total, foram gerados 37049 elementos.

3.2.4 Elementos de cinto de segurança

O LS-PrePost possui elementos dedicados para a modelagem do cinto de segurança. No método de criação de um cinto híbrido de 3 pontos, i.e. composto por elementos 1D e 2D (cascas), foram utilizados 3 tipos de elementos unidimensionais: *seatbelt*, *slipring* e *retractor*. Os elementos do tipo *seatbelt* podem ser observados na Figura 3.6 conectando as extremidades das partes 2D do cinto até os 3 pontos de ancoragem na estrutura do VHF urbano. É um elemento mais robusto que o elemento de casca para resolver a cinemática e a dinâmica do problema do cinto, porém não é recomendado para o tratamento de contatos

Figura 3.6: Modelagem do cinto de segurança em elementos finitos



Fonte: Dos autores

com o *dummy*. Os elementos do tipo *slipring* podem ser encontrados nas intersecções entre o cinto abdominal e o cinto superior (região inferior esquerda da Figura 3.6) e entre o cinto superior e o cinto 1D paralelo à coluna B do carro (região à direita do *dummy* na Figura 3.6). É um elemento que replica o dispositivo através do qual o cinto pode deslizar livremente, como observado no corpo da fivela de um cinto convencional. Por último, o elemento do tipo *retractor* pode ser encontrado na conexão do cinto 1D paralelo à coluna B e o ponto de ancoragem no chassis. É um elemento que replica o dispositivo que regula o tamanho do cinto para ajuste ao corpo do passageiro e trava o sistema em uma situação de impacto, segurando o corpo contra o assento. No total, foram gerados 101 elementos.

3.2.5 Elementos discretos

O LS-PrePost possui elementos discretos (molas) que são utilizados em componentes específicos, como é o caso de algumas partes do WorldSID-50M. No modelo do *dummy*, podem ser observados elementos discretos dentro das costelas, a fim de facilitar as análises de deflexão dos critérios de performance. No total, foram gerados 14 elementos.

3.3 Pré-processamento

No LS-PrePost, o método de edição dos parâmetros de pré-processamento é realizado por meio de *keywords*. Essas palavras-chave podem ser criadas para definir desde materiais, seções, contatos e condições iniciais até curvas e tabelas. O *software* não possui unidades,

Tabela 3.1: Unidades consistentes do modelo

Mass	Length	Time	Force	Stress	Energy
Kg	mm	ms	kN	GPa	$kN - mm$

Fonte: Dos autores

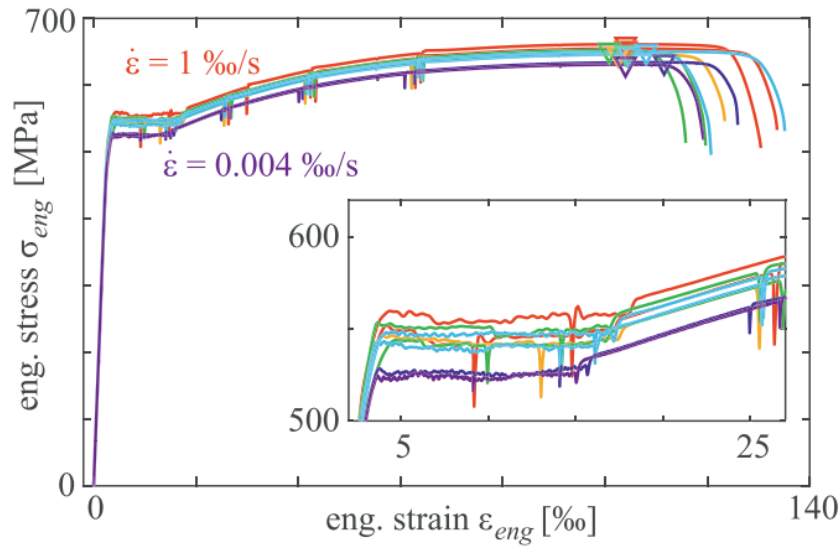
Tabela 3.2: Arquivos de simulação do modelo e suas funções

Arquivo	Função principal
<i>boundary.k</i>	Especificar a velocidade inicial do veículo
<i>contacts.k</i>	Especificar as condições de contato entre componentes
<i>controls.k</i>	Especificar os controles de <i>hourglass</i> e de terminação
<i>curves.k</i>	Especificar as curvas usadas para os pneus e o cinto
<i>driver - seat.k</i>	Especificar nós, elementos e partes do assento do motorista
<i>dummy.k</i>	Especificar nós, elementos e partes do WorldSID-50M
<i>dummy - contacts.k</i>	Especificar as condições de contato do <i>dummy</i>
<i>experimental - data.k</i>	Especificar os dados experimentais obtidos de ensaios
<i>left - suspension.k</i>	Especificar nós, elementos e partes da suspensão esquerda
<i>materials - sections.k</i>	Especificar as propriedades dos materiais e das seções
<i>motores.k</i>	Especificar nós, elementos e partes da bateria e dos motores
<i>nodes.k</i>	Especificar todos os nós do modelo
<i>passenger - seat.k</i>	Especificar nós, elementos e partes do assento do passageiro
<i>right - suspension.k</i>	Especificar nós, elementos e partes da suspensão direita
<i>rigid - walls.k</i>	Especificar as propriedades geométricas do chão e do poste
<i>rodas.k</i>	Especificar nós, elementos e partes das rodas
<i>seatbelt.k</i>	Especificar nós, elementos e partes do cinto de segurança
<i>steering - wheel.k</i>	Especificar nós, elementos e partes da direção
<i>vhf - urbano.k</i>	Especificar nós, elementos e partes da estrutura
<i>weldings.k</i>	Especificar nós, elementos e partes das soldas

Fonte: Dos autores

portanto, para que os resultados tenham algum sentido físico é esperado que um sistema consistente de unidades seja utilizado. A Tabela 3.1 mostra o sistema de unidades adotado. Cada *keyword*, assim como cada entidade ativa do modelo, possui um identificador único, reúne diferentes parâmetros de acordo com o contexto de aplicação e é gravada em um arquivo de extensão *.k*. A estruturação do *software* por palavras-chave em arquivos separados facilita a criação de diferentes casos de simulação, tornando possível editar apenas os atributos desejados a partir de um modelo base. Sendo assim, cada subsistema foi desenvolvido de forma independente, resultando em um total de 20 arquivos *.k* e um arquivo geral *main.k* que os agrega. A Tabela 3.2 exhibe a arquitetura do modelo.

As próximas subseções abordam a modelagem dos diferentes materiais presentes no VHF urbano, principalmente na estrutura, além de como foram definidas as seções

Figura 3.7: Variação das curvas tensão-deformação pelo efeito de $\dot{\epsilon}$ 

Fonte: (HAEFLIGER; FOMASI; KAUFMANN, 2021)

transversais das partes que compõem o modelo, as condições iniciais do problema e, não menos importante, como foi criado o cenário de impacto descrito na UNECE R135.

3.3.1 Materiais

Em uma colisão real, o material da estrutura pode sofrer diferentes taxas de deformação em um intervalo curto. Taxas de deformação da ordem de $10^{-6} s^{-1}$ até $10^{-2} s^{-1}$ são geralmente classificadas como quase-estáticas, i.e. os efeitos da aceleração nos dispositivos de medição de carga e a propagação das ondas de tensão no objeto podem ser negligenciados. Um estudo indicou que as taxas de deformação envolvidas em fenômenos como impactos costumam ser muito maiores, da ordem de $10^{-1} s^{-1}$ até $10^3 s^{-1}$, o que provocou tensões na região plástica maiores em relação às do caso quase-estático (HAEFLIGER; FOMASI; KAUFMANN, 2021). Segundo esse trabalho, as tensões encontradas para um $\dot{\epsilon}$ de $10^{-3} s^{-1}$ foram 5% maiores quando comparadas a um valor de $4 \cdot 10^{-6} s^{-1}$. A Figura 3.7 mostra como o comportamento das curvas tensão-deformação tende a variar com a taxa de deformação na qual o teste de tração é realizado. É possível observar um acréscimo no patamar da tensão na região plástica de deformação com o incremento de $\dot{\epsilon}$.

Motivado pela influência da taxa de deformação no comportamento do material em impactos, foram selecionados modelos constitutivos para os tubos do chassi que considerassem esse efeito. Os próximos tópicos detalham também alguns dos materiais utilizados nos principais componentes do VHF urbano, como motores e soldas.

Estrutura: aço AISI 1015

A keyword `*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024)` foi utilizada para modelar a estrutura do VHF urbano com aço AISI 1015. É um dos métodos mais utilizados no LS-PrePost, uma vez que é altamente eficiente para impactos e pode ser empregado com diferentes tipos de elementos, como sólidos, cascas ou vigas (LSTC, 2012). O material é elastoplástico, pode ser vinculado a valores arbitrários de tensão-deformação e fornece opções para tratar a dependência da taxa de deformação. No caso, optou-se por alimentar o modelo com quatro resultados de testes de tração a diferentes $\dot{\epsilon}$, mostrados na Tabela 4.1 da seção de Caracterização do Material. O parâmetro LCSS do método `*MAT_024` foi ativado para que o LS-PrePost fizesse a interpolação dos pontos de entrada e a criação das curvas tensão-deformação para taxas de deformação variáveis. Por *default*, no caso de ocorrência de taxas de deformação fora da faixa conhecida, o *software* não realiza a interpolação entre curvas, mas ajusta a resposta do material para a curva mais próxima.

Estrutura: aço DP1000

A keyword `*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK (*MAT_098)` foi utilizada para modelar a estrutura do VHF urbano com aço DP1000. O modelo constitutivo simplificado de Johnson e Cook é frequentemente adotado em simulações de resistência ao impacto pelo fato de que seus parâmetros são objeto de ampla pesquisa acadêmica e, portanto, facilmente encontrados na literatura (JOHNSON; COOK, 1983). Além disso, Johnson e Cook consideram um modelo isotrópico para o endurecimento (*hardening*) e os efeitos da taxa de deformação em sua formulação (LSTC, 2012). Para criar o método `*MAT_098`, foram utilizados dados de um estudo de Song e Dai (SONG; DAI, 2013) para a definição das constantes do DP1000, sendo: $A = 0,6736$, $B = 1,303$, $n = 0,4217$, $C = 0,0168$, $\epsilon_0 = 0,001$, $E = 210$, $\nu = 0,28$ e $\rho = 7,90e - 05$. Esses parâmetros se relacionam com a tensão efetiva no modelo constitutivo de Johnson e Cook da seguinte forma:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 - C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (3.1)$$

Onde:

- σ é a tensão equivalente de von Mises;
- ϵ é a deformação equivalente;
- $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação equivalente;
- $\dot{\epsilon}_0$ é a taxa de deformação de referência;
- A , B , C e n são constantes do material obtidas de ensaios de tração.

Motores

A *keyword* de corpo rígido `*MAT_RIGID (*MAT_o2o)` foi utilizada para modelar os três motores, uma vez que as deformações desses componentes não foram escopo deste trabalho. A unidade a combustão foi representada por um cubo de 49 *kg* de dimensões aproximadas ao motor real, assim como as unidades elétricas, que por sua vez foram representadas por cilindros de 19 *kg* cada, posicionadas no interior de cada roda traseira.

Conjunto de baterias

A *keyword* `*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_o24)` foi utilizada para modelar o conjunto de baterias. As propriedades do material foram copiadas do aço AISI 1015 do primeiro caso do modelo da estrutura, enquanto a geometria foi simplificada para um paralelepípedo único, localizado abaixo dos assentos e com 83 *kg* de massa.

Soldas

A *keyword* `*MAT_SPOTWELD (*MAT_100)` foi utilizada para modelar as soldas. O material possui propriedades mecânicas de um aço de baixo carbono e foi associado aos elementos de viga presentes entre os componentes tubulares do chassi. O principal bônus das soldas no LS-PrePost é realizar a modelagem de interfaces de uma forma mais realística em relação àquela que equipara as soldas com vínculos de corpo rígido.

