



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL VIEIRA DOHERTY

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE IMPACTO FRONTAL DE UM VEÍCULO BAJA SAE
PILOTADO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS VIA DINÂMICA
EXPLÍCITA**

Recife

2021

RAFAEL VIEIRA DOHERTY

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE IMPACTO FRONTAL DE UM VEÍCULO BAJA SAE
PILOTADO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS VIA DINÂMICA
EXPLÍCITA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf.

Recife

2021

D655a	Doherty, Rafael Vieira. Análise estrutural de impacto frontal de um veículo Baja SAE pilotado através do método dos elementos finitos via dinâmica explícita / Rafael Vieira Doherty. – 2021. 127 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl. Orientador: Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, 2021. Inclui referências e apêndices. 1. Engenharia mecânica. 2. Impacto frontal. 3. Análise por Elementos Finitos (FEA). 4. Dinâmica explícita. 5. EURO NCAP. 6. Baja SAE. I. Willmersdorf, Ramiro Brito (Orientador). II. Título. UFPE 621 CDD (22. ed.) BCTG/2022-169
-------	---

RAFAEL VIEIRA DOHERTY

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE IMPACTO FRONTAL DE UM VEÍCULO BAJA SAE
PILOTADO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS VIA
DINÂMICA EXPLÍCITA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 30/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Maxime Montoya (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Guilherme Barbosa Lopes Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que transmitiram os princípios e valores que carrego até hoje e auxiliam em minhas escolhas na vida.

Aos meus familiares e amigos, pela companhia e apoio nas decisões tomadas ao longo da minha jornada.

A minha companheira Ana Maria Xavier, por toda paciência, suporte e compreensão ao estar ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Ao meu professor orientador Ramiro Brito Willmersdorf, que com sapiência me conduziu no desenvolvimento deste trabalho e sempre se colocou à disposição para esclarecer dúvidas.

Aos professores que contribuíram para minha formação acadêmica, em especial aos professores Maxime Montoya e Flávio José da Silva, orientadores da Equipe Manguê Baja que sempre apoiaram nas competições e no desenvolvimento dos carros, e ao professor Guilherme Barbosa, orientador de iniciação científica que contribuiu para o meu progresso na área de pesquisa.

Aos professores Ian Glover, Viacheslav Stetsyuk, John Allport, John Baron e ao Team Hare (Formula Student), por possibilitarem a realização do meu intercâmbio para Inglaterra e diferentes experiências internacionais.

À Equipe Manguê Baja e todos os integrantes que deram o suor e sangue na construção dos carros que atingiram o topo dos pódios nas competições, que serviram como uma escola de vida na construção do meu caráter e que me trouxe grandes amigos até hoje.

Aos meus colegas de trabalho e gestores na ESSS, em especial a Fabiano Diesel, que contribuíram fortemente no desenvolvimento dos meus conhecimentos em simulação, me possibilitaram trabalhar em projetos desafiadores e disponibilizaram as licenças para os *softwares* utilizados neste trabalho.

RESUMO

Os acidentes de trânsito são um grande problema social e econômico atualmente, estando entre as maiores causas de morte no mundo e trazendo altos custos com saúde, indenizações e previdências. Com isso, a avaliação do comportamento dinâmico dos veículos durante colisões é de suma importância para possibilitar a pesquisa e desenvolvimento de produtos mais seguros. Nesse sentido, este trabalho consiste no desenvolvimento de uma análise estrutural de impacto frontal de um protótipo da categoria Baja SAE da Equipe Mangue Baja (UFPE) através do método dos elementos finitos via dinâmica explícita. Inicialmente, foi realizada a preparação e limpeza da geometria e geração da malha computacional do modelo numérico, utilizando o *Space Claim* e *Ansys Meshing*. Na sequência, foi realizado o *setup* e solução da simulação utilizando o *Ansys Mechanical*, *LS-PrePost* e *Ls-Dyna*, embasado no procedimento de testes para impacto frontal do programa europeu de segurança automotiva, onde foram consideradas todas as não linearidades (geométricas, materiais e contatos), velocidade inicial, critérios de falha de *Johnson-Cook*, modelo *Dummy*, cinto de segurança, entre outras informações relevantes. Por fim, foi realizado o pós processamento dos resultados do veículo e piloto através do *LS-PrePost*. Foi avaliado que a integridade do habitáculo do piloto e tanque de combustível são preservados, contudo, alguns componentes do veículo falham com o impacto. Ademais, seguindo o protocolo de avaliação para adultos do programa europeu de segurança automotiva, foi analisado que os limites críticos dos critérios de lesões ao piloto na cabeça, pescoço e tórax são ultrapassados, com exceção de lesões nas pernas que fica dentro de valores aceitáveis.

Palavras-chave: impacto frontal; Análise por Elementos Finitos (FEA); dinâmica explícita; EURO NCAP; Baja SAE.

ABSTRACT

Motor vehicle traffic accidents are a major social and economic issue today, being among the biggest causes of death in the world and bringing high costs with healthcare, indemnities and pensions. Thus, the evaluation of the dynamic behavior of vehicles during collisions is extremely important to enable the research and development of safer products. In this sense, this work consists in the development of a frontal impact structural analysis of a Baja SAE category prototype from the Mangue Baja Team (UFPE) through the finite element method using explicit dynamics. Initially, the geometry preparation and computational mesh generation of the numerical model was performed, using Space Claim and Ansys Meshing. Afterwards, the setup and solution were done using Ansys Mechanical, LS-PrePost and Ls-Dyna, based on the full width frontal impact testing protocol from Euro NCAP, where all non-linearities (geometric, materials and contacts), initial speed, Johnson-Cook failure criteria, Dummy model, seat belt, among other relevant information were considered. Finally, the post-processing of the vehicle and driver results was performed using LS-PrePost. It was found that the integrity of the driver's cabin and fuel tank is preserved, however, some vehicle components fail on impact. Furthermore, following the assessment protocol for adults from Euro NCAP, it was evaluated that the critical limits of the injury criterias for the driver in the head, neck and chest were exceeded, with the exception to the legs, which are within acceptable values for the injury criterias.

Keywords: frontal impact; Finite Element Analysis (FEA); explicit Dynamics; Euro NCAP; Baja SAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Experimental.	20
Figura 2 – Ciclo Utilizando Simulação.	20
Figura 3 – Protótipos MB1 e MB2 da Equipe Mangue Baja (UFPE), Competição Nacional Baja SAE 2019.	22
Figura 4 – Tipos de Elementos da Malha Computacional.	26
Figura 5 – Exemplo de Problema Linear 1D Utilizando MEF.	27
Figura 6 – Não Linearidade Geométrica.	28
Figura 7 – Material Não-Linear.	29
Figura 8 – Contatos Não-Lineares.	30
Figura 9 – Comparativo entre Metodologia Implícita e Explícita.	31
Figura 10 – Comparativo da Escala de Tempo e Não-Linearidade entre Metodologias.	32
Figura 11 – Estratégia de solução.	34
Figura 12 – Sistemas de Referência.	36
Figura 13 – Pontos de Integração em Elementos Sólidos.	40
Figura 14 – Pontos de Integração em Elementos de Casca.	40
Figura 15 – Distribuição dos Pontos de Integração na Espessura.	40
Figura 16 – Elemento de Belytschko-Tsay.	41
Figura 17 – Efeito da Formulação Desenvolvida por Wong-Chiang.	42
Figura 18 – Exemplos de Modos de <i>Hourglass</i> .	43
Figura 19 – Exemplos de Controle de <i>Hourglass</i> .	44
Figura 20 – Exemplo de material Elasto-Viscoplástico.	45
Figura 21 – Curva Elasto-Plástica Utilizando Modelo Isotrópico Multilinear de Plasticidade.	46
Figura 22 – Contatos Simétricos e Não-Simétricos.	50
Figura 23 – Rigidez de Contato.	51
Figura 24 – Efeito do Amortecimento Viscoso no Contato.	52
Figura 25 – Ensaios de Impacto Frontal, Contra Parede Deformável à Esquerda e Contra Parede Rígida à Direita.	53
Figura 26 – Modelos <i>Dummy</i> Físicos da Família Hybrid III à Esquerda. Modelo numérico <i>Dummy Hybrid III 5th Percentile Female</i> à Direita.	55
Figura 27 – Etapas de Modelagem.	56
Figura 28 – Sequência de <i>softwares</i> utilizados.	57
Figura 29 – Montagem Completa do Veículo Baja.	58
Figura 30 – Geometria (Etapa A).	59
Figura 31 – Malha Computacional (Etapa A).	60
Figura 32 – Espessuras dos Componentes (Etapa A).	61
Figura 33 – Juntas Fixas entre os Braços de Suspensão e Chassis (Etapa A).	63
Figura 34 – Materiais dos Componentes (Etapa A).	64

Figura 35 – Pontos de Massa (Etapa A).	67
Figura 36 – Modelo Finalizado (Etapa A).	68
Figura 37 – Geometria: Componentes Acrescentados (Etapa B).	69
Figura 38 – Malha: Componentes Acrescentados (Etapa B).	70
Figura 39 – Juntas Fixas dos Componentes Acrescentados (Etapa B).	71
Figura 40 – Materiais dos Componentes Acrescentados (Etapa B).	73
Figura 41 – Curva de Plasticidade da Liga de Alumínio 6061-T6.	74
Figura 42 – Curva de Plasticidade da Liga de Alumínio 7075-T6.	74
Figura 43 – Testes Experimentais de Compressão Realizados na UFPE.	75
Figura 44 – Curvas do Material dos Pneus.	76
Figura 45 – Massa Distribuída Representando o Combustível (Etapa B).	77
Figura 46 – Modelo Finalizado (Etapa B).	78
Figura 47 – Componentes Acrescentados (Etapa C). Geometria à Esquerda e Malha à Direita.	79
Figura 48 – Juntas Fixas dos Componentes Acrescentados (Etapa C).	82
Figura 49 – Curva de Tensão-Deformação do Material dos Cintos de Segurança.	83
Figura 50 – Modelo Finalizado (Etapa C).	85
Figura 51 – Modelo Não-Deformado (Etapa A).	86
Figura 52 – Evolução das Tensões de Von-Mises (Etapa A).	87
Figura 53 – Tensões de Von-Mises no Instante 12 ms (Etapa A).	88
Figura 54 – Tensões de Von-Mises no Instante 30 ms (Etapa A).	88
Figura 55 – Deformação Plástica Efetiva no Instante 30 ms (Etapa A).	89
Figura 56 – Componentes de Energia (Etapa A).	90
Figura 57 – Força Resultante no Contato entre o Veículo e Parede Rígida (Etapa A).	90
Figura 58 – Modelo Não-Deformado (Etapa B).	91
Figura 59 – Evolução das Tensões de Von-Mises (Etapa B).	92
Figura 60 – Tensões de Von-Mises no Instante 18 ms (Etapa B).	93
Figura 61 – Deformação Efetiva Total no Intervalo entre 7,8 ms e 8 ms (Etapa B).	93
Figura 62 – Componentes de Energia (Etapa B).	94
Figura 63 – Força Resultante no Contato entre o Veículo e Parede Rígida (Etapa B).	95
Figura 64 – Modelo Não-Deformado (Etapa C).	96
Figura 65 – Evolução dos Deslocamentos Resultantes (Etapa C).	97
Figura 66 – Evolução das Tensões de Von-Mises (Etapa C).	98
Figura 67 – Tensões de Von-Mises no Instante 35 ms (Etapa C).	99
Figura 68 – Tensões de Von-Mises no Instante 35 ms (Etapa C).	99
Figura 69 – Tensões de Von-Mises no Instante 8,4 ms (Etapa C).	100
Figura 70 – Deformação Efetiva Total no Intervalo entre 8 ms e 9,4 ms (Etapa C).	100
Figura 71 – Deformação Plástica Efetiva no Instante 35 ms (Etapa C).	101
Figura 72 – Diferença de Temperatura no Instante 35 ms (Etapa C).	101

Figura 73 – Componentes de Energia (Etapa C).	102
Figura 74 – Componentes de Energia Erodidas (Etapa C).	103
Figura 75 – Força Resultante no Contato entre o Veículo e Parede Rígida (Etapa C).	103
Figura 76 – Massa Adicionada (Etapa C).	104
Figura 77 – Critérios de Lesões.	104
Figura 78 – Componentes de Aceleração Originais na Cabeça do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	105
Figura 79 – Componentes de Aceleração Filtrados na Cabeça do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	105
Figura 80 – Aceleração Resultante e HIC-15 na Cabeça do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	106
Figura 81 – Forças de Cisalhamento e Tração no pescoço do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	107
Figura 82 – Momento de Flexão no Pescoço do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	107
Figura 83 – Deflexão Compressiva no Tórax do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	108
Figura 84 – Força Compressiva nos Fêmures do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	108
Figura 85 – Aceleração Resultante e CSI-3 no Tórax do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	117
Figura 86 – Componentes de Acelerações na Pélvis do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	117
Figura 87 – Componentes de Forças na Tíbia Esquerda do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	118
Figura 88 – Componentes de Forças na Tíbia Direita do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	118
Figura 89 – Componentes de Forças na Lombar do Modelo <i>Dummy</i> (Etapa C).	119
Figura 90 – Deformação Efetiva no Pneu Dianteiro Direito, Instante 35 ms (Etapa C).	119
Figura 91 – Deformação Plástica nos Olhais da Suspensão Traseira, Instante 35 ms (Etapa C).	120
Figura 92 – Deformação Plástica na Região Dianteira, Instante 35 ms (Etapa C).	120
Figura 93 – Deformação Plástica na Região Traseira, Instante 35 ms (Etapa C).	121
Figura 94 – Deformação Plástica em Vista Inferior, Instante 35 ms (Etapa C).	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equipamentos Disponíveis.	57
Tabela 2 – Tamanho dos Elementos de Malha (Etapa A).	59
Tabela 3 – Modelo de Johnson Cook para os Aços AISI 4130 e SAE 1020.	65
Tabela 4 – Propriedades dos Pontos de Massa.	67
Tabela 5 – Tamanho dos Elementos de Malha (Etapa B).	70
Tabela 6 – Conexões Acrescentadas na Dianteira e Traseira do Veículo (Etapa B).	72
Tabela 7 – Propriedades Elásticas e de Densidade das Ligas de Alumínio 6061-T6 e 7075-T6 e do Plástico HDPE.	73
Tabela 8 – Tamanho dos Elementos de Malha (Etapa C).	79
Tabela 9 – Conexões Acrescentadas na Dianteira e Traseira do Veículo (Etapa C).	82
Tabela 10 – Propriedades Elásticas Ortotrópicas da Fibra de Carbono.	83
Tabela 11 – Contatos do <i>Dummy</i> .	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
ESSS	Engineering Simulation and Scientific Software
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
FEA	Finite Element Analysis
SAE	Society of Automotive Engineers
FEM	Finite Element Analysis
PDE	Partial Differential Equation
CFL	Courant Friedrichs Lewy
AISI	American Iron and Steel Institute
HIC	Head Injury Criteria
Euro NCAP	European New Car Assessment Program

LISTA DE SÍMBOLOS

u	Função deslocamento.
u_h	Aproximação da função deslocamento.
u_i	Coefficientes ponderados.
ϕ_i	Funções de forma.
M	Matriz de massa.
C	Matriz de amortecimento.
K	Matriz de rigidez.
R	Vetor de forças.
t	Tempo.
x	Vetor de deslocamentos.
$\dot{x}$	Vetor de velocidades.
$\ddot{x}$	Vetor de acelerações.
F_i	Forças inerciais.
F_d	Forças de amortecimento.
F_e	Forças elásticas.
ρ	Densidade.
m_0	Massa inicial do elemento.
V	Volume.
b_i	Carregamentos de corpo.
σ_{ij}	Tensor tensão.
δ	Derivada parcial.
$\dot{e}$	Taxa de energia.
$\dot{\epsilon}_{ij}$	Taxa de deformação do tensor deformação.
m	Massa.
F	Força.
n	Instante de tempo.
Δt	Passo de tempo.
$\ddot{x}$	Aceleração instântanea.
$\dot{x}$	Velocidade instântanea.
x	Posição instântanea.
f	Fator de estabilidade para o passo de tempo.
L	Dimensão característica.
c_s	Velocidade do som no material.
E	Módulo de elasticidade.
ν	Coefficiente de poisson.
β	Coefficiente unitário do elemento de casca.
ϵ	Deformação total.
ϵ_e	Deformação elástica.
ϵ_p	Deformação plástica.

$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação total.
$\dot{\epsilon}_e$	Taxa de deformação elástica.
$\dot{\epsilon}_p$	Taxa de deformação plástica.
σ	Tensão.
$\hat{\sigma}_y$	Tensão de fluxo.
A	Coefficiente da tensão de escoamento.
B	Coefficiente de encruamento.
n	Expoente de encruamento.
C	Coefficiente da taxa de deformação plástica.
ϵ_0	Taxa de deformação limite quase-estática.
m	Expoente térmico.
T^*	Temperatura de homologação.
T	Temperatura do material.
T_{ref}	Temperatura de referência.
T_{melt}	Temperatura de fusão.
σ_{flow}	Tensão pós-escoamento.
σ_{yield}	Tensão de escoamento.
$\Delta\epsilon^p$	Incremento de deformação plástica.
D	Dano acumulado.
ϵ_f	Deformação equivalente até a fratura.
D_i	Coefficientes de dano
Q	Fator de triaxialidade.
$\bar{\epsilon}^f$	Deformação de falha na trinca.
$\bar{\epsilon}_n$	Deformação de nucleação da trinca.
α	Taxa de crescimento da trinca.
σ_m	Tensão média.
σ_{eq}	Tensão equivalente de Von-Mises.
k_c	Rigidez de contato.
S_{LSFAC}	Fator de escala da rigidez de deslizamento.
S_{FS}	Fator de escala da rigidez da superfície slave.
S_{FM}	Fator de escala da rigidez da superfície master.
ω	Frequência natural.
c_{crit}	Amortecimento crítico.
$F_{friction}$	Força de atrito.
μ	Coefficiente de atrito total.
f_{normal}	Força normal.
μ_d	Coefficiente de atrito dinâmico.
μ_s	Coefficiente de atrito estático.
c	Constante de decaimento.
v	Velocidade relativa entre superfícies de contato.
$\int$	Integral.
dt	Tempo infinitesimal.

G	Aceleração da gravidade.
a	Aceleração medida em G.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	22
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	TRABALHOS RELACIONADOS	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	26
3.2	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	28
3.2.1	Não Linearidades Geométricas	28
3.2.2	Materiais Não-Lineares	29
3.2.3	Contatos Não-Lineares	29
3.3	METODOLOGIA IMPLÍCITA X EXPLÍCITA	29
3.3.1	Implícita	29
3.3.2	Explícita	30
3.3.3	Comparativo	31
3.4	HISTÓRIA	32
3.5	ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO	33
3.6	SISTEMA DE REFERÊNCIA	35
3.7	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	35
3.7.1	Conservação de Massa	36
3.7.2	Conservação de Momento	36
3.7.3	Conservação de Energia	37
3.8	INTEGRAÇÃO NO TEMPO	37
3.8.1	Estabilidade do Passo de Tempo	38
3.8.2	<i>Mass Scaling</i>	38
3.9	FORMULAÇÃO DOS ELEMENTOS	39
3.9.1	Pontos de Integração	39
3.9.2	Elementos Quadrilaterais	41
3.9.3	Elementos Triangulares	41
3.10	<i>HOURGLASS</i>	42
3.10.1	Controle de <i>Hourglass</i>	42
3.11	MATERIAIS	43
3.11.1	Elasto-Plástico	44
3.11.2	Viscosidade	45
3.11.3	Modelo de Plasticidade Isotrópico Multilinear	46
3.11.4	Modelo de Plasticidade de Johnson-Cook	46
3.11.5	Modelo de Falha de Johnson-Cook	47

3.11.6	Hiperelasticidade	48
3.11.7	Constituição Ortotrópica	49
3.12	CONTATOS	49
3.12.1	Definições	49
3.12.2	Algoritmo de Contato	50
3.12.3	Rigidez de Contato	51
3.12.4	Amortecimento de Contato	51
3.12.5	Atrito	52
3.13	Programa Euro NCAP	53
3.14	Modelos <i>Dummy</i>	54
4	METODOLOGIA	56
4.1	ETAPA A	57
4.1.1	Preparação e Limpeza da Geometria	57
4.1.2	Geração da Malha Computacional	59
4.1.3	<i>Setup</i> do Modelo	60
4.1.3.1	Formulação dos Elementos	61
4.1.3.2	Controles do Tempo, <i>Solver</i> , <i>Hourglass</i> e sistema de referência	62
4.1.3.3	Conexões	63
4.1.3.4	Propriedades dos Materiais	63
4.1.3.5	Condições de Contorno	65
4.1.3.6	Contatos	65
4.1.3.7	Pontos de Massa	66
4.1.3.8	Definição do <i>Mass Scaling</i>	67
4.1.3.9	Solicitação de Dados	67
4.1.4	Modelo Obtido na Etapa A	68
4.2	ETAPA B	68
4.2.1	Geometria e Malha Computacional	68
4.2.2	<i>Setup</i> do Modelo	69
4.2.2.1	Formulação dos Elementos	70
4.2.2.2	Controle de <i>Hourglass</i>	70
4.2.2.3	Conexões	71
4.2.2.4	Condições de Contorno	71
4.2.2.5	Propriedades dos Materiais	72
4.2.2.6	Contatos	76
4.2.2.7	Massa Distribuída e Ajuste de Massa Pontual	76
4.2.3	Modelo Obtido na Etapa B	77
4.3	ETAPA C	78
4.3.1	Geometria e Malha Computacional	78
4.3.2	<i>Setup</i> do Modelo	79

4.3.2.1	Controle de Tempo	80
4.3.2.2	Modelo <i>Dummy</i>	80
4.3.2.3	Cinto de Segurança	80
4.3.2.4	Formulação dos Elementos	81
4.3.2.5	Conexões	81
4.3.2.6	Propriedades dos Materiais	82
4.3.2.7	Contatos	83
4.3.3	Modelo Obtido na Etapa C	84
5	RESULTADOS	86
5.1	RESULTADOS PRELIMINARES	86
5.1.1	Etapa A	86
5.1.1.1	Tensões de Von-Mises	86
5.1.1.2	Deformação Plástica Efetiva	88
5.1.1.3	Energias	89
5.1.1.4	Forças de Contato	90
5.1.2	Etapa B	91
5.1.2.1	Tensões de Von-Mises	91
5.1.2.2	Deformação Efetiva Total	93
5.1.2.3	Energias	94
5.1.2.4	Forças de Contato	94
5.2	RESULTADOS COMPLETOS	95
5.2.1	Deslocamentos Resultantes	95
5.2.2	Tensões de Von-Mises	95
5.2.2.1	Pontos Críticos	96
5.2.3	Deformação Efetiva Total	97
5.2.4	Deformação Plástica Efetiva	98
5.2.5	Diferença de Temperatura	100
5.2.6	Energias	101
5.2.7	Forças de Contato	102
5.2.8	Massa Adicionada	103
5.2.9	Avaliação do <i>Dummy</i>	104
5.2.9.1	Cabeça	105
5.2.9.2	Pescoço	106
5.2.9.3	Tórax	107
5.2.9.4	Fêmur	107
5.2.10	Discussão	108
6	CONCLUSÃO	110
6.1	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS E MELHORIAS	110

REFERÊNCIAS	112
APÊNDICE A - RESULTADOS ADICIONAIS	117
APÊNDICE B - CÓDIGO FONTE DO <i>LS-DYNA</i>	122

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o *National Highway Traffic Safety Administration* (U.S. Department of Transportation, 2020), nos anos de 2016 e 2017 nos Estados Unidos, os acidentes de trânsito por veículos motorizados foram a 13^a causa de morte entre todos os eventos estudados. Sendo em 2017 a causa líder de mortes para as idades de 3, 11, 12 e 17 à 21 anos, enquanto que em 2016, foi a causa principal para as idades de 10, 11 e 17 à 22 anos, o que demonstra o impacto social nos cidadãos.

Neste mesmo estudo, (U.S. Department of Transportation, 2020), quando os acidentes de trânsito por veículos motorizados foram classificados como causa de morte não intencional, tais acidentes foram categorizados como a segunda maior causa de morte nos anos de 2016 e 2017. Ademais, nesta classificação, tais eventos foram a causa líder de morte para as idades de 3 à 21 anos em 2017 e para as idades de 3 à 22, 65 e 66 anos em 2016, o que representa um impacto ainda maior para a população nesta avaliação mais específica.

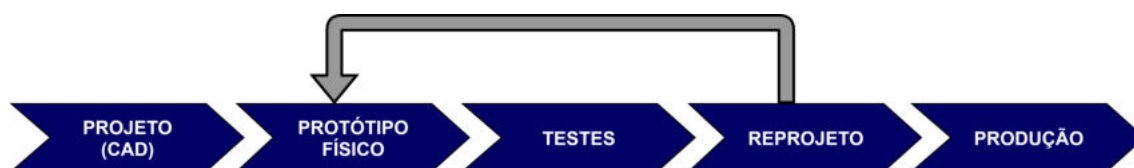
Ainda em U.S. Department of Transportation (2020), ao avaliar tais dados seguindo outra métrica, a de anos de vida perdidos (número de anos de vida perdidos, caso a morte não tivesse ocorrido, seguindo uma expectativa de vida média), os acidentes de trânsito por veículos motorizados foram a 7^a maior no *ranking* desde 2011 até 2017, o que reflete em como tais acidentes impactam a população mais jovem.

No Brasil, de acordo com a Secretaria de Vigilância em Saúde (DASNT, 2017), avaliando todas as idades e ambos os sexos, em 2017, houveram 46.282 óbitos devido à acidentes de trânsito, o que significa a 8^a maior causa de morte no país. E avaliando dados nacionais mais atuais (Vias Seguras, 2020), foi verificado que houveram 31.307 mortes em 2019 (onde aproximadamente um terço foram situações de impacto frontal), o que equivale a um gasto de aproximadamente R\$ 50 bilhões ao ano, entre custos com saúde, indenizações e previdências (Estadão, 2020).

Com isso, apesar de na última década estar ocorrendo uma redução do número de óbitos e gastos financeiros por ano, pode-se observar que o impacto social e econômico no Brasil e em países desenvolvidos, a exemplo dos Estados Unidos, ainda é bem relevante. Desta forma, nota-se a importância em realizar estudos aprofundados para entender o comportamento dinâmico dos automóveis durante acidentes de trânsito a fim de desenvolver veículos mais seguros.

A avaliação do comportamento dinâmico dos automóveis pode ser realizada através de dois métodos, experimentais e simulações (ANSYS, 2021b). Os estudos experimentais, vide Figura 1, são baseados na elaboração do modelo CAD (do inglês *Computer Aided Design*), seguido da fabricação do protótipo físico, submissão desse protótipo à testes experimentais e, caso os testes sejam bem sucedidos, o modelo é fabricado para distribuição em massa e, caso os testes apontem algum problema, o modelo é reprojetoado e submetido à novos testes, retornando ao ciclo.

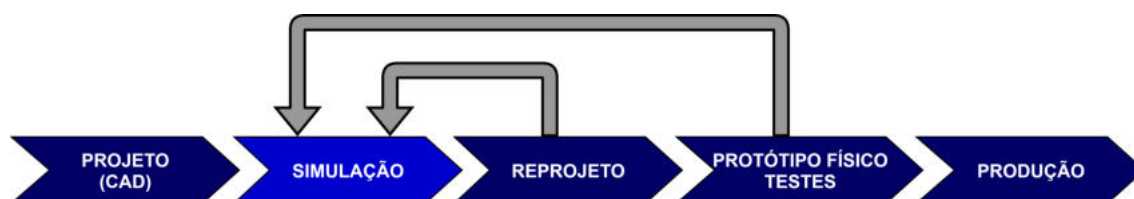
Figura 1 – Ciclo Experimental.



Fonte: O autor (2021)

Por outro lado, os estudos em simulação, vide Figura 2, partem do mesmo ponto inicial, ou seja, elaboração do CAD, contudo, na sequência é desenvolvido o estudo numérico CAE (do inglês *Computer Aided Engineering*), o qual pode ser entendido como um laboratório virtual onde é possível realizar diversos testes de forma rápida e eficiente; e apenas após a obtenção de fortes candidatos das simulações, são desenvolvidos protótipos físicos e realizados testes experimentais para possibilitar a manufatura em massa.

Figura 2 – Ciclo Utilizando Simulação.



Fonte: O autor (2021)

Entrando em maiores detalhes na etapa de estudo numérico, CAE é uma tecnologia que utiliza os computadores para dar suporte à engenharia, auxiliando no desenvolvimento de projetos e pesquisas, por meio de análises estruturais, térmicas, magnéticas, fluidodinâmicas, acústicas, entre outras, tornando o CAE uma ferramenta de suma importância na engenharia de ponta atualmente (WU; GU, 2012; ESSS, 2014).

De forma sucinta, conforme exposto em Zienkiewicz, Taylor e Zhu (2013), ESSS (2014), pode-se dividir uma simulação computacional em três principais etapas: 1. Pré-processamento: definição do modelo geométrico, determinação dos materiais, aplicação das condições de contorno do problema e geração da malha computacional; 2. Processamento: solução das equações físicas que caracterizam o problema, sendo resolvido pelo CPU e/ou GPU do *hardware* utilizado; 3. Pós-processamento: visualização e interpretação dos resultados obtidos.

Dentre as diversas vantagens da utilização de simulações, pode-se citar a redução de custos, minimização do tempo de lançamento dos produtos, identificação de erros, otimização de desempenho e maior confiabilidade (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013), o que torna uma ferramenta interessante para o estudo aprofundado do comportamento dinâmico de veículos

durante acidentes de trânsito. Contudo, vale também citar desvantagens desta ferramenta, sendo as principais, a necessidade de computadores robustos com *hardware* dedicado e mão de obra especializada.

Com isso, é de se esperar e notar que a simulação computacional tem ganhado espaço no âmbito acadêmico e comercial ao longo das últimas décadas, conforme pode ser observado pela publicação de artigos recentes em Bhardawaj, Sharma e Sharma (2020), Karthikeyan et al. (2019). Na área estrutural de FEA (do inglês *Finite Element Analysis*), constata-se que tem sido imprescindível para solucionar problemas complexos, bem como mapear comportamentos desconhecidos, cujos experimentos se mostram ineficazes e a teoria através de métodos analíticos inviável a nível de complexidade (FILHO, 2018; WU; GU, 2012).

Em se tratando de análises por elementos finitos via dinâmica explícita, tem-se a possibilidade de avaliar fenômenos de curta duração com particularidades e especificidades advindas das não linearidades do modelo, principalmente devido às propriedades do material (plasticidade, hiperelasticidade, viscoplasticidade, entre outras); contatos; e grandes deformações, deslocamentos e rotações (WU; GU, 2012; HEINSTEIN et al., 2000; WRIGGERS, 2008). Desta forma, para a elaboração do estudo proposto em entender de forma aprofundada o comportamento dinâmico de um veículo durante um acidente de trânsito, o qual é de se esperar que contenha diversas e intensas não linearidades, nota-se que tal método é compatível para sua resolução. Com isso, tendo em vista o alto investimento financeiro, tempo despendido em experimentos, alto índice de fatalidade, redução de custos e obrigatoriedade de avaliação a fim de atender diversas normas de diferentes países, foi selecionado pelo autor o estudo do fenômeno de impacto frontal (KARTHIKEYAN et al., 2019; BHARDAWAJ; SHARMA; SHARMA, 2020).

Assim, no presente trabalho, buscou-se desenvolver uma análise estrutural de impacto frontal de um protótipo *off-road* da categoria Baja SAE da Equipe Mangue Baja (UFPE), utilizando a metodologia FEA via dinâmica explícita com o auxílio do *software* CAD *Ansys Space Claim*¹ e dos pacotes CAE: *Ansys Meshing*², *Ansys Mechanical*³, *LS-PrePost*⁴ e *LS-Dyna*⁵ (licenças dos *softwares* disponibilizadas pela empresa ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software), os quais se apresentaram como ferramentas adequadas e robustas em diferentes referências (GULER et al., 2007; NOVERSA; PEIXINHO, 2013).

¹ Disponível em <<https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>>

² Disponível em <<https://www.ansys.com/products/meshing>>

³ Disponível em <<https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>>

⁴ Disponível em <<https://www.lstc.com/products/ls-prepost>>

⁵ Disponível em <<https://www.lstc.com/products/ls-dyna>>

Figura 3 – Protótipos MB1 e MB2 da Equipe Mangue Baja (UFPE), Competição Nacional Baja SAE 2019.



Fonte: Equipe Mangue Baja, UFPE (2019)

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral:

Foi determinada a seguinte hipótese principal para o problema de pesquisa: “A simulação numérica de um veículo Baja SAE com o piloto, através da análise por elementos finitos via dinâmica explícita, pode prever a integridade do veículo e a segurança do piloto em uma situação de impacto frontal.”

Objetivos específicos:

Ademais, tal problema de pesquisa tem os seguintes objetivos específicos.

- Poder afirmar se o habitáculo do chassis que comporta o piloto será invadido;
- Poder afirmar se há risco de comprometer o tanque de combustível;
- Poder afirmar se haverá falha dos componentes adjacentes ao chassis;

- Poder afirmar se o piloto sofrerá lesões na cabeça, pescoço, tórax e pernas, de acordo com o protocolo de avaliação para adultos do programa europeu de segurança automotiva (EURO NCAP, 2020);
- Poder afirmar se a metodologia aplicada é numericamente robusta e segue o procedimento de testes para impacto frontal do programa europeu de segurança automotiva (EURO NCAP, 2019);
- Poder afirmar se foram seguidas as recomendações e boas práticas da Ansys (ANSYS, 2021a; ANSYS, 2021b) e LSTC (LSTC, 2019; LSTC, 2021; LSTC, 2020a; LSTC, 2020b).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em 6 capítulos. Ao final, encontra-se as referências ordenadas de acordo com as citações durante o texto, como também resultados adicionais e o código fonte do *LS-Dyna* referente ao trabalho.

Os capítulos estão divididos da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualização e justificativa do problema de pesquisa e determinação da hipótese geral e objetivos específicos do trabalho.
- **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** Contém as fontes utilizadas e uma revisão dos trabalhos relacionados e suas carências em representar de forma adequada o fenômeno de impacto frontal.
- **Capítulo 3 - Fundamentação Teórica:** Contém os conceitos utilizados para o entendimento e composição do trabalho.
- **Capítulo 4 - Metodologia:** Apresentação das etapas nas quais o modelo foi dividido e *softwares* utilizados. Descrição do procedimento realizado na preparação da geometria, geração da malha computacional, *setup* do modelo e pós-processamento dos resultados.
- **Capítulo 5 - Resultados:** Exposição e discussão dos resultados obtidos referentes ao veículo e piloto.
- **Capítulo 6 - Conclusão:** Contém as considerações finais referentes ao trabalho desenvolvido, além de propor melhorias para este.
- **Apêndice A - Resultados Adicionais:** Contém resultados extras referentes ao *Dummy* e veículo do modelo completo.
- **Apêndice B - Código Fonte:** Contém o código fonte do *LS-Dyna* com os principais comandos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica e metodologia do trabalho foram baseadas no levantamento e leitura de bibliografias relacionadas ao tema aqui desenvolvido. A partir do principal tópico, simulação de impacto frontal, e tópicos adjacentes, a exemplo da análise por elementos finitos, dinâmica explícita, *LS-Dyna*, *Ansys Mechanical* e protocolos Euro NCAP, foi desenvolvida a revisão bibliográfica.

Primeiramente, foram identificadas as principais palavras chaves acerca dos tópicos comentados, sendo realizadas pesquisas na literatura para encontrar documentos de periódicos e jornais relevantes, sendo utilizados as seguintes fontes: Acervo da LSTC DYNAlook¹, Portal de Periódicos CAPES², Base da Elsevier³, Base da Springer⁴, Portal da ACM Digital Library⁵ e Base do IEEE⁶.

Em seguida, foram buscados livros de referência acerca dos tópicos comentados, dando preferência aos autores mais reconhecidos no âmbito acadêmico e comercial. Ademais, foram buscadas as documentações técnicas e materiais de treinamento dos *softwares* a serem utilizados, como também normas e protocolos com informações relevantes, para o desenvolvimento dos modelos numéricos. Por fim, de forma complementar, foram buscados sites de empresas e blogs reconhecidos para apoiar o trabalho.

2.1 TRABALHOS RELACIONADOS

Existem diversos artigos, trabalhos de conclusão de curso e dissertações com temas semelhantes ao presente trabalho desenvolvido, ou seja, simulação numérica de impacto, contudo muitos deles contém considerações extremamente simplificadoras, utilização de elementos de malha não adequados e metodologias pouco robustas.

Nos trabalhos apresentados em congresso em Bento et al. (2016) e em Queiroz, Lopes e Santos (2018) foi utilizada a metodologia de análise estrutural estática implícita, a qual não considera os efeitos dinâmicos do modelo e não possui robustez suficiente para lidar com as extremas não linearidades, ambas características presentes no fenômeno de impacto frontal. Em Furato e Guimarães (2016) e Murkute et al. (2016) o chassi foi simplificado utilizando elementos unidimensionais, uma hipótese não adequada para capturar os efeitos de deformação geométrica nos tubos, falha do material e interação com os componentes adjacentes durante uma situação de impacto.

¹ Disponível em <<https://www.dynalook.com/>>

² Disponível em <<http://periodicos.capes.gov.br/>>

³ Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/>>

⁴ Disponível em <<https://link.springer.com/>>

⁵ Disponível em <<https://dl.acm.org/>>

⁶ Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>

Outros exemplos são a dissertação de mestrado em Noorbhasha (2010) e os trabalhos de conclusão de curso em Stake (2020) e em Guth (2015), onde não foi considerado um critério de falha para o material utilizado, condição essencial em simulações de impacto, visto que é esperado que ocorra a falha de componentes em regiões localizadas durante o fenômeno, como também não foi implementado um modelo constitutivo viscoplástico do material, o qual é importante devido às altas taxas de deformação.

Também vale citar os trabalhos de tema semelhante, porém utilizando veículos de competição diferentes do Baja SAE, a exemplo do Formula SAE. No artigo em Yadav e Jain (2012) e nos trabalhos de conclusão de curso em Canut (2014) e em Santos (2016), também foram verificadas inconsistências semelhantes ao já comentado. Por fim, vale salientar que todos esses artigos, trabalhos apresentados em congresso, trabalhos de conclusão de curso e dissertações de mestrado consideraram apenas o chassi, eliminando do modelo os componentes de suspensão, direção e piloto representado pelo *Dummy*, o que é de se esperar que sejam essenciais para avaliar a rigidez adequada do veículo e segurança do piloto durante o impacto.

Desta forma, o presente trabalho busca representar todas estas condições de forma adequada, utilizando a metodologia de análise por elementos finitos via dinâmica explícita; considerando as não linearidades geométricas, de contato e de materiais; utilizando elementos de malha adequados; considerando uma curva viscoplástica e critério de falha para os materiais; inserindo os componentes de suspensão, direção e modelo *Dummy*; seguindo os protocolos da Euro NCAP; entre outros detalhes.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica foi dividida nas seguintes seções: método dos elementos finitos, análise por elementos finitos, metodologia implícita e explícita, história, estratégia de solução, sistema de referência, formulação matemática, integração no tempo, formulação dos elementos, *hourglass*, materiais, contatos, programa EURO NCAP e modelos *Dummy*.

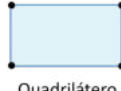
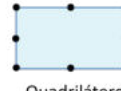
3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos, do inglês *Finite Element Method* (FEM), é uma estratégia amplamente utilizada para resolver equações diferenciais parciais, do inglês *partial differential equations* (PDE), de problemas dependentes do espaço e tempo que surgem nos âmbitos da matemática, física e engenharia (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

Para a grande maioria dos problemas, essas PDEs não podem ser resolvidos com métodos analíticos no meio contínuo e, desta forma, faz-se necessário uma aproximação das equações através de um sistema de equações algébricas em um domínio discretizado.

Este domínio discretizado é chamado de malha computacional, a qual é composta por elementos, onde os pontos de conexão entre tais elementos são denominados de nós. Diversos tipos de elementos podem ser utilizados na malha, vide Figura 4, classificados de acordo com seu espaço: unidimensional, bidimensional e tridimensional. Vale comentar que é possível aumentar a acurácia do modelo numérico a partir da adição de nós intermediários nas arestas dos elementos, passando a ordem do elemento de linear para quadrático.

Figura 4 – Tipos de Elementos da Malha Computacional.

	1D	2D	3D
Linear	 Viga	 Triangular  Quadrilátero	 Tetraédrico  Pirâmidal  Prismático  Hexaédrico
Quadrático	 Viga	 Triangular  Quadrilátero	 Tetraédrico  Pirâmidal  Prismático  Hexaédrico

Fonte: O autor (2021)

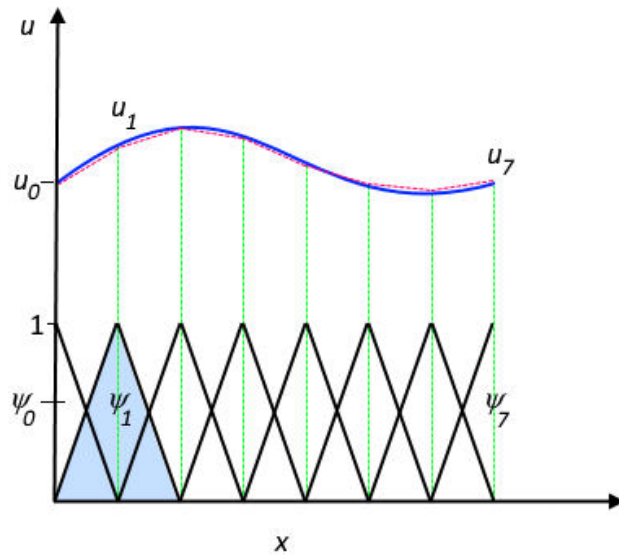
O método dos elementos finitos é formulado de forma que a solução das equações algébricas locais do modelo em domínio discretizado é uma aproximação da solução real global para as PDEs no domínio contínuo.

Para exemplificar a aplicação do FEM em um problema 1D linear, pode-se pensar em uma função u que será a variável dependente da PDE, a exemplo de deslocamento ao longo do comprimento de uma viga. A função u pode ser aproximada por uma função u_h utilizando combinações lineares de funções básicas de acordo com a Equação 3.1, onde ϕ_i são as função de forma e u_i são os coeficientes que aproximam a função u_h no sentido de u .

$$u \approx u_h = \sum_i u_i \psi_i. \quad (3.1)$$

De forma visual, tal problema pode ser observado na Figura 5, o qual foi discretizado em 7 elementos e 8 nós, onde os coeficientes tem valor igual a 1 em seus respectivos nós e valor igual a 0 nos outros nós. A função u (linha azul) é aproximada por u_h (linha vermelha), que é uma combinação linear de funções de forma lineares ϕ_i (linhas pretas) multiplicadas pelos coeficiente u_i (linha verde).

Figura 5 – Exemplo de Problema Linear 1D Utilizando MEF.



Fonte: (COMSOL, 2017)

Por fim, vale salientar que um dos benefícios de usar o método dos elementos finitos é a liberdade oferecida na discretização do modelo, tanto nos elementos a serem utilizados, ordem das funções e distribuição dos elementos, permitindo a solução de problemas de forma eficiente, acurada e robusta.

3.2 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

É importante destacar a diferença entre o método dos elementos finitos (FEM) e a análise por elementos finitos (FEA), os quais são termos que muitas vezes são confundidos como sinônimos nos meios acadêmicos e industriais. A partir da aplicação prática do método dos elementos finitos em problemas de engenharia, em conjunto com o trabalho de pré-processamento e pós processamento, utilizando ferramentas computacionais, é que se define a análise por elementos finitos. Os problemas típicos de interesse na engenharia incluem as tradicionais áreas de cálculo estrutural, transferência de calor, fluidodinâmica, eletromagnetismo, acústica e óptica.