Assentos

A *keyword* `*MAT_LOW_DENSITY_FOAM (*MAT_o57)` foi utilizada para modelar os assentos do veículo. O material é viscoplástico e possui respostas diferentes para carga e descarga, o que resulta em um efeito histerético, característico de espumas (LSTC, 2012). A modelagem da interface entre componentes de rigidez muito superior à de materiais como espumas pode provocar diversos problemas na simulação, sendo recomendável uma condição especial de contato, conforme explicado na subseção de Contatos.

Cinto de segurança

A *keyword* `*MAT_FABRIC (*MAT_o34)` foi utilizada para modelar a parte 2D do cinto de segurança, que possui contato com o corpo do *dummy*. O material é ortotrópico e foi inicialmente desenvolvido para aplicação em *airbags*, mas se estendeu para o estudo de cintos de segurança. Segundo o manual do LS PrePost, o modelo constitutivo possui uma formulação dedicada ao tratamento do comportamento de tecidos sob altas deformações (LSTC, 2012). Já a *keyword* `*MAT_SEATBELT (*MAT_Bo1)` foi utilizada para modelar a parte 1D do cinto. O material foi proposto especialmente para replicar a carga e a descarga

do sistema, sendo possível fornecer curvas para cada um desses regimes de esforços. As curvas de carga e descarga foram replicadas do trabalho de Duarte (DUARTE, 2021).

3.3.2 Seções

As seções são características intrinsicamente relacionadas aos elementos. São elas que diferenciam elementos do mesmo tipo de acordo com suas propriedades mecânicas. Nos elementos da estrutura, por exemplo, os fatores que diferenciam um tubo de outro são a espessura e a formulação do elemento, atributos definidos nas *keywords* de seção.

Foram utilizados cinco métodos distintos para esta etapa: **SECTION_SHELL* (82) para os elementos da estrutura e as partes do assento em contato com o *dummy*; **SECTION_SOLID* (101) para os motores, baterias e nos assentos; **SECTION_BEAM* (3) para os elementos de viga (soldas); **SECTION_DISCRETE* (2) para alguns elementos do *dummy* e, por fim, **SECTION_SEATBELT* (1) para os elementos 1D do cinto de segurança.

3.3.3 Contatos

Os contatos são entidades no LS-PrePost que modelam a interação entre os componentes, cada um com seu devido material. Na análise, foram utilizados três métodos distintos.

O método **CONTACT_SINGLE_SURFACE* foi adotado entre os elementos da estrutura do veículo, de forma a impedir que os tubos penetrassem uns nos outros ou entre si.

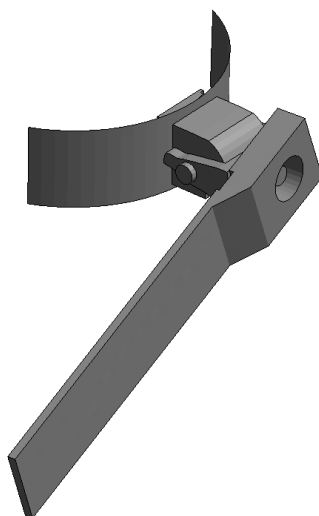
O método **CONTACT_SPOTWELD* foi empregado em todas as regiões de solda do veículo, principalmente na estrutura. Ele representa o equivalente a um engaste da teoria de tipos de apoio, tornando possível a transmissão de momentos, forças cortantes e forças normais. Também, previne que tubos se desconectem durante a simulação dinâmica.

Por último, o método **CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE* foi empregado nas interações entre *dummy* e estrutura do veículo, *dummy* e cinto de segurança e *dummy* e assento. Ele permite que seja associado um termo de atrito entre as superfícies em contato (coeficiente de Coulomb), o qual foi mantido em 0,1 a exemplo do trabalho de Duarte. Além disso, esta é uma *keyword* que também previne a penetração de um corpo no outro, o que é coerente com a física do problema. Os contatos internos do *dummy* já estavam modelados no arquivo disponibilizado pela LSTC, dispensando modificações.

3.3.4 Condições iniciais

Nesta etapa, a velocidade do veículo foi configurada de acordo com a respectiva norma. No caso da UNECE R135, foi associada ao veículo uma velocidade com componentes de $1,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na direção longitudinal da estrutura e de $6,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na direção transversal da mesma, o que implica em um ângulo de colisão de 75 graus com o poste.

Figura 3.8: Região de análise do critério de performance no ombro



Fonte: Dos autores

Também, o tempo de simulação foi estipulado em 90 ms , suficiente para capturar o momento da colisão e os instantes subsequentes relevantes para a análise.

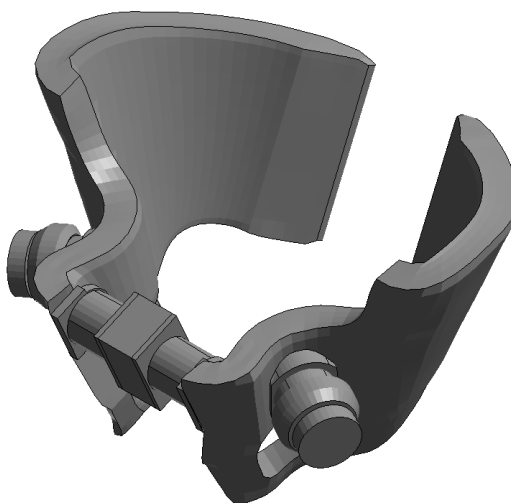
3.4 Solver

O LS-Dyna foi o *software* de elementos finitos utilizado nesta etapa. Foi utilizado um PC do GMSIE-USP com processador Intel I7-8700 de 6 núcleos e 8 GB de memória RAM para as simulações. Na configuração de cada simulação, foram disponibilizados quatro núcleos da CPU e a memória foi alocada automaticamente pelo programa. Cada simulação com o modelo completo, i.e. VHF urbano e *dummy*, demorou cerca de quatro a cinco horas.

3.5 Pós-processamento

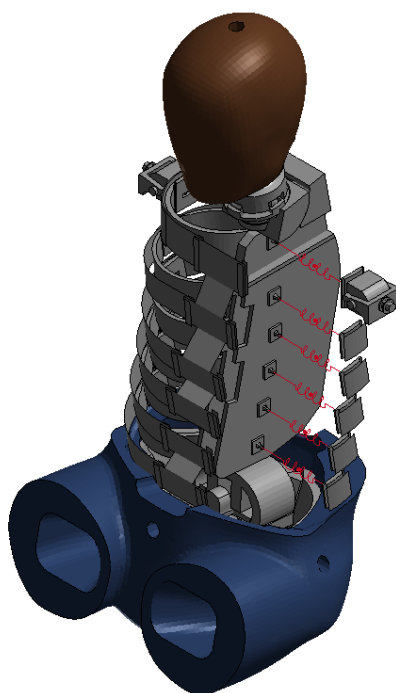
Na etapa de pós-processamento, foram recolhidos os dados das simulações no LS-PrePost. Para os critérios de performance na cabeça e na vértebra T12, foram plotadas as acelerações dos nós referenciados no manual do WorldSID-50M (LSTC, 2018). Para os critérios de deflexão máxima das costelas, foram plotados os deslocamentos de cada um dos elementos discretos (elementos de mola da Figura 3.10). Já para os critérios de força máxima no ombro e na sínfise púbica, foram calculadas as forças nas respectivas células de cargas modeladas em elementos finitos, assim como observado nas Figuras 3.8 e 3.9. Os valores obtidos e confrontados com a UNECE R135 podem ser verificados na seção de Resultados.

Figura 3.9: Região de análise do critério de performance na pelve



Fonte: Dos autores

Figura 3.10: Região de análise do critério de performance nas costelas

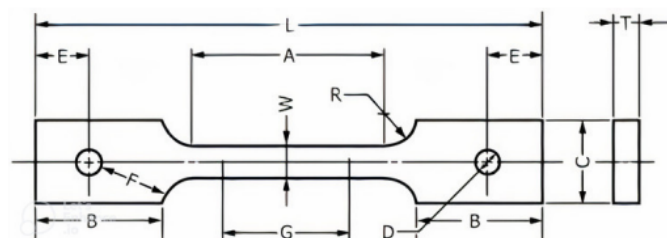


Fonte: Dos autores

Caracterização do Material

A fim de avaliar a influência da taxa de deformação no material utilizado no protótipo de terceira geração do VHF urbano, foram conduzidos testes de tração com quatro espécimes a diferentes velocidades na Instron 3369 (INSTRON, 2022) do GMSIE-USP. As dimensões dos corpos de prova fabricados estão ilustradas na Figura 4.1. As velocidades do teste foram escolhidas de forma a se replicar um caso próximo do quase-estático, um caso no limite superior de velocidade da máquina e dois casos intermediários. A Tabela 4.1 mostra as taxas de deformação que foram impostas aos espécimes para a análise. Devido à restrição da máquina disponível, não foi possível realizar ensaios mais rápidos.

Figura 4.1: Dimensões do corpo de prova segundo a ASTM E8



Definitions	Dimensions for a 6 mm Subsize Specimen [mm]
G - Gauge Length	25,0 ± 0,1
W - Width	6,0 ± 0,1
T - Thickness	Thickness of Material
R - Radius of Fillet, min	6
L - Overall Length	100
A - Length of Reduced Section	32
B - Length of Grip Section	30
C - Width of Grip Section	10

Fonte: Adaptado de (ASTM, 2016)

Tabela 4.1: Casos investigados nos ensaios de tração

Espécime	L_0 [mm]	Velocidade da Máquina [$mm \cdot min^{-1}$]	$\dot{\epsilon}$ [s^{-1}]
AISI 1015 #1	25	50	0,033
AISI 1015 #2	25	100	0,067
AISI 1015 #3	25	200	0,200
AISI 1015 #4	25	500	0,333

Fonte: Dos autores

Para o levantamento das curvas tensão-deformação verdadeiras, foi necessário obter a carga instantânea aplicada pela máquina e a deformação de cada corpo de prova durante os testes. No caso da medição da deformação, apesar de o GMSIE-USP possuir um extensômetro, optou-se por um método alternativo baseado em correlação digital de imagem (DIC), uma técnica não invasiva e altamente precisa. Outra vantagem do método é que ele permite extrair o campo de deformações em toda a superfície do espécime, tornando possível obter parâmetros como o módulo de Young¹ e o coeficiente de Poisson² do material. Com um extensômetro convencional, por outro lado, não haveria como medir simultaneamente deformações em direções ortogonais do corpo de prova.

Primeiramente, foi realizado o preparo da superfície do material, que consistiu em pintar uma das faces de cada espécime com tinta branca e, a seguir, pintar pequenos pontos pretos sobre a tinta branca. Essa última etapa foi realizada posicionando a lata de tinta a cerca de 20 cm dos objetos e pressionando o *spray* brevemente uma ou duas vezes, movimentando a lata pela extensão do corpo para que a tinta não ficasse concentrada. A Figura 4.2 mostra os espécimes devidamente pintados, após a finalização dos ensaios.

Os ensaios foram filmados com uma câmera digital e uma lente objetiva macro e o vídeo foi alimentado no *software* GOM Correlate, que é um programa de DIC capaz de identificar e rastrear pontos da superfície do espécime. Por isso, os corpos de prova foram pintados com cores contrastantes. O GOM Correlate possui precisão *subpixel* e permite criar extensômetros virtuais em qualquer local desejado da superfície dos espécimes.

A Figura 4.3 mostra a configuração preparada para os testes. A câmera foi posicionada em um tripé para não que não perdesse o enquadramento ou sofresse influência de vibrações externas. O foco da objetiva foi realizado manualmente de forma a se obter uma imagem nítida da superfície do corpo de prova em questão durante todo o ensaio.

As Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 exibem a análise de um espécime utilizando o GOM Correlate. Ao importar o arquivo do teste, o *software* automaticamente discretiza o filme por quadros e permite que se filtre a quantidade desejada, e.g. um quadro a cada dez. Esse é um recurso muito útil quando se trabalha com vídeos longos e com frequência de

¹O módulo de Young mede a rigidez do material (razão entre a tensão uniaxial e a deformação).

²O coeficiente de Poisson mede a expansão/contração do material na direção ortogonal à força aplicada.