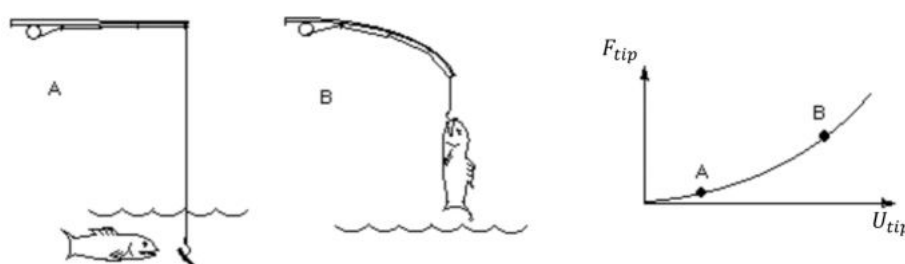
Ao se utilizar a FEA no contexto de cálculo estrutural, é possível resolver problemas nas categorias de lineares e não lineares. Para os problemas lineares, a resposta do modelo é completamente proporcional aos carregamentos, o que resulta em um baixo custo computacional e modelos mais simples. Enquanto que para problemas não-lineares, os modelos são mais complexos e exigem mais do *hardware* do computador. Desta forma, é importante entender as possíveis fontes de não linearidades.

3.2.1 Não Linearidades Geométricas

O conceito de não linearidades geométricas consiste na eliminação da hipótese da teoria de deformações infinitesimais, ou seja, o modelo pode sofrer grandes deslocamentos, grandes rotações e grandes deformações, as quais irão influenciar de forma significativa na rigidez da estrutura (ANSYS, 2021b).

Para entender este fenômeno, existem dois exemplos clássicos. O primeiro é uma placa plana fina apoiada em suas bordas com uma força aplicada no centro, onde ao deformar, a rigidez da placa é incrementada à medida que se deforma devido à contribuição da rigidez de membrana. O segundo é uma vara de pescar com uma massa em sua ponta, onde à medida que se deforma, a rigidez é incrementada devido ao seu novo formato geométrico, vide Figura 6.

Figura 6 – Não Linearidade Geométrica.



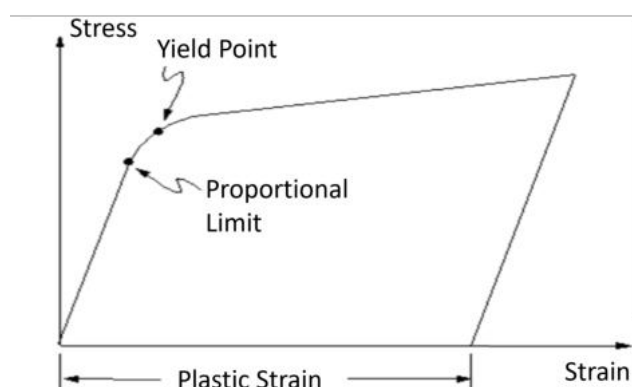
Fonte: (ANSYS, 2021b)

3.2.2 Materiais Não-Lineares

As não-linearidades dos materiais ocorrem quando a curva de tensão-deformação do material deixa de ser linear, ou seja, a tensão no local passa a ser uma função não linear da deformação (ANSYS, 2021b). Ademais, esta relação também é dependente do caminho tomado na curva (com exceção para os casos de materiais não lineares elásticos e hiperelásticos).

O exemplo mais prático para entender tal efeito é uma curva de tensão-deformação completa de uma material metálico, ou seja, com as regiões elástica e plástica, vide Figura 7.

Figura 7 – Material Não-Linear.



Fonte: (ANSYS, 2021b)

3.2.3 Contatos Não-Lineares

O conceito de contatos não-lineares consiste na possibilidade de diferentes componentes entrarem em contato ou se separarem, como também de contatos colados falharem, o que acarreta em uma mudança abrupta na rigidez do sistema (ANSYS, 2021b). Um exemplo simples para entender este fenômeno é um carro impactando contra uma estrutura rígida, vide Figura 8, onde há contatos entre diferentes componentes do veículo, como também com a parede.

3.3 METODOLOGIA IMPLÍCITA X EXPLÍCITA

Outra classificação importante de FEA dentro do cálculo estrutural é a metodologia de solução utilizada, a qual pode ser implícita ou explícita.

3.3.1 Implícita

A metodologia implícita é baseada na solução das equações dinâmicas governantes definidas em 3.2, onde M é a matriz de massa, $\ddot{x}$ é o vetor aceleração, C é a matriz de amortecimento,

Figura 8 – Contatos Não-Lineares.



Fonte: (ANSYS, 2021b)

$\dot{x}$ é o vetor velocidade, K é a matriz de rigidez, x é o vetor deslocamento e $R(t)$ é o vetor de carregamentos externos (WRIGGERS, 2008).

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = R(t) \quad (3.2)$$

Ao avaliar o significado dos termos, é possível verificar a presença da contribuição de cada força atuante no modelo de acordo com sua origem, vide equação 3.3, onde F_i são as forças inerciais, F_d são as forças de amortecimento, F_e são as forças elásticas e $R(t)$ são as forças externas.

$$F_i + F_d + F_e = R(t) \quad (3.3)$$

Supondo que as matrizes de amortecimento seja proporcional e de massa seja *lumped*, um método de solução é fundamentado na inversão da matriz de rigidez e integração direta em tempos discretos da equação 3.2, onde pode ser utilizado o método de Newmark ou HHT (Hilber-Hughes-Taylor) para calcular as variáveis de interesse no passo de tempo t_{n+1} . A integração no tempo é incondicionalmente estável, o que permite utilizar passos de tempo maiores, estando limitado apenas pela convergência e acurácia do modelo.

Especificamente para problemas não-lineares, a solução pode ser obtida através de uma série de aproximações lineares, algoritmo conhecido como Método de Newton Raphson, onde faz-se necessário a inversão da matriz de rigidez de forma iterativa a cada passo de tempo, visto que tal matriz deixa de ser linear e torna-se não linear, dependente do deslocamento da estrutura.

3.3.2 Explícita

A metodologia explícita é baseada na solução das equações de conservação de massa, momento e energia, as quais serão apresentadas em maiores detalhes na Seção 3.7.

As equações são desacopladas, o que significa que podem ser resolvidas diretamente de forma explícita e não são necessárias avaliações de convergência a cada passo de tempo.

Ademais, a solução é condicionalmente estável, o que significa que deve atender condições específicas, as quais serão explanadas em maiores detalhes na Seção 3.8.

Com relação às não-linearidades, estas são inclusas diretamente no vetor de forças internas, o que significa que não é necessário realizar a inversão da matriz de rigidez ao longo da solução do modelo (WU; GU, 2012).

3.3.3 Comparativo

Por conseguinte, ao comparar as metodologias implícita e explícita, é possível observar que cada uma tem suas vantagens e desvantagens, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Comparativo entre Metodologia Implícita e Explícita.

	Inércia e Amortecimento	Solução	Passo de Tempo	Não Linearidades
Implícita	Pode ser simplificada e não considerar as forças inerciais e de amortecimento (análise estática) ou considera-las (análise transiente).	É necessário um processo iterativo para buscar a convergência.	O passo de tempo é limitado apenas pela acurácia por ser incondicionalmente estável.	As não linearidades do modelo são consideradas através da atualização da matriz de rigidez.
Explícita	As forças inerciais e de amortecimento são sempre consideradas.	As equações são calculadas diretamente de forma desacoplada.	Passo de tempo limitado visto que é condicionalmente estável.	As não linearidades são consideradas diretamente no vetor de forças.

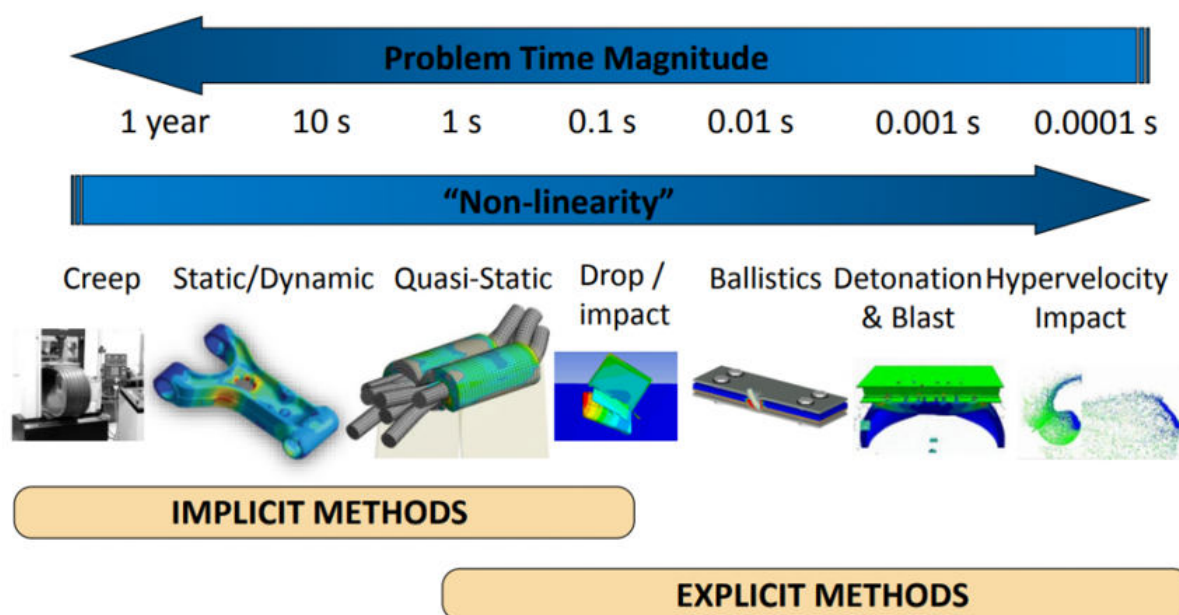
Fonte: O autor (2021)

Desta forma, é possível notar que a escolha da metodologia a ser utilizada para análises dinâmicas é baseada principalmente na escala de tempo e na intensidade de não-linearidades do problema físico a ser resolvido. Vale comentar que atualmente, em alguns *softwares* comerciais, a exemplo do *LS-Dyna*, já é possível mesclar estas duas abordagens ao longo da análise a fim de usufruir das vantagens de cada metodologia.

Para problemas de alta escala de tempo onde faz-se necessário utilizar altos passo de tempo e com efeitos de não-linearidades baixos para moderados, o recomendado é utilizar análises implícitas; enquanto que para problemas de baixa escala de tempo onde é possível utilizar baixíssimos passo de tempo e com efeitos de não-linearidades moderados para altíssimos, o recomendado é utilizar análises explícitas (LSTC, 2021). Na Figura 10 é possível observar tal comparação de forma esquemática e com exemplos de fenômenos físicos tradicionais utilizados com cada metodologia.

Para o problema proposto no presente trabalho, impacto frontal de um veículo Baja SAE pilotado, nota-se que é mais interessante utilizar a metodologia explícita devido à baixa escala de tempo (ordem de 10^{-2} segundo) e alta intensidade de não-linearidades (geométricas, materiais

Figura 10 – Comparativo da Escala de Tempo e Não-Linearidade entre Metodologias.



Fonte: (ANSYS, 2021b)

e contatos). Assim, nas seguintes seções do presente trabalho, o foco será exclusivamente em torno da metodologia explícita.

3.4 HISTÓRIA

A análise por elementos finitos via dinâmica explícita surgiu dos desafios observados pelos engenheiros em simular fenômenos relacionados à flambagem dinâmica, presença de contatos entre vários componentes, critério de falha para materiais, deformações excessivas, propriedades altamente não-lineares de materiais, comportamento de pós-flambagem, entre outros. Nestas áreas, a abordagem tradicional de dinâmica implícita não havia alcançado resultados com acurácia e custo computacional satisfatórios, até que o método dos elementos finitos via dinâmica explícita emergisse como uma ferramenta promissora (LSTC, 2019).

Avaliando o desenvolvimento desta tecnologia ao longo dos anos, em Wilkins (1963), foi realizada a primeira publicação acerca dos métodos explícitos aplicados à elementos finitos. Então, em Constantino (1967), foi explorado o primeiro software explícito desenvolvido a fim de resolver problemas de engenharia. Outros desenvolvimentos iniciais incluem *HONDO* e *PRONTO* liderados por Sam Key; *SADCAT*, *WHAMS* e *Super WHAMS* liderados por Ted Belytschko; e *DYNA-2D/3D* liderados por John Hallquist.

Contudo, foi apenas na década de 1980 que os softwares começaram a ser explora-

dos comercialmente. Inicialmente, houve o *PAMCRASH*, seguido por *RADIOSS*, *DYTRAN* e *ABAQUS-Explicit*. Em 1989, chefiado por John Hallquist, a primeira versão do *LS-Dyna* foi comercializada.

Desde então, a análise por elementos finitos via dinâmica explícita foi aplicada com sucesso a várias situações de problemas dinâmicos não lineares nas últimas décadas, sendo atualmente amplamente adotada nos mais diversos ambientes comerciais e acadêmicos. Conforme relatado em artigos e conferências, as aplicações envolvem vários fenômenos em diferentes indústrias, sendo as referências a seguir apenas alguns exemplos: (THO; SMITH, 2006) para colisão de pássaro em avião; (XUE; SCHMID, 2005) para colisão de trem; (HOUSSINI, 2006) para impacto de automóveis; (NEUMAYER; CHATIRI; HOERMANN, 2006) para queda livre de objetos; (CHOW; TAI, 2000) para estampagem de chapas metálicas; (LU; WU, 2006) para processos de forjamento e extrusão; e (MEDVEDEV, 2002) para soldagem.

Atualmente, os softwares comerciais mais reconhecidos e utilizados de FEA com metodologia explícita são: *LS-Dyna*, desenvolvido pela LSTC (adquirida pela Ansys); *AutoDyn*, desenvolvido pela Ansys; *ABAQUS-Explicit*, desenvolvido pela Dassault Systèmes; *RADIOSS*, desenvolvido pela Altair; e *NASTRAN*, originalmente desenvolvido pela NASA e adaptado pela Siemens, resultando no *NX-NASTRAN*.

3.5 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

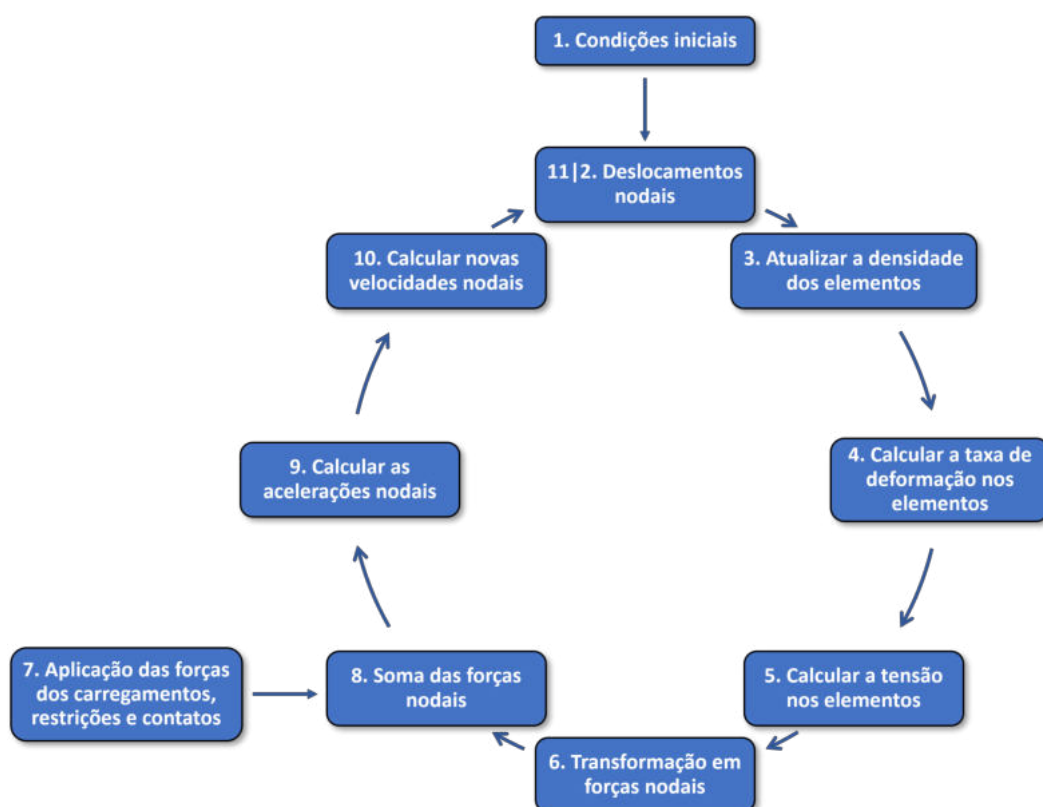
A análise por elementos finitos via dinâmica explícita requer uma sequência de passos particular a fim de resolver os modelos numéricos de forma eficiente e acurada.

Desta forma, a estratégia de solução pode ser resumida nos seguintes passos abaixo (WU; GU, 2012; ANSYS, 2021a), sendo esquematizada na Figura 11.

1. Condições iniciais são impostas no modelo, causando deslocamentos nodais.
2. Os deslocamentos dos nós produzem deformações nos elementos da malha em um determinado intervalo de tempo.
3. As deformações resultam em alterações no volume e, conseqüentemente, na densidade do material em cada elemento.
4. A partir das deformações e intervalo de tempo, as taxas de deformações são calculadas, sendo utilizadas as formulações dos elementos empregados.
5. A partir das deformações, taxas de deformação e leis de constituição do material, são calculadas as tensões resultantes nos elementos.
6. As tensões do componente são transformadas em forças nodais internas através das formulações dos elementos.

7. Forças nodais externas advindas de condições de carregamentos, restrições e interações de contatos são acrescentadas ao modelo.
8. As forças nodais internas e externas são somadas a fim de produzirem as forças nodais resultantes.
9. As forças nodais resultantes são divididas pelas massas nodais a fim de produzir acelerações nodais.
10. As acelerações são integradas explicitamente no tempo para produzir velocidades nodais.
11. As velocidades nodais são integradas explicitamente no tempo a fim de produzir novos deslocamentos nodais.
12. O ciclo de processo da solução é repetido a partir da etapa 2 até que um número de ciclos ou tempo determinado pelo usuário seja atingido.

Figura 11 – Estratégia de solução.



Fonte: Adaptado de Ansys (2021a)

3.6 SISTEMA DE REFERÊNCIA

Ao utilizar o método de elementos finitos, existem dois principais sistemas de referência a serem utilizados, lagrangiano e euleriano.

No sistema lagrangiano, o material associado a cada componente é discretizado em uma malha computacional ajustada ao corpo, onde cada elemento da malha é utilizado para representar um volume de material. Com isso, a mesma quantidade de massa do material permanece associada a cada elemento ao longo da simulação e a malha deforma junto com a deformação do material. Solucionar modelos utilizando o sistema de referência lagrangiano é o método mais eficiente e preciso para usar na grande maioria dos modelos estruturais.

Contudo, existem simulações onde o material sofre deformações extremas, a exemplo de modelos utilizando fluidos em estado líquido ou gasoso, onde os elementos da malha são altamente distorcidos conforme a deformação do material aumenta. Eventualmente, tais elementos podem ficar tão distorcidos que os elementos ficam invertidos (volumes negativos) e a simulação não pode prosseguir sem recorrer à erosão numérica, técnica que consiste em eliminar do modelo elementos altamente distorcidos. Para estas situações, pode-se utilizar o sistema euleriano.

No sistema de referência euleriano, a malha computacional permanece estacionária durante toda a simulação e o material flui através da malha. A malha, portanto, não sofre problemas associados a grandes deformações do corpo. Vale salientar que solucionar um modelo usando um referencial euleriano é computacionalmente mais custoso, quando comparado ao referencial lagrangiano, onde o custo adicional vem da necessidade de transportar material de um elemento para o próximo adjacente, como também rastrear em quais elementos existe cada quantidade de material (DESPRES, 2017; ANSYS, 2021a).

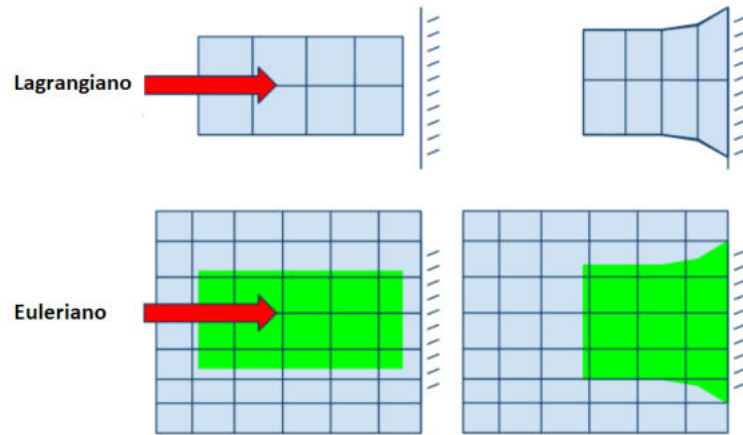
Na Figura 12, é apresentado um exemplo representativo, onde mostra um bloco de material impactando uma superfície rígida. Primeiramente, o bloco é representado no referencial lagrangiano, onde durante o processo de impacto os nós da malha acompanham a deformação do material. Em seguida, o mesmo problema é modelado em um referencial euleriano, onde a malha computacional é fixa no espaço e o material é rastreado à medida que se move pela malha.

3.7 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Em análises por elementos finitos via dinâmica explícita, em coordenadas lagrangianas, as equações diferenciais parciais a serem solucionadas expressam a conservação de massa, momento e energia. Tais equações em conjunto com o modelo de material, condições de contorno e condições iniciais definem a solução completa do problema (Etapas 3 à 5 da Figura 11).

Vale salientar que estas equações são solucionadas explicitamente para cada elemento do modelo, sendo utilizadas as variáveis calculadas no passo de tempo anterior como dados de

Figura 12 – Sistemas de Referência.



Fonte: Adaptado de (ANSYS, 2021a)

entrada para o passo de tempo atual, não havendo necessidade de buscar quaisquer formas de equilíbrio (WU; GU, 2012; LSTC, 2019).

3.7.1 Conservação de Massa

Iniciando pela equação da conservação de massa, para formulação lagrangiana, a malha se move e distorce junto com o componente que está sendo modelado, o que significa que a conservação de massa é automaticamente satisfeita. Desta forma, a densidade dos elementos pode ser determinada em qualquer momento a partir do volume atual e massa inicial do elemento pela equação 3.4, onde ρ é a densidade instantânea do elemento, m_0 é a massa inicial e V é o volume no momento de avaliação.

$$\rho = \frac{m_0}{V}. \quad (3.4)$$

3.7.2 Conservação de Momento

Para a conservação de momento, as equações diferenciais parciais relacionam as acelerações com os tensores de tensão e carregamentos de corpo em 3.5, 3.6 e 3.7, onde ρ é a densidade, $\ddot{x}$, $\ddot{y}$ e $\ddot{z}$ são as acelerações, b_i é o carregamento de corpo e $\frac{\delta\sigma_{ij}}{\delta j}$ são os tensores de tensão.

$$\rho\ddot{x} = b_x + \frac{\delta\sigma_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{xy}}{\delta y} + \frac{\delta\sigma_{xz}}{\delta z}, \quad (3.5)$$

$$\rho\ddot{y} = b_y + \frac{\delta\sigma_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{yy}}{\delta y} + \frac{\delta\sigma_{yz}}{\delta z}, \quad (3.6)$$

$$\rho\ddot{z} = b_z + \frac{\delta\sigma_{zx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{zy}}{\delta y} + \frac{\delta\sigma_{zz}}{\delta z}. \quad (3.7)$$

3.7.3 Conservação de Energia

Por fim, a conservação de energia é representada pela equação 3.8, onde $\dot{e}$ é a taxa de energia, ρ é a densidade, σ_{ij} são as tensões e $\dot{\epsilon}_{ij}$ é a taxa de deformação.

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\epsilon}_{zx}). \quad (3.8)$$

3.8 INTEGRAÇÃO NO TEMPO

Sobre o passo de tempo a ser utilizado, vale salientar que o mesmo deve ser pequeno o suficiente para garantir a estabilidade, acurácia e precisão da solução. O *solver* de dinâmica explícita utiliza um esquema de integração no tempo de diferença central, também conhecido como método de Leapfrog (WU; GU, 2012; LSTC, 2019).

Após as forças nodais totais serem calculadas a partir das tensões internas, carregamentos, restrições e contatos (etapas 6 à 8 da Figura 11), são calculadas as acelerações nodais através da divisão das forças pelas massas nodais (etapa 9 da Figura 11).

Para as seguintes equações da presente seção, $\ddot{x}_i$ representa as componentes das acelerações nodais, $\dot{x}_i$ representa as componentes das velocidades nodais, x_i representa as componentes das posições nodais, Δt representa o passo de tempo, m representa as massas nodais, F_i representa as componentes de forças agindo sobre os nós e b_i são as componentes de acelerações de corpos. O índice i representa as 3 direções do sistema de coordenadas ($i = x, y, z$) e o índice n representa o tempo atual.

Com isso, as componentes das acelerações no tempo n são definidas pela equação 3.9 (Etapa 9 da Figura 11).

$$\ddot{x}_i^n = \frac{F_i}{m} + b_i. \quad (3.9)$$

Então, as componentes de velocidades no tempo $n + 1/2$ podem ser definidas através da equação 3.10 (Etapa 10 da Figura 11).

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n. \quad (3.10)$$

E, por fim, as componentes das posições nodais são atualizadas para o tempo $n + 1$ através da equação 3.11 (Etapa 11|2 da Figura 11).

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2}. \quad (3.11)$$

Existem diversas vantagens em se utilizar tal metodologia para realizar a integração no tempo em problemas não lineares, sendo as principais: 1. As equações se tornam desacopladas e podem ser solucionadas de forma direta explicitamente, não sendo necessário métodos iterativos; 2. Não é necessário avaliação de convergência; 3. Não é necessário a inversão da matriz de rigidez, visto que todas as não linearidades estão inclusas nos vetores internos de forças.

3.8.1 Estabilidade do Passo de Tempo

Contudo, conforme apresentado em LSTC (2019), a fim de garantir a estabilidade e acurácia da solução, deve-se ter o cuidado de utilizar um passo de tempo máximo na integração explícita, o qual é limitado pela condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Tal condição impõe que o passo de tempo é limitado pela situação onde uma onda de choque de perturbação não deve atravessar um elemento completo da malha em um único passo de tempo.

Matematicamente tal condição pode ser determinada pela equação 3.12, onde Δt representa o passo de tempo máximo, f representa um fator de estabilidade para o passo de tempo, L representa uma dimensão característica do elemento de malha e c_s representa a velocidade do som local no material do elemento.

$$\Delta t \leq \left(f \frac{L}{c_s} \right)_{\min}. \quad (3.12)$$

Para elementos de casca especificamente, a velocidade do som local no material do elemento pode ser definida pela equação 3.13, onde E representa o módulo de elasticidade, ρ representa a densidade e ν representa o coeficiente de poisson.

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}}. \quad (3.13)$$

Ademais, o *software LS-Dyna* disponibiliza algumas opções para determinar a dimensão característica de elementos de casca (L). Para o presente trabalho, foi utilizada a opção calculada através da equação 3.14, onde $\beta = 0$ para elementos quadrilaterais e $\beta = 1$ para elementos triangulares, A_s é a área do elemento e L_i é o comprimento dos lados que definem o elemento de casca.

$$L = \frac{(1 + \beta)A_s}{\max(L_1, L_2, L_3, (1 - \beta)L_4)}. \quad (3.14)$$

Assim, a partir deste conjunto de equações, é possível calcular o passo de tempo máximo a ser utilizado durante a integração no tempo do modelo explícito, garantindo a estabilidade e acurácia da solução.

3.8.2 Mass Scaling

A técnica de *mass scaling* consiste em um mecanismo artificial (numérico), onde é adicionada massa a elementos individuais do modelo a fim de se obter um passo de tempo maior e reduzir o custo computacional (WU; GU, 2012; LSTC, 2021).

Utilizar esta técnica é bastante útil porque muitas vezes poucos elementos isolados ao longo do modelo são muito pequenos ou bastante distorcidos, e terminam controlando o passo

de tempo da análise baseado na condição de CFL da equação 3.12, visto que as dimensões do elemento contribuem para o cálculo de L .

Desta forma, ao utilizar o *mass scaling*, o usuário pode garantir que um passo de tempo mínimo será obedecido ao adicionar massa artificial aos elementos. Ao combinar as equações 3.12 e 3.13, em conjunto com a definição de densidade, é possível elaborar a equação 3.15, onde Δt é o passo de tempo, f é o fator de estabilidade, m é a massa do elemento, ν é o coeficiente de poisson, V é o volume do elemento e E é o módulo de elasticidade. Nesta equação pode-se observar o efeito proporcional que aumentar a massa dos elementos tem sobre o passo de tempo utilizado.

$$\Delta t \propto f \left(\frac{m(1 - \nu^2)}{VE} \right). \quad (3.15)$$

Aumentar o passo de tempo tem o benefício de reduzir o número de ciclos necessários para executar uma simulação com um determinado tempo total. Contudo, deve-se tomar o cuidado ao utilizar esta técnica a fim de que o aumento da massa destes elementos isolados não influencie nos resultados da simulação, sendo recomendado em LSTC (2019) monitorar a massa adicionada ao longo da análise a fim de garantir que esta massa não ultrapasse 2% da massa total para problemas onde as forças inerciais são significativas.

3.9 FORMULAÇÃO DOS ELEMENTOS

Existem diversas formulações de elementos que podem ser utilizados, vide Figura 4, além de pontos de massa (1 nó), utilizados para representar propriedades de massa e inércia; elementos discretos (2 nós) para representar molas e amortecedores; entre outros.

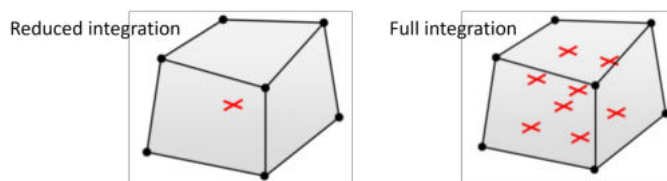
3.9.1 Pontos de Integração

No FEM, as integrais de elemento são usualmente realizadas numericamente, como um somatório de valores de funções avaliadas em pontos específicos, os pontos de integração ou pontos de Gauss, multiplicadas por pesos. A integração pode ser reduzida ou completa.

Para elementos sólidos hexaédricos isoparamétricos, a integração completa contém 8 pontos de integração, enquanto que a reduzida contém apenas 1, vide Figura 13. Dependendo da forma do elemento sólido, o número e distribuição de pontos de integração para integração completa pode variar (LSTC, 2021).

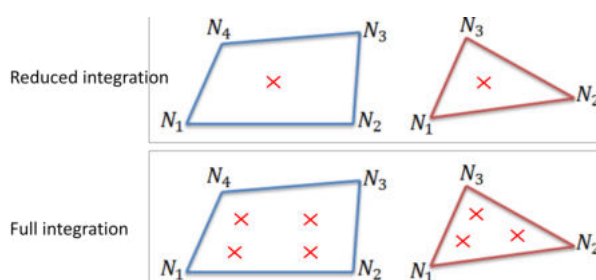
Para elementos de casca isoparamétricos, a integração completa ou reduzida é definida pelo número de pontos de integração no plano do elemento. Na integração completa, existem 4 e 3 pontos de integração para elementos quadrilateral e triangulares, respectivamente, enquanto que na reduzida existe apenas 1 ponto de integração para ambos os elementos, vide Figura 14.

Figura 13 – Pontos de Integração em Elementos Sólidos.



Fonte: (LSTC, 2021)

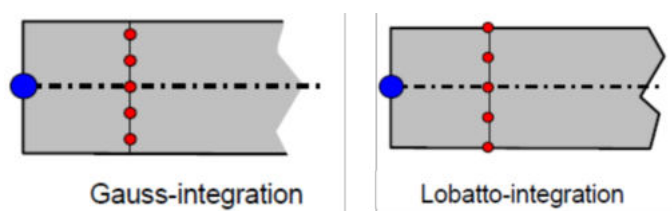
Figura 14 – Pontos de Integração em Elementos de Casca.



Fonte: Adaptado de (LSTC, 2021)

Contudo, podem existir mais de 1 ponto de integração ao longo da espessura do elemento, cuja distribuição pode ser de acordo com a Regra de Gauss, que não usa pontos nos extremos do intervalo ou com a Regra de Lobatto, que usa pontos nas extremidades. Na Figura 15 são apresentadas as duas distribuições, onde o ponto azul determina a superfície média do elemento de casca e os pontos em vermelho representam os pontos de integração.

Figura 15 – Distribuição dos Pontos de Integração na Espessura.



Fonte: (LSTC, 2021)

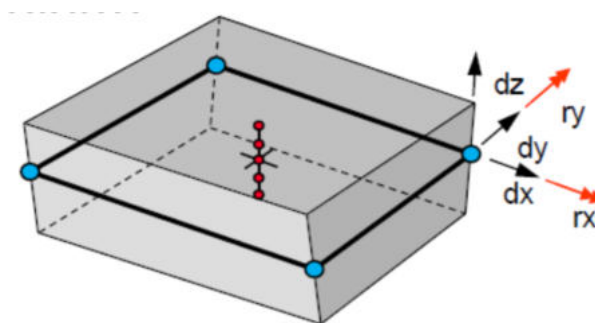
Nesta seção serão apresentados exclusivamente os elementos de casca do *LS-Dyna* que serão utilizados no presente trabalho, os quais foram formulados com a distribuição de pontos de integração estabelecida pela Regra de Gauss.

3.9.2 Elementos Quadrilaterais

Os elementos quadrilaterais baseados na teoria de Belytschko-Tsay são elementos de primeira ordem (sem nós intermediários), com 1 ponto de integração no plano do elemento e com possibilidade de definir o número de pontos de integração ao longo da espessura do elemento.

Na Figura 16 é apresentado tal elemento, onde os pontos azuis representam os nós e os pontos vermelhos representam os pontos de integração (foram utilizados 5 pontos). Este elemento é o mais recomendado em LSTC (2021) devido à sua eficiência e robustez em lidar com modelos altamente não-lineares, sendo inclusive o elemento *default* do *LS-Dyna*.

Figura 16 – Elemento de Belytschko-Tsay.



Fonte: (LSTC, 2021)

Tendo em vista que os elementos de Belytschko-Tsay são baseados na teoria de geometria plana, as deformações em torção não são consideradas. Desta forma, é interessante acrescentar a formulação incremental desenvolvida por Wong-Chiang, a qual ao sacrifício de um pequeno aumento em custo computacional, é capaz de acrescentar uma rigidez torsional a fim de representar de forma acurada tal fenômeno. Com a adição desta consideração, a teoria de formulação do elemento passa a ser chamada de Belytschko-Wong-Chiang (LSTC, 2019). Na Figura 17 é possível observar um exemplo de um problema de estrutura em torção cíclica, onde pode-se verificar o ganho em acurácia de tal formulação.

3.9.3 Elementos Triangulares

Os elementos triangulares baseados na teoria de Kennedy-Belytschko-Lin, também conhecidos como elementos triangulares C^0 são elementos de primeira ordem (sem nós intermediários), com 1 ponto de integração no plano do elemento e com a possibilidade de definir o número de pontos de integração ao longo da espessura do elemento.

Este elemento é análogo ao apresentado na Figura 16, onde ao invés de ter um formato quadrilátero, terá um formato triangular. De acordo com LSTC (2021), este elemento é recomen-

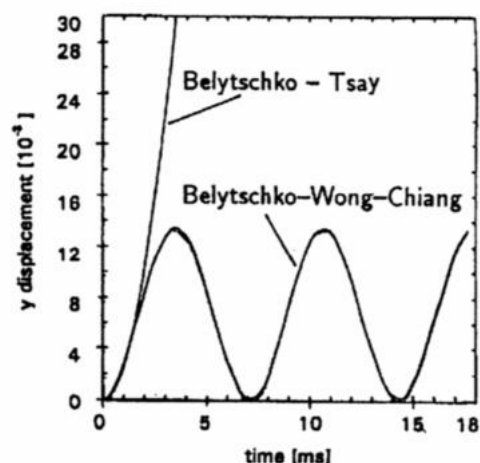
Figura 17 – Efeito da Formulação Desenvolvida por Wong-Chiang.

Twisted beam problem

$L = 12$
 $b = 1.1$
 $t = .32$
 $\text{twist} = 90 \text{ deg.}$
 $E = 29\,000\,000$
 $\nu = .22$



Displacement-time history



Fonte: (LSTC, 2019)

dado para realizar transições na malha entre elementos quadrilaterais a fim de evitar elementos distorcidos em geometrias complexas.

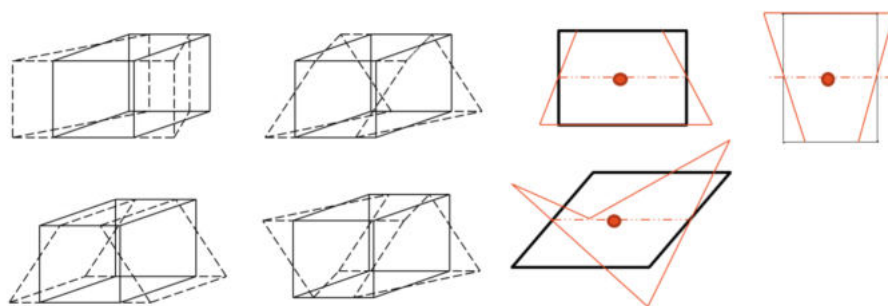
3.10 HOURGLASS

Os modos de *hourglass* consistem em configurações específicas dos elementos, os quais apesar de estarem diferentes de seu formato original, não geram deformações exatamente no ponto de integração, o que conseqüentemente leva o elemento a não apresentar rigidez à esta configuração, gerando instabilidades no modelo numérico (WU; GU, 2012). Vale salientar que os elementos sólidos tetraédricos e elementos de casca triangulares não sofrem de *hourglass*. Na Figura 18 é possível observar alguns exemplos de modos de *hourglass* de elementos sólidos hexaédricos e elementos de casca quadrilateral.

3.10.1 Controle de Hourglass

Desta forma, é necessário realizar um controle destes modos de *hourglass* a fim de garantir a acurácia e estabilidade do modelo numérico, o qual é feito através da aplicação de forças internas nos elementos. A adição destas forças internas extraem energia real do sistema, o que significa que, conforme recomendado em LSTC (2021), o usuário deve monitorar esta energia de *hourglass* a fim de que não represente mais do que 10 % do pico de energia interna do sistema.

Figura 18 – Exemplos de Modos de *Hourglass*.



Fonte: (LSTC, 2019)

Especificamente para os elementos de casca apresentados na Seção 3.9, existem duas formas de realizar o controle de *hourglass*.

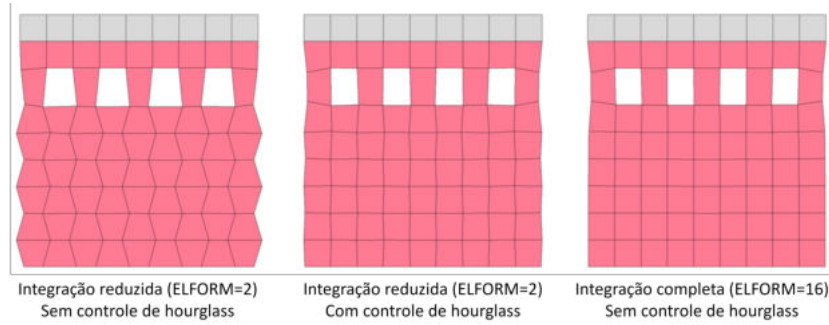
- Método de rigidez, onde as forças de *hourglass* são proporcionais aos deslocamentos nodais contribuindo para os modos de *hourglass*. Neste método, é possível reduzir as deformações acumuladas de *hourglass*, contudo pode artificialmente enrijecer a resposta do modelo. É recomendado para casos com contato entre materiais de rigidez semelhante ou de baixa-média velocidade.
- Método viscoso, onde as forças de *hourglass* são proporcionais às velocidades nodais contribuindo para os modos de *hourglass*. Neste método, as forças internas aplicadas tem o objetivo de inibir as deformações de *hourglass* do próximo passo de tempo, o que significa que não é possível reduzir as deformações acumuladas. É recomendado para casos com contato entre materiais com rigidez com diferentes ordens de grandeza, de alta velocidade ou de alta taxa de deformação.

Na Figura 19, a aresta inferior da estrutura foi fixa e foi aplicada uma força compressiva na estrutura, gerando os resultados apresentados, onde é possível observar três casos: 1. elementos de integração reduzida sem controle de *hourglass*; 2. elementos de integração reduzida com controle de *hourglass*; 3. elementos de integração completa sem controle de *hourglass*. Comparando as imagens, é possível observar uma alta deformação de *hourglass* dos elementos no caso 1, uma deformação controlada no caso 2 e a ausência de deformação no caso 3.

3.11 MATERIAIS

Os materiais na presente seção serão apresentados de acordo com duas categorias: elasto-plástico e hiperelástico, onde os materiais elasto-plástico podem possuir ou não a característica

Figura 19 – Exemplos de Controle de *Hourglass*.



Fonte: Adaptado de (LSTC, 2021)

de viscosidade na região plástica. Por fim, será apresentado de forma breve o conceito de material ortotrópico.

3.11.1 Elasto-Plástico

As curvas de tensão-deformação dos materiais elasto-plástico isotrópicos podem ser divididas em duas regiões: uma região inicial, linear e elástica seguida por uma região não linear plástica, onde tais regiões são divididas pela ponto de escoamento do material (BEER et al., 2011).

Desta forma, para descrever a deformação que ocorre em um ponto dentro de um modelo de material, pode-se usar a seguinte definição, equação 3.16, onde ϵ é a deformação total, ϵ_e é a deformação elástica e ϵ_p é a deformação plástica.

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p. \quad (3.16)$$

De forma análoga, as taxas de deformações podem ser descritas a partir da equação 3.17, onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação total, $\dot{\epsilon}_e$ é a taxa de deformação elástica e $\dot{\epsilon}_p$ é a taxa de deformação plástica.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_p. \quad (3.17)$$

Para a região elástica, a curva de tensão-deformação pode ser representada unidimensionalmente de forma simples através da equação 3.18 tendo em vista que é uma reta.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}. \quad (3.18)$$

Com relação à região plástica, pode-se aplicar diferentes modelos constitutivos que foram pesquisados até os dias atuais, sendo neste trabalho apresentados os que serão utilizados na metodologia: modelo de johnson-cook e modelo isotrópico multilinear. Outro conceito

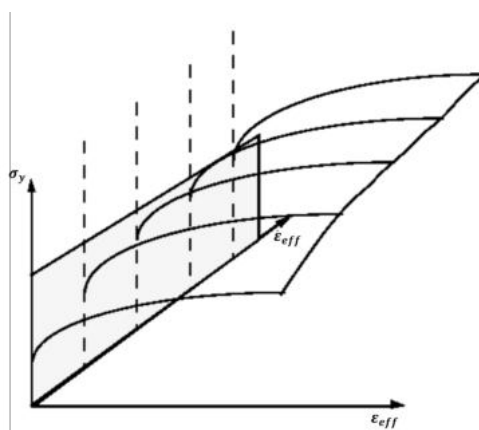
importante de destacar é a viscosidade do material, a qual pode influenciar a região elástica, plástica ou ambas.

3.11.2 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade do material que relaciona a curva de tensão-deformação com a taxa de deformação. Os materiais com tal propriedade geralmente são chamados de elasto-viscoplástico, viscoelástico-plástico, viscoelástico-viscoplástico ou hiper-viscoelástico. Tal propriedade é importante ao se trabalhar com simulações de curta duração, a exemplo de impacto, onde os materiais se deformam na escala de milissegundos ou microssegundos (LSTC, 2021).

Na Figura 20 é possível observar um exemplo de material elasto-viscoplástico, onde pode-se avaliar as diferentes curvas de plasticidade, dependendo da taxa de deformação do material.

Figura 20 – Exemplo de material Elasto-Viscoplástico.



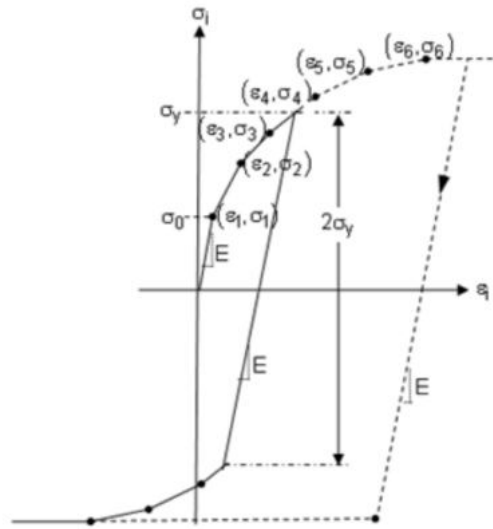
Fonte: (LSTC, 2021)

3.11.3 Modelo de Plasticidade Isotrópico Multilinear

O modelo constitutivo de material plástico isotrópico multilinear é baseado na hipótese de que a tensão atingida durante a plasticidade sob carregamento de tração será a nova tensão de escoamento sob carregamento de compressão. Além disso, a curva de plasticidade é elaborada no *software* utilizando diversos pontos de tensão-deformação (ANSYS, 2021a). Neste modelo, não é considerada a viscosidade do material.

Na Figura 21 é possível observar um exemplo de material elasto-plástico, com sua região de plasticidade definida através de um modelo isotrópico multilinear.

Figura 21 – Curva Elasto-Plástica Utilizando Modelo Isotrópico Multilinear de Plasticidade.



Fonte: (ANSYS, 2021a)

3.11.4 Modelo de Plasticidade de Johnson-Cook

O modelo constitutivo de material viscoplástico de Johnson-Cook pode ser caracterizado a partir da equação 3.19, onde $\hat{\sigma}_y$ é a tensão de fluxo, A é a tensão de escoamento, B é o coeficiente de encruamento, ϵ_p é a deformação plástica, n é o expoente de encruamento, C é o coeficiente da taxa de deformação plástica, $\dot{\epsilon}_p$ é a taxa de deformação plástica, $\dot{\epsilon}_o$ é a taxa de deformação limite quase-estática e m é o expoente térmico (WUERTEMBERGER; PALAZOTTO, 2016; IQBAL et al., 2015).

$$\hat{\sigma}_y = (A + B\epsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_o}\right) (1 - T^{*m}). \quad (3.19)$$

A variável T^* é a temperatura de homologação, a qual pode ser definida pela equação 3.20, onde T é a temperatura do material, T_{ref} é a temperatura de referência e T_{melt} é a temperatura

de fusão.

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}}. \quad (3.20)$$

Ao avaliar detalhadamente a equação 3.19, pode-se observar que os termos contidos no primeiro parenteses são as contribuições da tensão estática, as quais incluem a tensão de escoamento e o comportamento de encruamento, sendo análogo à formulação elaborada por Ludwicks, Equação 3.21, onde σ_{flow} é a tensão pós-escoamento, σ_{yield} é a tensão de escoamento, B é o coeficiente de encruamento e n o expoente de encruamento.

$$\sigma_{flow} = \sigma_{yield} + B\epsilon_p^n. \quad (3.21)$$

Os termos contidos no segundo parenteses da equação 3.19 descrevem o comportamento da taxa de deformação, sendo baseado em um modelo logarítmico proposto por Ludwik e utilizado por Lindholm, vide Equação 3.22, onde σ_{yield} é a tensão de escoamento, C é o coeficiente da taxa de deformação plástica e $\dot{\epsilon}_p$ é a taxa de deformação plástica.

$$\sigma = \sigma_{yield}(1 + C \log \dot{\epsilon}_p). \quad (3.22)$$

Os termos contidos no terceiro parenteses da equação 3.19 descrevem os efeitos de temperatura, onde o aumento da temperatura causa a tensão no material reduzir. A temperatura de homologação T^* é utilizada para normalizar a temperatura do material contra uma temperatura de referência. Vale comentar que, mesmo que o modelo esteja em temperatura ambiente constante, este termo se demonstra importante devido aos efeitos de calor interno gerado pelo processo de deformação.

Vale salientar que sabe-se que o comportamento entre estes três fatores (tensão estática, taxa de deformação e temperatura) são consideravelmente mais inter-correlacionados do que a formulação elaborada por Johnson-Cook propõe, contudo, tal modelo se apresentou razoavelmente acurado em prever modelos de impacto a baixas-médias taxas de deformação, conforme apresentado em Wuertemberger e Palazotto (2016), Iqbal et al. (2015).

3.11.5 Modelo de Falha de Johnson-Cook

A curva de tensão-deformação prediz o comportamento do material em suas regiões elástica e plástica, contudo não é suficiente para determinar quando o material irá falhar.

Desta forma, o modelo de falha de Johnson-Cook pode ser utilizado para determinar o ponto de rompimento do material, sendo caracterizado por um critério de acumulo de dano, definido na equação 3.23, onde D é o dano acumulado, $\Delta\epsilon^p$ é o incremento de deformação plástica acumulada e ϵ_f é a deformação equivalente até a fratura nas condições de deformação, taxa de deformação e temperatura atuais (WUERTEMBERGER; PALAZOTTO, 2016; IQBAL

et al., 2015). Uma vez que o dano acumulado D atinga o valor de 1, significa que a falha do material ocorreu.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon_f}. \quad (3.23)$$

O critério de falha é baseado no cálculo da deformação crítica de falha, apresentada na equação 3.24, onde ϵ_f é a deformação equivalente na falha, D_1 até D_5 são os coeficientes de dano determinados experimentalmente e Q é o fator de triaxialidade.

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 e^{-D_3 Q}] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right] [1 + D_5 T^*]. \quad (3.24)$$

A formulação da deformação equivalente de falha, equação 3.24, é semelhante à equação 3.19. Ou seja, os termos D_1 até D_3 são associados à condição de tensão estática, D_4 é relacionado à sensibilidade da taxa de deformação e D_5 é associado aos efeitos de temperatura.

Adicionalmente, vale salientar que os termos contidos no primeiro colchetes da equação 3.24 também estão associados à formação de trincas no material, sendo baseado no modelo de Hancock e Mackenzie, Equação 3.25, onde $\bar{\epsilon}^f$ é a deformação de falha na trinca, $\bar{\epsilon}_n$ é a deformação de nucleação da trinca no material, α é a taxa de crescimento da trinca, σ_m é a tensão média e σ é a tensão do material.

$$\bar{\epsilon}^f = \bar{\epsilon}_n + \alpha e^{\frac{-3\sigma_m}{2\sigma}}. \quad (3.25)$$

O fator de triaxialidade é a razão entre a tensão média e a tensão equivalente, o qual flutua durante a deformação do material, sendo utilizado para avaliar a ductibilidade do material. Tal fator é determinado pela Equação 3.26, onde σ_m é a tensão média e σ_{eq} é a tensão equivalente.

$$Q = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}. \quad (3.26)$$

A tensão média é definida através da média aritmética das três tensões principais (σ_{11} , σ_{22} e σ_{33}), vide Equação 3.27.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}. \quad (3.27)$$

E a tensão equivalente é definida pela equação 3.28, onde σ_{ij} é o tensor de tensões ($i = 1, 2, 3$ e $j = 1, 2, 3$).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3\sigma_{ij}\sigma_{ij}}{2}}. \quad (3.28)$$

3.11.6 Hiperelasticidade

O material hiperelástico é um tipo de modelo constitutivo idealmente elástico para o qual a relação da curva tensão-deformação não linear deriva de uma função da densidade de energia

de deformação. Nestes materiais, não há uma região plástica e o material pode ou não retornar ao seu estado inicial, dependendo da presença ou não do fenômeno de histerese (ANSYS, 2021b). Exemplos de materiais hiperelástico são: elastômeros, borracha, tecidos biológicos, entre outros.

3.11.7 Constituição Ortotrópica

Os materiais ortotrópicos são um conjunto específico dos materiais anisotrópicos. Nos materiais anisotrópicos, as propriedades mecânicas variam dependendo da direção avaliada, enquanto que nos materiais ortotrópicos, as propriedades mecânicas dependem da direção, contudo podem ser definidas apenas por três direções ortogonais (ANSYS, 2021b). Exemplos de materiais ortotrópicos são: fibra de carbono, fibra de vidro, madeira, *honeycomb*, entre outros.

3.12 CONTATOS

A formulação clássica do FEM para mecânica dos sólidos não considera o contato mecânico entre superfícies, permitindo a interpenetração de corpos e outros fenômenos não físicos. Desta forma, modelos específicos para contato devem ser introduzidos para evitar estes problemas (WRIGGERS, 2008). Existem diversos tipos de contatos, a exemplo de colado e de deslizamento, e diferentes formulações, a exemplo do método de penalidade e restrição. Nesta seção, o foco será em apresentar os contatos do *LS-Dyna* de deslizamento utilizando o método de penalidade com segmentos, visto que foram os utilizados neste trabalho.

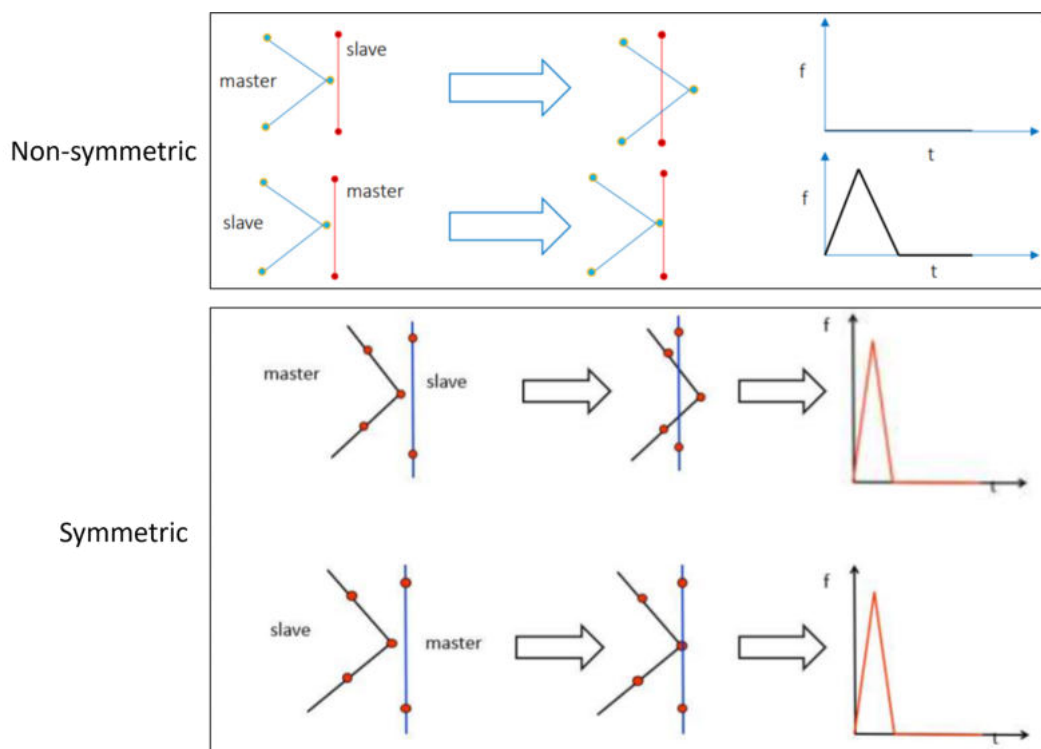
3.12.1 Definições

As nomenclaturas *master* e *slave* são referentes às superfícies que irão interagir no contato. Os *segments* são apenas uma forma de identificar as superfícies dos componentes em contato, os quais são definidos de forma idêntica a um elemento de casca típico sobre a malha dos componentes, contudo sem rigidez e massa.

Os contatos podem ser não-simétricos, o que significa que a superfície *slave* não pode penetrar na superfície *master*, contudo o inverso pode ocorrer. E existem os contatos simétricos, o que significa que ambas as superfícies, *slave* e *master* não podem penetrar entre si. Na Figura 22 é apresentado tal definição. Nos contatos não-simétricos, a definição das superfícies *slave* e *master* importa e seu custo computacional é baixo, enquanto que nos contatos simétricos, a definição das superfícies *slave* e *master* não importa, é mais robusto e seu custo computacional é alto.

A espessura do elemento de casca e a espessura do contato são definições distintas. A espessura do elemento de casca é utilizada para definir a massa e rigidez do componente, enquanto que a espessura do contato é utilizada apenas para definir a rigidez do contato e quais

Figura 22 – Contatos Simétricos e Não-Simétricos.



Fonte: Adaptado de (LSTC, 2021)

superfícies próximas devem estar em contato. Geralmente é interessante que as espessuras do elemento de casca e do contato sejam iguais ou próximas a fim de evitar que a rigidez de ambos tenham ordens de grandeza diferentes.

3.12.2 Algoritmo de Contato

O algoritmo dos contatos consiste em basicamente 5 passos (LSTC, 2019).

1. Definir as superfícies *slave* e *master*.
2. Buscar os *segments* mais próximos e computar a distância ortogonal.
3. Caso exista penetração, calcular a energia de contato e aplicar uma força proporcional à profundidade de penetração para os nós de ambas as superfícies, *slave* e *master*.
4. Atualizar de forma incremental as forças de interface e energia de contato.
5. Retornar ao passo 2, até que o tempo final de simulação seja atingido.

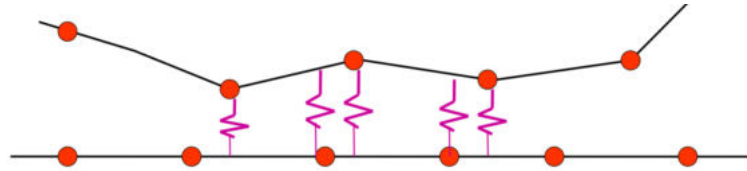
Vale salientar que a busca dos *segments* mais próximos tem um baixo custo computacional e por isso é avaliada em todo passo de tempo ao longo da análise. Contudo, a avaliação da

profundidade de penetração e cálculo das forças e energia de contato é a etapa mais custosa computacionalmente e, assim, é avaliada apenas após um determinado número de ciclos.

3.12.3 Rigidez de Contato

A rigidez de contato utilizando o método de penalidade pode ser compreendida através de molas que conectam as superfícies em contato, vide Figura 23, onde a força de contato é proporcional à rigidez da mola (rigidez de contato) e deslocamento das molas (profundidade de penetração) (LSTC, 2021).

Figura 23 – Rigidez de Contato.



Fonte: (LSTC, 2021)

A rigidez de contato pode ser calculada através da equação 3.29, onde S_{LSFAC} é o fator de escala da rigidez de deslizamento; S_{FS} e S_{FM} são os fatores de escala da rigidez da superfície *slave* e *master*, respectivamente; m_1 e m_2 são as massas nodais das superfícies *segment* em contato; e Δt é o passo de tempo, o qual apenas será atualizado se crescer mais de 5 % a fim de prevenir instabilidades.

$$k_c(t) = 0,5 S_{LSFAC} \left(\max(S_{FS}, S_{FM}) \right) \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) \left(\frac{1}{\Delta t(t)} \right)^2. \quad (3.29)$$

3.12.4 Amortecimento de Contato

O amortecimento viscoso de contato pode ser utilizado a fim de amortecer oscilações no sentido ortogonal das superfícies em contato e consequentemente reduzir ruídos de alta frequência em problemas de impacto (LSTC, 2021).

O dado de entrada necessário é o valor de amortecimento crítico, o qual pode ser definido pela equação 3.30, onde m é a massa mínima das superfícies em contato e ω é a frequência natural da interface de contato.

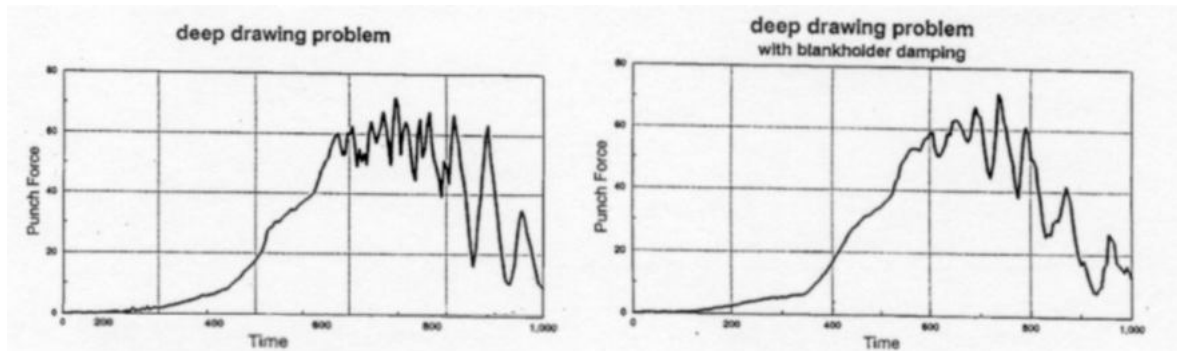
$$c_{crit} = 2m\omega. \quad (3.30)$$

A variável m é calculada diretamente, ou seja $m = \min(m_{slave}, m_{master})$. E a variável ω é calculada através da equação 3.31, onde k_c é a rigidez de contato já apresentada.

$$\omega = \sqrt{\frac{k_c(m_{slave} + m_{master})}{m_{slave}m_{master}}}. \quad (3.31)$$

O efeito da inserção deste amortecimento pode ser verificado na Figura 24.

Figura 24 – Efeito do Amortecimento Viscoso no Contato.



Fonte: (LSTC, 2019)

3.12.5 Atrito

De forma simplificada, o atrito pode ser compreendido através da formulação de Coulomb da equação 3.32, onde $F_{friction}$ é a força de atrito, μ é o coeficiente de atrito e f_{normal} é a força normal.

$$F_{friction} = \mu f_{normal}. \quad (3.32)$$

A força normal é calculada diretamente através da metodologia apresentada na Seção 3.12.3. Enquanto que o coeficiente de atrito é calculado através da equação 3.33, onde μ_d é coeficiente de atrito dinâmico, μ_s é o coeficiente de atrito estático, c é a constante de decaimento e v é a velocidade relativa entre os *segments* (LSTC, 2021).

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|v|}. \quad (3.33)$$

Vale comentar que existem alguns equacionamentos extras a fim de limitar os valores máximos de força de atrito e manter a estabilidade ao longo da análise. Além disso, é possível utilizar apenas o coeficiente de atrito estático, o que torna o coeficiente de atrito calculado constante.

3.13 PROGRAMA EURO NCAP

A Euro NCAP, do inglês *European New Car Assessment Programme*, é um programa voluntário europeu de avaliação do desempenho de segurança automotiva de novos carros desenvolvidos. Foi fundado em 1996, sendo originalmente iniciado pelo Laboratório de Pesquisa em Transporte para o Departamento de Transporte do Reino Unido, contudo posteriormente foi apoiado por diversos países europeus, como também pela União Europeia. Atualmente é baseado em Leuven na Bélgica e é o programa responsável pelo desenvolvimento dos protocolos de segurança veicular mais utilizada no continente europeu por diversas grandes marcas, a exemplo da Renault, Mercedes-Benz, Audi, Citroen, Volkswagen, Land Rover, entre outras (NCAP, 2021).

Os protocolos desenvolvidos pela Euro NCAP contemplam diversos testes de segurança, a exemplo do impacto frontal contra parede rígida, impacto frontal contra parede deformável, impacto lateral contra veículo deformável, impacto lateral contra poste, impacto traseiro contra veículo deformável, entre outros. A partir desses testes, são utilizados diversos critérios de forças, acelerações e deflexões no modelo *Dummy* e carro a fim de classificar a segurança do veículo.

Com relação aos ensaios de impacto frontal, existem dois principais tipos: contra parede deformável e contra parede rígida, vide Figura 25. Tais testes replicam um acidente no trânsito, onde modelos *Dummy* são colocados dentro do veículo a fim de avaliar riscos de lesão na cabeça, pescoço, tórax e pernas. Os modelos *Dummy*, veículo e estrutura impactada são instrumentados para determinar as forças e desacelerações a que os ocupantes seriam submetidos. Para proteger os ocupantes do carro de teste, as forças de impacto devem ser direcionadas para as regiões do carro onde a energia pode ser absorvida com eficiência e segurança. A zona de deformação dianteira deve colapsar de forma controlada, deixando o habitáculo o mais indeformado possível e, ao mesmo tempo, não expondo os ocupantes a níveis perigosamente elevados de desaceleração. Ademais, o movimento do volante e dos pedais para trás deve ser limitado a fim de evitar lesões graves ao condutor.

Figura 25 – Ensaios de Impacto Frontal, Contra Parede Deformável à Esquerda e Contra Parede Rígida à Direita.



Fonte: (NCAP, 2021)

No impacto frontal contra parede deformável, a ideia é replicar um acidente entre o veículo de teste e um carro familiar típico de médio porte. Neste experimento, o veículo de teste é acelerado até 50 km/h para se chocar contra uma estrutura deformável de 1400 kg que também foi acelerada até 50 km/h, a qual fica progressivamente mais rígida à medida que se deforma. É aplicado um *offset* de 50 % entre o veículo de teste e a estrutura deformável a fim de representar uma situação crítica onde apenas metade do veículo irá absorver o impacto. É utilizado um modelo *Dummy 50th Percentile Male*, o qual representa o percentil 50 masculino.

No impacto frontal contra parede rígida, a ideia é reproduzir um acidente entre o veículo de teste e uma estrutura extremamente rígida, a exemplo de uma parede de concreto. Neste teste, o veículo é acelerado até 50 km/h para se chocar contra uma estrutura rígida estática e de massa muito superior ao veículo. Não é aplicado *offset* entre o veículo e a parede rígida, o que significa que o veículo pode utilizar de toda sua região frontal para absorver o impacto. É utilizado um modelo *Dummy 5th Percentile Female*, o qual representa o percentil 5 feminino. O presente trabalho foi desenvolvido com base neste teste.

Estes dois testes são complementares na avaliação de segurança do veículo a fim de encontrar um equilíbrio entre rigidez e o sistema de restrição. O veículo deve ser rígido o suficiente para conter um *Dummy* percentil 50 masculino e garantir que a estrutura colapsada não entre em contato com o condutor. Porém, este mesmo veículo deve ser deformável o suficiente e possuir sistemas de restrição ao piloto que seja capaz de manter as altas desacelerações controladas em um *Dummy* percentil 5 feminino.

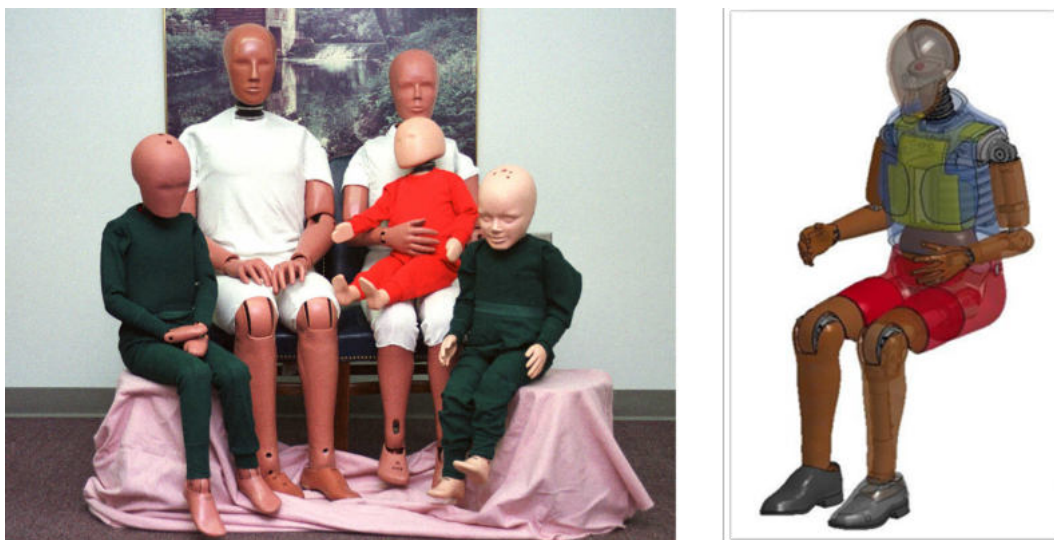
3.14 MODELOS DUMMY

Um modelo *Dummy* de colisão, ou simplesmente boneco, é um dispositivo de teste antropomórfico (ATD) em escala real que simula as dimensões, proporções de peso e articulação do corpo humano durante um acidente. Tais modelos são utilizados amplamente por pesquisadores, fabricantes de automóveis e aeronaves, instituições de segurança, entre outros, com o objetivo de prever os ferimentos que uma pessoa pode sofrer durante situações críticas. Sua utilização iniciou-se no ano de 1971 com a família *Hybrid I*, a qual continha apenas um boneco simples do percentil 50 masculino, sendo aperfeiçoado em 1972 com o lançamento da família *Hybrid II* a fim de reproduzir melhor os comportamentos dos ombros, joelhos e coluna (LSTC, 2021).

Então, em 1973 foi lançada a família *Hybrid III*, a qual representa de forma mais acurada as articulações, proporções de peso e resposta à danos. Atualmente, a família *Hybrid III* já conta com diversos outros bonecos complementares, a exemplo do percentil 5 feminino, percentil 95 masculino, crianças de 10, 6 e 3 anos, bebês de 6, 12 e 18 meses, entre outros, os quais são geralmente instrumentados a fim de registrar dados como velocidade de impacto, força de esmagamento, esforços de flexão, aceleração, deflexão, entre outros.

Com o avanço da tecnologia, buscou-se utilizar modelos *Dummy* em ferramentas numéricas, sendo escolhida a família *Hybrid III* para ser desenvolvida nos *softwares* comerciais. Nos modelos numéricos, a massa, rigidez, amortecimento e momento de inércia são determinados para representar os membros do corpo humano, a exemplo do tecido humano, músculos e ossos. E as juntas entre os corpos são modeladas através de juntas com restrições cinemáticas de acordo com os graus de liberdade físico real, por exemplo, a articulação do joelho é modelada como um pino, a articulação do quadril é modelada como uma articulação tipo soquete e a articulação do ombro é modelada como uma junta esférica. Na Figura 26 pode-se observar modelos *Dummy* da família *Hybrid III*, como também o modelo numérico *Dummy Hybrid III 5th Percentile Female* que representa o percentil 5 feminino.

Figura 26 – Modelos *Dummy* Físicos da Família Hybrid III à Esquerda. Modelo numérico *Dummy Hybrid III 5th Percentile Female* à Direita.

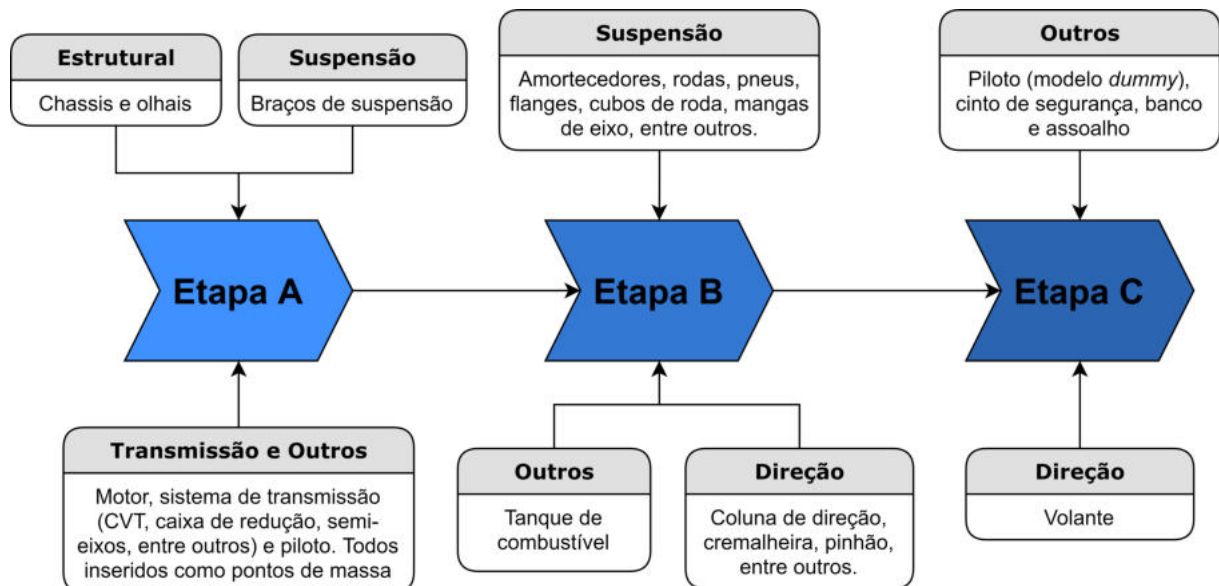


Fonte: (NCAP, 2021; LSTC, 2021)

4 METODOLOGIA

Ao resolver modelos numéricos de tamanhos consideráveis e complexos, é recomendado dividir o processo em etapas, conforme citado em Ansys (2021b), LSTC (2021). Dentro desse contexto, a metodologia do presente trabalho foi segmentada com o objetivo de trazer complexidade ao modelo de forma gradual, garantindo a acurácia dos resultados, viabilidade de custo computacional, entendimento do problema global e identificação de erros pontuais. Assim, foram acrescentados gradualmente os componentes do veículo em três etapas, conforme pode ser visto na Figura 27.

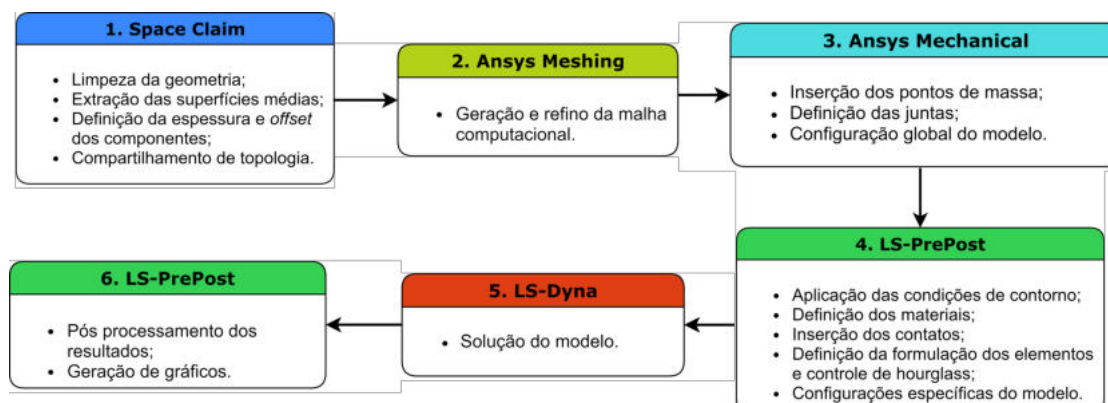
Figura 27 – Etapas de Modelagem.



Fonte: O autor (2021)

Para a execução de cada etapa, foram empregados diversos *softwares*, onde na Figura 28 é possível observar a sequência de *softwares* utilizados ao longo do pré-processamento, solução e pós-processamento dos modelos numéricos.

Para a utilização dos softwares aplicados, foi explorada a infraestrutura da ESSS, onde dois equipamentos foram disponibilizados, sendo um disponível de forma intermitente (*desktop* ESSS) para uso geral e outro apenas por períodos específicos para realizar a solução do modelo (*workstation* ESSS). Ademais, foi utilizado o equipamento pessoal do autor para auxiliar no desenvolvimento do trabalho (*notebook* pessoal). Na Tabela 1 são apresentados os três equipamentos disponíveis citados.

Figura 28 – Sequência de *softwares* utilizados.

Fonte: O autor (2021)

Tabela 1 – Equipamentos Disponíveis.

	<i>Desktop</i> ESSS	<i>Workstation</i> ESSS	<i>Notebook</i> Pessoal
Processador (CPU)	Intel i7 4790 (4 cores @ 4.0 GHz)*	Intel Xeon E5645 (12 cores @ 2.67 GHz)*	Intel i7 6700HQ (4 cores @ 3.5 GHz)*
Memória RAM	32 GB (DDR3 @ 1600 MHz)	128 GB (DDR3 @ 1333 MHz)	16 GB (DDR4 @ 2400 MHz)
Placa de Vídeo (GPU)	NVIDIA GeForce GT 1030 (GDDR5 2 GB)	NVIDIA GeForce GTS 250 (DDR3 1 GB)	NVIDIA GeForce GTX 1060 (GDDR5 6 GB)
Disco de Armazenamento	SSD Sata 240 GB HDD 7200 RPM 1 TB	HDD 7200 RPM 1 TB	SSD M.2 128 GB HDD 7200 RPM 1 TB

Fonte: O autor (2021).

*cores físicos (*hyperthread off*) e frequência máxima (*turbo frequency*).

4.1 ETAPA A

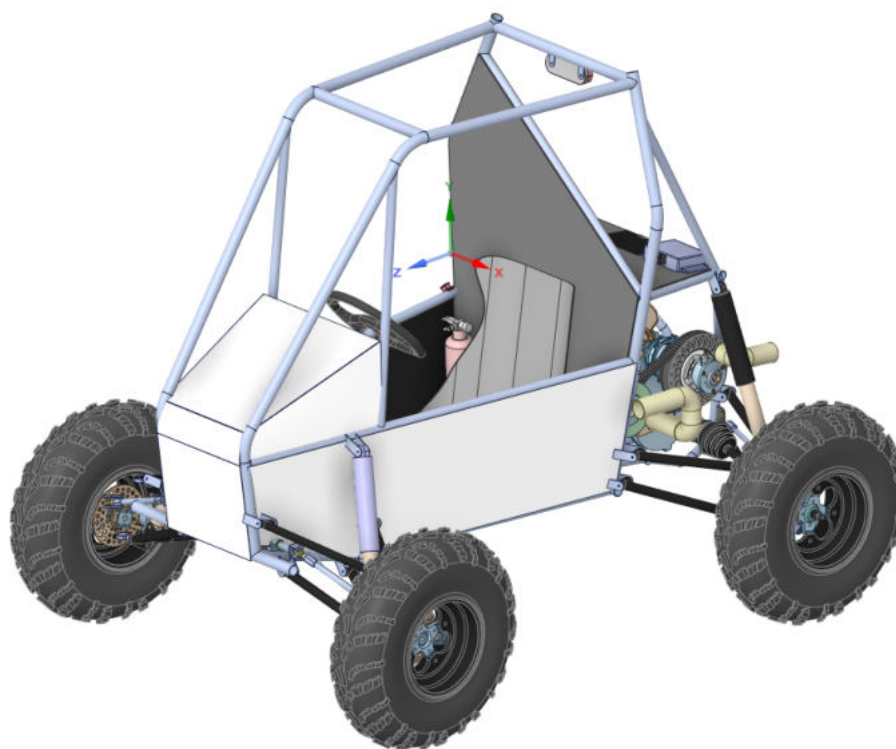
Primeiramente, foi recebido da Equipe Mangue Baja a montagem completa do protótipo MB2/2021, vide Figura 29, em formato neutro (STEP) a fim de dar início ao desenvolvimento do trabalho.

4.1.1 Preparação e Limpeza da Geometria

A partir da montagem completa do veículo, deu-se início à preparação e limpeza da geometria utilizando o *Space Claim*.

Inicialmente, foram excluídos a grande maioria dos componentes, com exceção do chassi, olhais, braços de suspensão e suporte do motor, a fim de simplificar o modelo de forma

Figura 29 – Montagem Completa do Veículo Baja.



Fonte: O autor (2021)

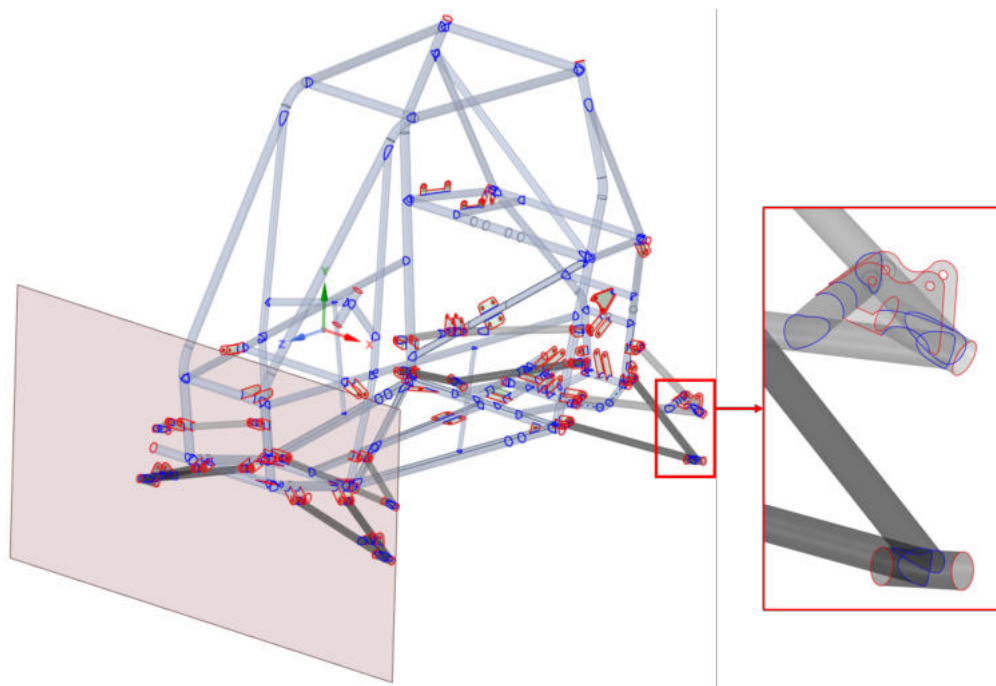
expressiva, sendo obtido tais componentes como geometrias sólidas.

Em seguida, foram retiradas as superfícies médias de todos os componentes, com exceção das buchas dos braços de suspensão, a fim de serem utilizadas posteriormente como componentes de casca, onde vale comentar que a espessura é interpretada automaticamente. Para as buchas dos braços de suspensão, a fim de manter o contato entre componentes, foi utilizada a superfície externa, inserindo manualmente sua espessura e realizando o devido ajuste de *offset*. Vale salientar que foram realizados diversos reparos em tais superfícies utilizando as ferramentas automáticas e controles manuais do *Space Claim* a fim de que todos os componentes estivessem em contato.

Ademais, foi utilizado a ferramenta de *Share Topology* a fim de compartilhar a topologia entre as peças, o que significa compartilhar os nós da malha computacional (e consequentemente os graus de liberdade) entre diferentes componentes, o que no modelo físico é representado pela soldagem. Por fim, foi adicionada uma superfície 5 mm à frente do veículo a fim de representar a parede rígida que o veículo irá colidir, conforme o protocolo (EURO NCAP, 2019).

Com isso foi obtido o modelo da Figura 30, onde é possível observar a parede rígida e as superfícies dos componentes, onde os contornos em azul correspondem as arestas que estão compartilhando topologia e em vermelho as arestas livres. Foi realizada uma ampliação em uma das regiões da bucha do braço de suspensão a fim de mostrar o ajuste comentado anteriormente.

Figura 30 – Geometria (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

4.1.2 Geração da Malha Computacional

Para a geração da malha computacional, foi utilizado o *Ansys Meshing*. Foram empregados elementos de casca de primeira ordem predominantemente quadrilaterais, com poucos elementos triangulares para dar flexibilidade à malha. Os tamanhos dos elementos escolhidos foram definidos a partir de *know-how* e recomendações dos materiais de treinamento, com o objetivo de se obter uma malha computacional razoavelmente uniforme e com boa relação entre acurácia e custo computacional.

A fim de confirmar os tamanhos de elementos definidos, foram realizados testes de independência de malha escalando os tamanhos de elementos em 60%, 80% e 120% em relação ao tamanho dos elementos da malha utilizada. Na Tabela 2 são apresentados os tamanhos de elementos utilizados.

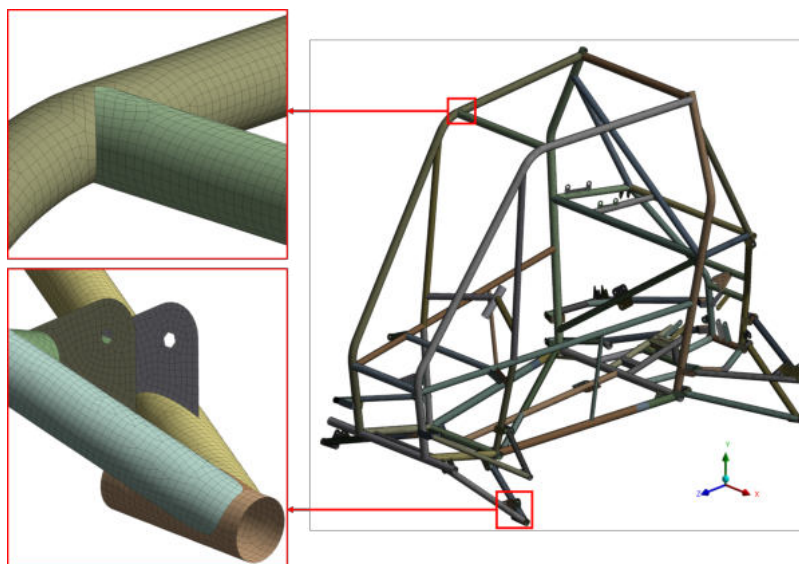
Tabela 2 – Tamanho dos Elementos de Malha (Etapa A).

Componentes	Tamanho de Elemento
Olhais, Base do Motor e Braços de Suspensão	2,9 mm
Chassis	3,8 mm
Parede Rígida (Para contatos)	10 mm

Fonte: O autor (2021)

Com isso, foi obtida a malha da Figura 31, onde foi aplicado uma ampliação em uma região específica do chassis a fim de observar o compartilhamento de topologia entre os elementos, conforme comentado anteriormente. Vale apontar que foi ocultada a parede rígida.

Figura 31 – Malha Computacional (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

4.1.3 Setup do Modelo

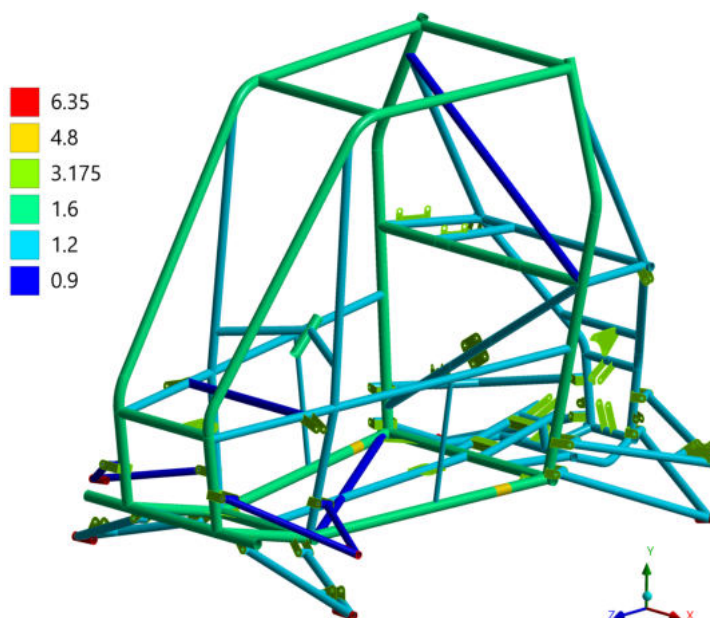
O *setup* do modelo foi elaborado primeiramente utilizando o *Ansys Mechanical* devido a sua interface amigável, agilidade no trabalho e capacidade de exportação para o *LS-PrePost*, sendo aplicada as boas práticas expostas no material de treinamento em Ansys (2021b) e manual do usuário em Ansys (2021a).

Em seguida, foi utilizado o *LS-PrePost* devido à sua interface que permite o acesso completo às variáveis do modelo. Vale salientar que apenas serão comentadas as variáveis de maior impacto no modelo numérico ao longo do texto a fim de não tornar o trabalho exageradamente extenso. Ademais, com relação aos ajustes e valores utilizados (a exemplo dos coeficientes de atrito, coeficiente de amortecimento, teoria de elementos, controle de *hourglass*, entre outros), foram seguidas as diretrizes e recomendações nos materiais de treinamento em LSTC (2021) e nos dois manuais de usuário em LSTC (2020a), LSTC (2020b).