Figura 4.2: Variação das curvas tensão-deformação pelo efeito de ϵ

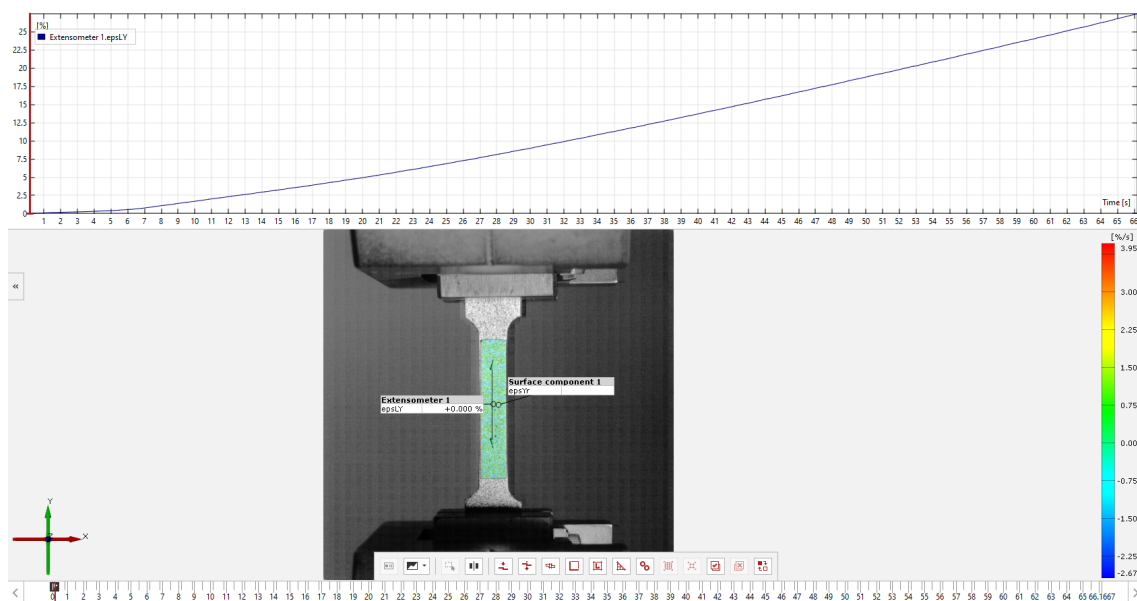


Fonte: Dos autores

Figura 4.3: Configuração do cenário para os testes de tração



Fonte: Dos autores

Figura 4.4: Captura de análise no GOM Correlate para $t = 0$ [s]

Fonte: Dos autores

captura de imagens elevada, e.g. 120 fps ou 240 fps, uma vez que se pode economizar poder computacional criando uma amostra representativa. Nos casos abordados nesta monografia, os quatro vídeos gerados tiveram sua quantidade de quadros filtrada em 25% do total, não induzindo problemas na suavidade das curvas de deformação.

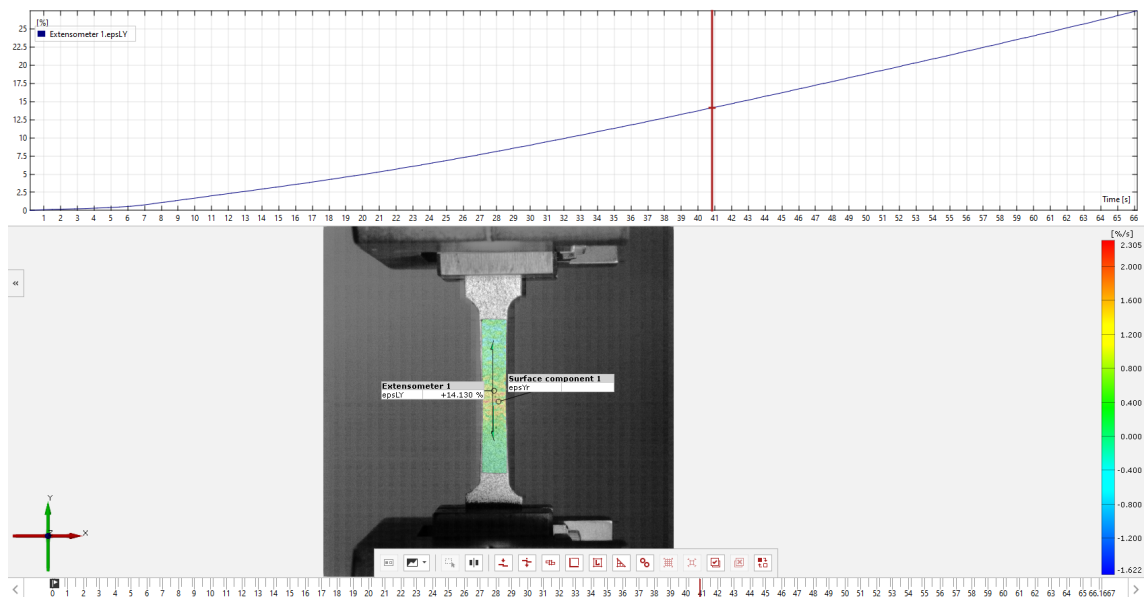
Ao centro, pode-se observar o campo de deformações, graduado por uma escala de cores que indica as regiões de maior deformação, em vermelho, e as regiões de menor deformação, em azul. No canto inferior, pode-se verificar a cronologia do ensaio, medida em segundos. Conforme o material alongou, é possível visualizar como o fenômeno do *necking* se tornou mais visível (Figura 4.6), sendo possível identificar inclusive em qual altura do espécime a fratura ocorreu. O gráfico presente na parte superior da imagem mostra a leitura do extensômetro virtual, em %, presente na linha de centro do corpo de prova. Os dados exibidos foram filtrados para variar desde o instante de deformação nula até o instante imediatamente anterior à fratura do material, que anteriormente era perceptível pela mudança abrupta de derivada na interpretação do extensômetro.

Os resultados obtidos do GOM Correlate foram exportados para uma planilha de MS Excel, contendo uma coluna com a evolução temporal da deformação de cada espécime.

No caso da medição da carga aplicada pela máquina, os dados foram obtidos diretamente da Instron 3369, que gravou os parâmetros de cada ensaio. As informações foram exportadas para a mesma planilha de MS Excel contendo os dados de deformação.

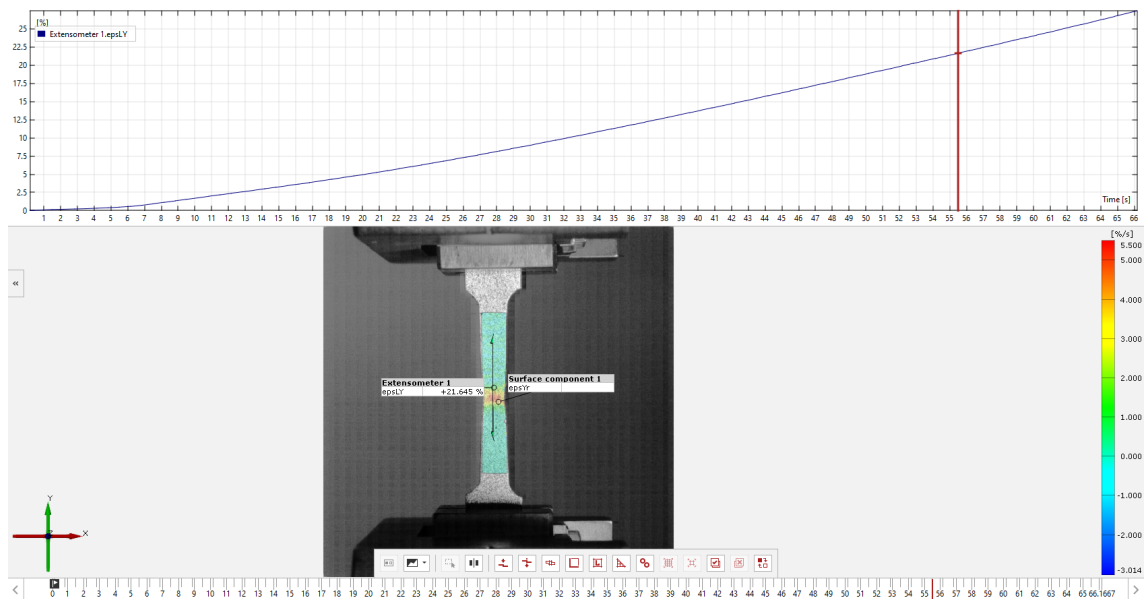
No contexto dos testes de tração, é válido ressaltar as diferenças entre as tensões de engenharia e real e as deformações de engenharia e verdadeira, assim como se observa na Figura 4.8. A tensão de engenharia é diferente da verdadeira pois não considera a

Figura 4.5: Captura de análise no GOM Correlate para $t = 41 \text{ [s]}$

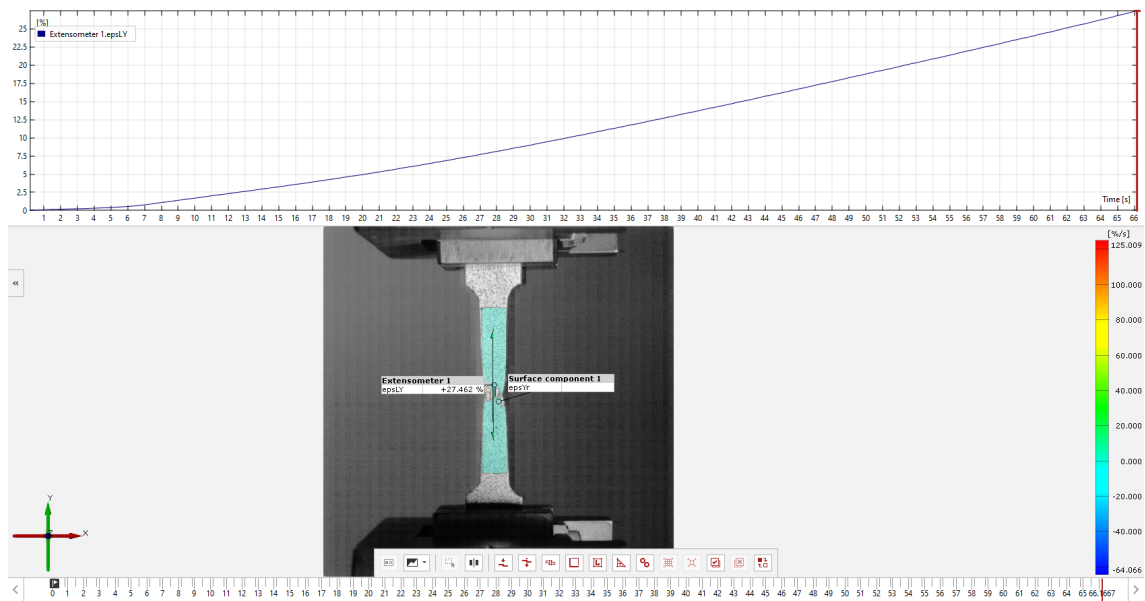


Fonte: Dos autores

Figura 4.6: Captura de análise no GOM Correlate para $t = 56 \text{ [s]}$



Fonte: Dos autores

Figura 4.7: Captura de análise no GOM Correlate para $t = 66$ [s]

Fonte: Dos autores

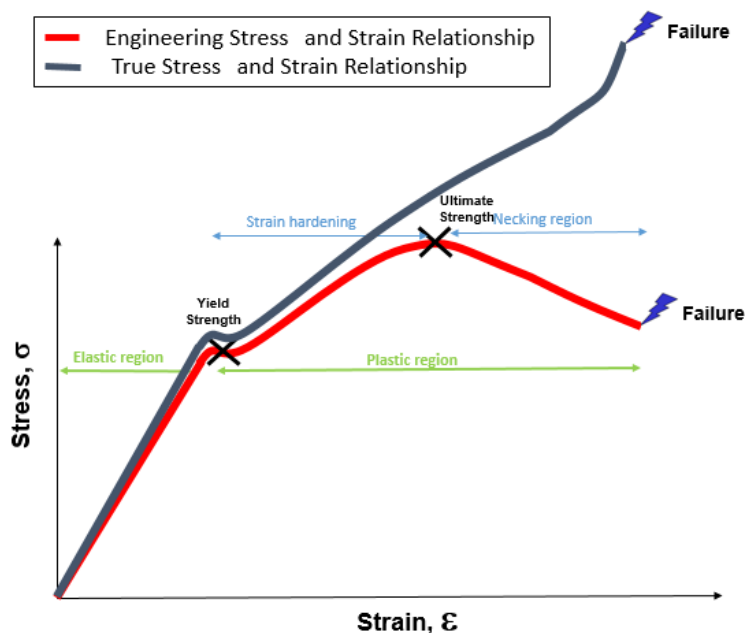
variação da seção transversal do corpo de prova, fator que se acentua na região plástica de deformação. A consequência disso é que a tensão de engenharia resulta maior do que a verdadeira, que deve ser calculada tomando como base a seção instantânea do espécime. Já a deformação de engenharia é diferente da verdadeira pois indica o quanto o material deforma por unidade de comprimento, enquanto a deformação verdadeira deve ser calculada tomando o logaritmo da razão entre o comprimento instantâneo e o comprimento inicial do espécime. Com as informações sobre as seções transversais de cada espécime, o seguinte método foi aplicado para converter as tensões e deformações:

1. Criação de uma nova coluna **Engineering stress [MPa]**;
2. Preenchimento dos valores pela divisão da carga pela seção [mm^2];
3. Criação de uma nova coluna **True stress [MPa]**;
4. Preenchimento dos valores pela aplicação da Equação 4.1;
5. Criação de uma nova coluna **True strain [MPa]**;
6. Preenchimento dos valores pela aplicação da Equação 4.2.