Inicialmente, foram verificadas as espessuras dos tubos advindas do *Space Claim*, vide Figura 32. Na imagem do *Ansys Mechanical* é possível observar os tubos do chassis e dos braços de suspensão com espessura entre 0,9 mm e 1,6 mm; os olhais e suporte do motor com espessura igual a 3,175 mm; a região de reforço do ponto de ancoragem do cinto de segurança

com espessura igual a 4,8 mm; e as buchas de terminais esféricos dos braços de suspensão com espessura igual a 6,35 mm.

Figura 32 – Espessuras dos Componentes (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

4.1.3.1 Formulação dos Elementos

Conforme apresentado na Seção 3.9 do presente trabalho, foram realizadas as definições das formulações dos elementos a serem utilizados. No *Ansys Mechanical*, todos os componentes foram definidos com o elemento de casca Belytschko-Tsay com apenas 1 ponto de integração no plano [**SECTION_SHELL; ELFORM=2*]. Para os componentes com espessura inferior a 2 mm, será utilizado o valor *default* de 3 pontos de integração ao longo da espessura [**SECTION_SHELL; NIP=3*], enquanto que para componentes com espessura superior a 2 mm, serão utilizados 5 pontos de integração ao longo da espessura [**SECTION_SHELL; NIP=5*].

Então, no *LS-PrePost* foram realizados alguns ajustes nos controles dos elementos de casca [**CONTROL_SHELL*]. Foi permitida a variação de espessura nos elementos de casca, fenômeno conhecido como *membrane straining* [*ISTUPD=4*]; foi acrescentada a possibilidade de erosão numérica, ou seja, quaisquer elementos que tenham distorções excessivas a ponto de atingir qualidade de elemento jacobiana negativa serão eliminados do modelo [*NFAIL=1*]; em acréscimo à teoria de elemento Belytschko-Tsay utilizada e já comentada anteriormente, foi determinado um acréscimo de rigidez no sentido de torção dos elementos a fim de aumentar sua robustez e acurácia, conhecida como elementos Belytschko-Wong-Chiang [*BWC=1*] em

conjunto com o método de projeção completo [*PROJ=1*]; e foi determinado que a teoria dos elementos triangulares a ser utilizada será a C^0 *Triangular Shells* [*ESORT=1*].

Além disso, ainda no *LS-PrePost*, através do comando [**SECTION_SHELL*], foi determinado que o fator de cisalhamento que escala a tensão de cisalhamento transversal nos elementos de casca utilizados é igual a $\frac{5}{6}$ [*SHRF=0.8333*]. Também foi inserido um pequeno amortecimento interno nos elementos de casca a fim de estabilizar ondas de choque repentinas no material [**CONTROL_BULK_VISCOSITY; Q1=1.5, Q2=0.06*].

4.1.3.2 Controles do Tempo, *Solver*, *Hourglass* e sistema de referência

Com relação aos controles de tempo do modelo, no *Ansys Mechanical* foi determinado o tempo total de simulação igual a 0,03 segundo [**CONTROL_TERMINATION; ENDTIM=0.03*] e o fator de estabilidade do passo de tempo com valor igual a 0,9 (coeficiente f da equação 3.12 na Seção 3.8.1) [**CONTROL_TIMESTEP; TSSFAC=0.9*]. Este tempo total foi selecionado a partir de testes preliminares, onde foi verificado que todos os componentes estavam com velocidades próximas de zero e se afastando da parede rígida.

Sobre os controles do *solver*, no *Ansys Mechanical* foi aplicado o controle *Invariant Node Numbering* a fim de utilizar sistemas de coordenadas locais consistentes entre os elementos [**CONTROL_ACCURACY; INN=2*]. Apesar do custo computacional acrescentado ao modelo (em torno de 5 %), tal controle é recomentado devido aos seguintes pontos: as forças nos elementos se tornam praticamente independentes em relação ao sequenciamento dos nós; os modos de *hourglass* não influenciam de forma considerável a direção do material; e tempos mais longos de simulação podem ser executados de forma estável.

Tendo em vista que se trata de um fenômeno de impacto entre um corpo sólido e uma superfície rígida, foi escolhido utilizar o sistema de referência lagrangiano devido a sua maior eficiência, quando comparado ao euleriano. Ademais, como será utilizado formulações de materiais com possibilidade de falha, existe uma baixa probabilidade de se obter elementos com distorções extremas a ponto de ter volume negativo. Contudo, caso ainda assim ocorra, a erosão numérica será acionada a fim de ter uma solução robusta.

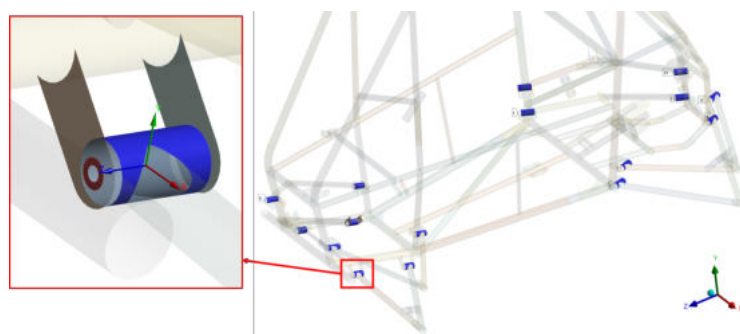
No que se refere à solução do modelo, foi escolhido utilizar o *Solver Double Precision* do *LS-Dyna* devido a sua maior acurácia e robustez em lidar com modelos complexos com uma alta quantidade de ciclos.

Em referência ao controle de *hourglass*, Seção 3.10 do presente trabalho, no *Ansys Mechanical* foi utilizado o tipo *Flanagan-Belytschko Stiffness Form* com coeficiente de *hourglass* igual a 0,03 [**CONTROL_HOURLASS; IHQ=4, HQ=0.03*].

4.1.3.3 Conexões

No tangente às conexões entre braços de suspensão e o chassi, no *Ansys Mechanical* foram utilizadas juntas rígidas fixas [**CONSTRAINED_JOINT_LOCKING*]. Foram selecionadas as faces das buchas de pivotamento dos braços de suspensão e as faces projetadas das arruelas em contato com os olhais do chassi. Vale comentar que sabe-se que tais conexões teoricamente seriam juntas de revolução, contudo, tendo em vista que uma simulação de impacto é da ordem de milissegundos, espera-se que os amortecedores não tenham tempo de trabalhar e comportem-se como estruturas rígidas no sentido axial, o que consequentemente significa que a consideração de utilizar juntas fixas é aceitável. Na Figura 33 são apresentadas as juntas fixas utilizadas.

Figura 33 – Juntas Fixas entre os Braços de Suspensão e Chassis (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

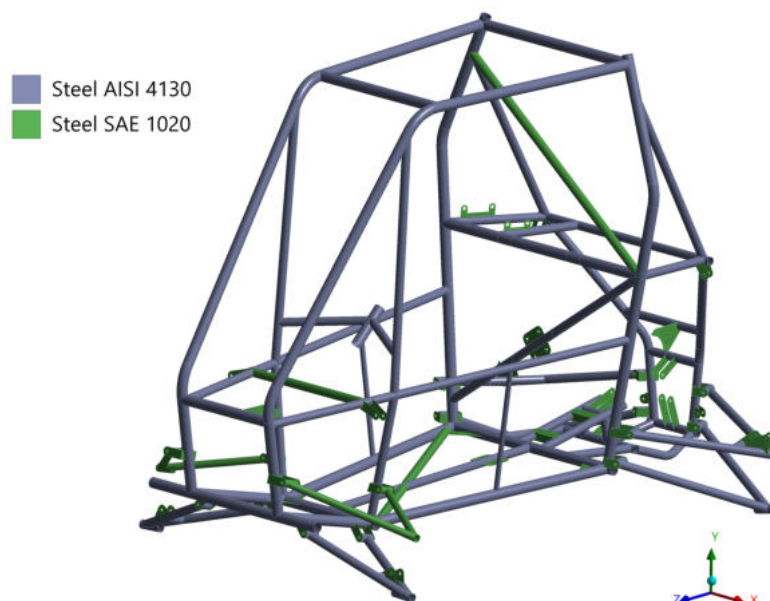
4.1.3.4 Propriedades dos Materiais

Conforme apresentado na Seção 3.11 do presente trabalho, faz-se necessário a definição das propriedades dos materiais no modelo numérico. Os materiais foram definidas no *Ansys Mechanical*, onde foram utilizados o Aço AISI 4130 e Aço SAE 1020, sendo apresentado na Figura 34 a distribuição de materiais entre os componentes do chassi e braços de suspensão.

Para ambos os aços, foram utilizados o modelo de Johnson-Cook para representar a curva elástica-viscoplástica de tensão-deformação e critério de falha [**MAT_JOHNSON_COOK*]. Os coeficientes do modelo constitutivo apresentados na Tabela 3 seguem as equações 3.19 e 3.24 apresentadas na Seção 3.11.

Os dados experimentais referentes ao Aço AISI 4130 foram retirados da referência (WUERTEMBERGER; PALAZOTTO, 2016). Com relação ao Aço SAE 1020, os dados experimentais foram retirados da referência (IQBAL et al., 2015), onde vale comentar que no artigo o autor determina o material apenas como "aço macio", contudo, a partir da composição química dada, pode-se observar que tal material está dentro dos limites de tolerância do Aço SAE 1020, sendo considerado uma boa aproximação utiliza-lo.

Figura 34 – Materiais dos Componentes (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

Em ambos os artigos, foram utilizadas uma máquina de tração para avaliar o material sob baixas taxas de deformação (ensaios quase-estáticos) e uma barra do tipo *Split-Hopkinson* (SHB) para caracterizar o material sob altas taxas de deformação, sendo variado também a temperatura nos ensaios de alta deformação. Avaliando ambos os artigos em paralelo e de forma sucinta, os ensaios experimentais foram realizados variando as taxas de deformação entre $0,0006 \text{ s}^{-1}$ e 1500 s^{-1} , enquanto que a temperatura foi variada entre 23°C e 750°C , o que abrange de forma plena o fenômeno de impacto frontal modelado no presente trabalho.

Tabela 3 – Modelo de Johnson Cook para os Aços AISI 4130 e SAE 1020.

Propriedade	Variável	AISI 4130	SAE 1020
Densidade	ρ	7850 kg/m ³	7850 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	E	160 GPa	203 GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0,29	0,33
Tensão de Escoamento	A	673 MPa	304,3 MPa
Coefficiente de Encruamento	B	190 MPa	422 MPa
Expoente de Encruamento	n	0,1538	0,345
Coefficiente da Taxa de Deformação Plástica	C	0,017	0,0156
Expoente Térmico	m	1,07	0,87
Temperatura de Fusão	T_{melt}	1432 °C	1526,9 °C
Temperatura de Referência	T_{ref}	23 °C	23 °C
Taxa de Deformação Limite Quase-Estática	$\dot{\epsilon}_0$	0,01 s ⁻¹	0,0001 s ⁻¹
Calor Específico	c_p	523 J/kg °C	523 J/kg °C
Parâmetro de Falha 1	D_1	-0,19	-0,1152
Parâmetro de Falha 2	D_2	0,732	1,0166
Parâmetro de Falha 3	D_3	0,663	-1,7684
Parâmetro de Falha 4	D_4	0,029	-0,052 79
Parâmetro de Falha 5	D_5	-0,8503	0,5262

Fonte: O autor (2021)

No *LS-PrePost*, foi realizado um ajuste no material de Johnson Cook [**MAT_JOHNSON-COOK*]. Foi inserida a condição de que para os elementos com 3 pontos e 5 pontos de integração ao longo da espessura falharem, apenas é necessário que 1 ponto de integração atinja a condição de dano unitário [*NUMINT=1*]. Isto é realizado para garantir que elementos sob alta distorção atinjam a falha.

4.1.3.5 Condições de Contorno

No que se refere às condições de contorno, foram seguidas as orientações do protocolo (EURO NCAP, 2019). No *LS-PrePost* foi aplicada a condição de comportamento rígido na superfície à frente do chassi [**MAT_RIGID*], com os três graus de liberdade de translação e três de rotação restringidos [*CON1=7, CON2=7*]. Em seguida, foi aplicada uma velocidade inicial em todas as entidades (componentes, juntas e massas pontuais), com exceção da parede rígida, igual a 13,89 m/s [*INITIAL_VELOCITY_GENERATION*], o que equivale a 50 km/h.

4.1.3.6 Contatos

Os contatos foram definidos no *LS-PrePost*, conforme conceitos e equações apresentados na Seção 3.12 do presente trabalho.

Para o contato entre os componentes do próprio veículo, foi utilizado o tipo simétrico automático [**CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE*], onde foram utilizados coeficiente de atrito estático igual a 0,1 [*FS=0.1*] para criar uma resistência de fricção; coeficiente de amortecimento viscoso igual a 20% a fim de evitar oscilações no contato [*VDC=20*]; e formulação de penalidade baseada em *segments* pela robustez [*SOFT=2*].

Em seguida, foi determinado um contato simétrico automático entre o veículo e a parede rígida [**CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*], onde foram utilizados um coeficiente de atrito estático igual a 0,3 [*FS=0.3*]; coeficiente de amortecimento viscoso igual a 20% [*VDC=20*]; e formulação de penalidade baseada em *segments* [*SOFT=2*].

Foram realizados alguns ajustes nos controles de contato [**CONTROL_CONTACT*]. Foi determinado que a variação da espessura dos elementos de casca irão influenciar na espessura dos contatos [*THKCHG=1*]; que as penetrações iniciais entre diferentes componentes serão ignoradas a fim de não gerar tensões indesejadas no primeiro ciclo da análise [*IGNORE=1*]; e que as espessuras dos contatos serão iguais à espessura dos elementos de casca [*SSTHK=1*].

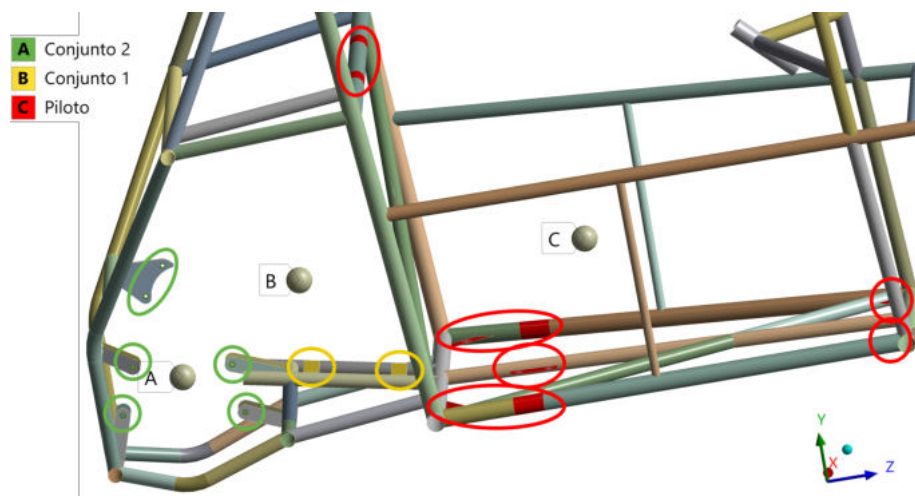
4.1.3.7 Pontos de Massa

No *Ansys Mechanical*, foram acrescentados dois pontos de massa com as propriedades de massa, momentos de inércia e coordenadas do centro de gravidade [**ELEMENT_INERTIA*], onde o Conjunto 1 é representado pelo motor, CVT motora e proteção da CVT; e o Conjunto 2 é representado pela caixa de redução, CVT movida, homocinéticas e semi-eixos. Vale comentar que as propriedades dos pontos de massa foram retirados do *Space Claim*, sendo as massas conferidas experimentalmente com os componentes físicos. O Conjunto 1 foi associado às superfícies da projeção das arruelas nos olhais de apoio da caixa de redução e o Conjunto 2 foi associado às faces superiores dos suportes do motor.

Em seguida, ainda no *Ansys Mechanical*, foi acrescentado mais um ponto de massa [**ELEMENT_INERTIA*] representando o piloto sobre as regiões do apoio do assoalho, fixações do banco e pontos de ancoragem do cinto de segurança, onde foram utilizadas as propriedades de massa e coordenadas do centro de gravidade, as quais foram retiradas do modelo *Dummy Hybrid III 5th Percentile* e que foi escolhido de acordo com as diretrizes do protocolo (EURO NCAP, 2019). As propriedades do momento de inércia não foram inseridas tendo em vista que a Etapa A é um modelo preliminar simplificado e porque na Etapa C o modelo *Dummy* completo será inserido com todas suas devidas características.

Na Figura 35 são demonstradas as superfícies e coordenadas onde os pontos de massa foram aplicados e na Tabela 4 são apresentados as propriedades dos pontos de massa.

Figura 35 – Pontos de Massa (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

Tabela 4 – Propriedades dos Pontos de Massa.

Propriedade	Conjunto 1	Conjunto 2	Piloto
Massa [kg]	30,2	19,3	50,2
Momento de Inércia em X [kg mm ²]	$0,27 \times 10^6$	$0,76 \times 10^6$	—
Momento de Inércia em Y [kg mm ²]	$1,16 \times 10^6$	$1,36 \times 10^6$	—
Momento de Inércia em Z [kg mm ²]	$1,23 \times 10^6$	$1,92 \times 10^6$	—

Fonte: O autor (2021)

4.1.3.8 Definição do *Mass Scaling*

Conforme apresentado na Seção 3.8.2 do presente trabalho, foi aplicado o *mass scaling* no *LS-PrePost* a fim de aumentar o passo de tempo do modelo, onde foi utilizado um valor igual a $3,5 \times 10^{-7}$ [**CONTROL_TIMESTEP; DT2MS=-3.5 E-07*]. Este valor foi selecionado a partir de testes preliminares, garantindo que a massa adicionada no modelo não represente mais do que 2% da massa total do modelo físico.

4.1.3.9 Solicitação de Dados

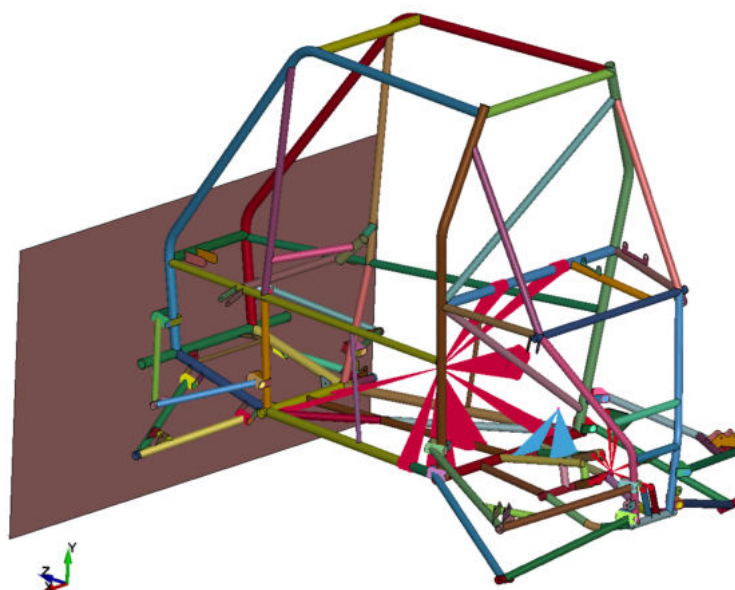
Por fim, foram definidos os dados a serem gerados para serem interpretados durante o pós-processamento do modelo. Através do comando [**DATABASE_BINARY_D3PLOT*], foi determinado que os arquivos de resultados serão escritos a cada 0,0002 s [*DT=0.0002*]. Ademais, de forma resumida, através dos comandos [**DATABASE_EXTENT_BINARY; *ASCII_OPTION; *CONTROL_ENERGY; *CONTROL_OUTPUT*], foram determinadas as variáveis necessárias

para gerar os dados de deformações; tensões; parâmetros de falha; variação de temperatura; energias total, cinética, interna e de *hourglass*; forças nos contatos; entre outros. Os dados foram gerados e interpretados no *LS-PrePost*.

4.1.4 Modelo Obtido na Etapa A

Assim, foi obtido o modelo referente à Etapa A da Figura 36 no *LS-PrePost*, o qual está pronto para ser resolvido pelo *LS-Dyna*.

Figura 36 – Modelo Finalizado (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

4.2 ETAPA B

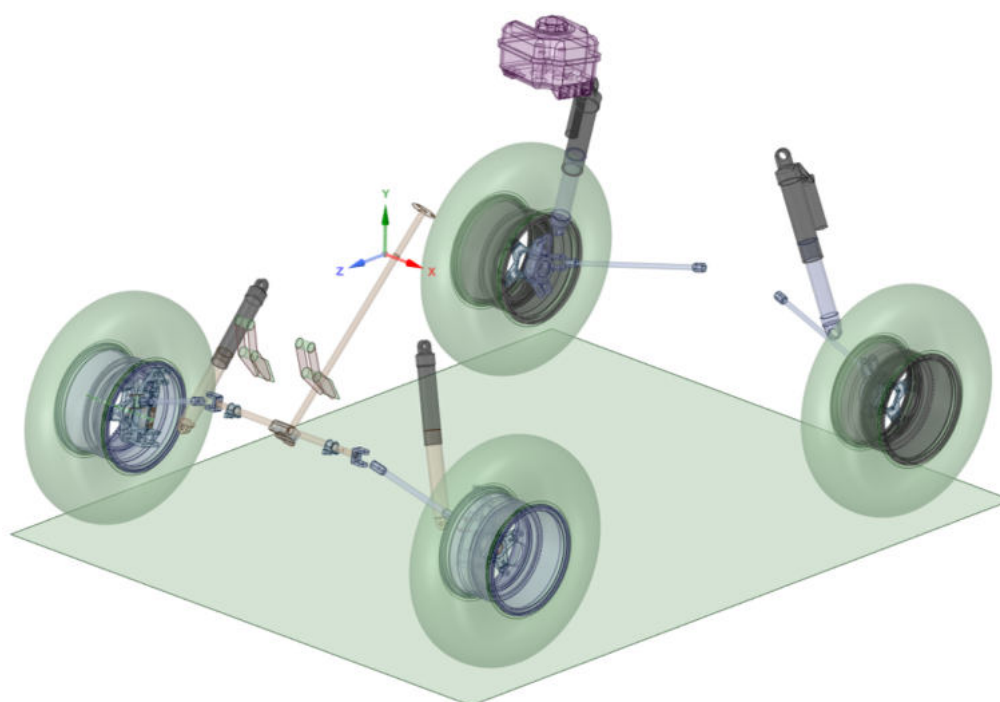
A partir do modelo da Etapa A executado, na Etapa B foram acrescentados componentes a fim de tornar o veículo mais próximo do modelo real.

4.2.1 Geometria e Malha Computacional

Com relação à geometria da Etapa B, foram acrescentados o tanque de combustível, como também o restante do conjunto de suspensão e sistema de direção, os quais são compostos pelos seguintes componentes: amortecedores, mangas de eixo, pontas de eixo, cubos de roda, flanges, rodas, pneus, *links* de direção e convergência, mancais, cremalheira, caixa de direção, coluna de direção, pedal de freio e pedal de acelerador.

Inicialmente, foram realizadas simplificações, a exemplo da remoção dos cravos dos pneus e retirada de detalhes nos amortecedores, as quais foram avaliadas que não devem interferir de forma significativa no modelo. Então, a geometria foi preparada a partir da extração das superfícies externas dos componentes, definição das espessuras e ajuste de *offset*, pelos motivos já citados na Etapa A. Vale salientar que foi acrescentada também uma superfície rígida abaixo do veículo a fim de representar o terreno, como também foi realizado um afastamento proporcional da parede rígida para o veículo devido a presença dos pneus que passam do ponto mais a frente do chassi. Na Figura 37 são apresentados os componentes acrescentados na Etapa B.

Figura 37 – Geometria: Componentes Acrescentados (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

Sobre a geração da malha computacional dos componentes acrescentados na Etapa B, seguiu-se a mesma filosofia já apresentada na Etapa A, sendo utilizado os tamanhos de elementos apresentados na Tabela 5.

Com isso, foi obtida a malha da Figura 38, onde foi aplicado uma ampliação no tanque de combustível e região traseira direita do veículo a fim de observar em maiores detalhes a malha. Vale destacar que foi ocultada a superfície representando o terreno.

4.2.2 Setup do Modelo

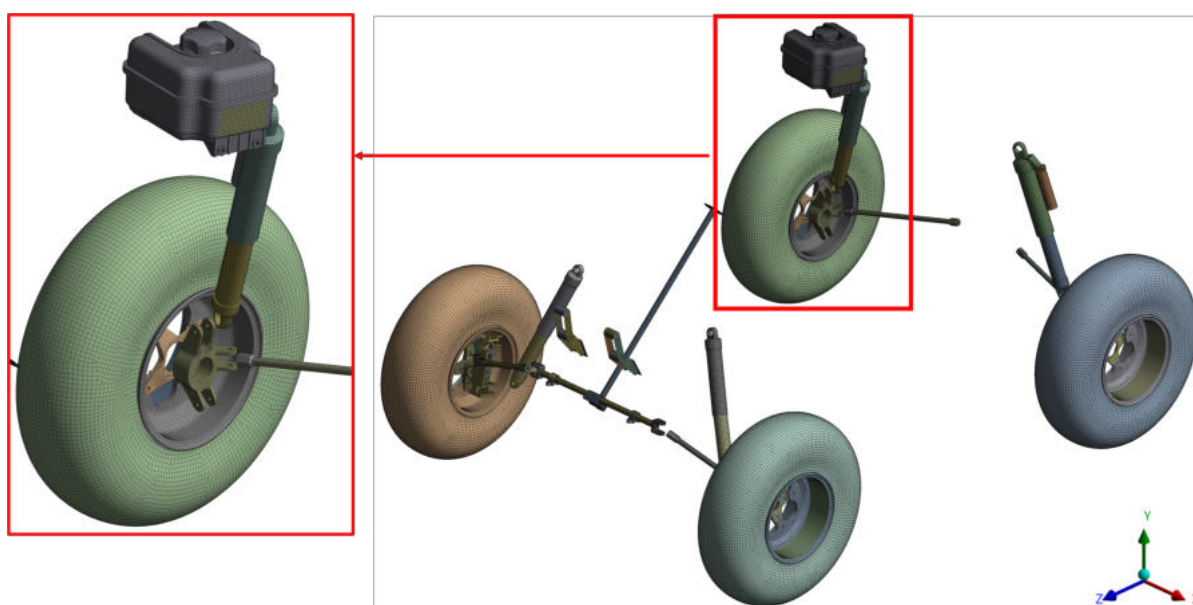
No tangente ao *setup* do modelo, nesta seção apenas será apresentado o que foi adicionado ou ajustado para os componentes acrescentados durante a elaboração da Etapa B.

Tabela 5 – Tamanho dos Elementos de Malha (Etapa B).

Componente	Tamanho de Elemento
Tanque de Combustível	2,8 mm
Sistema de Direção, Pontas de Eixo e <i>Links</i>	3 mm
Mangas de Eixo e Pedais	3,5 mm
Rodas, Flanges, Cubos de Roda e Amortecedores	5 mm
Pneus	8 mm
Terreno (Para contatos)	10 mm

Fonte: O autor (2021)

Figura 38 – Malha: Componentes Acrescentados (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

4.2.2.1 Formulação dos Elementos

Com relação à formulação dos elementos, vale comentar apenas a questão do número de pontos de integração, o qual foi utilizado igual a 5 [*SECTION_SHELL; NIP=5] no *Ansys Mechanical* devido aos fatos já apresentados na Etapa A.

4.2.2.2 Controle de *Hourglass*

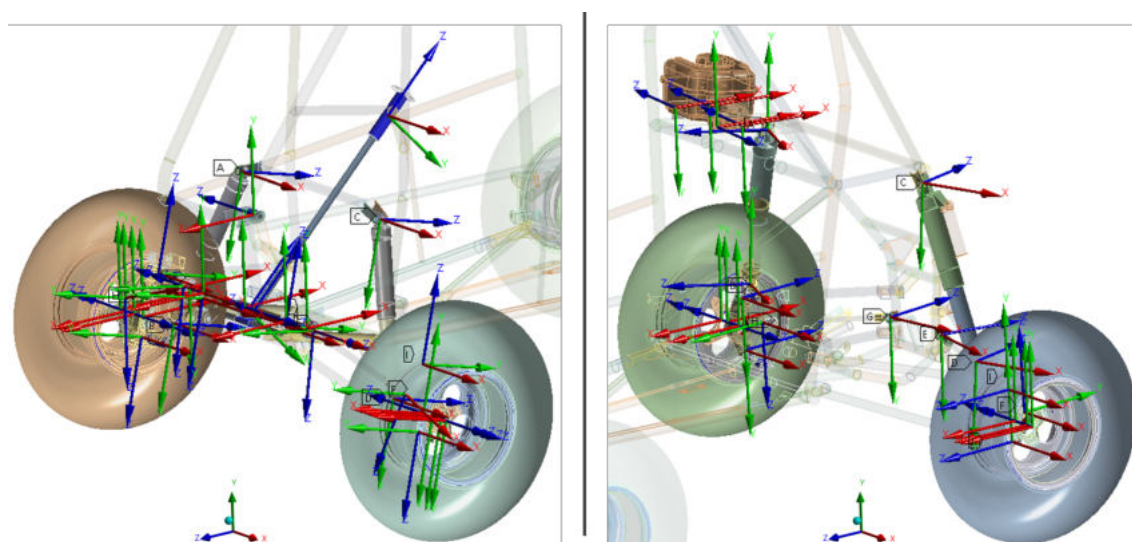
Sobre o controle de *hourglass*, foi utilizado no *Ansys Mechanical* o tipo *Englemann-Whirley Viscous Form* com coeficiente igual a 0,1 [*HOURLASS; IHQ=1, QM=0.1] especificamente para os pneus. Isto foi feito para garantir a estabilidade do modelo, tendo em vista que a rigidez do pneu é muito inferior à do aço (em torno de 10^{-3}). Para o restante dos componentes

acrescentados na Etapa B, se manteve a definição do controle de *hourglass* já comentada na Etapa A.

4.2.2.3 Conexões

Foram acrescentadas juntas rígidas fixas [**CONSTRAINED_JOINT_LOCKING*] no *Ansys Mechanical* a fim de realizar a conexão entre os componentes acrescentados na Etapa B, como também com os componentes já existentes da Etapa A. Com isso, vale comentar que o sistema de suspensão e direção foi considerado travado. Na Figura 39 são apresentadas as juntas acrescentadas durante a Etapa B e na Tabela 6 são apresentados os componentes conectados.

Figura 39 – Juntas Fixas dos Componentes Acrescentados (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

4.2.2.4 Condições de Contorno

Apenas foi acrescentada no *Ansys Mechanical* a condição de contorno da aceleração da gravidade. Vale salientar que apesar de ser uma simulação de curta duração, tal condição é importante a fim de fechar os contatos e gerar atrito nos pneus, considerados travados, com o terreno, como também fechar os contatos dos próximos componentes que serão acrescentados na etapa posterior.

Ademais, no *LS-PrePost*, os componentes acrescentados, com exceção do terreno, foram adicionados à definição de velocidade inicial já comentada na Etapa A.

Tabela 6 – Conexões Acrescentadas na Dianteira e Traseira do Veículo (Etapa B).

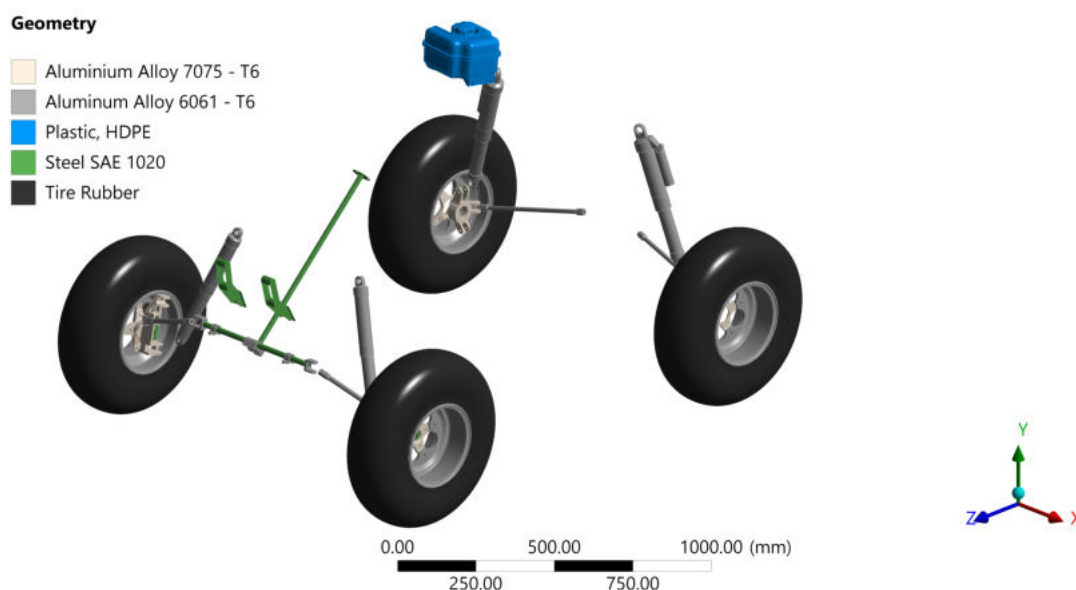
Dianteira	Traseira
Chassis — Amortecedores	Chassis — Amortecedores
<i>Tie Rods</i> — <i>Links</i> de Direção	Chassis — <i>Links</i> de Convergência
<i>Links</i> de Direção — Mangas de Eixo	<i>Links</i> de Convergência — Cubo de Roda
Amortecedores — Braços de Suspensão	Amortecedores — Braços de Suspensão
Braços de Suspensão — Mangas de Eixo	Braços de Suspensão — Cubos de Roda
Mangas de Eixo — Pontas de Eixo	Cubos de Roda — Flanges
Pontas de Eixo — Flanges	Flanges — Rodas
Flanges — Rodas	Rodas — Pneus
Rodas — Pneus	Chassis — Tanque de Combustível
<i>Tie Rods</i> — Cremalheira	-
Chassis — Mancais da Cremalheira	-
Mancais da Cremalheira — Cremalheira	-
Caixa de Direção — Cremalheira	-
Chassis — Caixa de Direção	-
Caixa de Direção — Coluna de Direção	-
Chassis — Coluna de Direção	-
Chassis — Pedal de Freio	-
Chassis — Pedal de Acelerador	-

Fonte: O autor (2021)

4.2.2.5 Propriedades dos Materiais

As propriedades dos materiais foram definidas no *Ansys Mechanical*, sendo utilizado: Borracha para os pneus; Plástico HDPE (*high-density polyethylene*) para o tanque de combustível; Liga de Alumínio 6061-T6 para as rodas, *links*, amortecedores, *tie rods* e *mancais*; Liga de Alumínio 7075-T6 para as mangas de eixo, flanges e cubos de roda; e Aço SAE 1020 para as pontas de eixo, cremalheira, coluna de direção e pedais. Na Figura 40 é apresentada a distribuição de materiais dos componentes acrescentados.

Figura 40 – Materiais dos Componentes Acrescentados (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

Com relação ao Aço SAE 1020, suas propriedades já foram apresentadas na Tabela 3. Com relação ao Plástico HDPE, foi utilizado um material isotrópico elástico [**MAT_ELASTIC*], e para as Ligas de Alumínio 6061-T6 e 7075-T6, foram utilizados modelos de materiais elástico-plástico [**MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY*]. As propriedades destes três novos materiais foram definidas no *Ansys Mechanical* e retiradas da Base de Dados do Granta em Ansys Granta (2021).

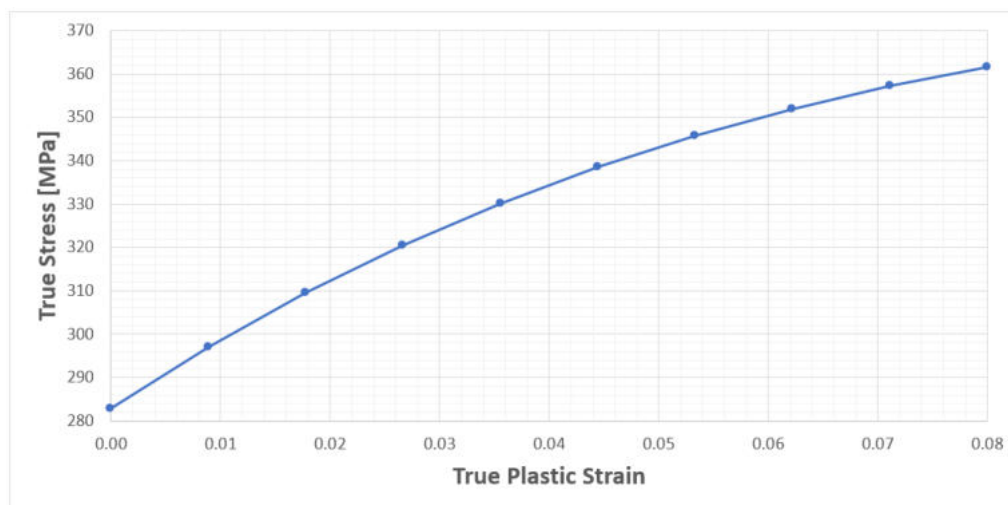
Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades elásticas e de densidade do Plástico HDPE e das Ligas de Alumínio 6061-T6 e 7075-T6. E nas Figuras 41 e 42 são apresentadas as curvas de plasticidade (*True Stress X True Plastic Strain*) das Ligas de Alumínio 6061-T6 e 7075-T6, respectivamente. Vale salientar que foi considerado uma temperatura constante de 23 °C para tais propriedades, tendo em vista que não se espera variações de temperatura significativas nos componentes compostos por estes três materiais.

Tabela 7 – Propriedades Elásticas e de Densidade das Ligas de Alumínio 6061-T6 e 7075-T6 e do Plástico HDPE.

Propriedade	Variável	Plástico HDPE	6061-T6	7075-T6
Densidade	ρ	958,5 kg/m ³	2713 kg/m ³	2800 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	E	1,08 GPa	69,04 GPa	72,4 GPa
Coeficiente de Poisson	ν	0,414	0,33	0,33

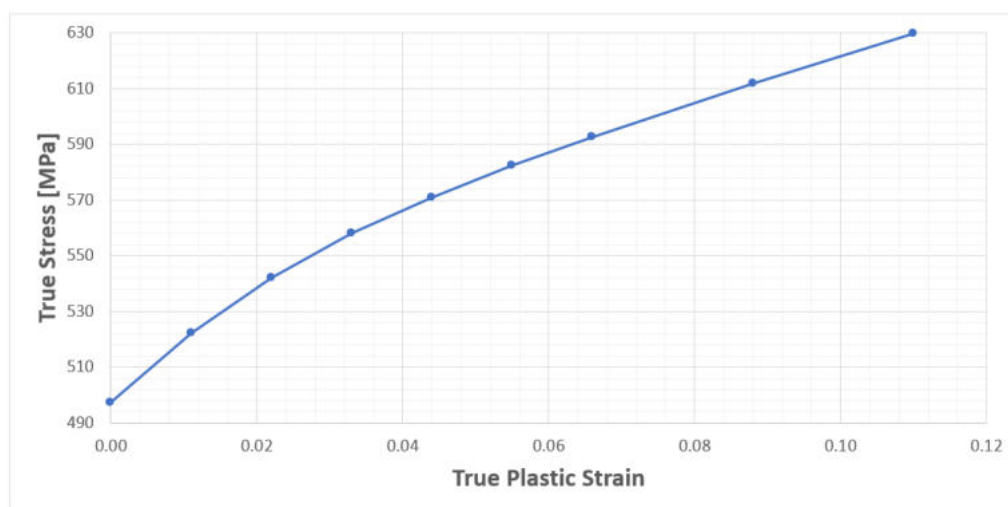
Fonte: O autor (2021)

Figura 41 – Curva de Plasticidade da Liga de Alumínio 6061-T6.



Fonte: O autor (2021)

Figura 42 – Curva de Plasticidade da Liga de Alumínio 7075-T6.



Fonte: O autor (2021)

Com relação ao material dos pneus, suas propriedades variam bastante entre modelos e fabricantes, como também são altamente não-lineares e complexas, sendo necessários diversos testes experimentais e a modelagem numérica de diferentes componentes que compõe o pneu (banda de rodagem, cintas de aço, cobertura de nylon, carcaça de poliéster, talão, entre outros).

Desta forma, a fim de simplificar o modelo de material do Pneu *Carlisle AT489C* utilizado no veículo, primeiramente foram realizados ensaios experimentais de compressão quase-estáticos na máquina de compressão-tração da UFPE com o pneu pressurizado com a pressão utilizada em competições, vide Figura 43, a fim de se obter a região elástica da curva do pneu.

Figura 43 – Testes Experimentais de Compressão Realizados na UFPE.



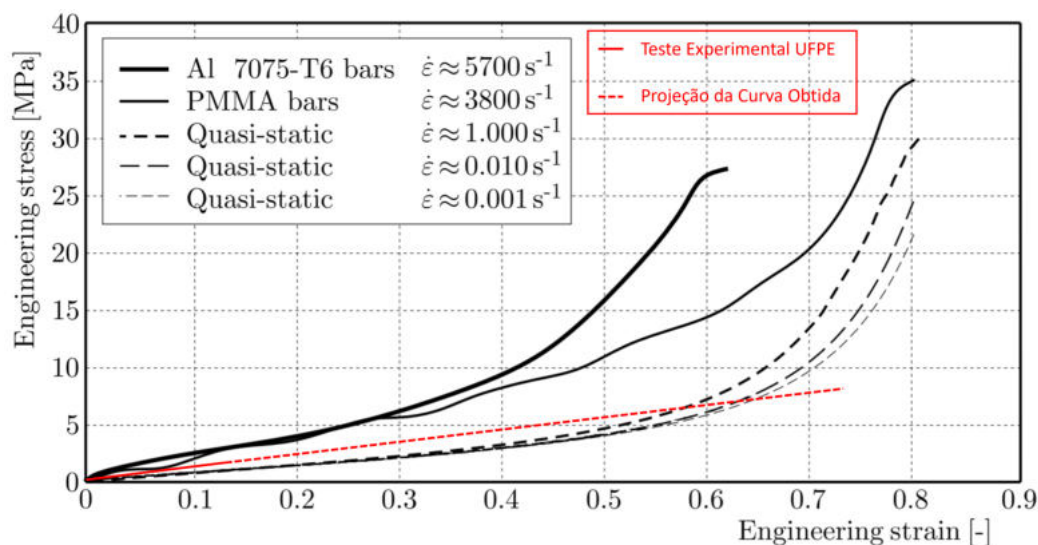
Fonte: O autor (2021)

Em seguida, esta curva elástica foi comparada com as curvas não-lineares completas obtidas da referência (BARANOWSKI; JANISZEWSKI; MAŁACHOWSKI, 2017), onde o autor realizou testes de compressão na borracha de um pneu automotivo, utilizando uma máquina de tração-compressão para os testes quase-estáticos e uma barra do tipo *Split-Hopkinson* (SHB) para os testes com alta taxa de deformação, sendo a taxa de deformação variada entre os valores de $0,001 \text{ s}^{-1}$ e 5700 s^{-1} .

Na Figura 44 é possível observar as curvas de tensão-deformação elaboradas pelo autor da referência, como também a linha em vermelho representando a região elástica obtida e projetada dos ensaios experimentais realizados na UFPE. Por conseguinte, foi assumido que as propriedades da borracha obtidas pela referência (BARANOWSKI; JANISZEWSKI; MAŁACHOWSKI, 2017) é uma aproximação razoável do modelo de pneu *Carlisle AT489C* pressurizado, sendo utilizadas suas curvas no modelo numérico.

Assim, as propriedades do material dos pneus foram adicionadas através do *LS-PrePost*, onde foi utilizado um modelo de material hiper-viscoelástico [**SIMPLIFIED_RUBBER/FOAM*]. A partir da Figura 44, foram retirados diversos pontos em diferentes taxas de deformação, sendo elaboradas as curvas de tensão-deformação [**DEFINE_CURVE*], e em seguida compiladas em uma tabela para inserir os dados de taxas de deformação [**DEFINE_TABLE*], obtendo-se algo semelhante ao apresentado na Figura 20.

Figura 44 – Curvas do Material dos Pneus.



Fonte: Adaptado de Baranowski, Janiszewski e Małachowski (2017)

Por fim, foi acrescentado um critério de falha no modelo do material dos pneus que é acionado no momento que a deformação efetiva total do elemento atingir 0,80. Este valor foi adotado tendo em vista que foi o ponto de ruptura das curvas obtidas em Baranowski, Janiszewski e Małachowski (2017) na Figura 44, com exceção da curva de taxa de deformação máxima, a qual não se espera atingir devido à velocidade de impacto do veículo.

4.2.2.6 Contatos

No tangente aos contatos, no *LS-PrePost*, os componentes acrescentados foram adicionados à definição do contato entre os componentes do próprio veículo, o qual já foi apresentado na Etapa A [**AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE*].

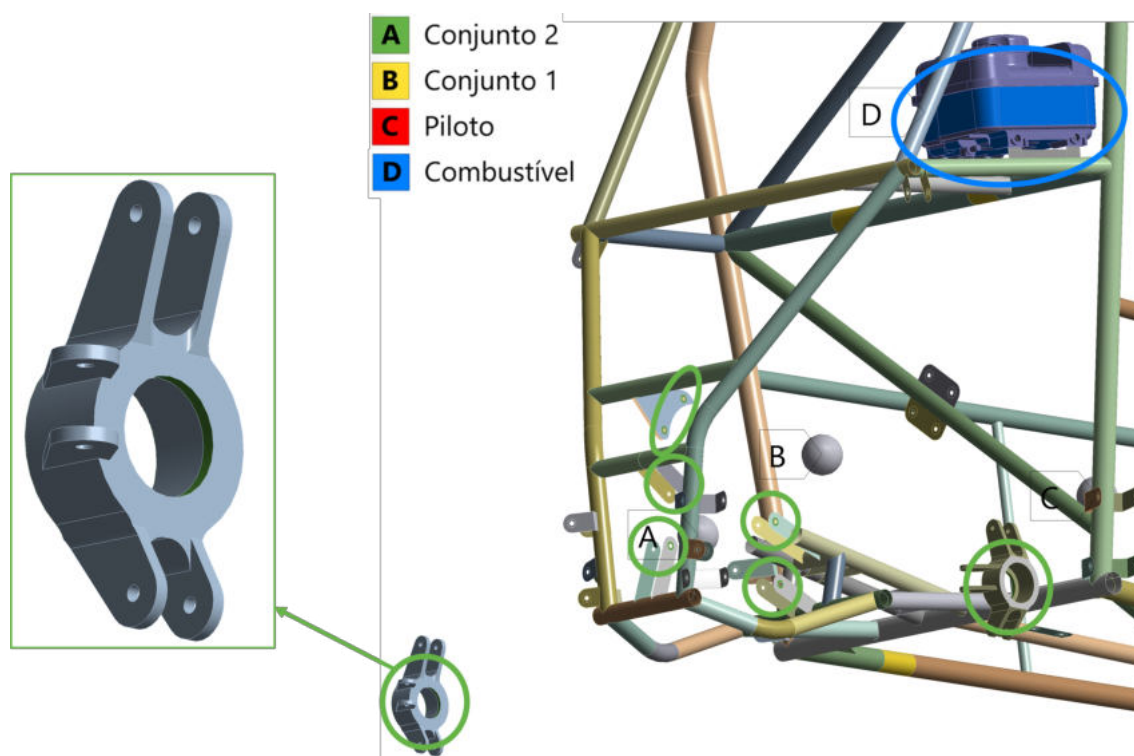
Em seguida, foi inserido um contato simétrico automático entre o veículo e o terreno [**CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*], onde foram utilizadas as mesmas variáveis do contato entre o veículo e a parede rígida já comentados na Etapa A, ou seja, coeficiente de atrito estático igual a 0,3 [*FS=0.3*]; coeficiente de amortecimento viscoso igual a 20% [*VDC=20*]; e formulação de penalidade baseada em *segments* [*SOFT=2*].

4.2.2.7 Massa Distribuída e Ajuste de Massa Pontual

No *Ansys Mechanical*, foi acrescentada uma massa distribuída [**ELEMENT_MASS_NODE_SET*] no fundo e nas paredes do tanque de combustível a fim de representar a gasolina presente no tanque, vide Figura 45. Tendo em vista que o tanque tem capacidade de 3,78 L e a

gasolina utilizada em competições tem densidade aproximada de 715 kg/m^3 , foi aplicada uma massa distribuída igual a 2,7 kg.

Figura 45 – Massa Distribuída Representando o Combustível (Etapa B).



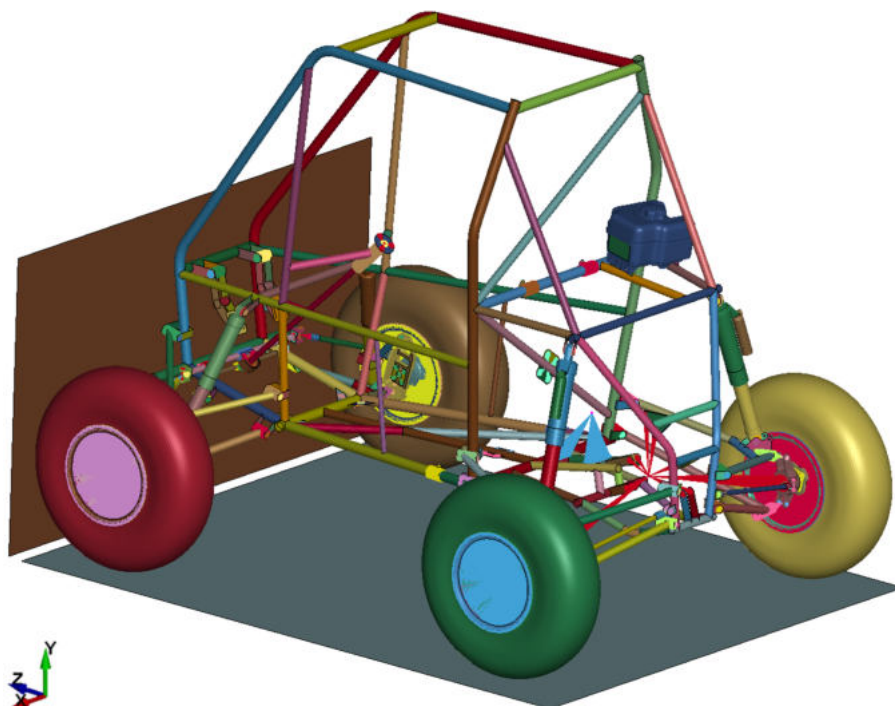
Fonte: O autor (2021)

Ademais, com relação ao ponto de massa do Conjunto 1 apresentado na Subseção 4.1.3.7, foi realizado um ajuste em suas faces de apoio no modelo. Tal ajuste consistiu na adição das faces internas dos cubos de roda traseiro do veículo, o qual é justificado pelo fato de a caixa de redução e cubos de roda serem conectados através dos semieixos. A presença dos semieixos acrescenta rigidez na região traseira do veículo e distribui a massa entre os componentes. Desta forma, tal ajuste serviu para representar estas características no modelo numérico de forma mais adequada.

4.2.3 Modelo Obtido na Etapa B

Por conseguinte, a partir do desenvolvimento realizado em cima do modelo da Etapa A, foi obtido o modelo da Etapa B no *LS-PrePost*, vide Figura 46, o qual representa de forma mais realista o veículo e está pronto para ser resolvido pelo *LS-Dyna*.

Figura 46 – Modelo Finalizado (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

4.3 ETAPA C

A partir do modelo da Etapa B executado, na Etapa C foram acrescentados componentes adjacentes a fim de tornar o veículo mais próximo do modelo real e o modelo *Dummy* para representar o piloto.

4.3.1 Geometria e Malha Computacional

Com relação à geometria da Etapa C, no *Space Claim* foram acrescentados o assoalho e banco, onde foram retiradas suas superfícies médias (com informações de espessura e *offset*), e o volante, onde foi retirada sua superfície externa, inserida a espessura e definido o *offset*.

Ademais, vale comentar que foram inseridas pequenas superfícies rígidas próximas aos pontos de ancoragem do cinto de segurança com o único objetivo de transmitir os carregamentos da extremidade do cinto para a superfície reforçada do chassi, evitando assim uma concentração de tensão em nós singulares do chassi.

Então, foi realizada a geração da malha computacional dos componentes acrescentados utilizando o *Ansys Meshing*, onde seguiu-se a mesma filosofia já apresentada nas Etapas A e B, sendo utilizado os tamanhos de elementos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Tamanho dos Elementos de Malha (Etapa C).

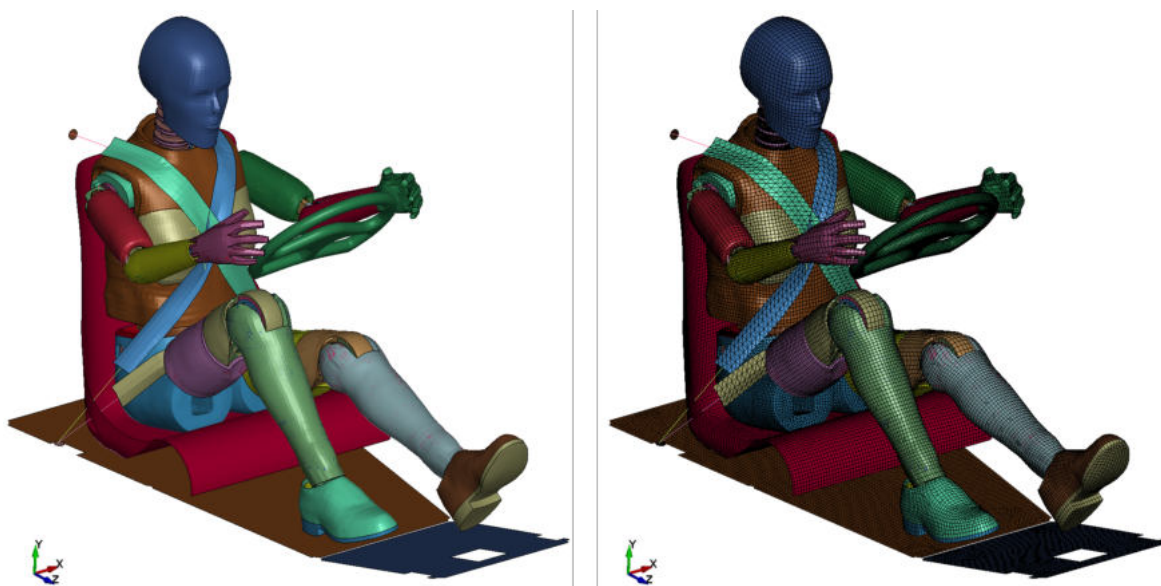
Componente	Tamanho de Elemento
Superfícies dos Pontos de Ancoragem do Cinto	3 mm
Volante	3,5 mm
Assoalho e Banco	7 mm

Fonte: O autor (2021)

Em seguida, no *LS-PrePost*, foi acrescentada a geometria e malha computacional do modelo *Dummy* disponibilizado em LSTC (2021). Por fim, foi inserida a geometria e gerada a malha computacional do cinto de segurança. Serão apresentados maiores detalhes sobre o modelo *Dummy* e cinto de segurança na próxima seção.

Com isso, foi obtida a geometria e malha dos componentes acrescentados na Etapa C no *LS-PrePost*, vide Figura 47.

Figura 47 – Componentes Acrescentados (Etapa C). Geometria à Esquerda e Malha à Direita.



Fonte: O autor (2021)

4.3.2 Setup do Modelo

Com relação ao *setup* do modelo, nesta seção apenas será apresentado o que foi adicionado ou ajustado para os componentes acrescentados durante a elaboração da Etapa C.

4.3.2.1 Controle de Tempo

O tempo total de simulação foi alterado para 0,035 segundo [**CONTROL_TERMINATION; ENDTIM=0.035*], tendo em vista que com a adição do *Dummy* é necessário garantir que o corpo do piloto atingiu o equilíbrio.

4.3.2.2 Modelo *Dummy*

O piloto foi representado através do modelo *Dummy Hybrid III 5th Percentile Female*, o qual caracteriza o 5% percentil feminino. A escolha deste modelo *Dummy*, conforme já comentado anteriormente, foi devido ao presente trabalho estar seguindo as recomendações do protocolo (EURO NCAP, 2019). Vale realçar que com a inserção do modelo *Dummy*, o ponto de massa que representava o piloto existente nas Etapas A e B foi suprimido.

Este modelo *Dummy* foi elaborado pela LSTC, onde foram desenvolvidos diversos modelos numéricos a fim de validar com os ensaios experimentais, a exemplo do teste de flexão e extensão do pescoço, avaliação de impacto no tórax, ensaio de impacto no joelho, *drop tests*, entre outros. A representação acurada e precisa deste modelo pode ser garantida tendo em vista que: a LSTC, empresa desenvolvedora do *LS-Dyna*, é referência em simulações de dinâmica explícita; pelo fato de tal Modelo *Dummy* ser amplamente utilizado na indústria automotiva; e devido aos resultados apresentados em Kang, Xiao e Ford Motor Company (2008), onde foram comparados resultados numéricos e experimentais do modelo *Dummy*.

Para realizar o posicionamento do modelo *Dummy*, foi utilizada a interface *Safety* disponibilizada no *LS-PrePost*, onde o modelo foi posicionado de acordo com a posição de pilotagem típica esperada pelo regulamento da competição Baja (SAE BRASIL, 2019). Vale realçar que garantiu-se os seguintes posicionamentos: o pé esquerdo no pedal de freio, o pé direito próximo ao assoalho, o corpo acomodado no banco e as mãos próximas ao volante.

4.3.2.3 Cinto de Segurança

O cinto de segurança de 4 pontos do piloto também foi adicionado através da interface *Safety* disponibilizada no *LS-PrePost*. Com relação ao seu posicionamento, não foi considerado a fivela central onde os cintos se encontram, tendo em vista que ao tentar fazer isto em testes preliminares, ocorreram instabilidades no modelo, principalmente devido à uma concentração alta de esforços na região pélvica do piloto e escorregamento do cinto da região peitoral para fora (mesmo com o atrito aplicado). Desta forma, todas as pontas do cinto de segurança foram presas nas pequenas superfícies rígidas adicionadas (as quais estão fixas na região reforçada dos pontos de ancoragem do chassis), o que foi considerado como uma aproximação razoável, tendo em vista que os carregamentos resultantes do cinto sempre serão absorvidos pelo chassis a

fim de restringir o piloto. Além disso, vale destacar que garantiu-se o aperto firme do cinto de segurança contra o corpo do piloto, conforme é de se esperar durante a pilotagem do veículo.

Vale salientar que foram utilizadas regiões com elementos unidimensionais para representar as pontas do cinto de segurança e elementos bidimensionais para representar a região em contato com o piloto a fim de garantir a estabilidade do modelo e reduzir o custo computacional.

4.3.2.4 Formulação dos Elementos

Com relação à formulação dos elementos do banco, assoalho e volante, foram utilizados o mesmo tipo de elemento nas Etapas anteriores, onde vale realçar apenas sobre o número de pontos de integração, o qual foi utilizado igual a 5 [**SECTION_SHELL; NIP=5*] no *Ansys Mechanical* devido às justificativas já apresentadas na Etapa A.

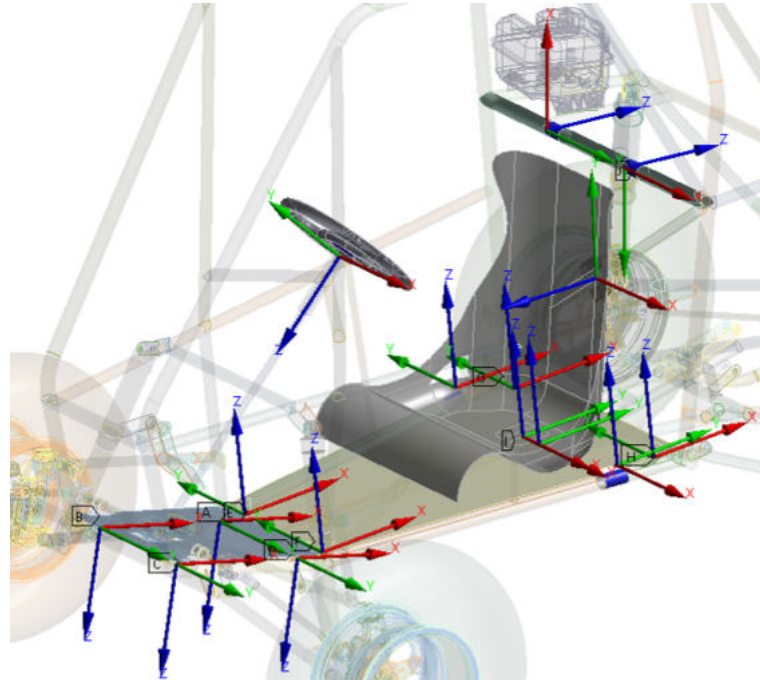
Para os elementos unidimensionais da ponta do cintos de segurança, foram utilizados elementos específicos desenvolvidos pela LSTC para cintos de segurança [**ELEMENT_SEATBELT*], os quais são de baixo custo computacional e de alta robustez.

Com relação aos elementos bidimensionais em contato com o piloto, foram utilizados elementos padrão de casca [**ELEMENT_SHELL*], contudo com alguns ajustes específicos. Através da carta [**SECTION_SHELL*], foi aplicada a formulação de membrana de Belytschko-Tsay com integração completa no plano [*ELFORM=9*] e 2 pontos de integração ao longo da espessura [*NIP=2*]. Tais elementos garantem a acurácia e robustez do modelo, tendo em vista que não possuem resistência à flexão, o que é o esperado por ser um tecido, e não tem problemas com *hourglass* e necessidade de ajuste na formulação para situações de torção, visto que possuem integração completa no plano do elemento.

4.3.2.5 Conexões

Foram acrescentadas juntas rígidas fixas [**CONSTRAINED_JOINT_LOCKING*] no *Ansys Mechanical* a fim de realizar a conexão entre os componentes acrescentados na Etapa C, como também com os componentes já existentes das Etapas A e B. Na Tabela 9 são apresentados os componentes conectados pelas juntas e na Figura 48 são apresentadas as juntas acrescentadas durante a Etapa C.

Figura 48 – Juntas Fixas dos Componentes Acrescentados (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

Tabela 9 – Conexões Acrescentadas na Dianteira e Traseira do Veículo (Etapa C).

Olhais do Chassis — Assoalho
Olhais do Chassis — Banco
Coluna de Direção — Volante
Chassis — Superfícies dos Pontos de Ancoragem do Cinto

Fonte: O autor (2021)

4.3.2.6 Propriedades dos Materiais

As propriedades dos materiais foram definidas no *Ansys Mechanical*. Para o volante, assoalho e banco, foi utilizado fibra de carbono [**MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC*], onde suas propriedades elásticas ortotrópicas em temperatura constante são apresentadas na Tabela 10 e foram retiradas da Base de Dados do Granta em Ansys Granta (2021).

Com relação ao cinto de segurança, foi utilizado um material de tecido para ambas as regiões, a unidimensional [**MAT_SEATBELT*] e bidimensional [**MAT_FABRIC*], onde suas propriedades foram retiradas da referência (KANG et al., 2018). Nesta referência, o autor validou o modelo numérico, determinando as propriedades mecânicas do cinto, como também a interação de contato entre o cinto e o modelo *Dummy*, através de ensaios experimentais.

Na Figura 49 é possível observar as curvas de tensão-deformação para os casos de

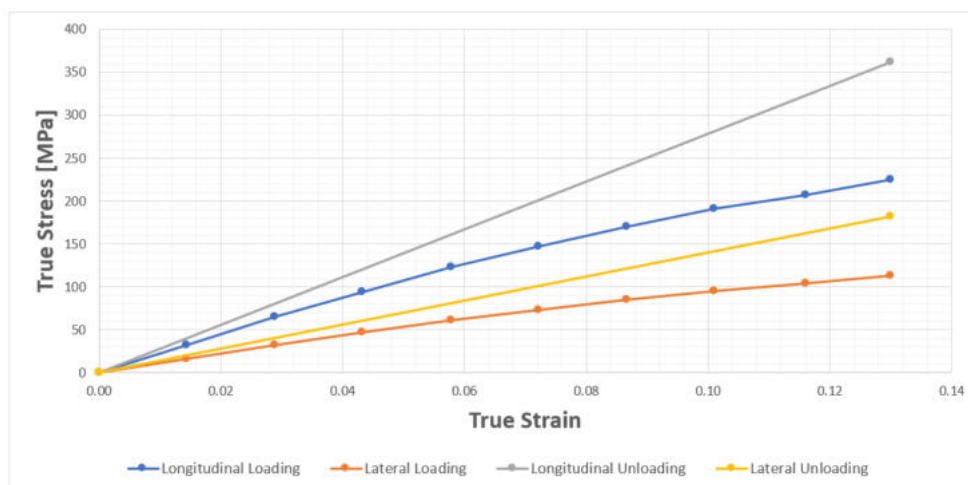
Tabela 10 – Propriedades Elásticas Ortotrópicas da Fibra de Carbono.

Propriedade	Variável	Fibra de Carbono
Densidade	ρ	1800 kg/m ³
Módulo de Elasticidade na Direção X	E_x	290 GPa
Módulo de Elasticidade na Direção Y	E_y	230 GPa
Módulo de Elasticidade na Direção Z	E_z	230 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i> no Plano XY	ν	0,2
Coefficiente de <i>Poisson</i> no Plano XZ	ν	0,2
Coefficiente de <i>Poisson</i> no Plano YZ	ν	0,4
Módulo de Cisalhamento no Plano XY	G_{xy}	9 GPa
Módulo de Cisalhamento no Plano XZ	G_{xz}	8,2 GPa
Módulo de Cisalhamento no Plano YZ	G_{yz}	9 GPa

Fonte: O autor (2021)

carregamento e descarregamento, nos sentidos longitudinal e lateral, do tecido. Com relação à interação do contato entre o cinto de segurança com o modelo *Dummy*, suas propriedades serão apresentadas na próxima Seção.

Figura 49 – Curva de Tensão-Deformação do Material dos Cintos de Segurança.



Fonte: Adaptado de Kang et al. (2018)

4.3.2.7 Contatos

Os contatos foram adicionados utilizando o *LS-PrePost*. Os componentes do veículo acrescentados na Etapa C foram inseridos na definição do contato geral [*AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE] já apresentado na Etapa A.

Para os contatos do modelo *Dummy* com o banco, assoalho, pedal de freio, cremalheira e volante, foram utilizados contatos simétricos automáticos [**CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*], onde foram utilizadas as seguintes variáveis: coeficiente de atrito estático igual a 0,3 [*FS=0.3*]; coeficiente de amortecimento viscoso igual a 20% [*VDC=20*]; e formulação de penalidade baseada em *segments*[*SOFT=2*].

Com base nas diretrizes apresentadas na referência (KANG et al., 2018), com relação aos contatos do modelo *Dummy* com o cinto de segurança, também foram utilizados contatos simétricos automáticos [**CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*], contudo, com as seguintes variáveis: coeficiente de atrito estático igual a 0,294 [*FS=0.294*]; coeficiente de amortecimento viscoso igual a 20% [*VDC=20*]; formulação de penalidade baseada em *segments*[*SOFT=2*]; coeficiente de fricção dinâmica igual a 0,25 [*FD=0.25*]; e expoente de decaimento igual a 2 [*DC=2*].

Todos os contatos do modelo *Dummy* foram aplicados de forma independente entre os diferentes componentes que o piloto pode entrar em contato durante o impacto, seguindo a Tabela 11.

Tabela 11 – Contatos do *Dummy*.

Costas, quadril e coxas do <i>Dummy</i> — Banco
Peitoral do <i>Dummy</i> — Cintos Verticais
Pélvis do <i>Dummy</i> — Cinto Horizontal
Pés do <i>Dummy</i> — Assoalho, Cremalheira e Pedal de Freio
Mãos e Braços do <i>Dummy</i> — Volante e Tubos Próximos

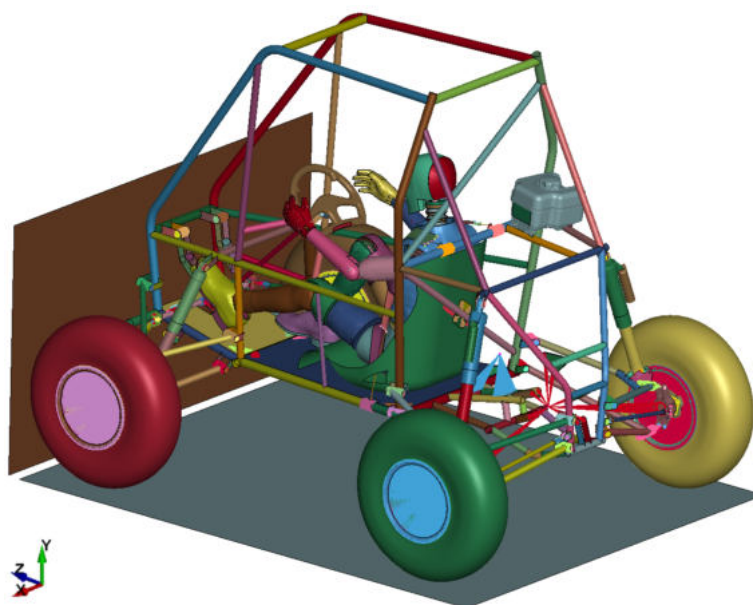
Fonte: O autor (2021)

4.3.3 Modelo Obtido na Etapa C

Finalmente, a partir do desenvolvimento realizado em cima do modelo nas Etapas A e B, foi obtido o modelo completo da Etapa C no *LS-PrePost*, vide Figura 50, o qual está pronto para ser resolvido pelo *LS-Dyna*.

Tal modelo representa de forma mais realista o veículo físico, possuindo todas as definições de formulação dos elementos; controle de tempo, *solver* e *hourglass*; conexões entre componentes; propriedades dos materiais baseadas em referências e artigos; condições de contorno seguindo os protocolos; contatos entre todo o sistema; pontos de massa e massa distribuída representando os componentes suprimidos; definição do mass scaling para acelerar a solução; geração de dados completa; e inserção do modelo *Dummy* posicionado com seu cinto de segurança apertado.

Figura 50 – Modelo Finalizado (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

5 RESULTADOS

Os resultados do projeto foram divididos nas seguintes seções: resultados preliminares (referentes às Etapas A e B) e resultados completos (referente à Etapa C).

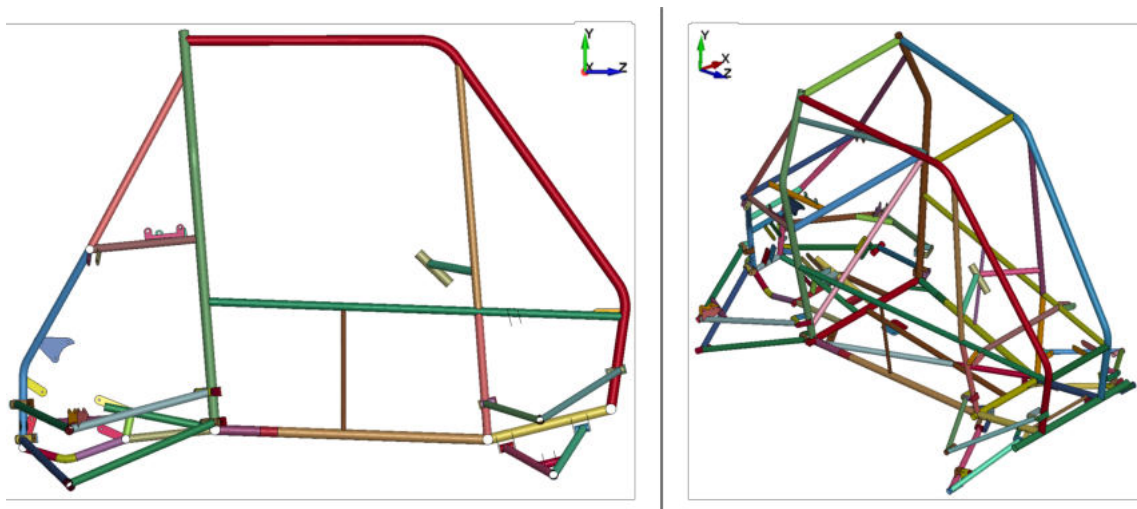
5.1 RESULTADOS PRELIMINARES

Primeiramente, serão apresentados os resultados preliminares do projeto referentes às Etapas A e B. Nesta seção serão explorados os dados de tensões de Von-Mises, deformação efetiva total, deformação plástica efetiva, gráficos de energia e força no contato do veículo com a parede rígida.

5.1.1 Etapa A

Conforme apresentado na Metodologia, na Etapa A o modelo é constituído apenas pelo chassi e braços de suspensão, com massas pontuais referentes ao motor, conjunto de transmissão e piloto. Na Figura 51, o modelo é apresentado em sua forma não-deformada, com a parede rígida ocultada, a fim de comparar com os resultados obtidos.

Figura 51 – Modelo Não-Deformado (Etapa A).

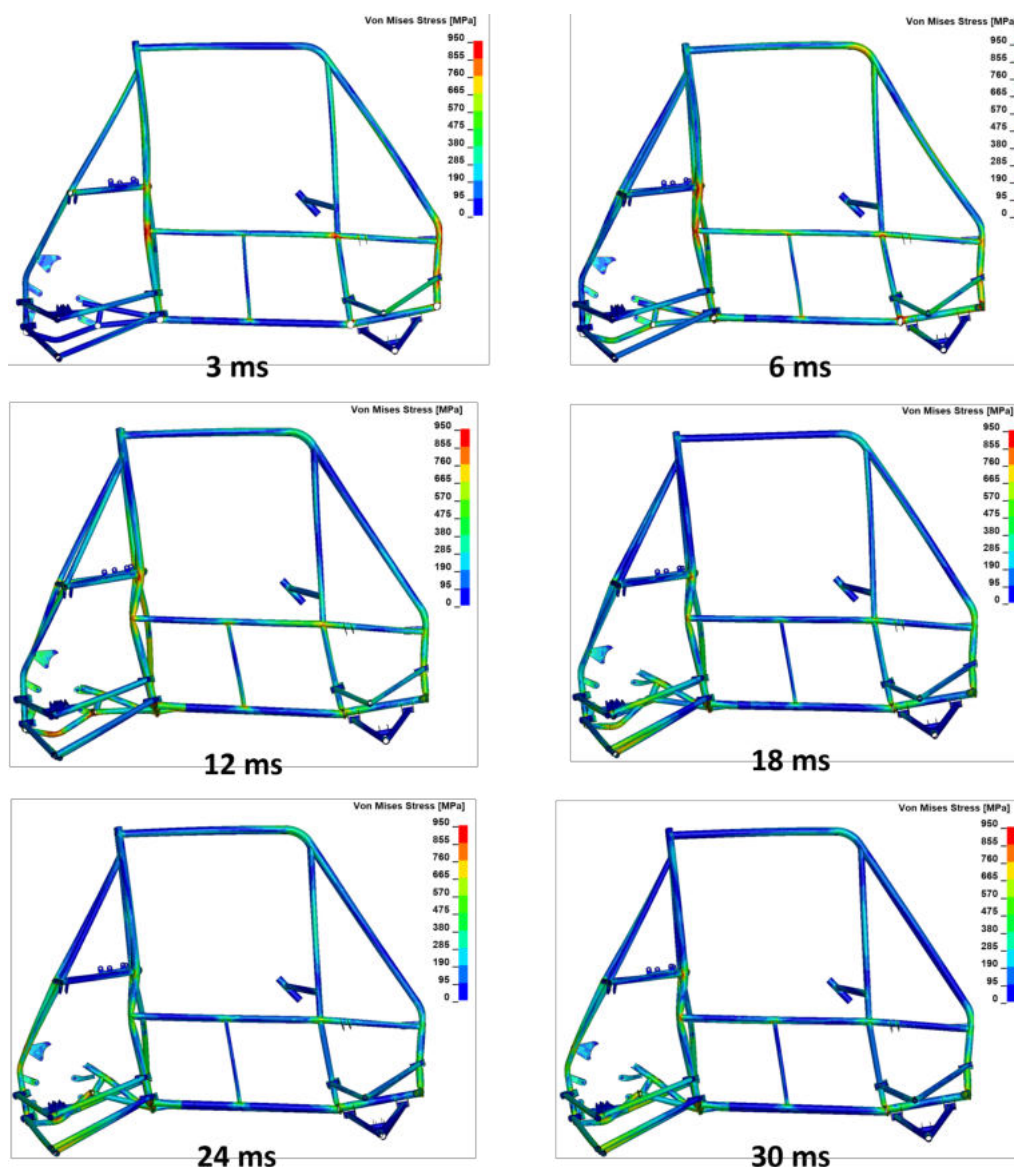


Fonte: O autor (2021)

5.1.1.1 Tensões de Von-Mises

Em vista lateral, na Figura 52 é possível observar a evolução das tensões de Von-Mises ao longo do tempo, onde são apresentados os instantes de tempo iguais a: 3 ms, 6 ms, 12 ms, 18 ms, 24 ms e 30 ms.

Figura 52 – Evolução das Tensões de Von-Mises (Etapa A).

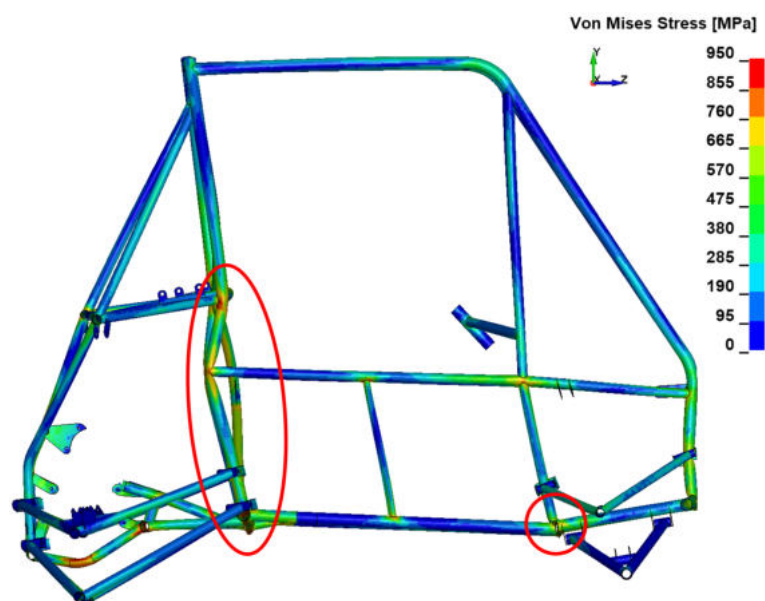


Fonte: O autor (2021)

Vale destacar o instante de 12 ms na Figura 53, onde é possível observar uma deformação acentuada nas regiões destacadas em vermelho, chegando a colapsar um tubo do assoalho. Tal deformação pode ser justificada pelas forças inercias provenientes do piloto que está predominantemente apoiada nos suportes do assoalho, olhais do banco e pontos de ancoragem do cinto de segurança.

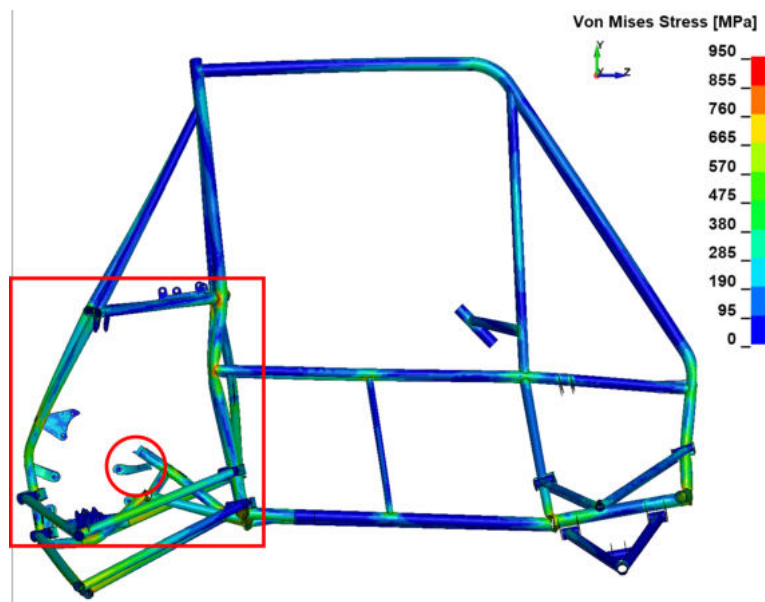
Outro momento que vale salientar é o instante final de 30 ms, vide Figura 54, onde é possível observar a grande deformação na região traseira do componente, como também a falha de um dos olhais do suporte da caixa de redução, o que pode ser justificado pelas forças inerciais advindas dos dois pontos de massa representando o motor e sistema de transmissão do veículo.

Figura 53 – Tensões de Von-Mises no Instante 12 ms (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

Figura 54 – Tensões de Von-Mises no Instante 30 ms (Etapa A).



Fonte: O autor (2021)

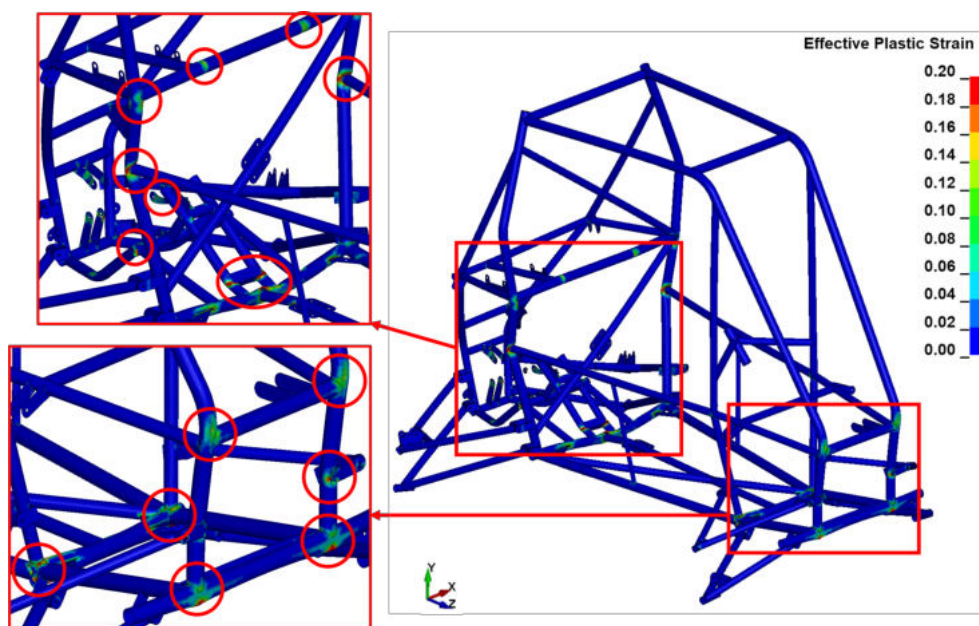
5.1.1.2 Deformação Plástica Efetiva

Em vista isométrica, é mostrada a deformação plástica efetiva do modelo. É possível observar a deformação plástica principalmente com valores entre 10% e 20%, com algumas regiões pontuais chegando a atingir 40%. Nas regiões destacadas em vermelho da Figura 55

pode-se verificar os principais pontos de alta deformação plástica no instante final de 30 ms, os quais são caracterizados por regiões de apoio dos pontos de massa (piloto, conjunto de transmissão e motor), regiões em contato com a parede rígida e nós estruturais do chassi.

Nestas mesmas regiões de alta deformação plástica, também foi verificado trincas no material; altas variações de temperatura, chegando a atingir variações de 60 °C em relação à temperatura ambiente; e efeito de *membrane straining*, chegando a atingir 11% de redução na espessura dos elementos. Com isso, pode-se concluir a importância de se utilizar o modelo constitutivo completo de Johnson-Cook, utilizando parâmetros obtidos em testes realizados em diferentes temperaturas, taxas de deformação e com a consideração de falha do material, como também a relevância em implementar a possibilidade de variar a espessura dos elementos ao longo da análise.

Figura 55 – Deformação Plástica Efetiva no Instante 30 ms (Etapa A).



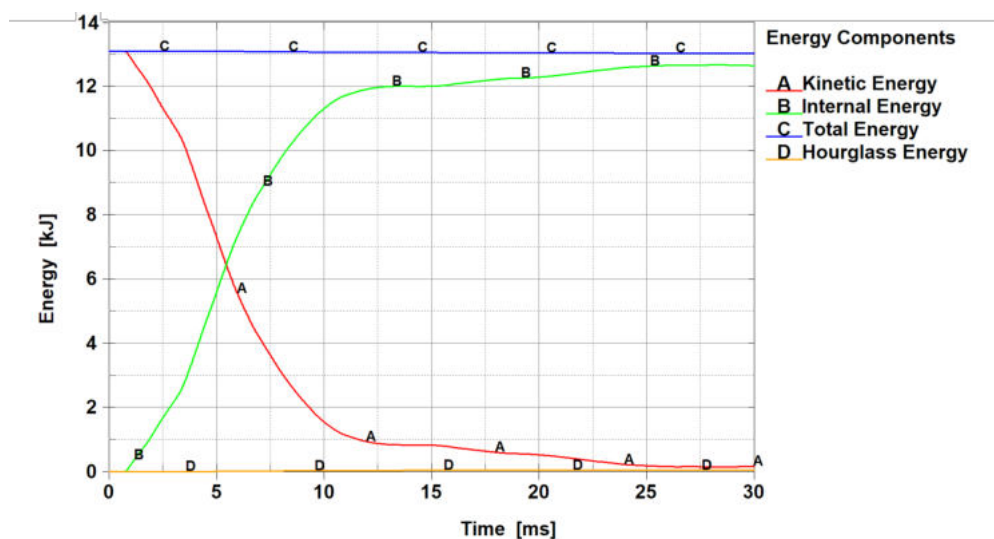
Fonte: O autor (2021)

5.1.1.3 Energias

Na Figura 56 é possível observar o desenvolvimento das componentes de energia total, cinética, interna e *hourglass* ao longo da simulação.

Desde o início, existe a conversão de energia cinética em energia interna, até o instante 12 ms, onde começa a haver uma estabilização das componentes de energia. Ademais, pode-se observar que a energia total é aproximadamente constante, o que significa que não há perdas relevantes no sistema através dos contatos e amortecimentos; e que a energia de *hourglass* é muito inferior à 10% do valor pico de energia interna, conforme recomendado em LSTC (2021).

Figura 56 – Componentes de Energia (Etapa A).

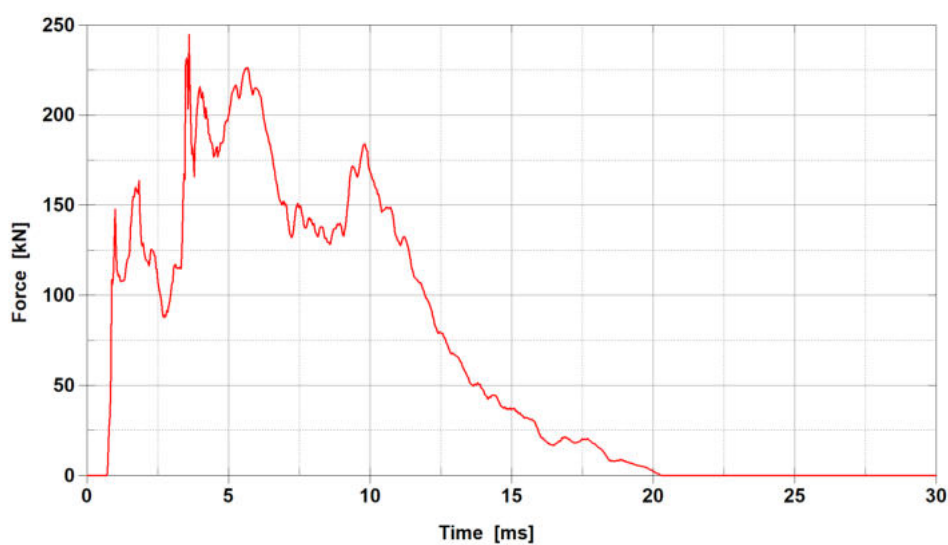


Fonte: O autor (2021)

5.1.1.4 Forças de Contato

Na Figura 57 pode-se verificar a força resultante do contato entre o veículo e a parede rígida. O pico de força ocorre em torno de 3,5 ms da análise com valor igual a aproximadamente 240 kN. O formato do gráfico com diversos picos pode ser justificado pelo impacto sequencial dos nós estruturais da região frontal do chassi com a parede rígida.