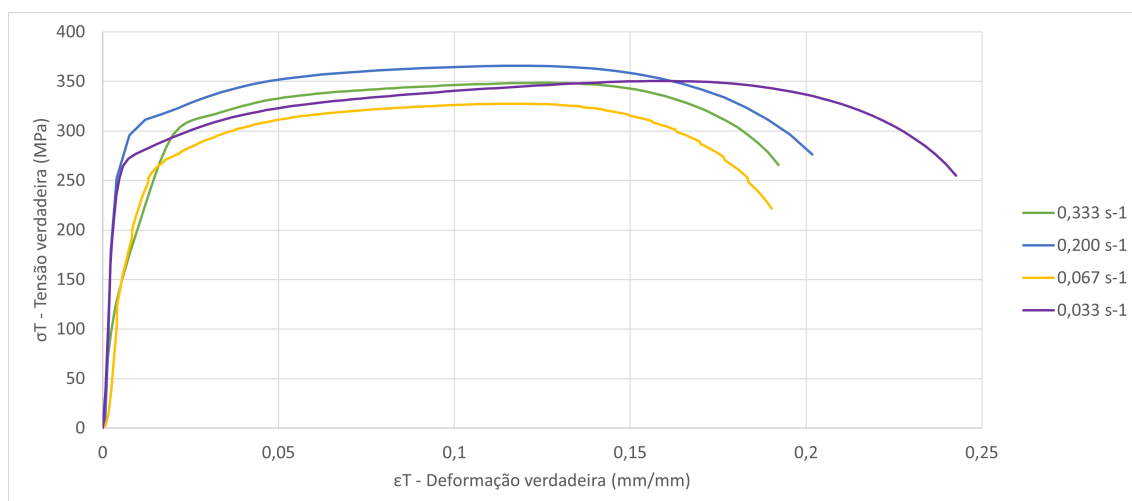
$$\sigma_T = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (4.1)$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (4.2)$$

Figura 4.8: Diferenças entre tensão/deformação de engenharia e tensão/deformação real



Fonte: (ÇAPAR, 2022)

Figura 4.9: Variação das curvas tensão-deformação pelo efeito de $\dot{\epsilon}$ 

Fonte: Dos autores

Com isso, a última etapa consistiu em gerar as curvas tensão-deformação verdadeiras, assim como mostrado no gráfico da Figura 4.9. Conforme Haefliger, Fomasi e Kaufmann concluíram em seu estudo, as tensões encontradas para materiais sujeitos a maiores taxas de deformação realmente foram diferentes, porém não houve confirmação de que maiores taxas de deformação implicaram sempre em maiores tensões, o que pode ser explicado pela amostragem pequena dos corpos de prova ou por falhas na fabricação dos mesmos.

Resultados

5.1 Simulação da estrutura inicial

A primeira simulação foi realizada com a terceira versão da estrutura projetada por Duarte, com a modificação do modelo constitutivo do material do chassis. Os principais instantes da simulação estão representados nas Figuras 5.1 (vista superior) e 5.2 (vista frontal).

O primeiro critério avaliado foi o HIC36, que não deveria ser superior a 1000. Inicialmente, foi plotada a aceleração na cabeça, apresentada na Figura 5.3 e, com, isso foi calculado um HIC36 de 1293425, muito acima do valor limite de 1000.

O segundo critério avaliado foi a força máxima na direção y no ombro, que não deveria ser superior a 3 kN . O valor calculado foi de 10,36 kN , portanto, acima do permitido.

O terceiro critério avaliado foi a deflexão máxima das costela torácicas, que não deveriam defletir mais de 55 mm . Os valores calculados foram: 16,77 mm , 10,53 mm e 18,72 mm (Figura 5.4). Portanto, os requisitos do regulamento foram cumpridos.

O quarto critério avaliado foi a deflexão máxima das costelas abdominais, que não deveriam defletir mais de 65 mm . Os valores calculados foram: 32,00 mm e 32,00 mm (Figura 5.5). Novamente, os requisitos do regulamento foram cumpridos.

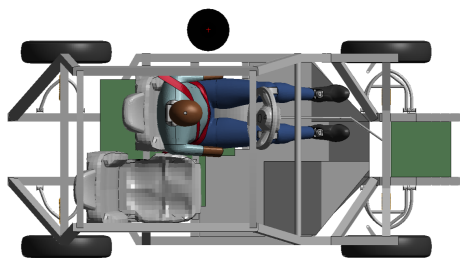
O quinto critério foi a aceleração da vértebra T12, que não deveria exceder 75 g, exceto para intervalos cuja duração cumulativa fosse inferior a 3 ms . O gráfico desta aceleração é apresentado na Figura 5.6, que mostra que o pico foi de 75,68 g. Como a aceleração ficou apenas 1 ms acima do limite de 75 g, este critério resultou de acordo com a norma.

O último critério avaliado foi o pico de força na sínfise púbica. O limite definido pelo norma é de 3,36 kN e o valor calculado foi de 4,13 kN , acima do permitido pela norma.

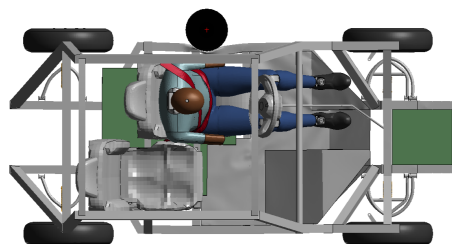
Na análise da segurança do conjunto de baterias, notou-se que não houve contato com outras partes durante a colisão, portanto não houve deformação local a ser medida.

Figura 5.1: Vista superior da simulação com estrutura de AISI 1015

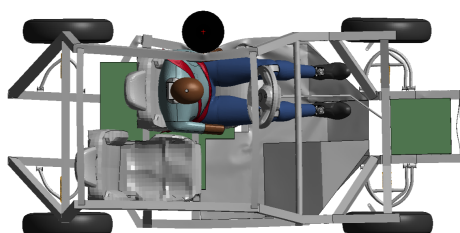
t = 0 ms



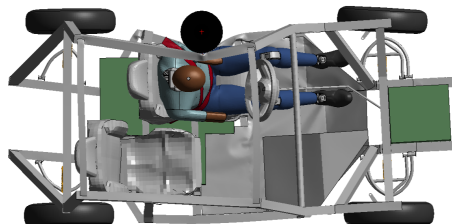
t = 10 ms



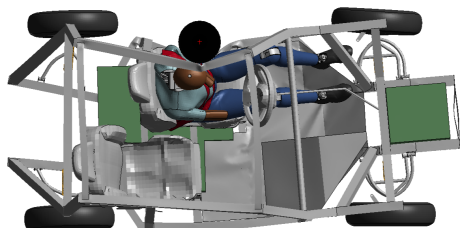
t = 20 ms



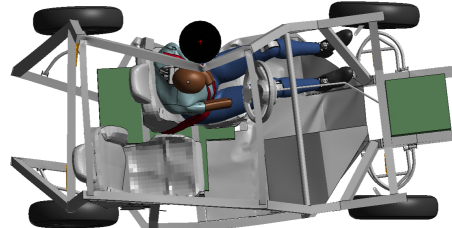
t = 30 ms



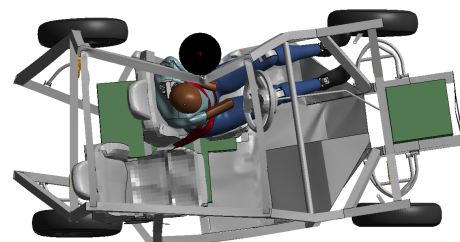
t = 40 ms



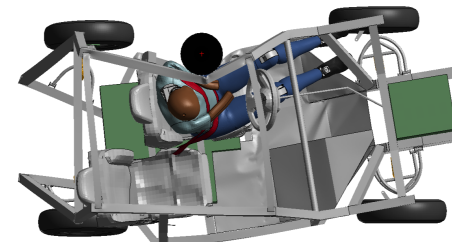
t = 50 ms



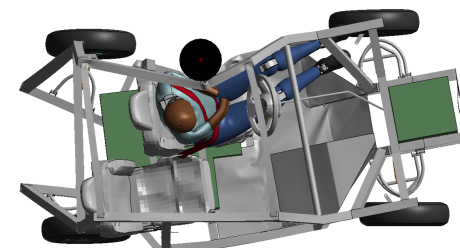
t = 60 ms



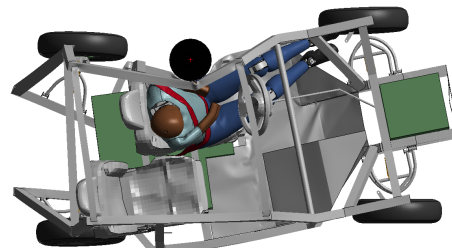
t = 70 ms



t = 80 ms



t = 90 ms



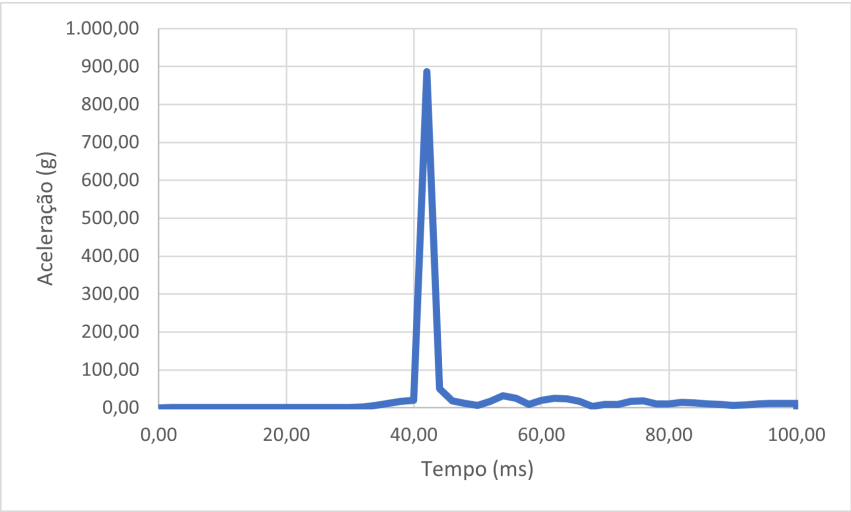
Fonte: Dos autores

Figura 5.2: Vista frontal da simulação com estrutura de AISI 1015



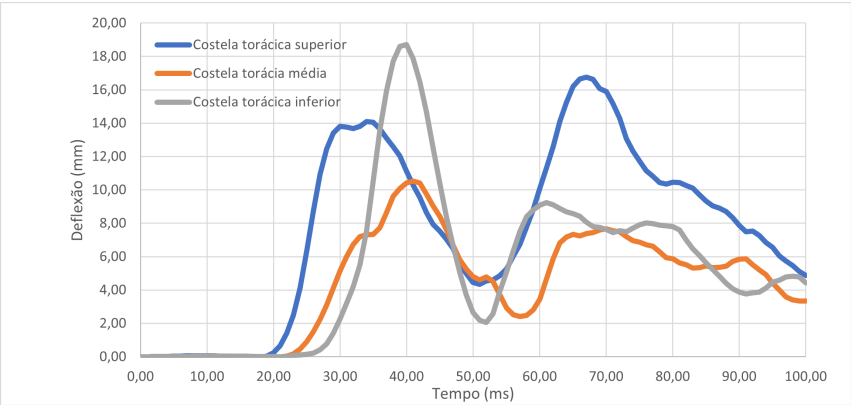
Fonte: Dos autores

Figura 5.3: Aceleração na cabeça para estrutura inicial



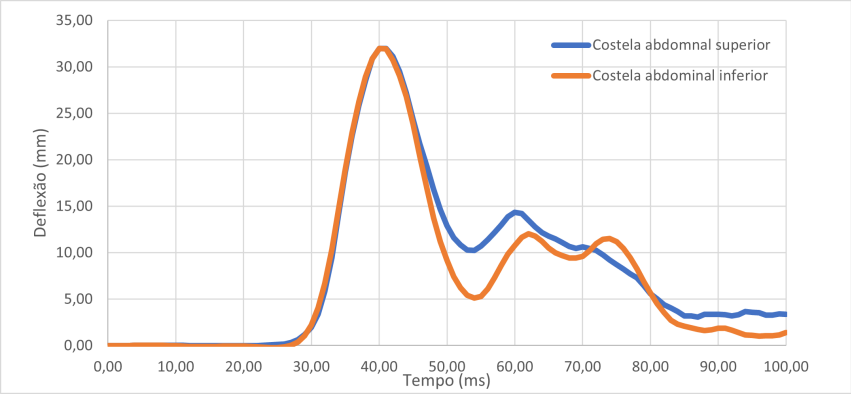
Fonte: Dos autores

Figura 5.4: Thorax performance criterion para estrutura inicial



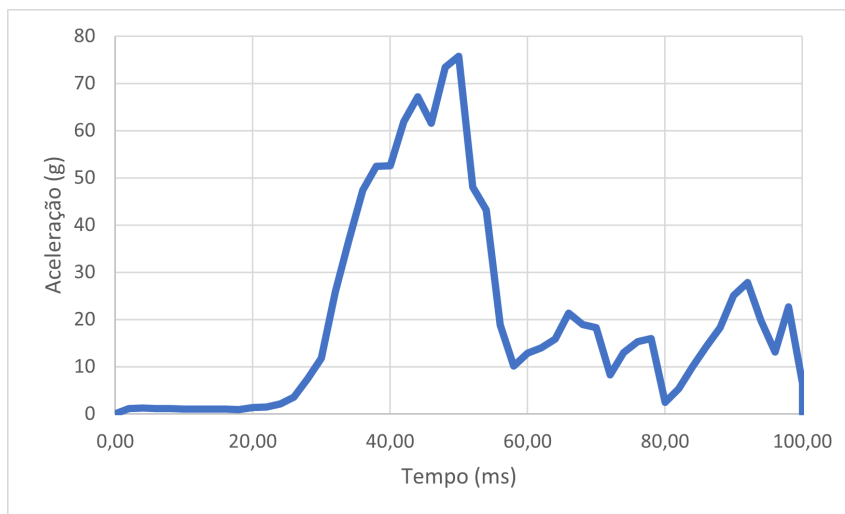
Fonte: Dos autores

Figura 5.5: Abdominal performance criterion para estrutura inicial



Fonte: Dos autores

Figura 5.6: Aceleração na vertebra T12 para estrutura inicial



Fonte: Dos autores

5.2 Simulação da estrutura com DP1000

Na segunda simulação, foi alterado o material dos tubos da estrutura para o aço DP1000 e analisado o desempenho em relação a norma UNECE R135. Os principais instantes da simulação estão representados nas Figuras 5.7 (vista superior) e 5.8 (vista frontal).

Para o critério do HIC36, que não deveria ser superior a 1000, a aceleração na cabeça foi apresentada na Figura 5.9. Foi calculado o HIC de 1362347, acima do limite de 1000.

Para o segundo critério, a força máxima na direção y no ombro, o valor calculado foi de 12,07 kN . Portanto, acima do permitido pela norma, de 3 kN .

Para o terceiro critério avaliado, a deflexão máxima das costelas torácicas, os valores calculados foram: 17,02 mm , 11,06 mm e 18,95 mm (Figura 5.10). Portanto, resultaram de acordo com os requisitos do regulamento, com limite de 55 mm .

Para o quarto critério, a deflexão máxima das costelas abdominais, os valores calculados foram: 33,00 mm e 34,68 mm (Figura 5.11). Novamente, de acordo com a norma.

Para o quinto critério, a aceleração da vértebra T12, a Figura 5.12 apresenta o resultado da aceleração. O valor máximo obtido foi de 66,53 g , o que está aceitável.

Para o último critério, o pico de força da sínfise púbica, o valor calculado foi de 3,66 kN , menor que o valor encontrado na anteriormente, mas acima do limite de 3,36 kN .

Na análise da segurança do conjunto de baterias, notou-se que novamente não houve contato com outras partes durante a colisão, portanto não houve deformação local a ser medida. É válido mencionar, contudo, que o poste ficou mais distante das baterias.

Figura 5.7: Vista superior da simulação com estrutura de DP1000

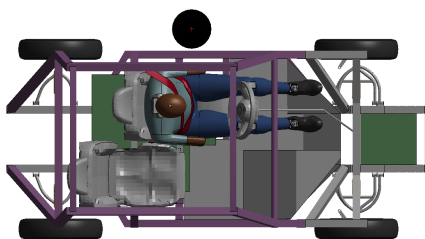
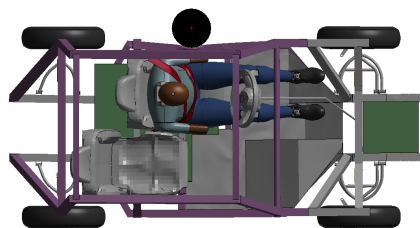
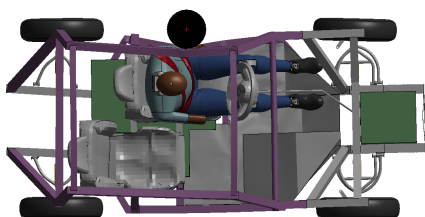
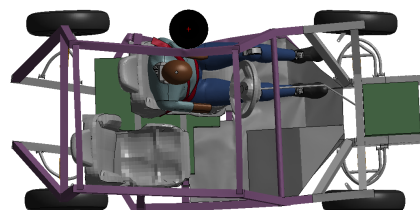
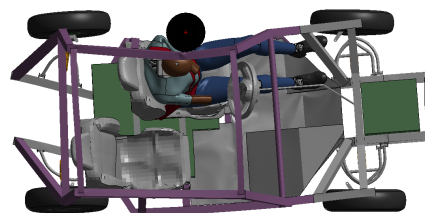
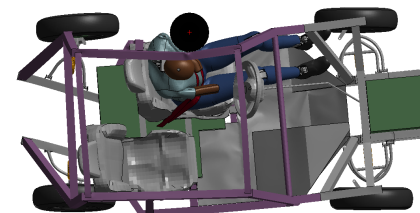
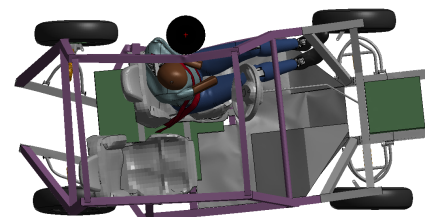
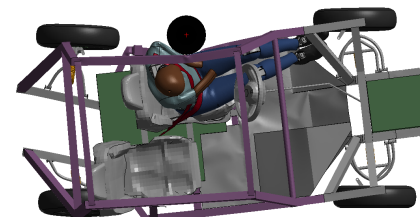
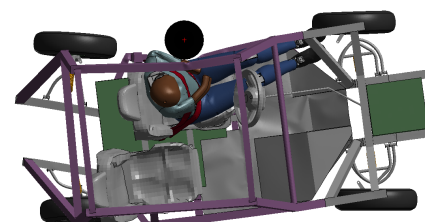
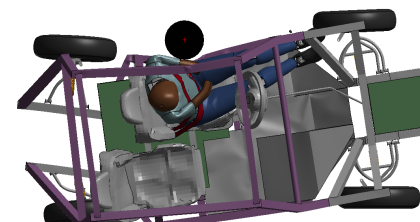
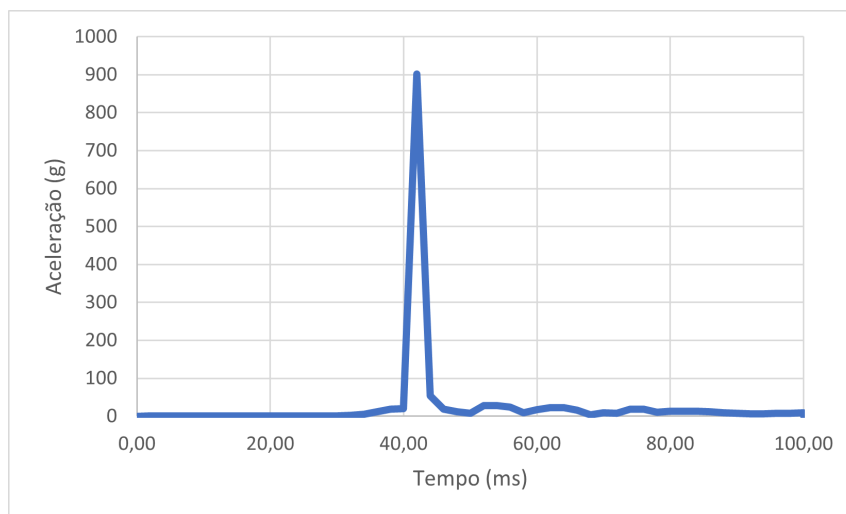
 $t = 0 \text{ ms}$  $t = 10 \text{ ms}$  $t = 20 \text{ ms}$  $t = 30 \text{ ms}$  $t = 40 \text{ ms}$  $t = 50 \text{ ms}$  $t = 60 \text{ ms}$  $t = 70 \text{ ms}$  $t = 80 \text{ ms}$  $t = 90 \text{ ms}$ 