Figura 57 – Força Resultante no Contato entre o Veículo e Parede Rígida (Etapa A).



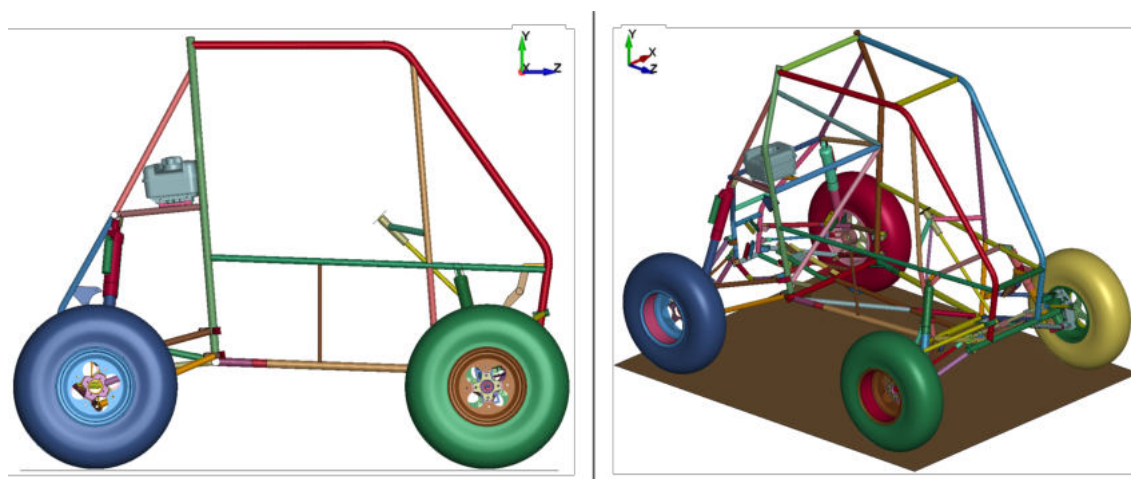
Fonte: O autor (2021)

5.1.2 Etapa B

Conforme exposto na Metodologia, na Etapa B foram acrescentados o restante do conjunto de suspensão, sistema de direção, pedal de freio, pedal de acelerador e tanque de combustível. Na Figura 58, o modelo é apresentado em sua forma não-deformada a fim de comparar com os resultados obtidos. Vale comentar que a parede rígida foi ocultada.

Para os resultados da Etapa B, foram utilizados os mesmos valores mínimos e máximas das escalas nas legendas da Etapa A, a fim de ser possível comparar os resultados de forma direta.

Figura 58 – Modelo Não-Deformado (Etapa B).

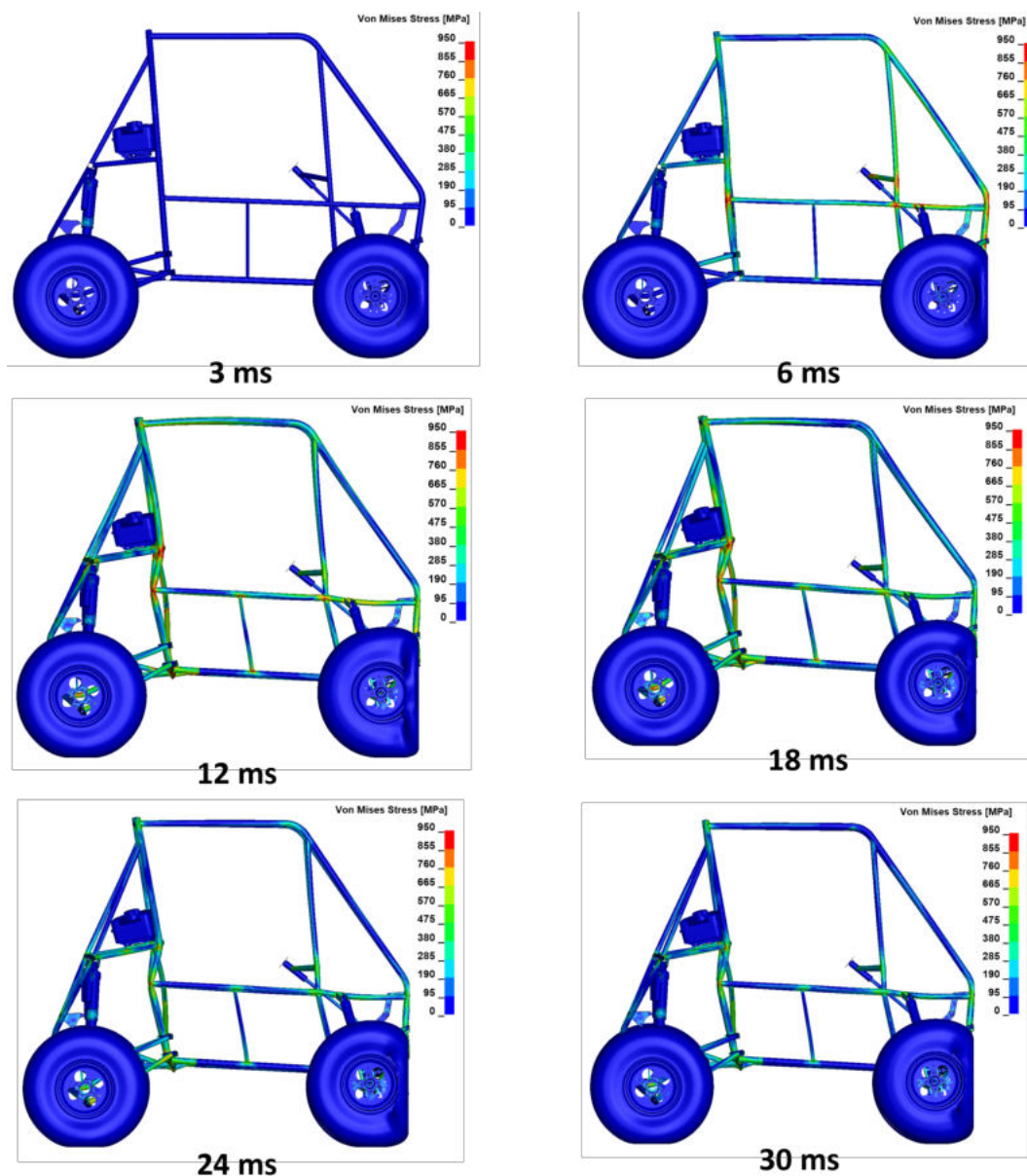


Fonte: O autor (2021)

5.1.2.1 Tensões de Von-Mises

Em vista lateral, na Figura 59 é possível avaliar a progressão das tensões de Von-Mises ao longo do tempo, onde são apresentados os momentos com tempos iguais a: 3 ms, 6 ms, 12 ms, 18 ms, 24 ms e 30 ms.

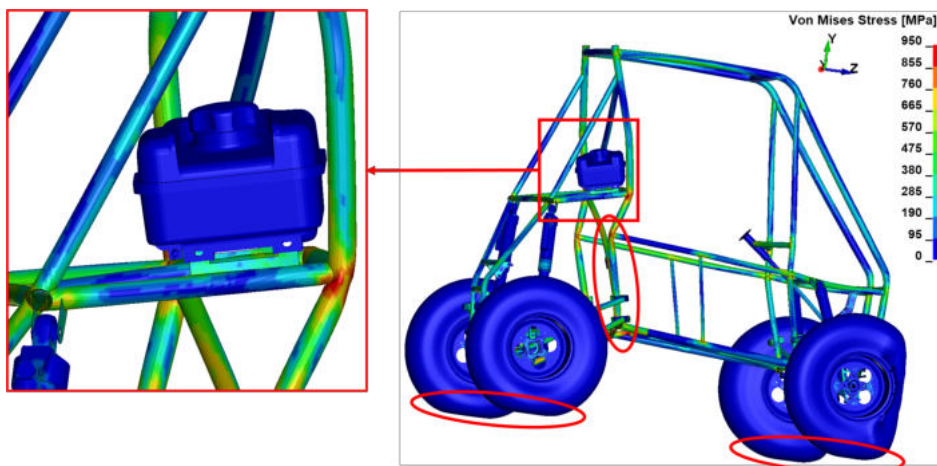
Figura 59 – Evolução das Tensões de Von-Mises (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

Vale ressaltar o instante de pico de deformações em 18 ms na Figura 60, onde além de ser possível realizar as observações já feitas na Etapa A referentes às altas deformações nas regiões de apoio do piloto, motor e conjunto de transmissão, também pode-se avaliar nas regiões destacadas em vermelho a deformação dos pneus contra o terreno, ressaltando a importância da inserção de tal superfície com contato em conjunto com a condição de contorno de gravidade. Ademais, ao aplicar uma ampliação no tanque de combustível, pode-se verificar que o tanque não entra em contato com o chassi, garantindo a segurança relacionada à derramamento de combustível em situação de impacto.

Figura 60 – Tensões de Von-Mises no Instante 18 ms (Etapa B).

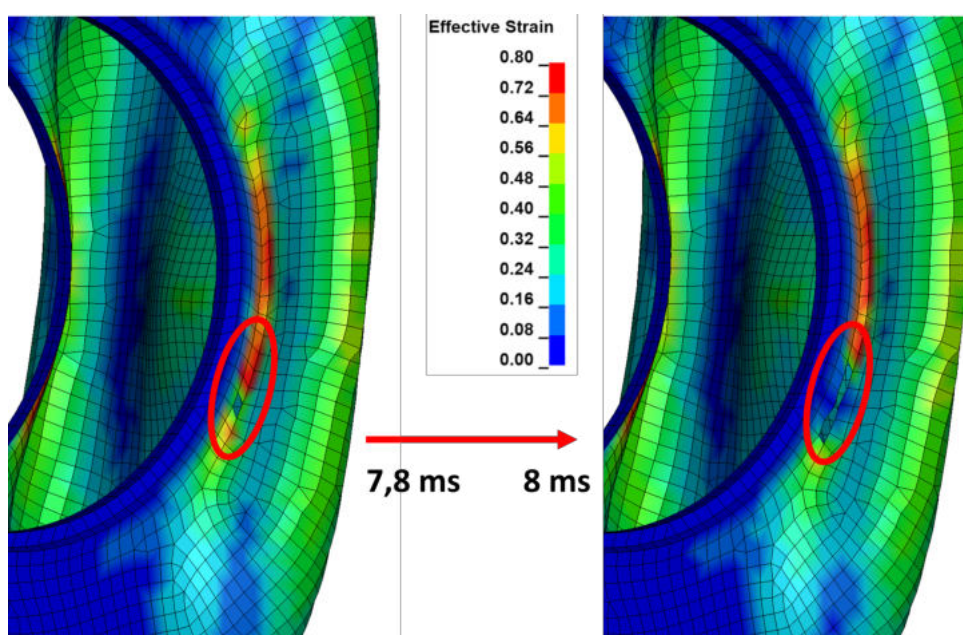


Fonte: O autor (2021)

5.1.2.2 Deformação Efetiva Total

Foi avaliado a deformação efetiva total dos pneus durante o impacto. Vale destacar o intervalo de tempo de 7,8 ms à 8 ms na Figura 61, onde é possível observar na região destacada em vermelho o início da falha do material do pneu e na sequência sua propagação ao longo da região de alta deformação. O valor de deformação efetiva total no momento de falha é próximo à 80%, conforme esperado, tendo em vista que é justamente o ponto de critério de falha inserido.

Figura 61 – Deformação Efetiva Total no Intervalo entre 7,8 ms e 8 ms (Etapa B).

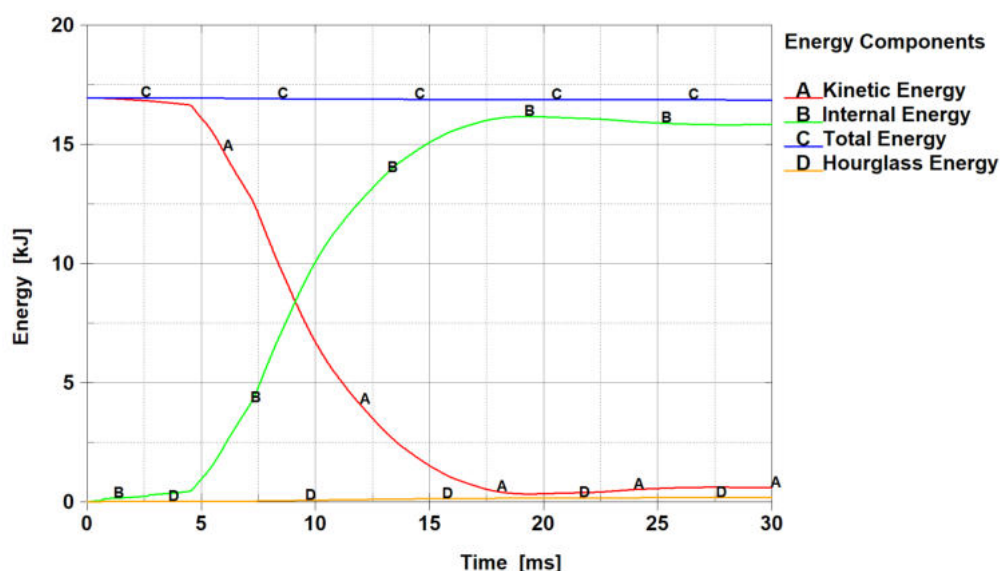


Fonte: O autor (2021)

5.1.2.3 Energias

Na Figura 62 é possível observar o desenvolvimento das componentes de energia total, cinética, interna e *hourglass* ao longo da simulação.

Figura 62 – Componentes de Energia (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

No início da simulação, existe uma baixa conversão de energia cinética em energia interna tendo em vista que apenas os pneus estão em contato e não são capazes de converter muita energia; até o instante em torno de 4,5 ms quando ocorre o contato do chassi com a parede rígida e então inicia-se uma alta conversão de energia cinética em energia interna. Em torno de 18 ms estabelece-se uma estabilização das componentes de energia.

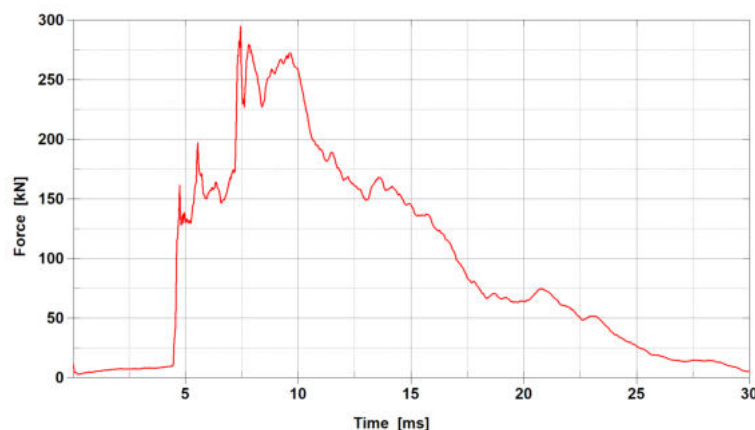
Ademais, pode-se observar que a energia total é aproximadamente constante, o que significa que não há perdas consideráveis no sistema através dos contatos e amortecimentos; e que a energia de *hourglass* é muito inferior à 10% do valor pico de energia interna, conforme recomendado em LSTC (2021).

5.1.2.4 Forças de Contato

Na Figura 63 pode-se verificar a força resultante do contato estabelecido entre o veículo e a parede rígida. O valor do pico de força é igual a 295 kN e o instante de pico ocorre em torno de 7,5 ms. Quando comparado à Etapa A, o momento tardio de pico é devido a maior distância do chassi para o parede rígida e o valor superior de pico é justamente devido à inércia acrescentada

com os componentes adicionados no modelo. Além disso, até o instante de 4,5 ms, há uma baixa força de contato, justamente por apenas os pneus estarem em contato com a parede rígida.

Figura 63 – Força Resultante no Contato entre o Veículo e Parede Rígida (Etapa B).



Fonte: O autor (2021)

5.2 RESULTADOS COMPLETOS

Os resultados completos são referentes ao modelo desenvolvido na Etapa C. Nesta seção serão apresentados todos os dados relevantes para o atendimento dos objetivos específicos e entendimento detalhado do modelo completo desenvolvido.

Conforme discutido na Metodologia, na Etapa C tem-se o modelo completo do veículo com o *Dummy*. Na Figura 64, o modelo é apresentado em sua forma não-deformada, com a parede rígida ocultada, a fim de comparar com os resultados a serem apresentados. Para os resultados da Etapa C, foram utilizadas as mesmas escalas das Etapas A e B, a fim de ser possível comparar os resultados de forma direta.

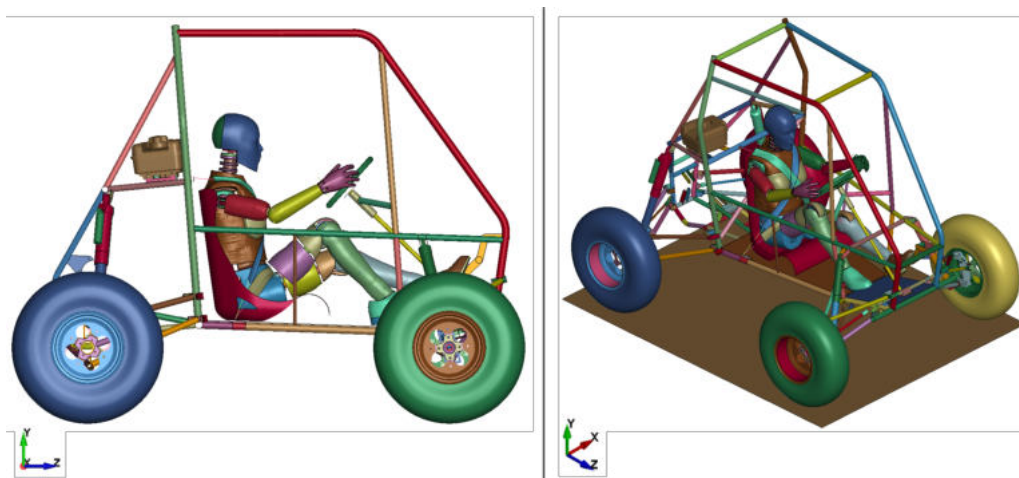
5.2.1 Deslocamentos Resultantes

Em vista lateral, na Figura 65 é possível acompanhar a evolução dos deslocamentos resultantes do veículo e do modelo *Dummy* ao longo do tempo, onde são expostos os instantes com tempos iguais a: 6 ms, 12 ms, 18 ms, 24 ms, 30 ms e 35 ms. É interessante verificar o grande deslocamento do modelo *Dummy* e a evolução da sua posição devido às forças inerciais.

5.2.2 Tensões de Von-Mises

Em vista lateral, na Figura 66 é possível avaliar a evolução das tensões de Von-Mises ao longo do tempo, onde são apresentados os momentos com tempos iguais a: 6 ms, 12 ms, 18 ms,

Figura 64 – Modelo Não-Deformado (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

24 ms, 30 ms e 35 ms.

Vale destacar o instante de pico de deslocamento do piloto em 35 ms na Figura 67, onde é possível verificar as observações já feitas nas Etapa A e B referente às altas deformações na região traseira e pneus destacados em vermelho, como também da preservação do tanque de combustível. A principal diferença ocorre na visualização do habitáculo do piloto, destacado em amarelo, onde pode-se observar que é preservado mesmo no instante crítico da análise.

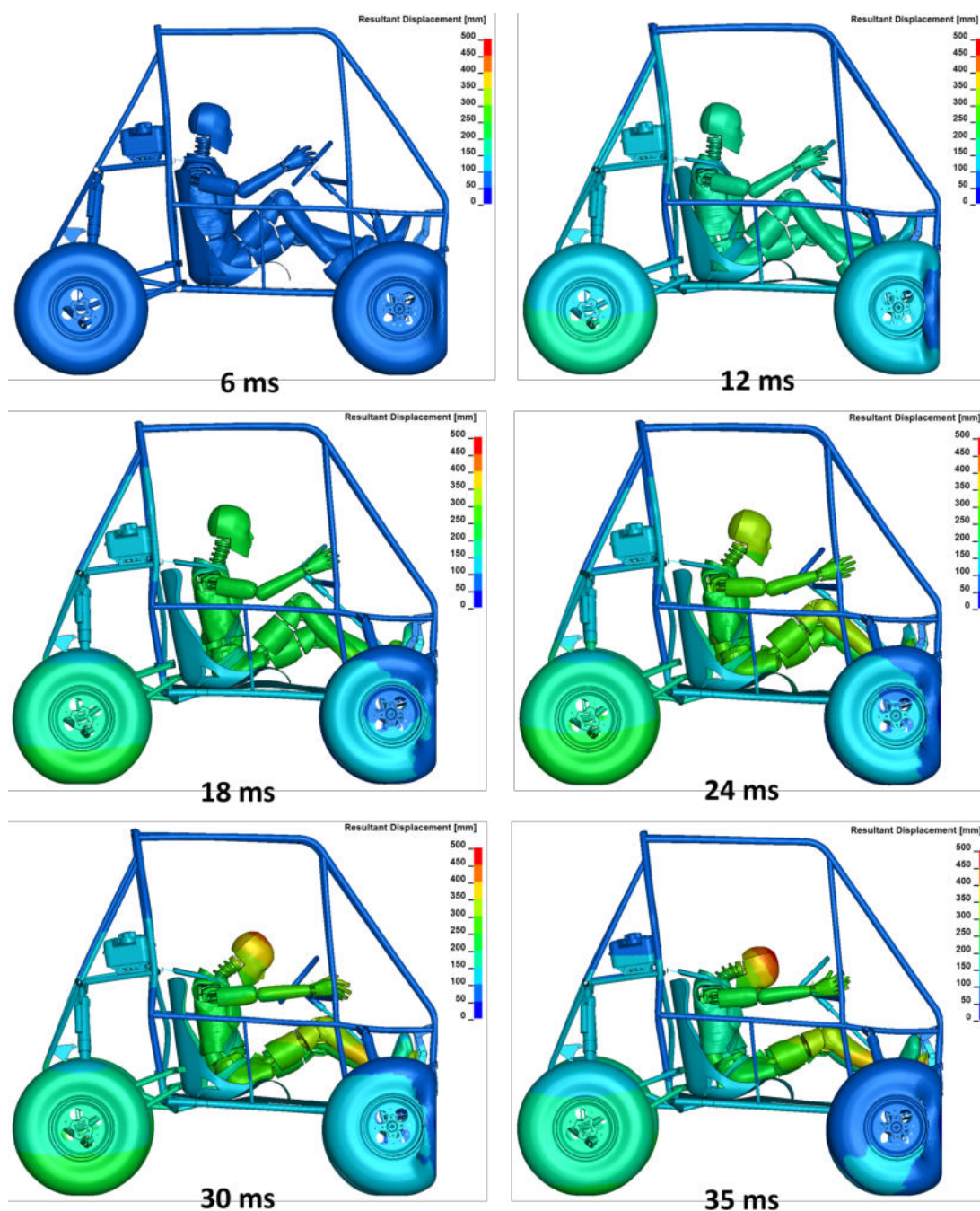
5.2.2.1 Pontos Críticos

Em seguida, foram avaliados os pontos críticos do veículo. Vale realçar que nestas regiões, conforme já comentado durante a Etapa B, é possível observar o efeito de *membrane straining*, onde no modelo da Etapa C chegou a atingir 13% de redução na espessura dos elementos, principalmente nos pontos críticos a serem apresentados abaixo.

Na Figura 68, no instante final de 35 ms, pode-se observar as trincas nos tubos do chassis, como também a falha dos olhais dos braços de suspensão traseiros e dos olhais do assoalho. Foi apresentada a malha na imagem a fim de facilitar a visualização das falhas.

Na Figura 69 foram avaliadas as regiões de alta tensão na dianteira do veículo no instante de 8,4 ms. É interessante observar as regiões de alta tensão nos olhais do amortecedor e braços de suspensão destacados em vermelho, o que significa que parte dos esforços estão sendo absorvidos pelo sistema de suspensão; como também vale realçar as regiões de alta tensão no contato com a parede rígida.

Figura 65 – Evolução dos Deslocamentos Resultantes (Etapa C).

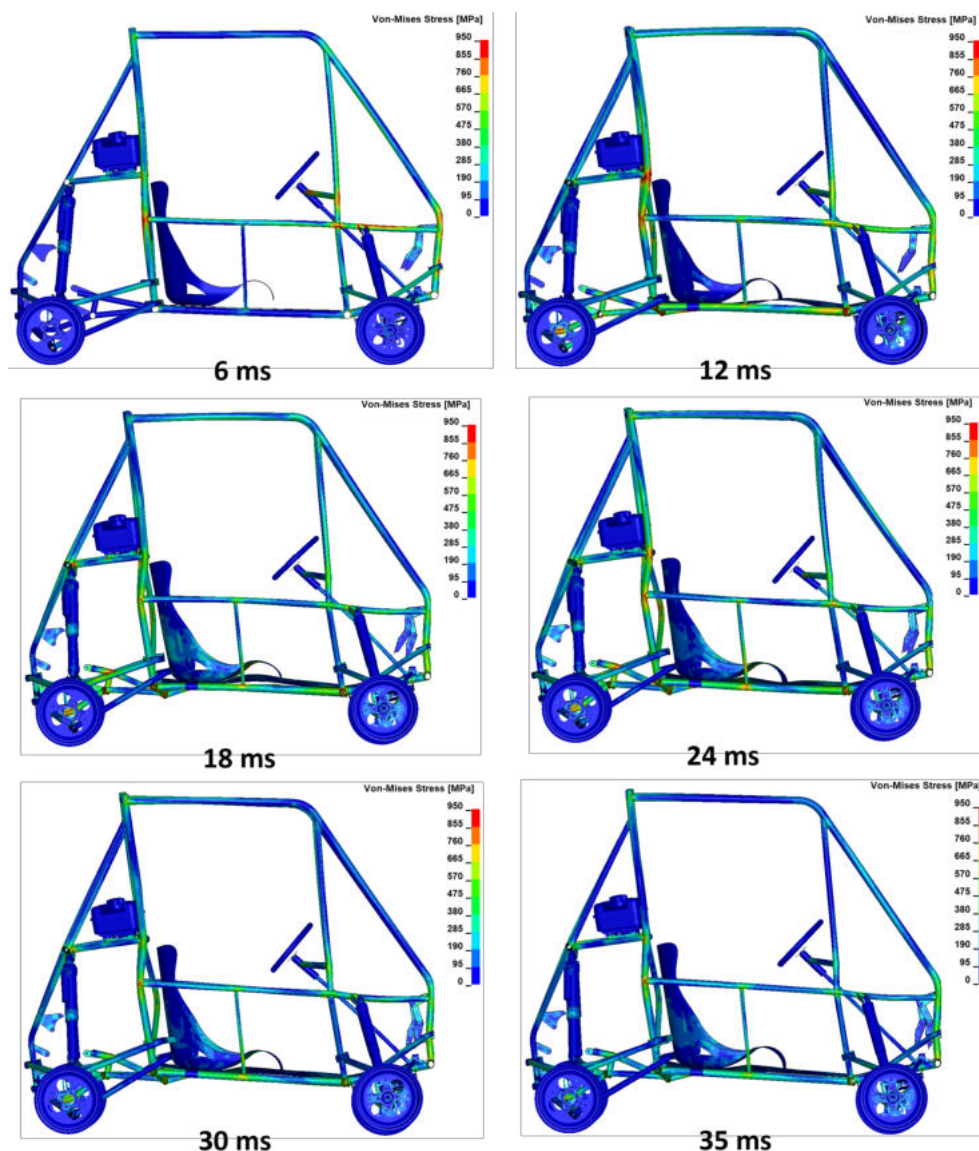


Fonte: O autor (2021)

5.2.3 Deformação Efetiva Total

Com relação à deformação efetiva total, foram avaliados os pneus durante o impacto, de forma análoga ao apresentado nos resultados preliminares da Etapa B. Vale ressaltar o intervalo de tempo de 8 ms à 9,4 ms na Figura 70, onde pode-se verificar na região destacada em vermelho o início da falha do material do pneu e sua propagação ao longo da região de alta deformação e

Figura 66 – Evolução das Tensões de Von-Mises (Etapa C).



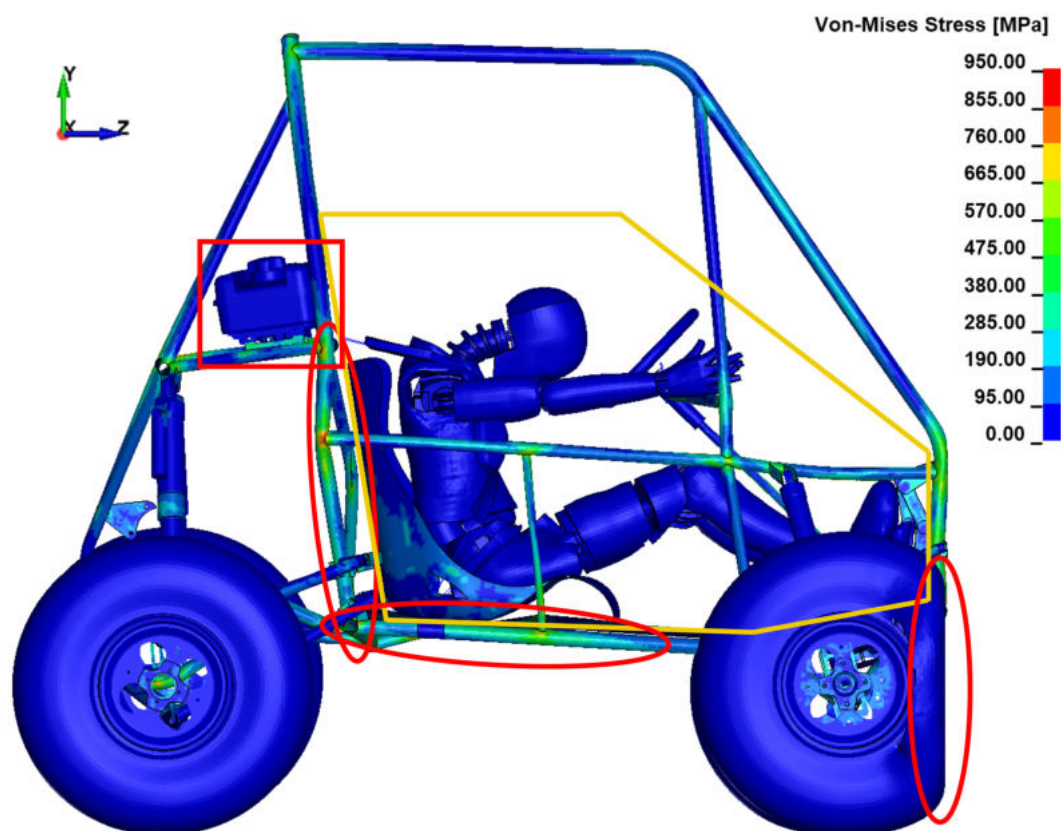
Fonte: O autor (2021)

próximo à região em contato com a roda.

5.2.4 Deformação Plástica Efetiva

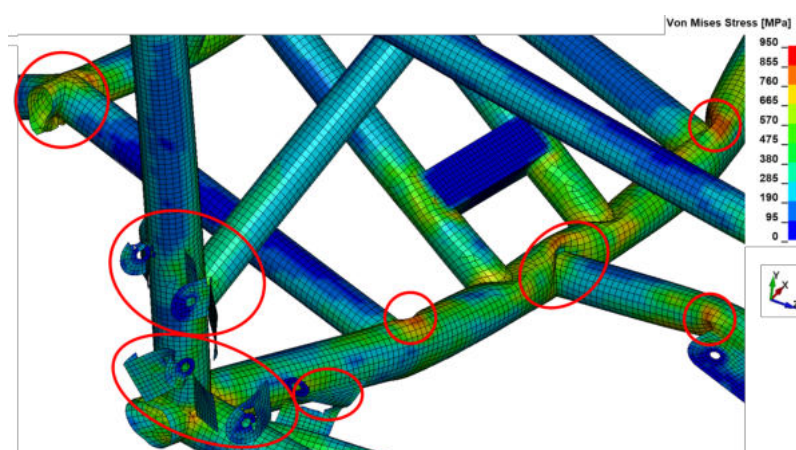
No tangente à deformação plástica efetiva do modelo, é possível observar valores principalmente entre 10% e 20%, com algumas regiões pontuais chegando a atingir 40%. Foi avaliado o instante de 35 ms, onde pode-se destacar nas regiões destacadas em vermelho da Figura 71 os principais pontos de alta deformação plástica, coerentes com algumas regiões de falha comentadas anteriormente.

Figura 67 – Tensões de Von-Mises no Instante 35 ms (Etapa C).



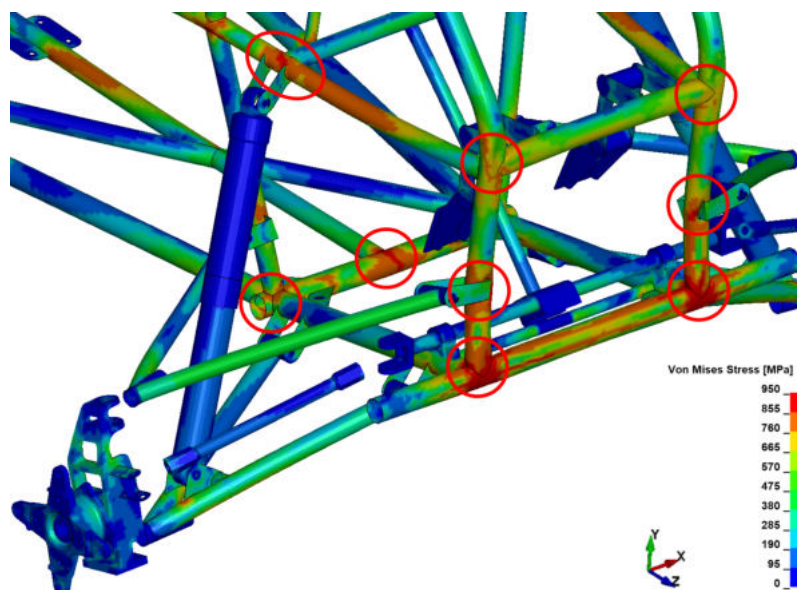
Fonte: O autor (2021)

Figura 68 – Tensões de Von-Mises no Instante 35 ms (Etapa C).



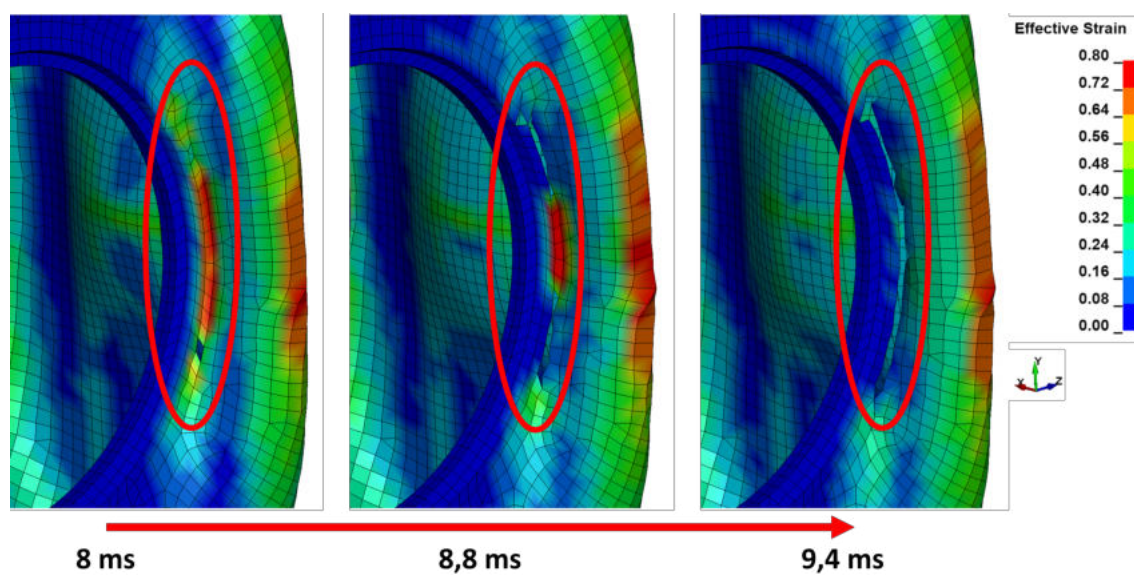
Fonte: O autor (2021)

Figura 69 – Tensões de Von-Mises no Instante 8,4 ms (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

Figura 70 – Deformação Efetiva Total no Intervalo entre 8 ms e 9,4 ms (Etapa C).

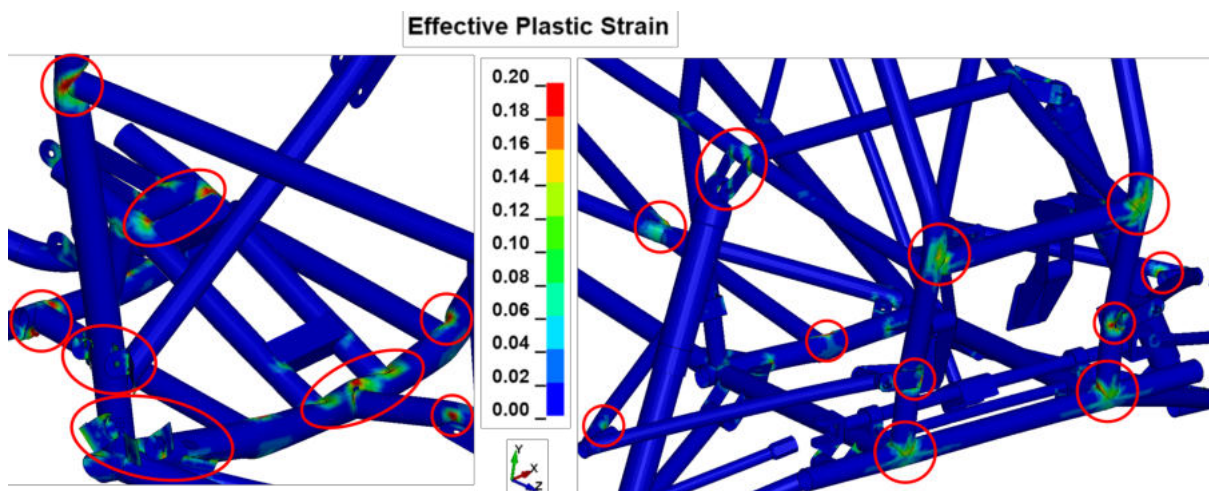


Fonte: O autor (2021)

5.2.5 Diferença de Temperatura

Durante a deformação do material, parte da energia mecânica é transformada em energia térmica. Devido ao modelo constitutivo de Johnson-Cook utilizado, é possível reproduzir esta variação de temperatura no modelo numérico. Nas regiões destacadas em vermelho da Figura

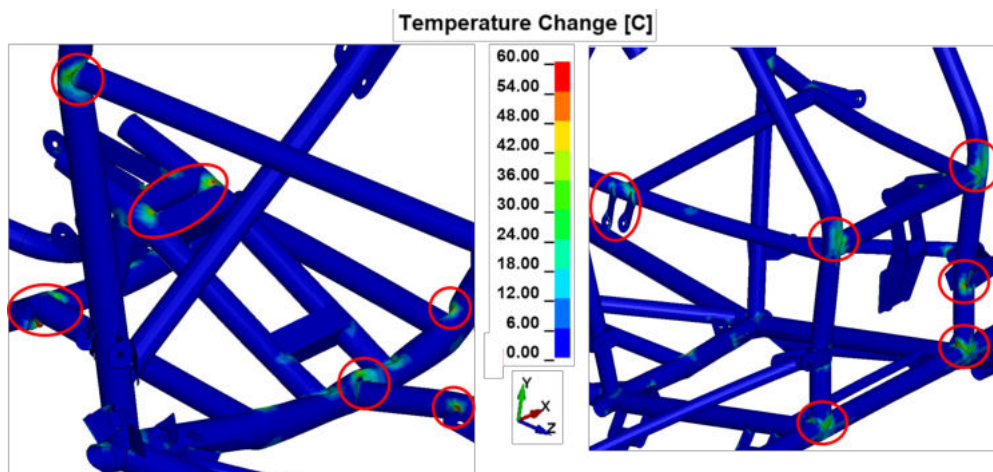
Figura 71 – Deformação Plástica Efetiva no Instante 35 ms (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

72 é possível observar as áreas com altas variações de temperatura que atingem até 60 °C em relação à temperatura ambiente.

Figura 72 – Diferença de Temperatura no Instante 35 ms (Etapa C).



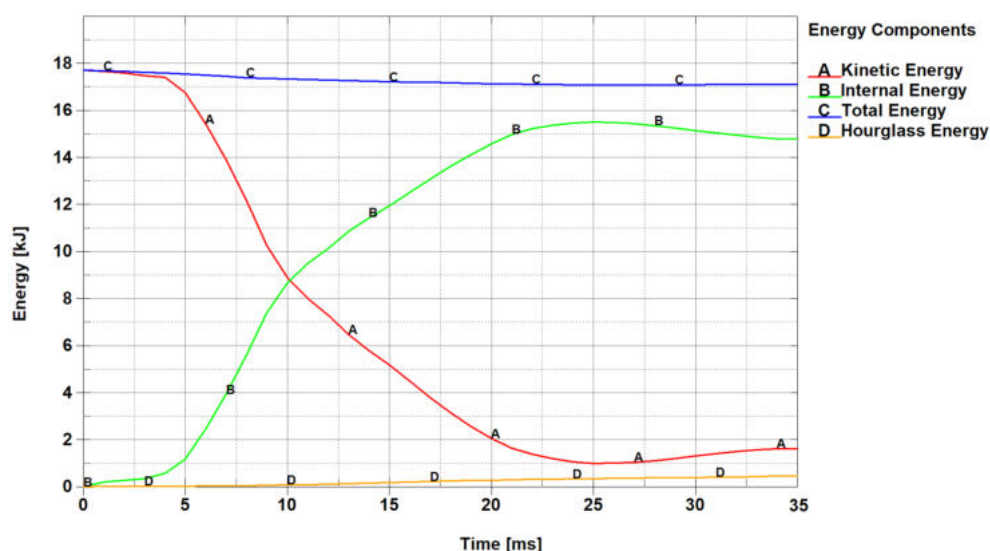
Fonte: O autor (2021)

5.2.6 Energias

Na Figura 73, pode-se avaliar a evolução ao longo do tempo das componentes de energia total, cinética, interna e *hourglass*. O comportamento das curvas é semelhante ao já apresentado na Etapa B, ou seja, no início da simulação, existe uma baixa conversão de energia cinética em energia interna tendo em vista que apenas os pneus estão em contato e não são capazes de

converter uma alta quantidade de energia; até o instante em torno de 4,5 ms quando ocorre o contato do chassi com a parede rígida e então inicia-se uma alta conversão de energia cinética em energia interna. Ademais, pode-se observar que a energia total é aproximadamente constante, o que significa que não há perdas significativas no sistema através dos contatos e amortecimentos.