Figura 5.8: Vista frontal da simulação com estrutura de DP1000



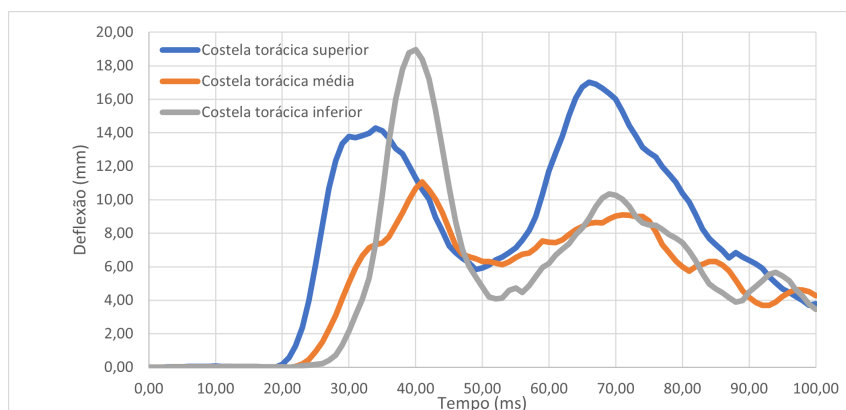
Fonte: Dos autores

Figura 5.9: Aceleração na cabeça para estrutura com DP1000



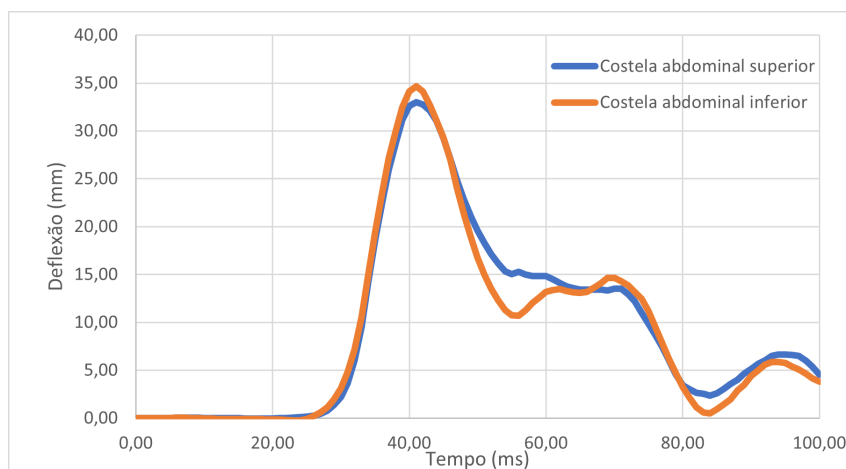
Fonte: Dos autores

Figura 5.10: Thorax performance criterion para estrutura com DP1000



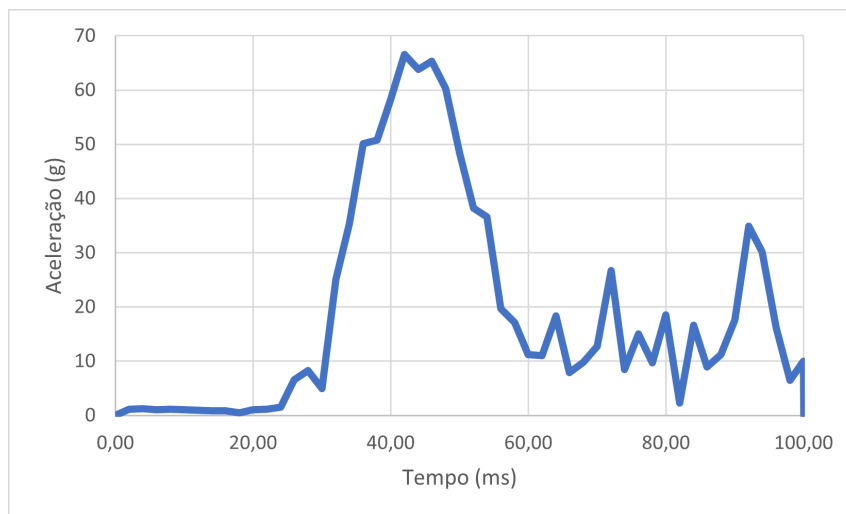
Fonte: Dos autores

Figura 5.11: Abdominal performance criterion para estrutura com DP1000



Fonte: Dos autores

Figura 5.12: Aceleração na vértebra T12 para estrutura com DP1000



Fonte: Dos autores

5.3 Simulação da estrutura com reforço de um tubo

Na terceira simulação, foi adicionada uma barra transversal na região da porta da estrutura de aço AISI 1015, a fim de se obter uma absorção maior do impacto pela estrutura. Os principais instantes da simulação estão representados nas Figuras 5.13 e 5.14.

Para o critério do HIC₃₆, que não deveria ser superior a 1000, a aceleração na cabeça foi apresentada na Figura 5.15. Com isso, foi calculado o HIC₃₆ de 1167666, o menor das três simulações, mas ainda demasiadamente acima do limite de 1000.

Para o segundo critério, a força máxima na direção y no ombro, o valor calculado foi de 10,35 kN , também acima do permitido pela norma, de 3 kN .

Para o terceiro critério avaliado, a deflexão da costela torácica, os valores calculados foram 19,51 mm , 36,52 mm e 38,74 mm (Figura 5.16), valores maiores que nas simulações anteriores, mas ainda abaixo do limite de 55 mm . Portanto, satisfatórios.

Para o quarto critério, que está relacionado com as deflexões das costelas abdominais, os valores calculados foram: 4,18 mm e 26,19 mm (Figura 5.17), novamente satisfatório.

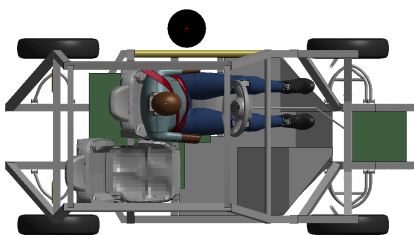
Para o quinto critério, que leva em consideração a aceleração da coluna inferior, a Figura 5.18 apresenta o resultado da aceleração, que obteve o valor máximo de 74,23 g , valor intermediário entre as simulações anteriores e de acordo com a exigência da norma.

Para o último critério, a força máxima da sínfise púbica, o valor calculado foi de 4,18 kN , maior que os valores encontrados nas simulações anteriores e reprovado pela norma.

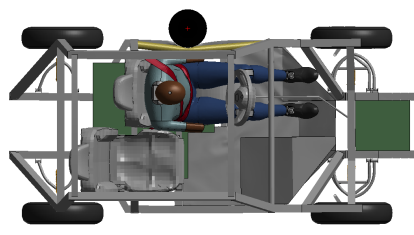
Na análise da segurança do conjunto de baterias, notou-se que não houve contato com outras partes durante a colisão, portanto não houve deformação local a ser medida.

Figura 5.13: Vista superior da simulação com estrutura de AISI 1015 e tubo lateral

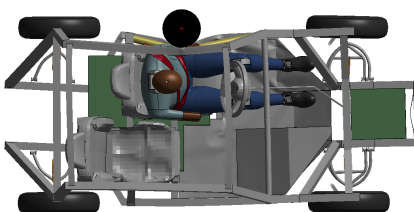
t = 0 ms



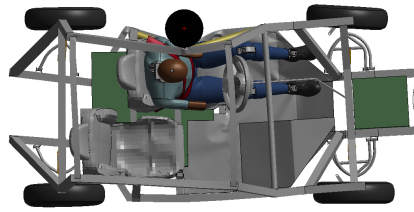
t = 10 ms



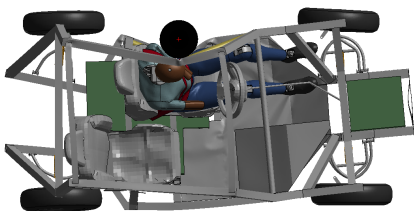
t = 20 ms



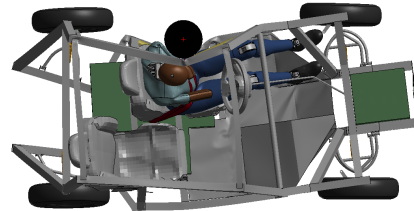
t = 30 ms



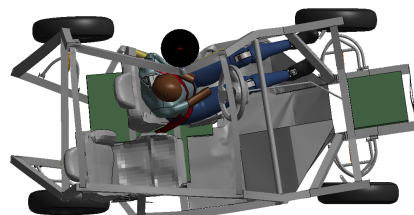
t = 40 ms



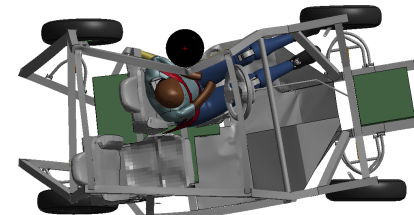
t = 50 ms



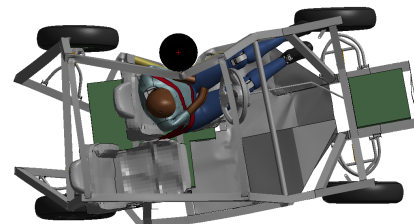
t = 60 ms



t = 70 ms



t = 80 ms



t = 90 ms

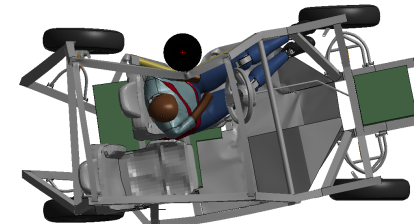
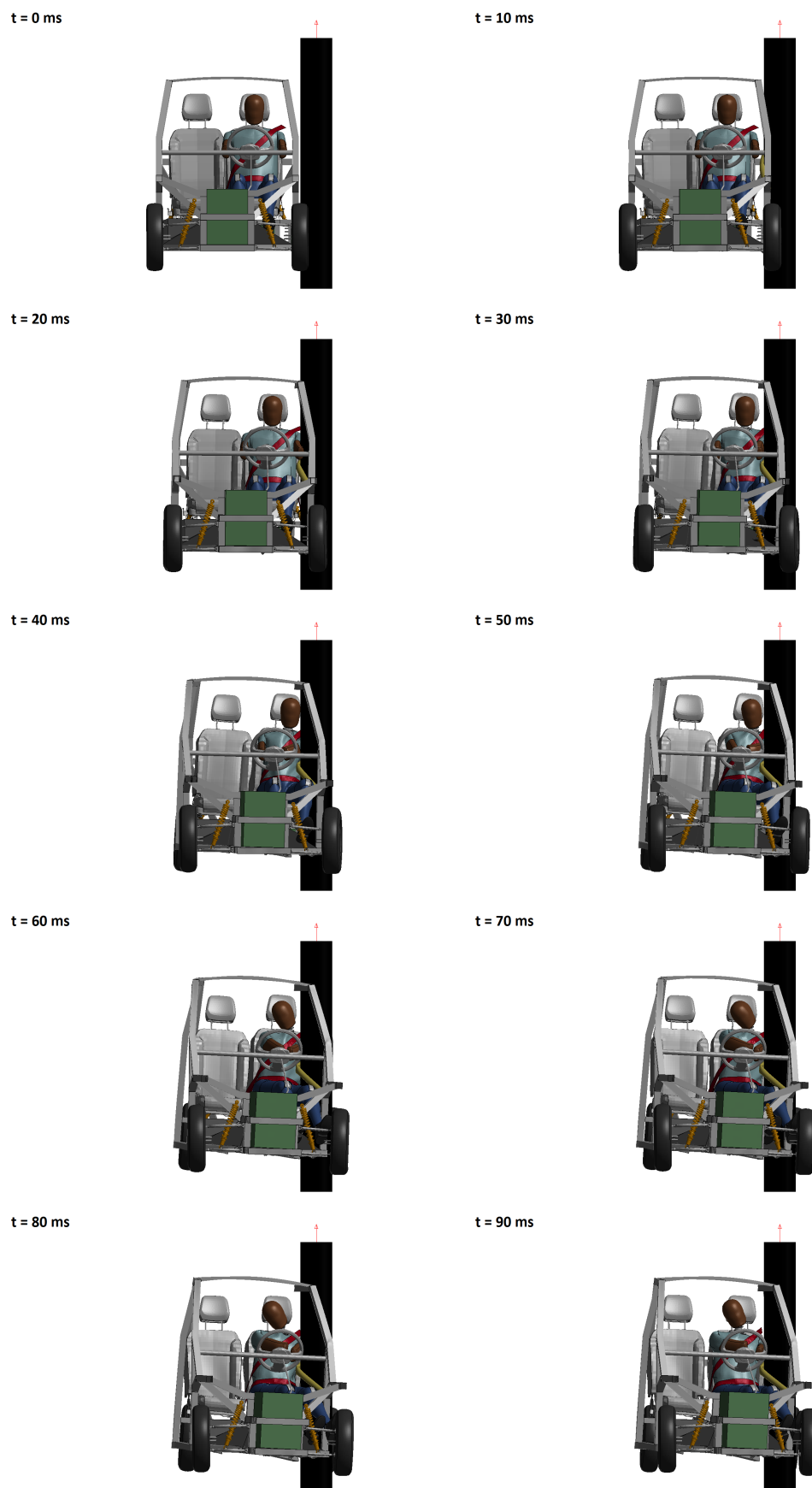
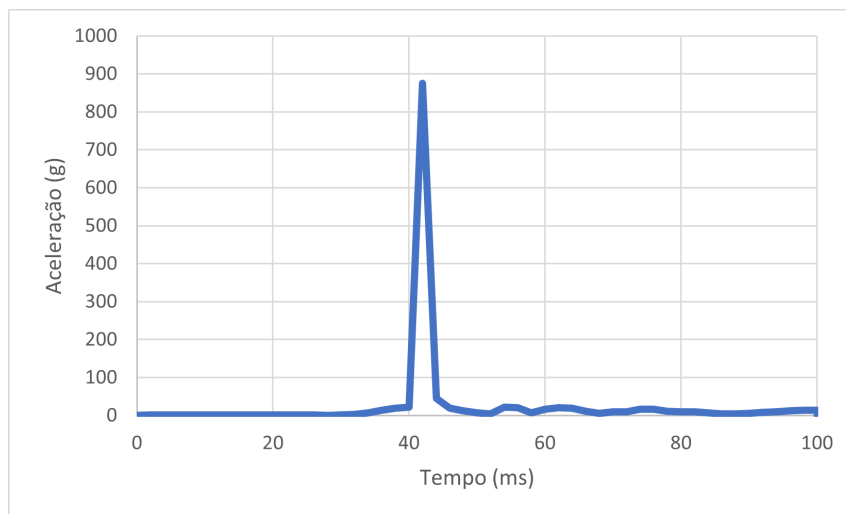