Figura 73 – Componentes de Energia (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

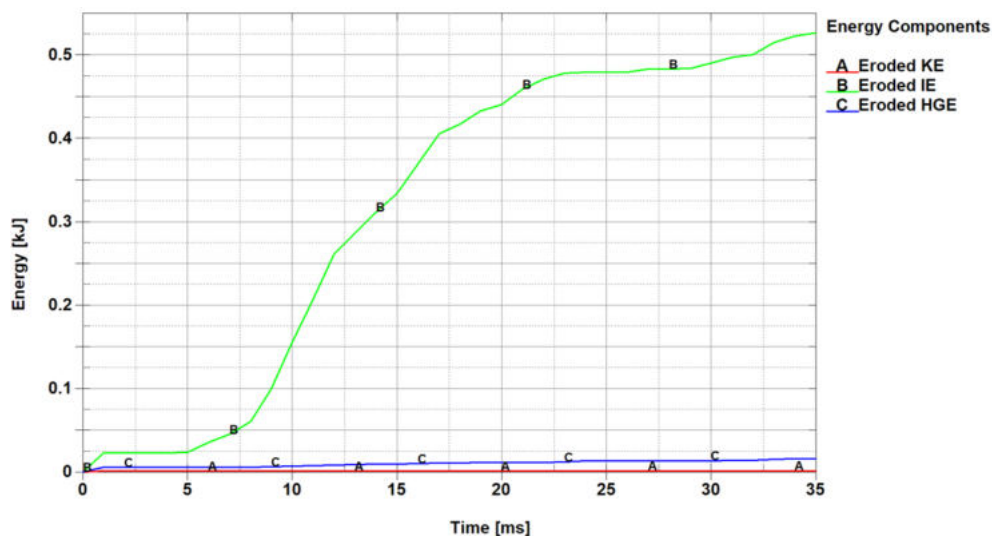
As maiores diferenças com relação à Etapa B estão no momento que ocorre a estabilização das energias, em torno de 23 ms, e no leve aumento da energia de *hourglass* ao longo da análise, o que são justificadas devido à presença do modelo *Dummy* que converte de forma mais lenta a energia devido à sua elasticidade e do próprio cinto de segurança que o restringe; e a necessidade de maiores forças estabilizadoras de *hourglass* para o modelo *Dummy*. Apesar do aumento da energia de *hourglass*, seu valor máximo ainda é inferior a 10% do valor pico de energia interna, estando dentro das recomendações dadas em LSTC (2021).

Uma verificação adicional interessante de se realizar é a avaliação das energias perdidas devido ao fenômeno de erosão numérica, que significa a exclusão de elementos que foram extremamente distorcidos a ponto de atingirem a instabilidade e qualidade jacobiana negativa. Na Figura 74 é possível observar que as componentes de energias perdidas devido ao fenômeno de erosão numérica são desprezíveis, garantindo a conservação de energia do sistema.

5.2.7 Forças de Contato

Na Figura 75 pode-se avaliar a força resultante do contato estabelecido entre o veículo e a parede rígida. Há uma baixa força de contato até 4,5 ms devido ao período de contato exclusivo dos pneus com a parede rígida já comentado. Quando comparado à Etapa B, o momento de

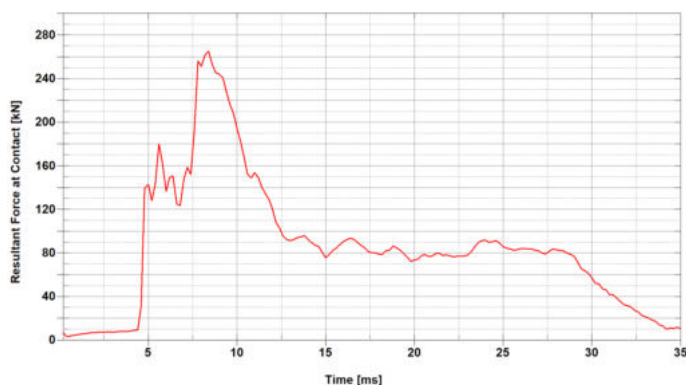
Figura 74 – Componentes de Energia Erodidas (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

pico ocorre com valor igual a 268 kN em 8,1 ms e o perfil da curva é mais suave, o que pode ser justificado pelo fato de o modelo *Dummy* com o cinto de segurança reduzir a rigidez global instantânea do sistema no momento crítico devido à sua flexibilidade que suaviza o impacto.

Figura 75 – Força Resultante no Contato entre o Veículo e Parede Rígida (Etapa C).

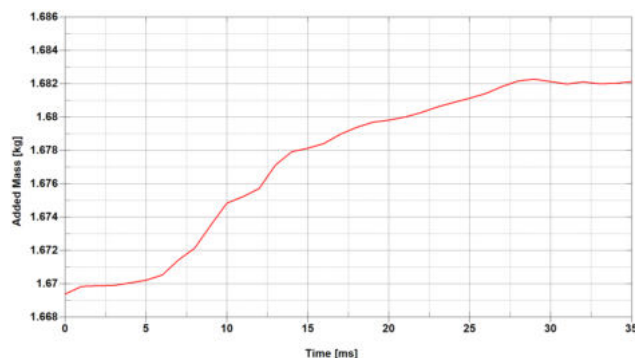


Fonte: O autor (2021)

5.2.8 Massa Adicionada

Na Figura 76 pode-se avaliar a massa adicionada ao modelo devido à utilização do *Mass Scaling*. Foi verificado um valor máximo igual a aproximadamente 1,682 kg, o que representa menos que 1,5% da massa total do veículo, significando que o *Mass Scaling* foi utilizado de forma adequada e está dentro das recomendações dadas em LSTC (2021).

Figura 76 – Massa Adicionada (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

5.2.9 Avaliação do *Dummy*

Para realizar a avaliação de lesões no modelo *Dummy*, seguiu-se os critérios apresentados nas páginas 16 e 17 do protocolo (EURO NCAP, 2020), vide Figura 77, onde são apresentadas as tabelas com valores permitidos para o passageiro sem *airbag*.

Figura 77 – Critérios de Lesões.

		Higher limit	Lower limit	Capping limit
Head	HIC15	-	500.00	700.00
	Resultant Acc 3msec exceedance	g	72.00	80.00
		Higher limit	Lower limit	Capping limit
Neck	Shear	kN	1.20	1.95
	Tension	kN	1.70	2.62
	Extension	Nm	36.00	49.00
		Higher limit	Lower limit	Capping limit
Chest	Compression	mm	18.00	42.00*
	Viscous Criterion	m/s	0.50	1.00
		Higher limit	Lower limit	Capping limit
Femur	Femur compression	kN	2.60	6.20
				NA

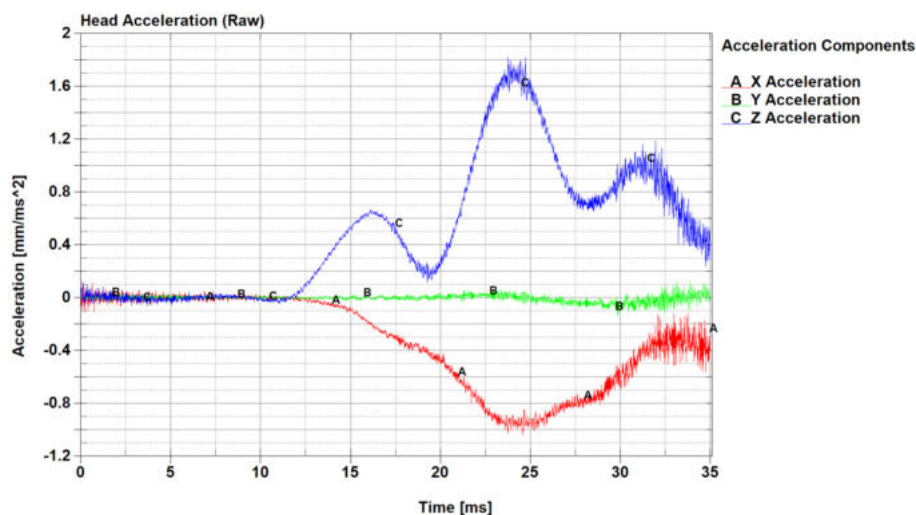
Fonte: Páginas 16 e 17 do Protocolo (EURO NCAP, 2020)

Na geração de alguns dados, foi utilizado o Filtro SAE de Passa-Baixa 108 Hz, conforme apresentado em SAE INTERNATIONAL (2014), e cálculo algébrico de vetor resultante. Os efeitos destas manipulações apenas serão apresentados no tratamento de dados das componentes de aceleração na cabeça do modelo *Dummy* à título de esclarecimento. No restante dos dados que tais tratamentos forem utilizados, apenas serão apresentados os resultados finais prontos.

5.2.9.1 Cabeça

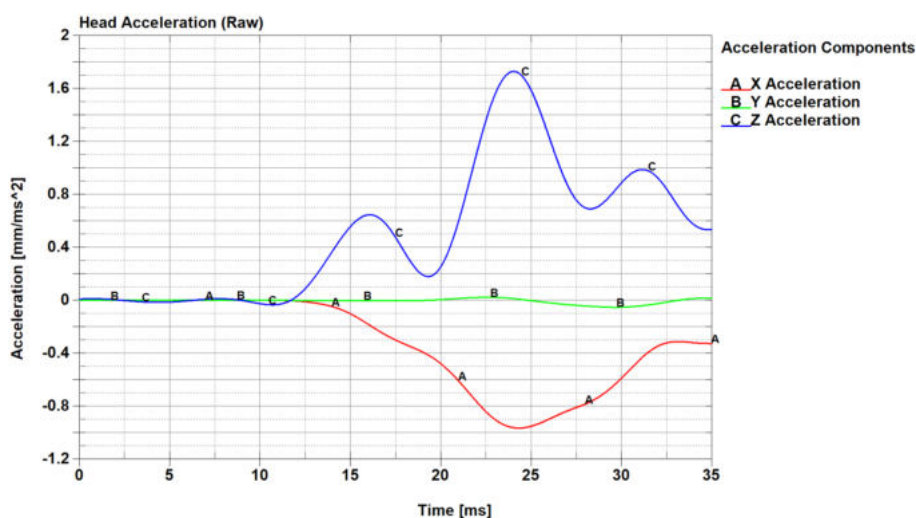
Primeiramente, na Figura 78 é possível avaliar os dados originais das componentes de aceleração na cabeça do modelo *Dummy*, onde após a utilização do filtro SAE, foram obtidas as componentes de aceleração filtradas, vide Figura 79.

Figura 78 – Componentes de Aceleração Originais na Cabeça do Modelo *Dummy* (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

Figura 79 – Componentes de Aceleração Filtrados na Cabeça do Modelo *Dummy* (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

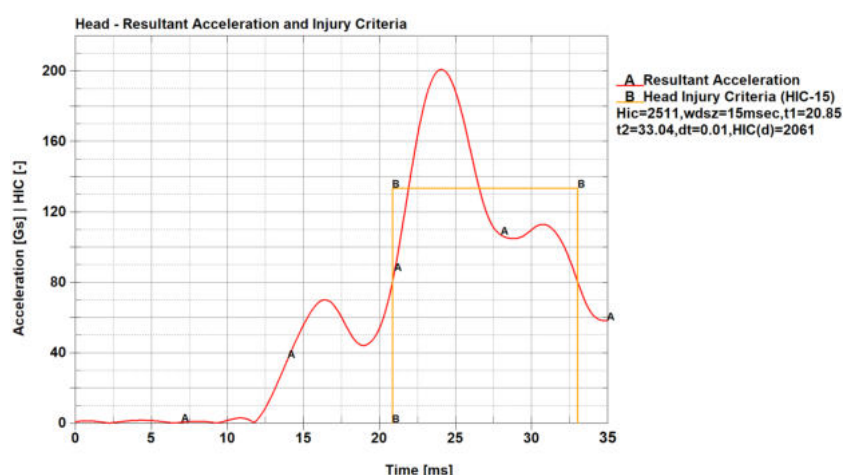
Em seguida, foi calculado o vetor resultante das três acelerações e transformado em unidades de G (aceleração da gravidade). Por fim, foi determinado o Critério de Traumatismo Craniano (HIC, do inglês *Head Injury Criteria*). O HIC é uma medida de probabilidade de ocorrer o traumatismo craniano decorrente de um impacto, onde são avaliados os efeitos do

pico de aceleração e da duração do evento, o que significa que grandes acelerações podem ser toleradas por curtíssimos períodos de tempo. Para o seu cálculo, é utilizada a Equação 5.1, onde t_1 e t_2 são os tempos inicial e final (geralmente é utilizado um intervalo de 15 ms) escolhidos para maximizar o HIC e a é a aceleração medida em G.

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left[(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2,5} \right]. \quad (5.1)$$

Com isso, foi obtido a Figura 80, onde são apresentadas a aceleração resultante sentida na cabeça do modelo *Dummy* e o critério HIC-15.

Figura 80 – Aceleração Resultante e HIC-15 na Cabeça do Modelo *Dummy* (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

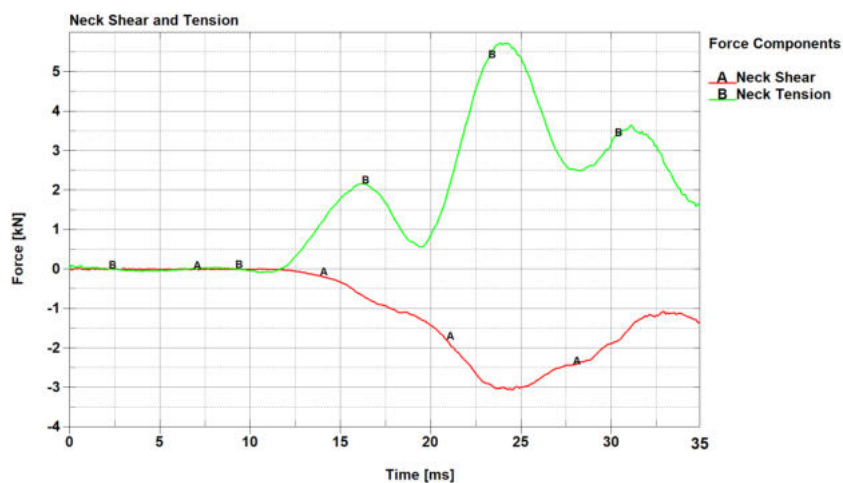
A partir dos resultados, pode-se observar que o valor pico de aceleração sentida na cabeça do modelo *Dummy* é igual a 200 G, o que significa um valor 2,5 vezes superior ao limite estabelecido pelo protocolo Euro NCAP (2020). Com relação ao HIC-15, foi verificado um valor igual a 2511, o que consiste em um valor 3,58 vezes superior ao estabelecido pelo protocolo Euro NCAP (2020).

5.2.9.2 Pescoço

Com relação às forças sentidas no pescoço do modelo *Dummy*, vide Figura 81, foi verificado uma força de cisalhamento igual a -3 kN, o que significa um valor 1,54 vezes superior ao limite estabelecido pelo protocolo Euro NCAP (2020); e força de tração igual a $5,8$ kN, o que constitui um valor 2,21 vezes superior ao limite estabelecido pelo protocolo Euro NCAP (2020).

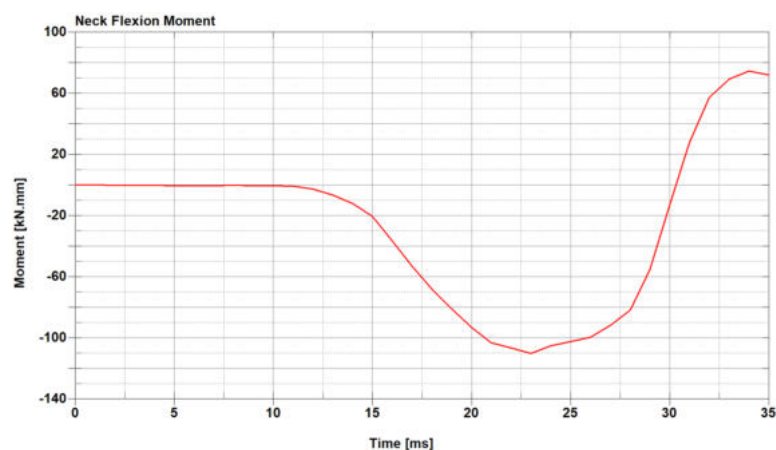
Sobre o momento de flexão do pescoço, foi aplicado o filtro SAE de passa-baixa, sendo obtido a Figura 82, onde foi verificado um valor igual a -110 kN mm, o que significa um valor 2,24 vezes superior ao estabelecido pelo protocolo Euro NCAP (2020).

Figura 81 – Forças de Cisalhamento e Tração no pescoço do Modelo *Dummy* (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

Figura 82 – Momento de Flexão no Pescoço do Modelo *Dummy* (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

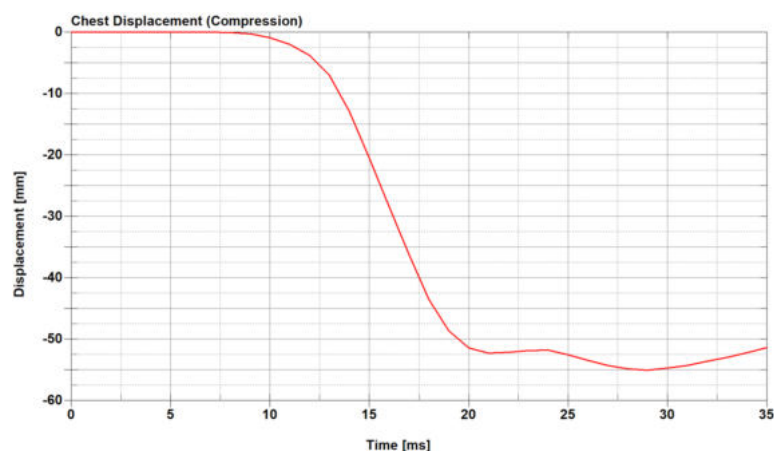
5.2.9.3 Tórax

No tangente à deflexão compressiva do tórax do modelo *Dummy*, vide Figura 83, foi avaliado um valor igual a -55 mm, o que significa um valor 1,31 vezes superior ao estabelecido pelo protocolo Euro NCAP (2020).

5.2.9.4 Fêmur

A respeito da força de compressão no fêmur do modelo *Dummy*, foi aplicado o filtro SAE de passa-baixa, sendo obtido a Figura 84, onde foram verificados valores iguais a 2,26 kN e 2,86 kN nos fêmures esquerdo e direito, respectivamente. Vale destacar que o ambos os fêmures

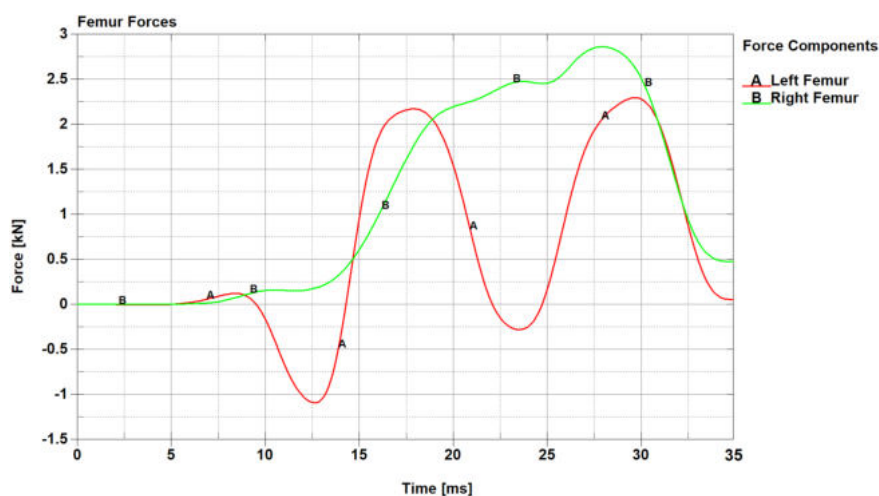
Figura 83 – Deflexão Compressiva no Tórax do Modelo *Dummy* (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

estão dentro do limite estabelecido no protocolo Euro NCAP (2020).

Figura 84 – Força Compressiva nos Fêmures do Modelo *Dummy* (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

5.2.10 Discussão

Para as lesões referentes à cabeça, pescoço e tórax, foram observados valores em torno de 1,3 à 3,6 vezes superior ao permitido pelo protocolo Euro NCAP (2020), o que era esperado, tendo em vista que um veículo da categoria Baja SAE é muito mais rígido do que um veículo convencional. Isto ocorre principalmente devido aos seguintes fatores: o material utilizado ser aço em todo o chassis; geometria tubular treliçada conforme regulamento da competição; ausência de

um projeto de amortecimento controlado de impacto; e ausência de uma região rígida o suficiente para apoiar os pés do piloto e redistribuir os esforços.

A partir destes valores observados, é de se esperar que o piloto sofra lesões moderadas a graves durante o impacto frontal (EURO NCAP, 2020). Contudo, vale destacar que esta alta rigidez do veículo Baja é desenvolvida desta forma pelo regulamento da competição devido ao fato de a prioridade durante acidentes ser preservar o habitáculo do piloto, o que foi validado nos resultados. Vale realçar também que não foram considerados os restritores de pescoço e capacete do piloto, os quais devem contribuir no sentido de reduzir os riscos de lesões na cabeça devido à maior inércia proporcionada e restrição de movimentos.

Com relação às lesões referentes aos fêmures, foram observados valores aceitáveis pelo protocolo Euro NCAP (2020). Inclusive, com relação ao fêmur esquerdo, os valores estão abaixo do limite mínimo estabelecido pelo protocolo, demonstrando que os esforços no piloto poderiam ser redistribuídos para a perna esquerda, contudo, devido à baixa rigidez do pedal de freio (mesmo restrito no olhal do chassis), tal situação não é concretizada. Além disso, vale destacar que os acidentes típicos no contexto das competições são entre veículos, o que, quando comparado ao choque contra uma parede rígida, traria uma absorção da energia de impacto de forma mais suave, reduzindo o risco de lesões ao piloto.

6 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento do trabalho, pôde-se contribuir na compreensão da segurança do veículo baja para os alunos que pilotam o carro durante as competições. Nessa perspectiva, através da análise por elementos finitos via dinâmica explícita, foi definido a integridade do veículo e preservação do piloto em situação crítica de impacto frontal.

O desenvolvimento da metodologia de acordo com o procedimento de testes para impacto frontal do programa europeu de segurança automotiva foi fundamental para garantir a consistência dos resultados de acordo com protocolos bem estabelecidos no mercado, como também possibilitar a avaliação dos dados de acordo com critérios compatíveis. Ademais, o estudo profundo dos manuais técnicos e materiais de treinamento da Ansys e LSTC foram importantes a fim de garantir a elaboração de uma metodologia numericamente robusta, acurada e precisa, como também definir os pontos a serem considerados na análise, a exemplo da inserção do modelo *Dummy* e cinto de segurança; não linearidades (geométrica, materiais e contatos); modelo constitutivo de *Johnson-Cook* (com critério de falha e viscoplasticidade); formulação dos elementos adequados; inserção dos pontos de massa; entre outros.

Com relação à divisão da análise em etapas, a evolução na complexidade do modelo ao longo das etapas foi essencial na compreensão detalhada do fenômeno de impacto frontal estudado. Na progressão da Etapa A para Etapa B, foi possível observar a falha nos pneus dianteiros; os esforços nos braços de suspensão, com a falha de alguns olhais na região traseira; a integridade conservada do tanque de combustível; e a redistribuição de esforços dos olhais da caixa de redução, que na Etapa A haviam falhado, para o cubo de roda traseiro devido à presença dos semi-eixos.

Enquanto que no avanço da Etapa B para Etapa C, foi possível observar uma menor deformação e preservação do habitáculo do chassi, principalmente devido à presença do modelo *Dummy* e assoalho; como também foi possível determinar a incidência de lesões nas regiões da cabeça, pescoço e tórax, e ausência de lesões na região das pernas do piloto a partir dos critérios estabelecidos pelos protocolos.

Por conseguinte, no modelo completo da Etapa C, foi previsto o comportamento dinâmico do veículo e piloto com um nível mais elevado de acurácia, precisão e qualidade, quando comparado às etapas preliminares do trabalho e referências bibliográficas atuais que foram avaliadas inicialmente.

6.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS E MELHORIAS

Para trabalhos futuros, é interessante avaliar duas principais estratégias de melhorias deste trabalho, sendo a primeira em nível experimental de validação e a segunda em considerações adicionais no modelo numérico.

No tocante à avaliação experimental, seria de extremo valor a validação de uma situação de impacto frontal de um protótipo da categoria Baja SAE com um *Dummy*, ambos instrumentados. Com isso, seria possível certificar a qualidade dos resultados numéricos e replicar a metodologia para outros veículos de competição, a exemplo da categoria Fórmula SAE. Como sugestão, poderia-se utilizar um chassis aposentado de alguma equipe com componentes sem fins úteis. Na ausência de alguns componentes para serem utilizados no teste, poderia-se realizar a aproximação da massa e rigidez destas regiões, a exemplo de utilizar um tarugo de alumínio usinado a fim de representar o amortecedor completo. No tangente à instrumentação, a utilização de acelerômetros e extensômetros em regiões estratégicas do veículo e *Dummy*, aliado a uma câmera de alta velocidade, seriam suficientes no levantamento de dados relevantes.

Com relação às considerações adicionais no modelo numérico, poderia-se adicionar a solda com sua zona termicamente afetada nas adjacências; a retirada dos pontos de massa e representação do motor e sistema de transmissão de forma integral; a adição do acabamento e sistema de freio do veículo, que apesar de possuírem baixa massa e rigidez, podem influenciar levemente nos resultados; a consideração da inércia rotativa devido ao giro de alguns componentes, a exemplo da CVT, rodas, pneus e eixos; e a inclusão do capacete, restritor de pescoço e restritores de braço no piloto que poderiam aliviar as lesões no *Dummy*. Por fim, seria interessante avaliar o modelo completo em diferentes situações de acidente, a exemplo de impacto traseiro, impacto frontal contra parede deformável com *offset*, capotamento, impacto lateral, entre outros.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **Ansys technical documentation**. 2021 r1. ed. [S.l.], 2021. Citado 7 vezes nas páginas 23, 33, 34, 35, 36, 46 e 60.
- ANSYS. **Ansys Training Material (Ansys Learning Hub)**. [S.l.], 2021. Citado 9 vezes nas páginas 19, 23, 28, 29, 30, 32, 49, 56 e 60.
- Ansys Granta. **Granta Software Database**. 2021. Data compiled by the Granta Design team at Ansys, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 82.
- BARANOWSKI, P.; JANISZEWSKI, J.; MAŁACHOWSKI, J. Tire rubber testing procedure over a wide range of strain rates. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, Polish Society of Theoretical and Applied Mechanics, p. 727, abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.55.2.727>. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 76.
- BEER, F. P. et al. **Mecânica dos Materiais**. 5a. ed. New York, EUA: Mc Graw Hill, 2011. Citado na página 44.
- BENTO, G. C. O. et al. Projeto mecânico e análise estrutural via simulação numérica por elementos finitos de um chassi tipo baja sae. In: **19º Congresso Nacional de Iniciação Científica**. [S.l.]: Centro Universitário Heraldo Di Biase - UGB, 2016. Citado na página 24.
- BHARDWAJ, S.; SHARMA, R. C.; SHARMA, S. K. Analysis of frontal car crash characteristics using ANSYS. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier BV, v. 25, p. 898–902, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.358>. Citado na página 21.
- CANUT, F. A. Análise estrutural do chassi de um veículo fórmula sae pelo método de elementos finitos. In: **Trabalho de Conclusão de Curso**. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2014. Citado na página 25.
- CHOW, C. L.; TAI, W. H. Damage based formability analysis of sheet metal with LS-DYNA. **International Journal of Damage Mechanics**, SAGE Publications, v. 9, n. 3, p. 241–254, jul. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/105678950000900303>. Citado na página 33.
- COMSOL. **The Finite Element Method (FEM)**. 2017. <https://br.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>. Acessado em: 31 de julho de 2021. Citado na página 27.
- CONSTANTINO, C. Finite element approach of stress wave problems. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, American Society of Civil Engineers, v. 93, p. 153–176, 1967. Citado na página 32.
- DASNT. **10 principais causas de mortalidade no Brasil, ambos os sexos, todas as idades, em 2017**. 2017. <http://svs.aids.gov.br/dantps/centrais-de-conteudos/paineis-de-monitoramento/mortalidade/gbd-brasil/principais-causas/>. Acessado em: 17 de maio de 2021. Citado na página 19.
- DESPRES, B. **Numerical Methods for Eulerian and Lagrangian Conservation Laws**. 1a. ed. Paris, France: Birkhauser, 2017. Citado na página 35.
- ESSS. **Engenharia assistida por computador: o que é e como funciona?** 2014. <https://www.esss.co/blog/engenharia-assistida-por-computador-o-que-e-e-como-funciona/>. Acessado em: 27 de março de 2021. Citado na página 20.

Estadão. **Mortes no Trânsito: Tráfego brasileiro mata 1 pessoa a cada 15 minutos**. 2020. <<https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-com-seguranca/mortes-no-transito-brasileiro-mata-1-pessoa-a-cada-15-minutos/>>. Acessado em: 17 de maio de 2021. Citado na página 19.

EURO NCAP. **FULL WIDTH FRONTAL IMPACT TESTING PROTOCOL**. [S.l.], 2019. Version 1.2. Citado 5 vezes nas páginas 23, 58, 65, 66 e 80.

EURO NCAP. **ASSESSMENT PROTOCOL – ADULT OCCUPANT PROTECTION**. [S.l.], 2020. Version 9.1.2. Citado 6 vezes nas páginas 23, 104, 106, 107, 108 e 109.

FILHO, A. A. **Elementos finitos, a base da tecnologia CAE**. 6a. ed. São Paulo, Brasil: Érica | Saraiva, 2018. Citado na página 21.

FURATO, F. F. A. L.; GUIMARÃES, T. A. Uma metodologia de análise e projeto de um chassi para um veículo mini baja de competição. In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. [S.l.]: ABCM, 2016. Citado na página 24.

GULER, M. A. et al. The influence of seat structure and passenger weight on the rollover crashworthiness of an intercity coach*. **International Journal of Crashworthiness**, Informa UK Limited, v. 12, n. 6, p. 567–580, dez. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/13588260701485297>>. Citado na página 21.

GUTH, G. A. Análise dinâmica não linear de um chassi de baja sae utilizando a metodologia de elementos finitos. In: **Trabalho de Conclusão de Curso**. [S.l.]: Faculdade Horizontina, 2015. Citado na página 25.

HEINSTEIN, M. W. et al. Contact—impact modeling in explicit transient dynamics. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Elsevier BV, v. 187, n. 3-4, p. 621–640, jul. 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0045-7825\(99\)00342-4](https://doi.org/10.1016/s0045-7825(99)00342-4)>. Citado na página 21.

HOUSSINI, S. E. Front bumper crashworthiness optimization. In: **2006 9th International LS-DYNA Users Conference in Crash/Safety (3)**. 9th International LS-DYNA Users Conference, 2006. Disponível em: <<https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2006/36CrashSafety.pdf>>. Citado na página 33.

IQBAL, M. et al. The characterization and ballistic evaluation of mild steel. **International Journal of Impact Engineering**, Elsevier BV, v. 78, p. 98–113, abr. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.12.006>>. Citado 4 vezes nas páginas 46, 47, 48 e 63.

KANG, S. et al. LS-DYNA belted occupant model. In: **2018 15th International LS-DYNA Users Conference in Occupant Protection**. 15th International LS-DYNA Users Conference, 2018. Disponível em: <<https://www.dynalook.com/conferences/15th-international-ls-dyna-conference/occupant-protection/ls-dyna-r-belted-occupant-model/view>>. Citado 3 vezes nas páginas 82, 83 e 84.

KANG, S.; XIAO, P.; Ford Motor Company. Comparison of hybrid III rigid body dummy models. In: **2009 10th International LS-DYNA Users Conference in Crash/Safety (1)**. 10th International LS-DYNA Users Conference, 2008. Disponível em: <<https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2008/CrashSafety1-1.pdf/view>>. Citado na página 80.

KARTHIKEYAN, M. et al. Investigation on crash analysis of a frontal car bumper. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, Springer Science and Business Media LLC, v. 72, n. 10, p. 2699–2709, jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12666-019-01741-w>>. Citado na página 21.

LSTC. **LS-DYNA Theory Manual**. R12. [S.l.], 2019. Citado 11 vezes nas páginas 23, 32, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 50 e 52.

LSTC. **LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume I**. R12. [S.l.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 60.

LSTC. **LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II - Material Models**. R12. [S.l.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 60.

LSTC. **Dummy, Barrier and Tire Models for Download**. 2021. <https://www.lstc.com/download/dummy_models>. Acessado em: 19 de junho de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 79.

LSTC. **LS-DYNA Training Material (Ansys Learning Hub)**. [S.l.], 2021. Citado 19 vezes nas páginas 23, 31, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 50, 51, 52, 54, 56, 60, 89, 94, 102 e 103.

LU, H. S.; WU, C. T. A grid-based adaptive scheme for the three-dimensional forging and extrusion problems with the efg method. In: **2006 9th International LS-DYNA Users Conference in Metal Forming (2)**. 9th International LS-DYNA Users Conference, 2006. Disponível em: <<https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2006/24MetalForming.pdf/view>>. Citado na página 33.

MEDVEDEV, S. V. Computer modelling of residual welding strains in technological design of welded structures. **Welding International**, Informa UK Limited, v. 16, n. 1, p. 59–65, jan. 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09507110209549491>>. Citado na página 33.

MURKUTE, A. et al. Structural optimization of sae baja car frame. In: **Final Report for MAE-598**. [S.l.]: Arizon State University, 2016. Citado na página 24.

NCAP, E. **Adult Occupant Protection**. 2021. <<https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/>>. Acessado em: 05 de maio de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 55.

NEUMAYER, D.; CHATIRI, M.; HOERMANN, M. Drop test simulation of a cooker including foam packaging and pre-stressed plastic foil wrapping. In: **2006 9th International LS-DYNA Users Conference in Simulation Technology (4)**. 9th International LS-DYNA Users Conference, 2006. Disponível em: <<https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2006/45SimulationTechnology.pdf>>. Citado na página 33.

NOORBHASHA, N. Computational analysis for improved design of an sae baja fram structure. In: **Master of Science Degree in Mechanical Engineering**. [S.l.]: University of Nevada, 2010. Citado na página 25.

NOVERSA, M.; PEIXINHO, N. Numerical simulation of impact behaviour of structures with response adapted to the intensity of shock. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Wiley, v. 44, n. 10, p. 856–860, out. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/mawe.201300053>>. Citado na página 21.

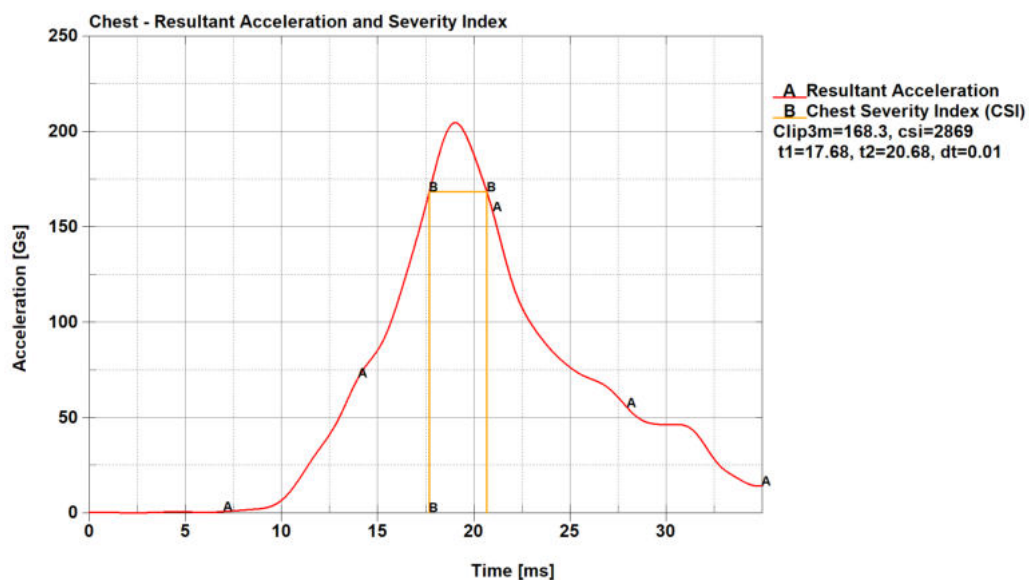
- QUEIROZ, E. N.; LOPES, A. P.; SANTOS, A. A. Análise de impacto frontal em um chassi space frame do tipo mini baja. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**. [S.l.]: Universidade do Estado do Amazonas, 2018. Citado na página 24.
- SAE BRASIL. **RATBSB - Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil**. [S.l.], 2019. Acessado em: 16 de julho de 2021. Citado na página 80.
- SAE INTERNATIONAL. **Instrumentation for Impact Test - Electronic Instrumentation - J211, Part 1**. [S.l.], 2014. Version 201403. Citado na página 104.
- SANTOS, D. J. F. C. H. Atenuador de impacto para fórmula sae: Análise dinâmica não linear pelo método dos elementos finitos. In: **Trabalho de Conclusão de Curso**. [S.l.]: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016. Citado na página 25.
- STAKE, L. Análise computacional do impacto da estrutura tubular de um veículo baja sae. In: **Trabalho de Conclusão de Curso**. [S.l.]: Universidade de Caxias do Sul, 2020. Citado na página 25.
- THO, C.-H.; SMITH, M. R. Bird strike simulation for BA609 spinner and rotor controls. In: **2006 9th International LS-DYNA Users Conference in Simulation Technology (4)**. 9th International LS-DYNA Users Conference, 2006. Disponível em: <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2006/43SimulationTechnology.pdf>. Citado na página 33.
- U.S. Department of Transportation. **Motor Vehicle Traffic Crashes as a Leading Cause of Death in the United States, 2016 and 2017**. 2020. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812927>. Acessado em: 15 de maio de 2021. Citado na página 19.
- Vias Seguras. **Estatísticas nacionais de acidentes de trânsito**. 2020. http://vias-seguras.com/layout/set/print/os_acidentes/estatisticas/estatisticas_nacionais. Acessado em: 17 de maio de 2021. Citado na página 19.
- WILKINS, M. Calculation of elastic-plastic flow. **Lawrence Radiation Laboratory**, University of California, v. 22, 1963. Citado na página 32.
- WRIGGERS, P. **Nonlinear finite element methods**. 1a. ed. Hannover, Germany: Springer, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 21, 30 e 49.
- WU, S. R.; GU, L. **Introduction to the explicit finite element method for nonlinear transient dynamics**. 6a. ed. New Jersey, EUA: Wiley, 2012. Citado 8 vezes nas páginas 20, 21, 31, 33, 36, 37, 38 e 42.
- WUERTEMBERGER, L.; PALAZOTTO, A. N. Evaluation of flow and failure properties of treated 4130 steel. **Journal of Dynamic Behavior of Materials**, Springer Science and Business Media LLC, v. 2, n. 2, p. 207–222, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40870-016-0059-1>. Citado 4 vezes nas páginas 46, 47, 48 e 63.
- XUE, X.; SCHMID, F. Modelling study to validate finite element simulation of railway vehicle behaviour in collisions. In: **2005 5th European LS-DYNA Users Conference in Crash Technology (2)**. 5th European LS-DYNA Users Conference, 2005. Disponível em: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2005/Xue.pdf>. Citado na página 33.

YADAV, G.; JAIN, A. Design and front impact analysis of rollcage. In: **M.P.** [S.l.]: Sri Satya Institute of Science of Technology and Jawaharlal Institute of Technology, 2012. Citado na página 25.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **Introductory Lectures on the Finite Element Method**. 1a. ed. Oxford, UK: Springer, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 26.

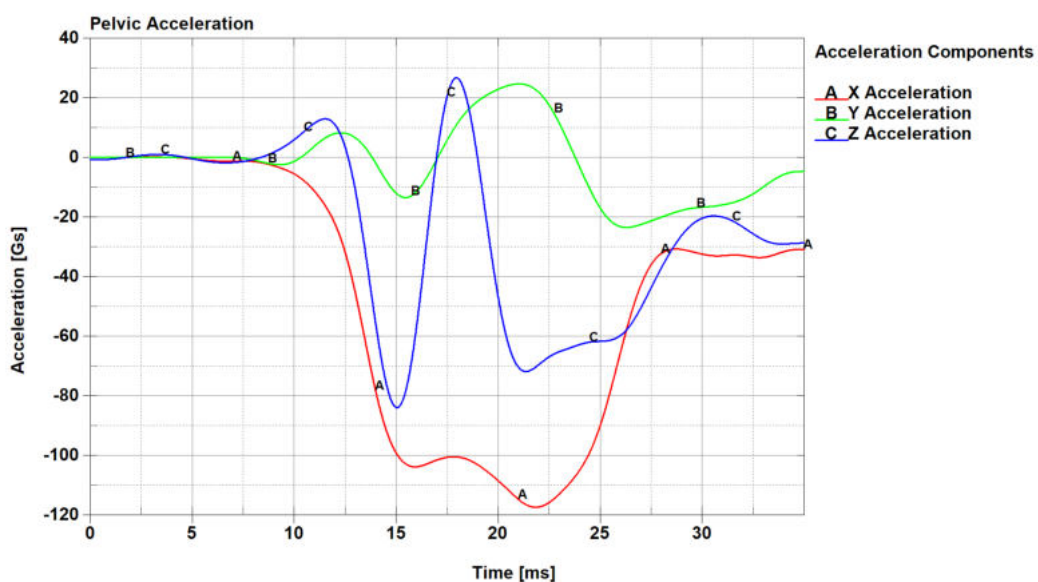
APÊNDICE A - RESULTADOS ADICIONAIS

Figura 85 – Aceleração Resultante e CSI-3 no Tórax do Modelo *Dummy* (Etapa C).



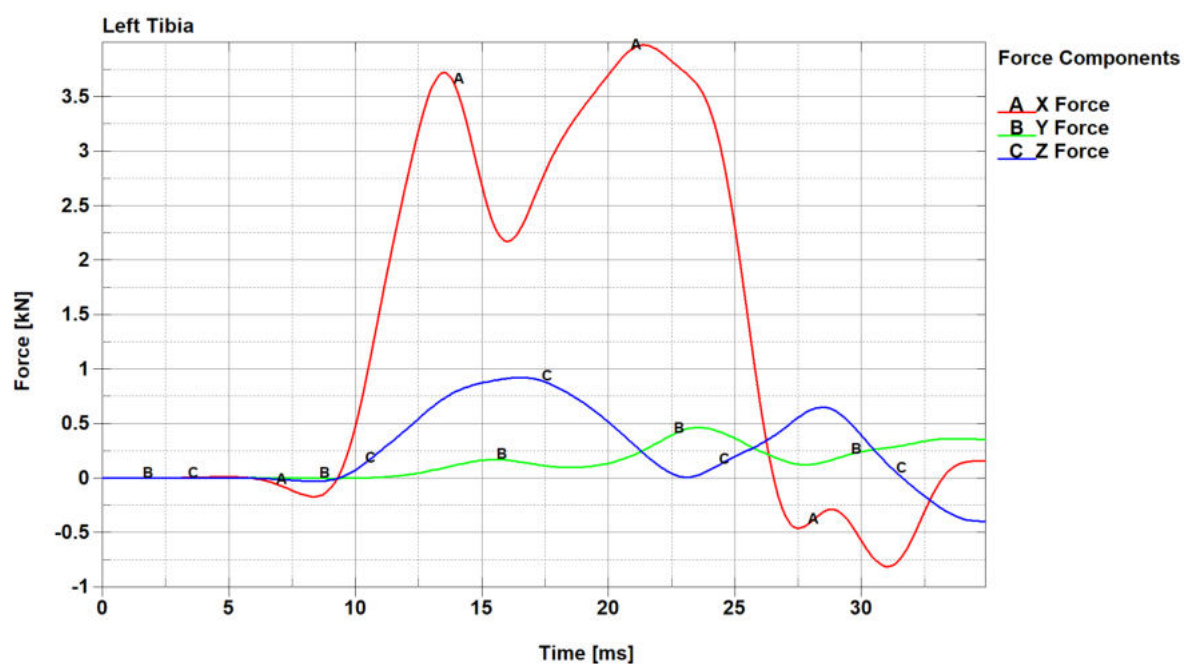
Fonte: O autor (2021)

Figura 86 – Componentes de Acelerações na Pélvis do Modelo *Dummy* (Etapa C).