Figura 5.14: Vista frontal da simulação com estrutura de AISI 1015 e tubo lateral



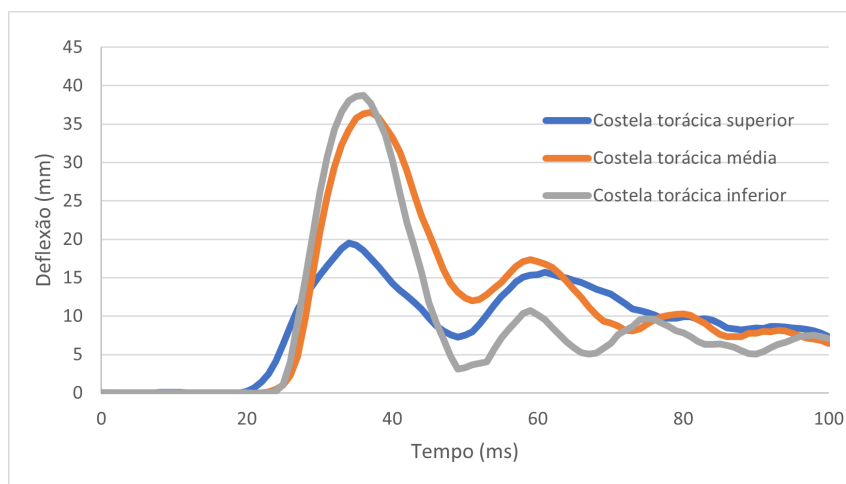
Fonte: Dos autores

Figura 5.15: Aceleração na cabeça para estrutura com tubo na lateral



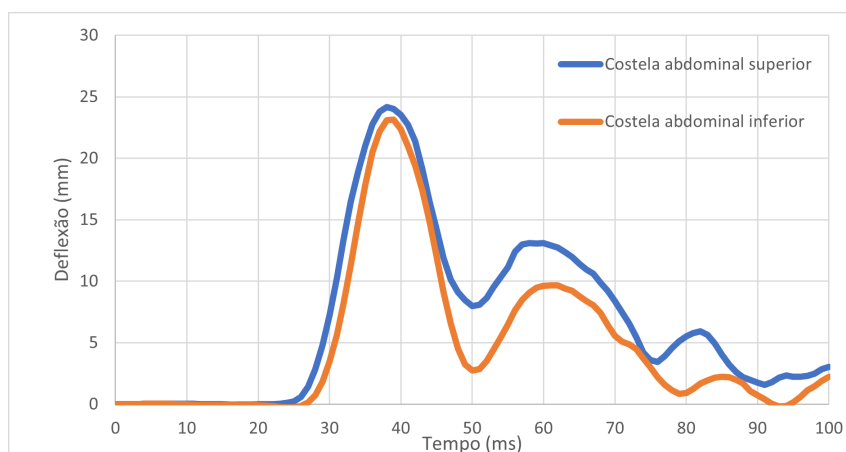
Fonte: Dos autores

Figura 5.16: Thorax performance criterion para estrutura com tubo na lateral



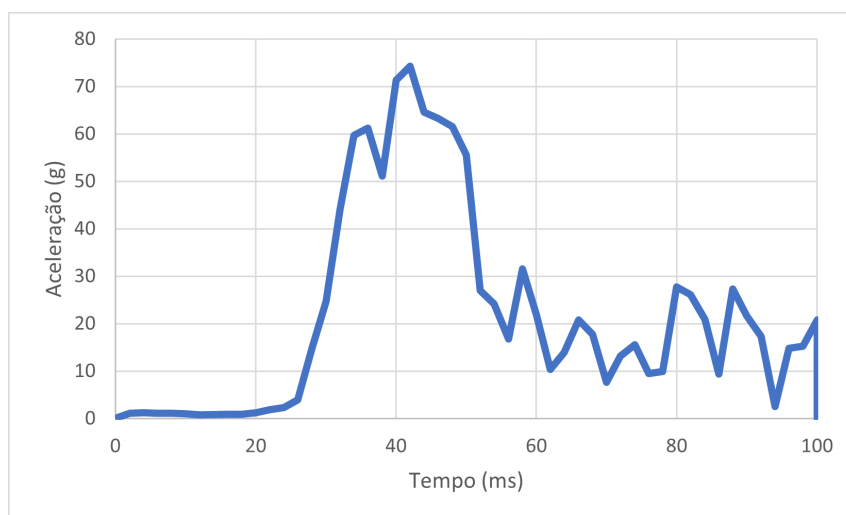
Fonte: Dos autores

Figura 5.17: Abdominal performance criterion para estrutura com tubo na lateral



Fonte: Dos autores

Figura 5.18: Aceleração na vertebra T12 para estrutura com tubo na lateral



Fonte: Dos autores

Discussão

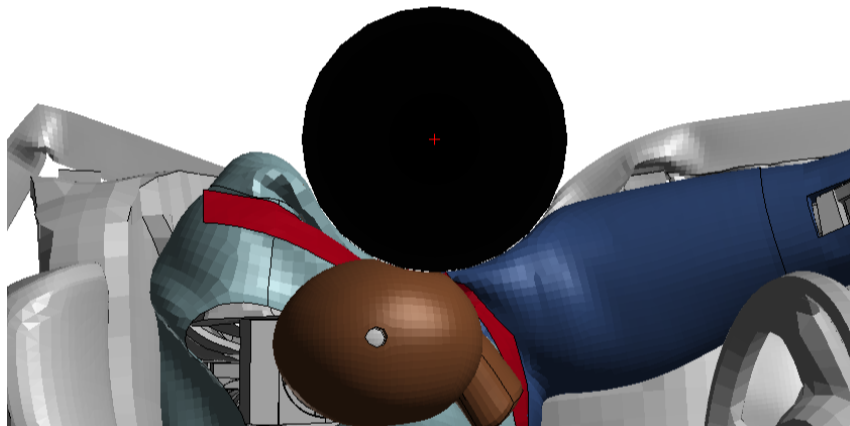
Devido às mudanças necessárias entre a segunda e a terceira versões do veículo, alguns elementos importantes para a segurança do veículo se perderam, como por exemplo os *airbags* laterais e de cortina, além da composição da estrutura com aço DP1000.

No caso do impacto lateral contra um poste, essas mudanças causaram um efeito negativo em relação aos critérios de performance analisados, uma vez que na terceira geração do VHF urbano o *dummy* sempre colidiu a cabeça diretamente contra o poste (Figura 6.1), o que ocasionou um HIC36 excessivamente elevado, com os critérios de força máxima no ombro e na pelve também excedendo os requisitos estipulados pela norma.

Observando as comparações das simulações da Tabela 6.1, notou-se que mesmo colocando um material mais resiliente como o DP1000 ou acrescentando um tubo na lateral do chassi, o veículo não foi considerado seguro para o impacto contra poste.

As alterações analisadas não surtiram efeito positivo. Com a alteração do material da estrutura para o DP1000, o habitáculo se deformou menos em relação ao caso do AISI 1015, mas gerou um aumento no HIC36 e nas deflexões das costelas. Um dos fatores que

Figura 6.1: Impacto do poste com o a cabeça do *dummy*



Fonte: Dos autores

Tabela 6.1: Comparação dos resultados das análises

Critério de Performance	Estrutura 1 (AISI 1015)	Estrutura 2 (DP1000)	Estrutura 3 (AISI 1015) + Reforço
HIC ₃₆	1293425	1362347	1167666
Força lateral máxima no ombro [kN]	10,36	12,07	10,35
Deflexão máxima nas costelas torácicas [mm]	18,72	18,95	38,74
Deflexão máxima nas costelas abdominais [mm]	32	34,68	26,19
Aceleração na vértebra T ₁₂ [g]	75,68	66,53	74,23
Força máxima na sínfise púbica [kN]	4,13	3,66	4,18

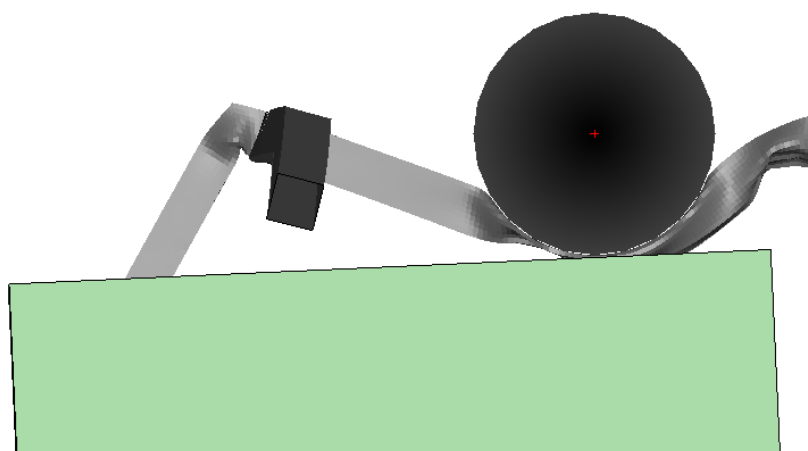
Fonte: Dos autores

pode ter provocado esse aumento foi a rotação do carro após a colisão do primeiro tubo do assoalho com o poste, que foi ligeiramente maior no caso da estrutura com o aço DP1000. O habitáculo melhor preservado, contudo, pode ser uma vantagem em outros casos de acidente com capotamento, assim como na proteção do compartimento das baterias, cujo gatilho para explosão pode ser induzido por excesso de deformação. A Figura 6.2 mostra como o poste chegou muito mais perto de colidir com o conjunto de baterias na estrutura de aço AISI 1015 em relação ao caso da estrutura de aço DP1000 (Figura 6.3).

Em todas as simulações o compartimento das baterias não colidiu com o poste, portanto o VHF urbano foi considerado seguro segundo o critério de performance definido na seção de Requisitos. A localização do conjunto foi considerada ideal para sua proteção em caso de impactos, já que o local possui tubos na direção transversal e que atuam ativamente no caminho das forças que o chassi experimenta em colisões laterais.

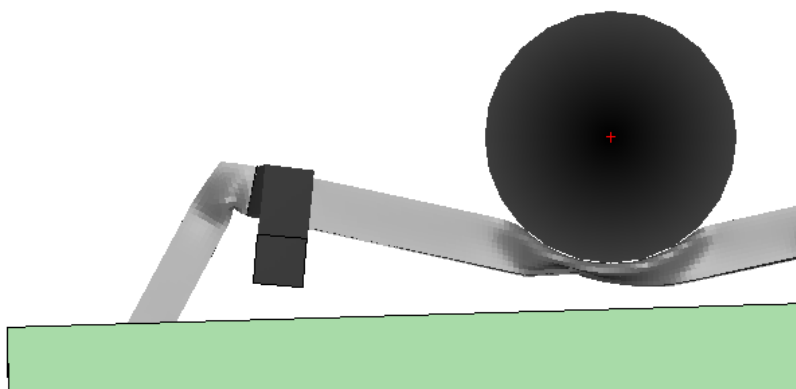
Com a adição do tubo na lateral os critérios se alteraram muito pouco, uma vez que o poste concentrou o impacto em uma região pequena e central dele, causando flexão. Tubos em flexão tendem a não ter a mesma performance em relação a tubos que operam sob flambagem, como foi o caso da *crash box* projetada por Duarte na segunda geração do VHF urbano. O efeito da deformação programável e progressiva necessita de mais espaço para operar de forma ótima, sendo que, em contrapartida, o motorista se encontra próximo demais à carroceria do veículo em impactos laterais. O maior efeito observado neste caso foi o aumento das deformações da costela torácica média e da costela torácica inferior, o que pode ser explicado pela colisão do tubo com essas duas partes (Figura 6.4).

Figura 6.2: Situação do compartimento das baterias na estrutura de AISI 1015



Fonte: Dos autores

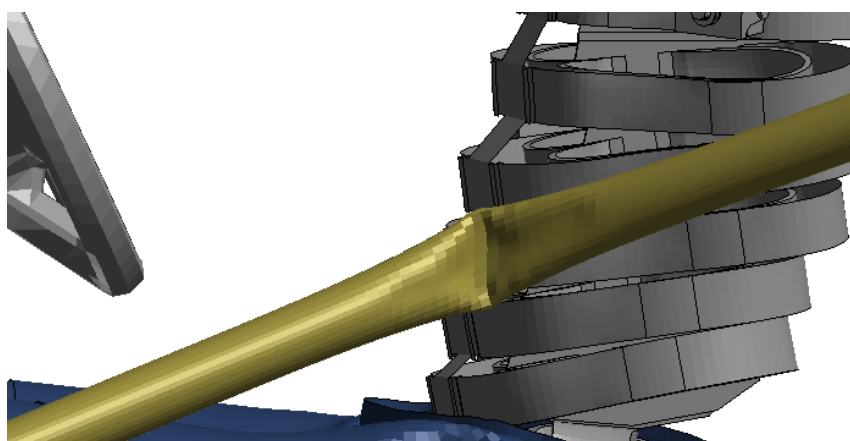
Figura 6.3: Situação do compartimento das baterias na estrutura de DP1000



Fonte: Dos autores

Para este tipo de impacto, a presença de *airbags* de cortina seria de extrema importância, pois teria impedido a colisão direta da cabeça do *dummy* com o poste, além de ter absorvido outros contatos secundários. Analogamente, a presença de *airbags* laterais também seria adequado para atenuar os impactos sofridos pelo ombro e pela pelve. Os resultados apontam para uma necessidade latente de investimentos em segurança veicular, dado que, ao menos no Brasil, não há leis obrigando a presença dos *airbags* mencionados ou mesmo a realização dos *crash tests* normatizados. A utilização dos critérios de performance padronizados segundo a UNECE R135 permitiu uma comparação objetiva do desempenho do VHF urbano com relação às suas gerações anteriores, o que pode servir como instrumento norteador para o desenvolvimento das próximas gerações do projeto.

Figura 6.4: Impacto do tubo lateral com o *dummy*



Fonte: Dos autores

Conclusão

O trabalho apresentou a análise da performance de um veículo híbrido compacto para ambientes urbanos em uma colisão lateral contra poste seguindo a norma UNECE R135. O veículo foi idealizado para levar dois passageiros, e possuir um motor dianteiro à combustão e dois motores elétricos localizados no interior das rodas traseiras, recarregados por um conjunto de baterias de íon lítio localizado embaixo dos assentos.

Foi possível verificar que o carro não seria aprovado na norma caso fosse submetido aos testes de impacto lateral contra poste, o que seria improvável sem o emprego de *airbags* laterais e de cortina, mesmo com materiais de alta resistência na estrutura. A maioria dos critérios de performance resultaram acima do permitido, sendo o critério na cabeça o mais severo de todos, uma vez que o *dummy* colidiu a cabeça com o poste em todos os cenários estudados, ainda que com uso de cinto de segurança de três pontos.

Na questão de segurança das baterias, em nenhuma das simulações o conjunto de baterias colidiu com o poste ou deformou-se, mostrando que o VHF urbano foi seguro neste quesito, independente do material. A arquitetura da estrutura se mostrou tão ou mais relevante que o material para absorver a energia da colisão, dados os mecanismos de deformação provocados por um impacto lateral concentrado contra poste.

Do ponto de vista da modelagem de materiais, a utilização de dados experimentais para alimentar o modelo constitutivo da estrutura se mostrou um método prático na investigação da influência da taxa de deformação no material. O procedimento adotado provou-se ser escalável para inclusão de novos dados, em grande parte devido à natureza modular das *keywords* do LS-PrePost. Contudo, seria necessária uma máquina de teste de tração capaz de atingir velocidades superiores a $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, o que poderia exigir o emprego de novas técnicas experimentais, i.e. utilizando uma barra de Hopkinson.

Referências

- AAAM. **Abbreviated Injury Scale**. 2008. Disponível em: <<https://www.aaam.org/abbreviated-injury-scale-ais/>>. (acessado em: 19.08.2022).
- ASTM. E 8M Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. **Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials**, v. 3.01, 2016.
- BELYTSCHKO, T. et al. Hourglass Control in Linear and Nonlinear Problems. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 43, p. 251–276, 1984.
- ÇAPAR, Y. **Engineering Stress/Strain vs True Stress/Strain**. 2022. Disponível em: <<https://yasincapar.com/engineering-stress-strain-vs-true-stress-strain/#:~:text=True%5C%20stress%5C%20is%5C%20the%5C%20applied,Also%5C%20known%5C%20as%5C%20nominal%5C%20stress.>>>. (acessado em: 25.11.2022).
- CCSA. **Center for Collision Safety and Analysis - Finite Element Models**. 2022. Disponível em: <<https://www.ccsa.gmu.edu/models/>>. (acessado em: 21.06.2022).
- DU BOIS, Paul et al. **Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection**. [S.l.]: American Iron e Steel Institute, 2004.
- DUARTE, Marcelo Rubens Galdiano. UN crash safe vehicle design using human body models, 2021.
- LS-DYNA. **Elements**. 2022. Disponível em: <<https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/elements>>. (acessado em: 25.11.2022).
- EURONCAP. **Official Dacia Spring 2021 Safety Rating**. 2021. Disponível em: <<https://www.euroncap.com/en/results/dacia/spring/44197>>. (acessado em: 09.08.2022).

EURONCAP. **Official Fiat 500e 2021 Safety Rating**. 2021. Disponível em: <<https://www.euroncap.com/en/results/fiat/500e/44198>>. (acessado em: 09.08.2022).

_____. **Official Renault ZOE 2021 Safety Rating**. 2021. Disponível em: <<https://www.euroncap.com/en/results/renault/zoe/44206>>. (acessado em: 09.08.2022).

FANG, Jianguang et al. On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 55, p. 1091–1119, 2017. ISSN 1615-1488. DOI: 10.1007/s00158-016-1579-y. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00158-016-1579-y>>.

FLANAGAN, D. P.; BELYTSCHKO, T. A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with Orthogonal Hourglass Control. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 17, p. 679–706, 1981.

GM. **2016 Chevrolet Volt Battery System**. 2016. Disponível em: <https://media.gm.com/content/dam/Media/microsites/product/Volt_2016/doc/VOLT_BATTERY.pdf>. (acessado em: 17.08.2022).

GREVE, L.; FEHRENBACH, C. Mechanical Testing and Macro-Mechanical Finite Element Simulation of the Deformation, Fracture, and Short Circuit Initiation of Cylindrical Lithium Ion Battery Cells. *Power Sources*, 2012.

HAEFLIGER, Severin; FOMASI, Sara; KAUFMANN, Walter. Influence of quasi-static strain rate on the stress-strain characteristics of modern reinforcing bars. **Construction and Building Materials**, v. 287, p. 122967, 2021. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122967>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821007273>>.

HUANG, Zhigang. Experimental study on side pole collision and deformable barrier collision of car, 2020.

HUMANETICS. **WorldSID 50th User Manual**. 2018. Disponível em: <https://humanetics.humaneticsgroup.com/sites/default/files/2020-11/um-w50m_rev_k.pdf>. (acessado em: 26.08.2022).

_____. **WorldSID-50M**. 2022. Disponível em: <<https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/side-impact/worldsid-50m>>. (acessado em: 19.06.2022).

INSTRON. **3300 Series Universal Testing Systems**. 2022. Disponível em:
<<https://www.instron.com/en/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems/3300-series>>.
(acessado em: 25.11.2022).

JOHNSON, G.; COOK, W. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures. **7th International Symposium on Ballistics**, p. 541-547, 1983.

LATINNCAP. Resultados desde 2020, 2020.

_____. **Official Jac E-JS1 2022 Safety Rating**. 2022. Disponível em:
<<https://www.latinnacap.com/po/resultado/173/jac-e-js1--e10x--e-s1--s1+-2-airbags>>. (acessado em: 15.12.2022).

_____. **Side Pole Impact Test**. 2022. Disponível em:
<<https://www.latinnacap.com/en/our-tests/adult-occupant/side-pole-impact-test>>. (acessado em: 17.08.2022).

LIMA, A. de. Desenvolvimento de um veículo urbano seguro utilizando otimização baseado em metamodelos, 2016.

LSTC. **LS-Dyna Keyword User's Manual - Volumes I and II**. 2012. Disponível em:
<<https://www.dynasupport.com/manuals>>. (acessado em: 21.06.2022).

_____. LSTC WorldSID 50th Male Finite Element Model, 2018.

_____. **Download LST, LLC Barrier, Dummy, and Tire Models for LS-DYNA**. 2022. Disponível em: <https://www.lstc.com/download/dummy_models>. (acessado em: 25.08.2022).

NHTSA. How Vehicle Age and Model Year Relate to Driver Injury Severity in Fatal Crashes. **Traffic Safety Facts**, 2013.

_____. **Crash Viewer**. 2017-2021. Disponível em:
<<https://crashviewer.nhtsa.dot.gov/CIREN/SearchIndex>>. (acessado em: 19.08.2022).

NISSAN. **Nissan gives EV batteries a second life**. 2021. Disponível em:
<<https://global.nissanstories.com/en/releases/4r>>. (acessado em: 15.08.2022).

PINTAR, Frank A; MAIMAN, Dennis J; YOGANANDAN, Narayan. Injury patterns in side pole crashes. **Annual proceedings. Association for the Advancement of Automotive Medicine**, Association for the Advancement of Automotive Medicine, v. 51, p. 419-433, 2007.

SCHULZ, S. L. Elementos Finitos Tri-Lineares com Integração Reduzida e Controle de Modos Espúrios na Análise Linear de Placas e Cascas, 1997.

SINDIPEÇAS. Relatório da Frota Circulante, 2019.

SONG, R.-b.; DAI, Q.-f. Dynamic Deformation Behavior of Dual Phase Ferritic-Martensitic Steel at Strain Rates From 10^{-4} to 2000 s⁻¹. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 20, n. 8, p. 48–53, 2013.

TAHAN, F. J et al. Development of LSTC WorldSID Dummy Finite Element Model (50th Percentile Male), 2018.

TESLA. **Safety-First Design**. 2017. Disponível em:
<<https://www.tesla.com/model3>>. (acessado em: 17.08.2022).

TOYOTA. **About THUMS**. 2022. Disponível em:
<<https://www.toyota.co.jp/thums/about/>>. (acessado em: 22.11.2022).

UNECE. **1958 Agreement - Transport - UNECE**. 1958. Disponível em:
<<https://unece.org/trans/main/wp29/wp29regs>>. (acessado em: 10.10.2022).

_____. Addendum 94: Regulation No. 95. Uniform provisions Concerning the Approval of Vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision, 2011.

_____. Addendum 134 – Regulation No. 135. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their Pole Side Impact performance (PSI), 2015.

WANG, Dazhi et al. Car Side Structure Crashworthiness in Pole and Moving Deformable Barrier Side Impacts, 2006.

WHO. **Global Status Report on Road Safety**. 2018. Disponível em:
<<https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>>. (acessado em: 27.07.2022).