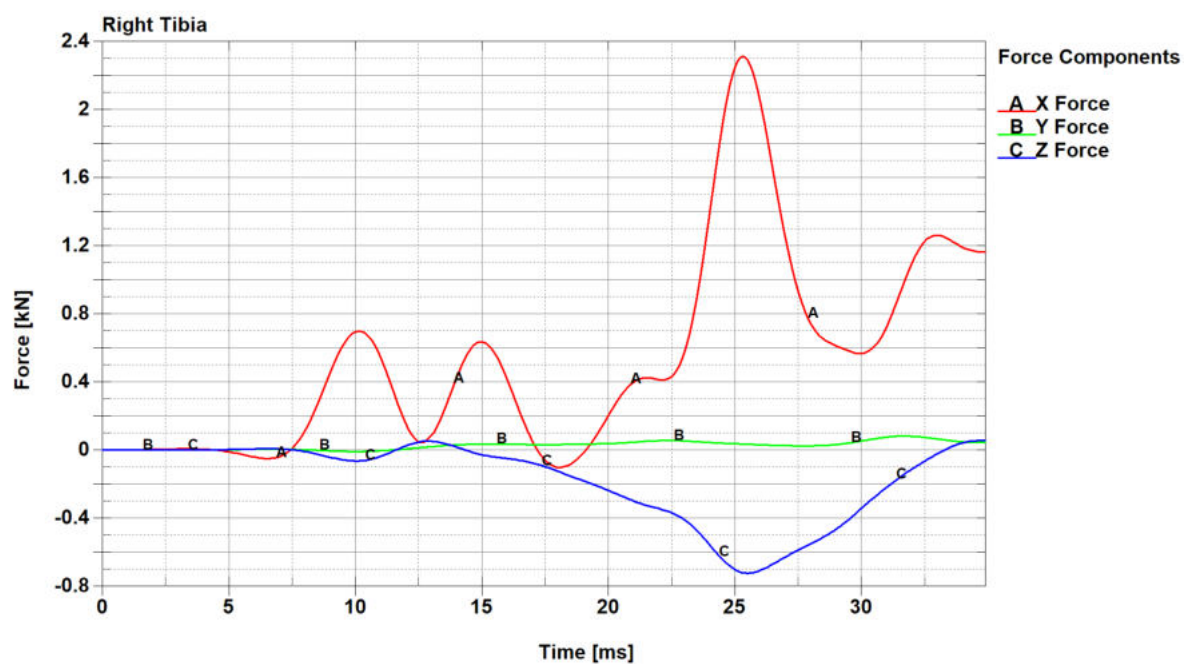
Fonte: O autor (2021)

Figura 87 – Componentes de Forças na Tíbia Esquerda do Modelo *Dummy* (Etapa C).



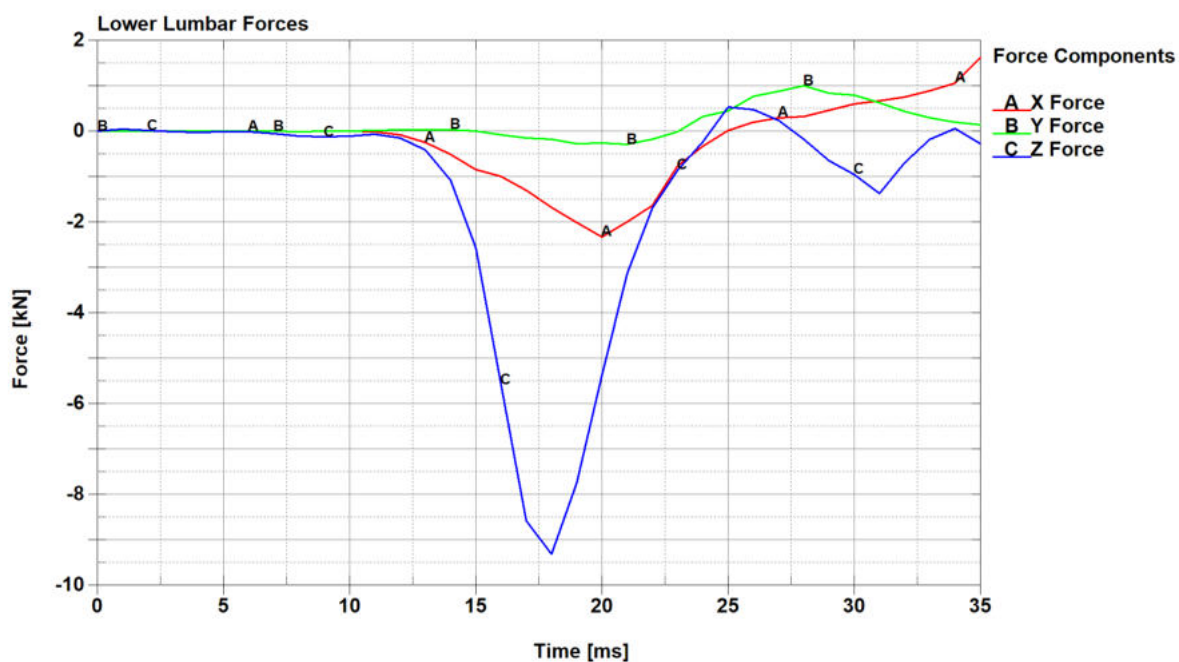
Fonte: O autor (2021)

Figura 88 – Componentes de Forças na Tíbia Direita do Modelo *Dummy* (Etapa C).



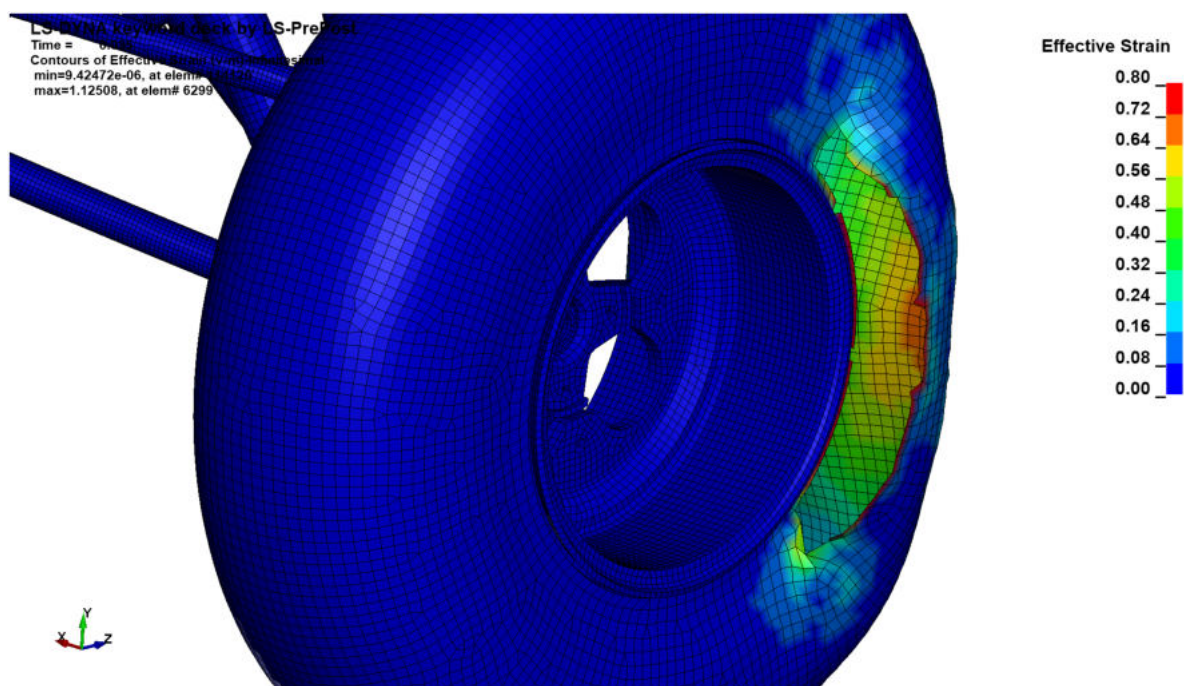
Fonte: O autor (2021)

Figura 89 – Componentes de Forças na Lombar do Modelo *Dummy* (Etapa C).



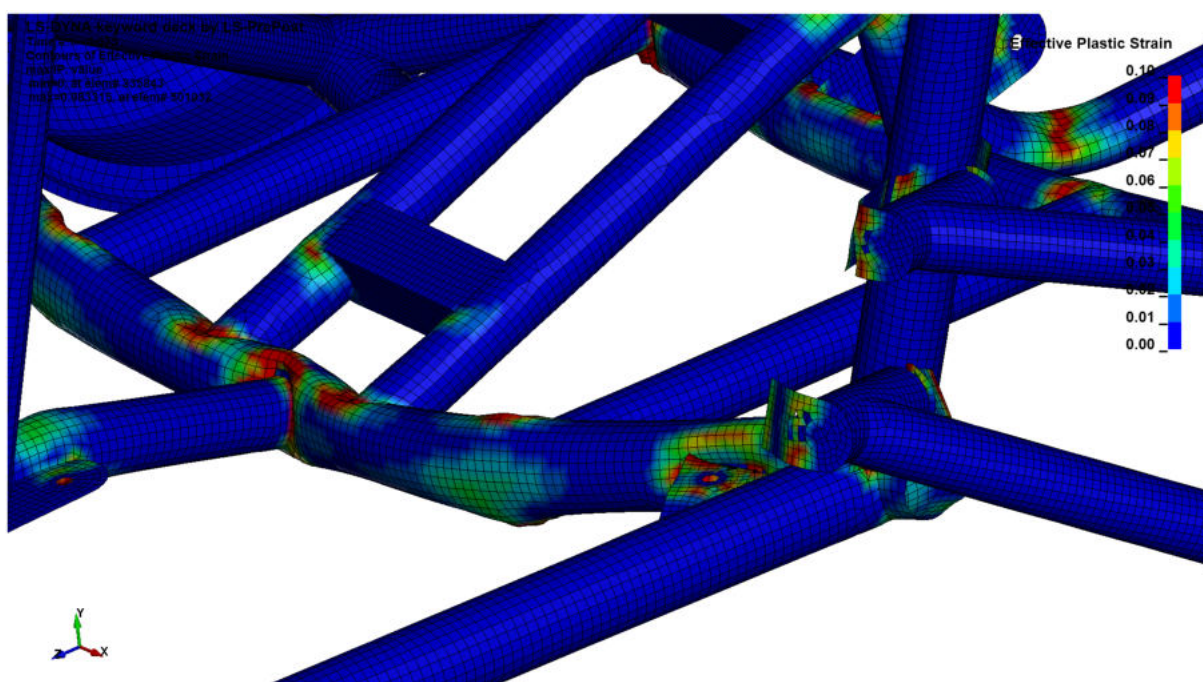
Fonte: O autor (2021)

Figura 90 – Deformação Efetiva no Pneu Dianteiro Direito, Instante 35 ms (Etapa C).



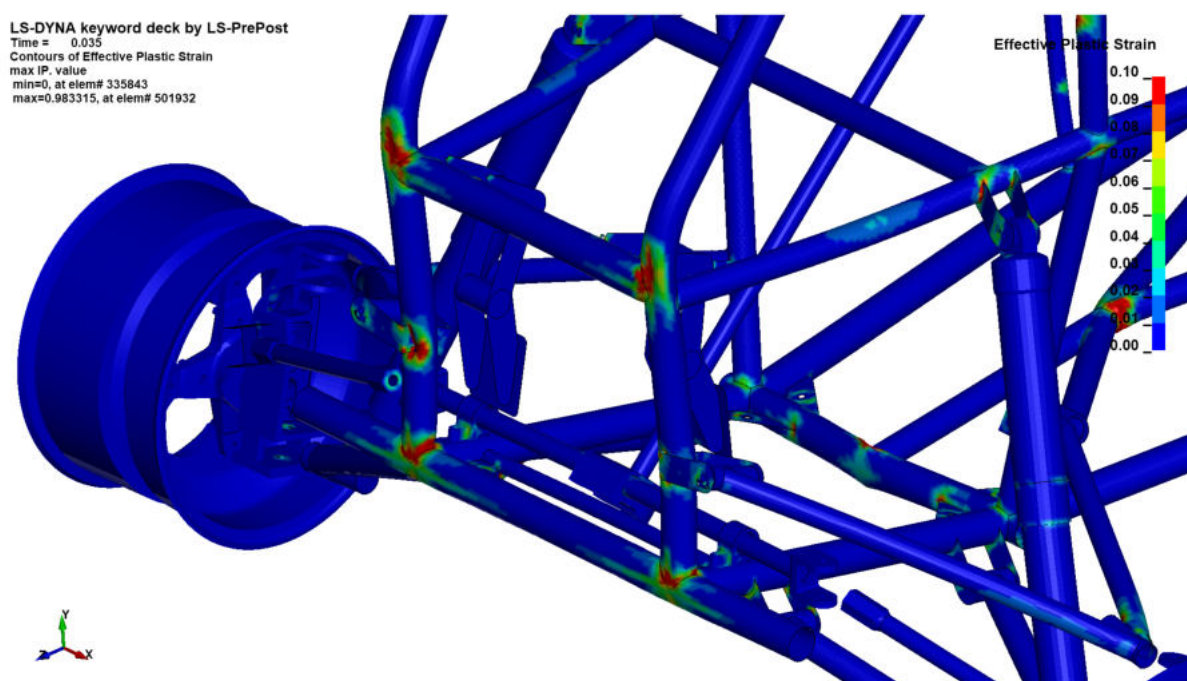
Fonte: O autor (2021)

Figura 91 – Deformação Plástica nos Olhais da Suspensão Traseira, Instante 35 ms (Etapa C).



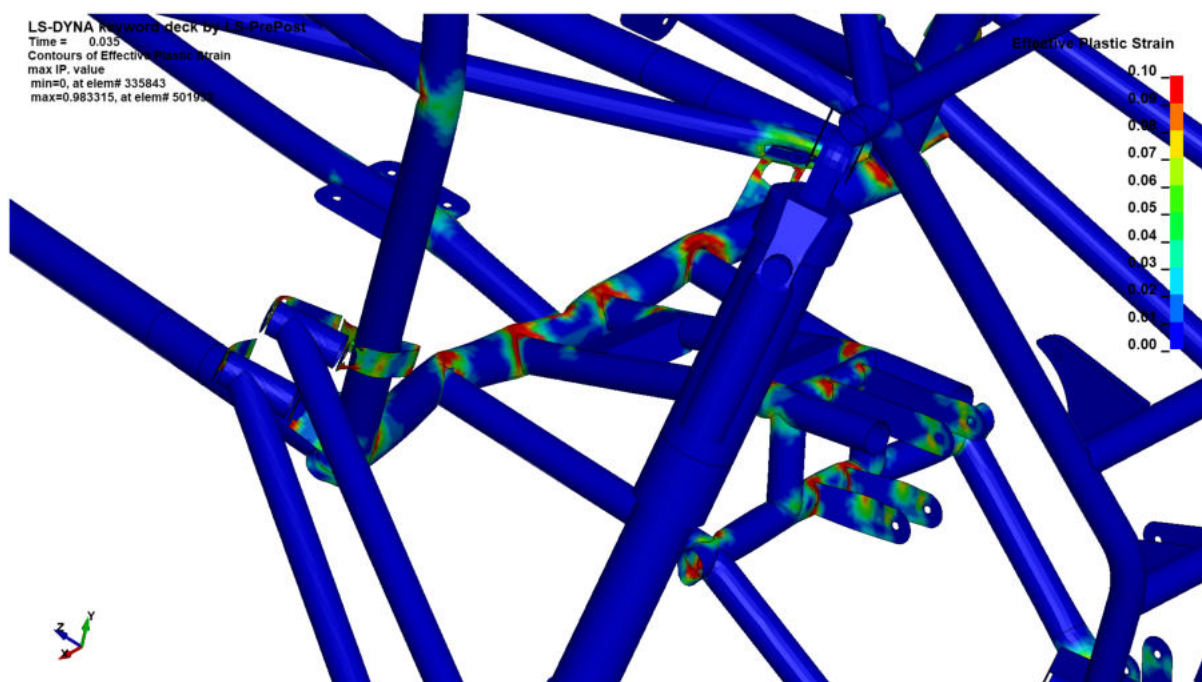
Fonte: O autor (2021)

Figura 92 – Deformação Plástica na Região Dianteira, Instante 35 ms (Etapa C).



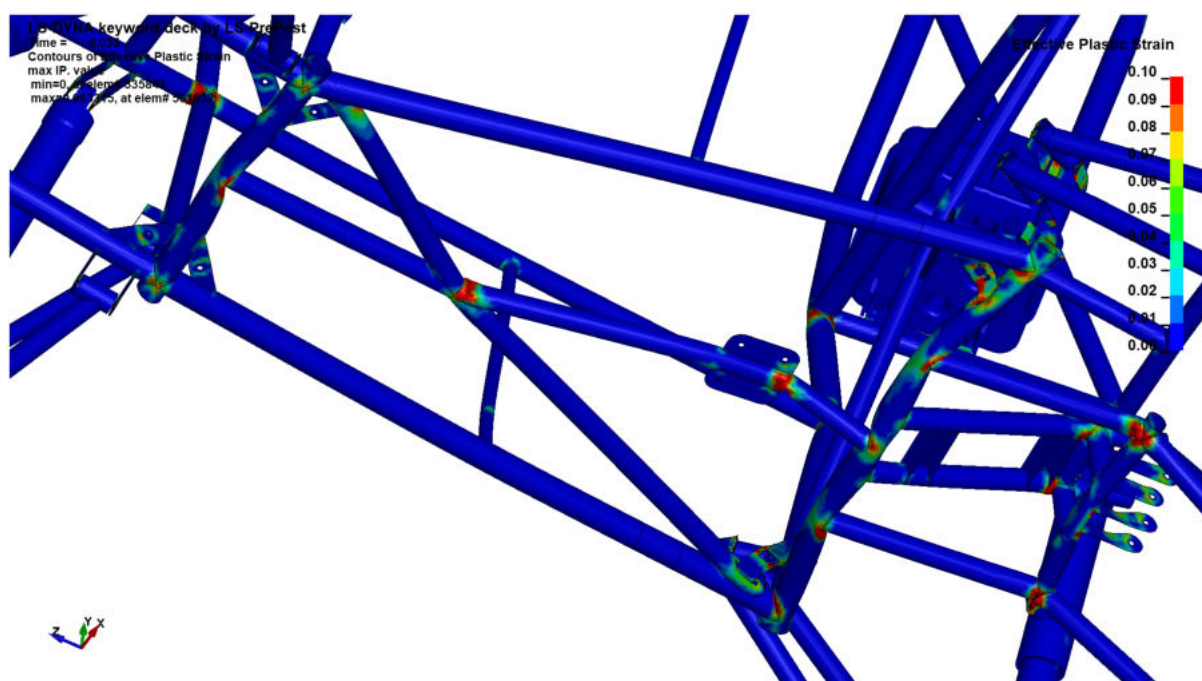
Fonte: O autor (2021)

Figura 93 – Deformação Plástica na Região Traseira, Instante 35 ms (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

Figura 94 – Deformação Plástica em Vista Inferior, Instante 35 ms (Etapa C).



Fonte: O autor (2021)

APÊNDICE B - CÓDIGO FONTE DO *LS-DYNA*

O código fonte utilizado na Etapa C do trabalho contém aproximadamente duas milhões de linhas. Desta forma, é importante deixar claro que no código apresentado abaixo, apenas foram inseridos os principais comandos utilizados a fim de auxiliar no desenvolvimento de trabalhos futuros, sendo excluídas as seguintes informações:

- Malha computacional com as informações de nós e elementos;
- Juntas fixas entre componentes;
- Pontos remotos;
- *Sections* dos componentes que não pertencem ao chassi;
- Sistemas de coordenadas locais;
- Definição dos componentes através das *Parts*;
- Modelo *dummy* e suas informações associadas.

```

1  *KEYWORD
2  *CONTROL_ACCURACY
3  $#      osu      inn      pidosu      iacc
4          0          2          0          0
5  *CONTROL_BULK_VISCOSITY
6  $#      q1      q2      type      btype      tstype
7          1.5      0.06      -1          0          0
8  *CONTROL_CONTACT
9  $#      slsfac      rwpnal      islchk      shlthk      penopt      thkchg      orien      enmass
10         0.0      0.0          1          1          1          1          2          0
11  $#      usrstr      usrfrc      nsbcs      interm      xpene      ssthk      ecdt      tiedprj
12          0          0          0          0          0.0          1          0          0
13  $#      sfric      dfric      edc      vfc      th      th_sf      pen_sf
14         0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
15  $#      ignore      frceng      skiprwg      outseg      spotstp      spotdel      spothin
16          1          1          0          1          0          1          0.5
17  $#      isym      nserod      rwgaps      rwgdt      rwksf      icov      swradf      ithoff
18          0          0          1      0.0      0.0          0      0.0          0
19  $#      shldg      pstiff      ithcnt      tdcnof      ftall      unused      shltrw      igactc
20          1          0          0          0          1          1          0.0          0
21 *CONTROL_ENERGY
22  $#      hgen      rwen      slnten      rylen      irgen
23          2          2          2          2          2
24 *CONTROL_HOURLASS
25  $#      ihq      qh
26          4      0.03
27 *CONTROL_OUTPUT
28  $#      npopt      neecho      nrefup      iaccop      opifs      ipnint      ikedit      iflush
29          1          0          0          0      0.0          0          0          0
30  $#      iprtf      ierode      tet10s8      msgmax      ipcurv      gmdt      ipldblt      eocs
31          0          0          2          0          0      0.0          0          0
32  $#      tolev      newleg      frfreq      minfo      solsig      msgflg      cdetol
33          2          0          1          0          0          0      10.0
34  $#      phschng      demden      icrfile      spc2bnd      penout      shlsig      hisnout      engout
35          0          0          0          0          0          0          0          0

```

```

36 $#      insf      isolsf      ibsf      issf      mlkbag
37          0          0          0          0          0
38 *CONTROL_RIGID
39 $#      lmf      jntf      orthmd      partm      sparse      metalf      plotel      rbsms
40          0          0          0          0          0          0          0          0
41 $#      norbic
42          0
43 *CONTROL_SHELL
44 $#      wrpang      esort      irnxx      istupd      theory      bwc      miter      proj
45          30.0          1          -1          4          2          1          1          1
46 $#      rotasc1      intgrd      lamsht      cstyp6      thshel
47          0.0          0          0          0          0
48 $#      psstupd      sidt4tu      cntco      itsflg      irquad      w-mode      stretch      icrq
49          0          0          2          0          2          0.0          0.0          0
50 $#      nfail1      nfail4      psnfail      keeps      delfr      drcpsid      drcprm      intperr
51          1          0          0          0          0          0          1.0          0
52 *CONTROL_SOLID
53 $#      esort      fmatrix      niptets      swloc1      psfail      t10jtol      icohed      tet13k
54          1          0          0          1          0          0.0          0          0
55 $#      pm1      pm2      pm3      pm4      pm5      pm6      pm7      pm8      pm9      pm10
56          0          0          0          0          0          0          0          0          0          0
57 *CONTROL_SOLUTION
58 $#      soln      nlq      isnan      lcint      lcacc      ncdcf
59          0          0          0          0          0          1
60 *CONTROL_TERMINATION
61 $#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas      nosol
62          0.035      10000000      0.001      0.0      100000.0          0
63 *CONTROL_TIMESTEP
64 $#      dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
65          0.0          0.9          0          0.0-3.5000E-7          0          1          0
66 $#      dt2msf      dt2mslc      imsc1      unused      unused      rmscl      unused      ihdo
67          0.0          0          0          0.0          0.0          0.0          0
68 *DATABASE_BNDOUT
69 $#      dt      binary      lcur      ioopt
70          3.00000E-5          3          0          1
71 *DATABASE_DEFORC
72 $#      dt      binary      lcur      ioopt
73          0.001          3          0          1
74 *DATABASE_ELOUT
75 $#      dt      binary      lcur      ioopt      option1      option2      option3      option4
76          3.00000E-5          3          0          1          0          0          0          0
77 *DATABASE_GLSTAT
78 $#      dt      binary      lcur      ioopt
79          0.001          3          0          1
80 *DATABASE_JNTFORC
81 $#      dt      binary      lcur      ioopt
82          0.001          3          0          1
83 *DATABASE_MATSUM
84 $#      dt      binary      lcur      ioopt
85          0.001          3          0          1
86 *DATABASE_NODOUT
87 $#      dt      binary      lcur      ioopt      option1      option2
88          1.00000E-5          3          0          1          0.0          0
89 *DATABASE_RCFORC
90 $#      dt      binary      lcur      ioopt
91          2.00000E-4          3          0          1
92 *DATABASE_SECFORC
93 $#      dt      binary      lcur      ioopt
94          1.00000E-4          3          0          1
95 *DATABASE_BINARY_D3PLOT
96 $#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
97          2.00000E-4          0          0          0          0
98 $#      ioopt      rate      cutoff      window      type      pset
99          0          0.0          0.0          0.0          0          0
100 *DATABASE_EXTENT_BINARY
101 $#      neigh      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg      rltflg      engflg
102          0          6          0          1          1          1          1          1
103 $#      cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz      n3thdt      ialemat
104          0          0          0          1          2          3          2          0
105 $#      nintsld      pkp_sen      sclp      hydro      msscl      therm      intout      nodout

```



```

106      0      0      0.0      0      2      0
107 $#      dtdt      resplt      neipb      quadr      cubic
108      0      0      0      0      0
109 *LOAD_BODY_Y
110 $#      lcld      sf      lclddr      xc      yc      zc      cid
111      69      1.0      0      0.0      0.0      0.0      141
112 *MAT_ADD_EROSION_TITLE
113 Rubber_Erosion
114 $#      mid      excl      mxpres      mneps      effeps      voleps      numfip      ncs
115      238      0.0      0.0      0.0      0.8      0.0      1.0      1.0
116 $#      mnpres      sigpl      sigvm      mxeps      epssh      sigth      impulse      failtm
117      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
118 $#      idam      -      -      -      -      -      -      lcregd
119      0      0      0      0      0      0      0      0
120 $#      lcld      nsff      epsthin      engcrt      radcrt      lceps12      lceps13      lcepsmx
121      0      10      0.0      0.0      0.0      0      0      0
122 $#      dteflt      unused      mxtmp      dtmin
123      0.0      0.0      0.0
124 *MAT_JOHNSON_COOK_TITLE
125 Steel_4130
126 $#      mid      ro      g      e      pr      dtf      vp      rateop
127      1      7850.06.20200E101.60000E11      0.29      0.0      1.0      0.0
128 $#      a      b      n      c      m      tm      tr      epso
129      6.730000E81.900000E8      0.1538      0.017      1.07      1432.0      23.0      0.01
130 $#      cp      pc      spall      it      dl      d2      d3      d4
131      523.0      0.0      2.0      0.0      -0.19      0.732      0.663      0.029
132 $#      d5      c2/p      erod      efmin      numint
133      -0.8503      0.0      01.00000E-6      1.0
134 *MAT_JOHNSON_COOK_TITLE
135 Steel_1020
136 $#      mid      ro      g      e      pr      dtf      vp      rateop
137      6      7850.07.63200E102.03000E11      0.33      0.0      1.0      0.0
138 $#      a      b      n      c      m      tm      tr      epso
139      3.043000E84.220000E8      0.345      0.0156      0.87      1526.85      23.01.00000E-4
140 $#      cp      pc      spall      it      dl      d2      d3      d4
141      523.0      0.0      2.0      0.0      0.1152      1.0116      -1.7684      -0.05279
142 $#      d5      c2/p      erod      efmin      numint
143      0.5262      0.0      01.00000E-6      1.0
144 *MAT_RIGID_TITLE
145 Rigid_Static
146 $#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
147      135      7850.02.00000E11      0.3      0.0      0.0      0.00
148 $#      cmo      con1      con2
149      1.0      7      7
150 $#lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
151      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
152 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
153 Aluminium_Alloy_6061_T6
154 $#      mid      ro      e      pr      sigy      etan      fail      tdel
155      173      2713.06.90400E10      0.33      0.0      0.0      0.08      0.0
156 $#      c      p      lcsc      lcsr      vp
157      0.0      0.0      1      0      0.0
158 $#      eps1      eps2      eps3      eps4      eps5      eps6      eps7      eps8
159      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
160 $#      es1      es2      es3      es4      es5      es6      es7      es8
161      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
162 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
163 Aluminium_Alloy_7075_T6
164 $#      mid      ro      e      pr      sigy      etan      fail      tdel
165      210      2800.07.24200E10      0.33      0.0      0.0      0.08      0.0
166 $#      c      p      lcsc      lcsr      vp
167      0.0      0.0      21      0      0.0
168 $#      eps1      eps2      eps3      eps4      eps5      eps6      eps7      eps8
169      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
170 $#      es1      es2      es3      es4      es5      es6      es7      es8
171      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
172 *MAT_SIMPLIFIED_RUBBER/FOAM_TITLE
173 Tire_Rubber
174 $#      mid      ro      km      mu      g      sigf      ref      prten
175      238      500.09.146000E8      0.1      0.0      0.0      0.0      0.0

```

```

176 $#      sgl      sw      st      lc/tbid      tension      rtype      avgopt      pr/beta
177      1.0      1.0      1.0      100      -1.0      1.0      0.0      0.0
178 $#      lcunld      hu      shape      stol      visco      hisout
179      0      1.0      0.0      0      0.0      0.0
180 *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC_TITLE
181 Carbon_Fiber
182 $#      mid      ro      ea      eb      ec      prba      prca      prcb
183      266      1800.02.90000E112.30000E102.30000E10 0.0158621 0.0158621      0.4
184 $#      gab      gbc      gca      aopt      g      sigf
185      8.999999E98.214000E98.999999E9      0.0      0.0      0.0
186 $#      xp      yp      zp      a1      a2      a3      macf
187      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1
188 $#      v1      v2      v3      d1      d2      d3      beta      ref
189      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
190 *MAT_RIGID_TITLE
191 Rigid
192 $#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
193      283      7850.02.00000E11      0.3      0.0      0.0      0.00
194 $#      cmo      con1      con2
195      0.0      0      0
196 $#lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
197      6424      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
198 *MAT_FABRIC_TITLE
199 Seatbelt_Fabric_2D
200 $#      mid      ro      ea      eb      -      prba      prab      -
201      300      1062.02.000000E92.000000E92.000000E9      0.3      0.3      0.3
202 $#      gab      -      -      cse      el      prl      lratio      damp
203      7.690000E87.690000E87.690000E8      1.03.000000E8      0.3      0.1      0.2
204 $#      aopt      flc      fac      ela      lnrc      form      fvopt      tsrfac
205      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      14      0      0.0
206 $#      unused      rgbrth      a0ref      a1      a2      a3      x0      x1
207      0.0      0      0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
208 $#      v1      v2      v3      -      -      -      beta      isrefg
209      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0
210 $#      lca      lcb      lcab      lcua      lcub      lcuab      rl
211      300      301      0      310      311      0      0.0
212 *MAT_SEATBELT_TITLE
213 Seatbelt_Fabric_1D
214 $#      mid      mpul      llcid      ulcid      lmin      cse      damp      e
215      350      0.0647      350      360      0.0      2.0      0.2      0.0
216 *MAT_ELASTIC_TITLE
217 HDPE_Plastic
218 $#      mid      ro      e      pr      da      db      not used
219      351      958.51.080000E9      0.41383      0.0      0.0      0.0
220 *DEFINE_COORDINATE_SYSTEM_TITLE
221 Global_Coordinate_System
222 $#      cid      xo      yo      zo      x1      y1      z1      cidl
223      141      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0
224 $#      xp      yp      zp
225      0.0      1.0      0.0
226 *DEFINE_TABLE_TITLE
227 Rubber_Stress_Strain_Viscoplasticity
228 $#      tbid      sfa      offa
229      100
230 $#      value      lcid
231      5700.0      90
232      3800.0      91
233      1.0      92
234      0.001      93
235 *DEFINE_CURVE_TITLE
236 Rubber_Plastic_Curve_5700
237 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
238      90      0      0.0      0.0      0.0      0.0      0      0
239 $#      al      ol
240      -0.805      -3.7000000000e+07
241      -0.73      -3.4000000000e+07
242      -0.65      -3.0000000000e+07
243      -0.5889983      -2.6110910000e+07
244      -0.5761619      -2.4097752000e+07
245      -0.5578244      -2.1702232000e+07

```

```

246      -0.5226162      -1.8094210000e+07
247      -0.4808065      -1.4243284000e+07
248      -0.4360628      -1.1116376000e+07
249      -0.3777494      -8539767
250      -0.2922962      -5988143
251      -0.1811705      -3717861
252      -0.0674775      -2004419
253           0.0           0.0
254           0.06748           2004419
255           0.18117           3717861
256           0.2923           5988144
257           0.37775           8539767
258           0.43606      1.1116376000e+07
259           0.48081      1.4243284000e+07
260           0.52262      1.8094210000e+07
261           0.55782      2.1702232000e+07
262           0.57616      2.4097752000e+07
263           0.589      2.6110910000e+07
264           0.65      3.0000000000e+07
265           0.73      3.4000000000e+07
266           0.805      3.7000000000e+07
267 *DEFINE_CURVE_TITLE
268 Rubber_Plastic_Curve_3800
269 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
270           91           0           0.0           0.0           0.0           0.0           0           0
271 $#      al      ol
272           -0.805      -3.4917212000e+07
273           -0.7804425      -3.4085232000e+07
274           -0.7687065      -3.2238836000e+07
275           -0.7360656      -2.5183370000e+07
276           -0.6960897      -2.0304722000e+07
277           -0.6238396      -1.5702709000e+07
278           -0.5343522      -1.2485341000e+07
279           -0.4488991      -9292698
280           -0.3656465      -7247694
281           -0.2856947      -5752085
282           -0.226281      -4391832
283           -0.1202898      -2624675
284           -0.0333696      -1274305
285           0.0           0.0
286           0.0333696      1274305
287           0.1202898      2624675
288           0.226281      4391832
289           0.2856947      5752085
290           0.3656465      7247694
291           0.4488991      9292698
292           0.5343522      1.2485341000e+07
293           0.6238396      1.5702709000e+07
294           0.6960897      2.0304722000e+07
295           0.7360656      2.5183370000e+07
296           0.7687065      3.2238836000e+07
297           0.7804425      3.4085232000e+07
298           0.805      3.4917212000e+07
299 *DEFINE_CURVE_TITLE
300 Rubber_Plastic_Curve_1
301 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
302           92           0           0.0           0.0           0.0           0.0           0           0
303 $#      al      ol
304           -0.805      -2.9234696000e+07
305           -0.7767751      -2.6091562000e+07
306           -0.7492687      -2.0981364000e+07
307           -0.7188283      -1.6262557000e+07
308           -0.6799526      -1.1917451000e+07
309           -0.6297077      -8635957
310           -0.5743282      -6472249
311           -0.4951099      -4649074
312           -0.4415641      -3813221
313           -0.361979      -2744451
314           -0.2912484      -2183214
315           -0.1932733      -1472982

```

```

316      -0.0748126      -662190.3
317      0.0      0.0
318      0.0748126      662190.3
319      0.1932733      1472982
320      0.2912484      2183214
321      0.361979      2744451
322      0.4415641      3813221
323      0.4951099      4649074
324      0.5743282      6472249
325      0.6297077      8635957
326      0.6799526      1.1917451000e+07
327      0.7188283      1.6262557000e+07
328      0.7492687      2.0981364000e+07
329      0.7767751      2.6091562000e+07
330      0.805      2.9234696000e+07
331 *DEFINE_CURVE_TITLE
332 Rubber_Plastic_Curve_001
333 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
334      93      0      0.0      0.0      0.0      0.0      0      0
335 $#      al      ol
336      -0.805      -2.1105194000e+07
337      -0.7808093      -1.8506976000e+07
338      -0.7657725      -1.6160287000e+07
339      -0.7415669      -1.3266314000e+07
340      -0.6957229      -9748847
341      -0.6506125      -7561290
342      -0.5903081      -5808085
343      -0.5369195      -4731996
344      -0.4723713      -3817367
345      -0.3894854      -2917665
346      -0.3021985      -2237706
347      -0.2080482      -1515101
348      -0.1070867      -897025.1
349      0.0      0.0
350      0.1070867      897025.1
351      0.2080482      1515101
352      0.3021985      2237706
353      0.3894854      2917665
354      0.4723713      3817367
355      0.5369195      4731996
356      0.5903081      5808085
357      0.6506125      7561290
358      0.6957229      9748847
359      0.7415669      1.3266314000e+07
360      0.7657725      1.6160287000e+07
361      0.7808093      1.8506976000e+07
362      0.805      2.1105194000e+07
363 *DEFINE_CURVE_TITLE
364 Aluminium_Alloy_6061_T6_Plastic_Curve
365 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
366      1      0      0.0      0.0      0.0      0.0      0      0
367 $#      al      ol
368      0.0      2.8280000000e+08
369      0.008889      2.9700000000e+08
370      0.01778      3.0950000000e+08
371      0.02667      3.2050000000e+08
372      0.03556      3.3010000000e+08
373      0.04444      3.3850000000e+08
374      0.05333      3.4570000000e+08
375      0.06222      3.5190000000e+08
376      0.07111      3.5720000000e+08
377      0.08      3.6170000000e+08
378 *DEFINE_CURVE_TITLE
379 Aluminium_Alloy_7075_T6_Plastic_Curve
380 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
381      21      0      0.0      0.0      0.0      0.0      0      0
382 $#      al      ol
383      0.0      4.9710000000e+08
384      0.011      5.2210000000e+08
385      0.022      5.4190003200e+08

```



```

386          0.033      5.5790003200e+08
387          0.044      5.7100000000e+08
388          0.055      5.8240000000e+08
389          0.066      5.9270003200e+08
390          0.088      6.1180000000e+08
391          0.11       6.2960000000e+08
392 *DEFINE_CURVE_TITLE
393 Gravity_Curve
394 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
395          69          0          0.0          0.0          0.0          0.0          0          0
396 $#          al          ol
397          0.0          9.80665
398          0.02          9.80665
399          0.03          9.80665
400          0.3          9.80665
401 *DEFINE_CURVE_TITLE
402 Loading_Longitudinal_Seatbelt
403 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
404          300          0          0.0          0.0          0.0          0.0          0          0
405 $#          al          ol
406          0.0          0.0
407          0.0144      3.2500000000e+07
408          0.0289      6.4800000000e+07
409          0.0433      9.4600000000e+07
410          0.0578      1.2300000000e+08
411          0.0722      1.4700000000e+08
412          0.0867      1.7000000000e+08
413          0.101      1.9100000000e+08
414          0.116      2.0700000000e+08
415          0.13       2.2500000000e+08
416 *DEFINE_CURVE_TITLE
417 Loading_Lateral_Seatbelt
418 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
419          301          0          0.0          0.0          0.0          0.0          0          0
420 $#          al          ol
421          0.0          0.0
422          0.0144      1.6300000000e+07
423          0.0289      3.2400000000e+07
424          0.0433      4.7300000000e+07
425          0.0578      6.1500000000e+07
426          0.0722      7.3600000000e+07
427          0.0867      8.5100000000e+07
428          0.101      9.5400000000e+07
429          0.116      1.0400000000e+08
430          0.13       1.1300000000e+08
431 *DEFINE_CURVE_TITLE
432 Unloading_Longitudinal_Seatbelt
433 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
434          310          0          0.0          0.0          0.0          0.0          0          0
435 $#          al          ol
436          0.0          0.0
437          0.13       3.6200000000e+08
438 *DEFINE_CURVE_TITLE
439 Unloading_Lateral_Seatbelt
440 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
441          311          0          0.0          0.0          0.0          0.0          0          0
442 $#          al          ol
443          0.0          0.0
444          0.13       1.8170000000e+08
445 *DEFINE_CURVE_TITLE
446 Loading_Longitudinal_1D_Seatbelt
447 $#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
448          350          0          0.06.10000E-5          0.0          0.0          0          0
449 $#          al          ol
450          0.0          0.0
451          0.0144      3.2500000000e+07
452          0.0289      6.4800000000e+07
453          0.0433      9.4600000000e+07
454          0.0578      1.2300000000e+08
455          0.0722      1.4700000000e+08

```

```

456          0.0867      1.7000000000e+08
457          0.101      1.9100000000e+08
458          0.116      2.0700000000e+08
459          0.13       2.2500000000e+08
460 *DEFINE_CURVE_TITLE
461 Unloading_Longitudinal_1D_Seatbelt
462 $#      lcld      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
463          360          0      0.06.10000E-5      0.0      0.0      0      0
464 $#          al          ol
465          0.0          0.0
466          0.13      3.6200000000e+08
467 *SECTION_SHELL_TITLE
468 Tubes_1.6mm
469 $#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
470          1          2      0.833333      3      1.0      0      0      1
471 $#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
472          0.0016      0.0016      0.0016      0.0016      0.0      0.0      0.0      0
473 *SECTION_SHELL_TITLE
474 Tubes_1.2mm
475 $#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
476          2          2      0.833333      3      1.0      0      0      1
477 $#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
478          0.0012      0.0012      0.0012      0.0012      0.0      0.0      0.0      0
479 *SECTION_SHELL_TITLE
480 Tubes_0.9mm
481 $#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
482          6          2      0.833333      3      1.0      0      0      1
483 $#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
484          9.00000E-49.00000E-49.00000E-49.00000E-49      0.0      0.0      0.0      0
485 *SECTION_SHELL_TITLE
486 Tabs_3.175mm
487 $#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
488          59          2      0.833333      5      1.0      0      0      1
489 $#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
490          0.003175      0.003175      0.003175      0.003175      0.0      0.0      0.0      0
491 *SECTION_SHELL_TITLE
492 Seatbelt_Section_2D
493 $#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
494          300          9      0.0      2      1.0      0      1      1
495 $#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
496          0.0012      0.0012      0.0012      0.0012      1.0      0.0      0.0      0
497 $#      bi      bi      bi      bi      bi      bi      bi      bi
498          90.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
499 *SECTION_SEATBELT_TITLE
500 Seatbelt_Section_1D
501 $#      secid      area      thick
502          3506.10000E-5      0.0012
503 *ELEMENT_INERTIA
504 $#      eid      nid      csid
505          521024      515962      0
506 $#      ixz      ixy      ixz      iyy      iyz      izz      mass
507          0.76      0.0      0.0      1.36      0.0      1.92      19.3
508 $#      ID      nid      csid
509          521025      515963      0
510 $#      ixz      ixy      ixz      iyy      iyz      izz      mass
511          0.27      0.0      0.0      1.16      0.0      1.23      30.2
512 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID
513 $#      cid
514          333Vehicle_Self_Contact
515 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
516          52          0      2      0      0      0      0      0
517 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
518          0.1      0.0      0.0      0.0      20.0      0      0.0      0.0
519 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
520          0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
521 $#      soft      sofscl      lcldab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
522          2      0.0      0      0.0      3.0      35      0      1
523 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
524          0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
525 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID

```

```

526 $#      cid                                     title
527      2Vehicle_to_Barrier
528 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
529      52      50      2      2      0      0      1      0
530 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
531      0.3      0.0      0.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
532 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
533      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
534 $#      soft      sofsc1      lc1dab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
535      2      0.1      0      1.025      3.0      35      0      1
536 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
537      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
538 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
539 $#      cid                                     title
540      3Vehicle_to_Floor
541 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
542      52      51      2      2      0      0      1      0
543 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
544      0.3      0.0      0.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
545 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
546      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
547 $#      soft      sofsc1      lc1dab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
548      2      0.1      0      1.025      3.0      35      0      1
549 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
550      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
551 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
552 $#      cid                                     title
553      39Shoulder_Belts_to_Dummy
554 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
555      55      65      2      2      0      0      1      0
556 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
557      0.294      0.25      2.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
558 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
559      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
560 $#      soft      sofsc1      lc1dab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
561      2      0.1      0      1.025      3.0      5      0      1
562 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
563      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
564 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
565 $#      cid                                     title
566      40Hips_Belts_to_Dummy
567 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
568      56      66      2      2      0      0      1      0
569 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
570      0.294      0.25      2.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
571 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
572      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
573 $#      soft      sofsc1      lc1dab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
574      2      0.1      0      1.025      3.0      5      0      1
575 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
576      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
577 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
578 $#      cid                                     title
579      41Shoes_Dummy_to_Floor_Pedal
580 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
581      58      67      2      2      0      0      1      0
582 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
583      0.3      0.0      0.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
584 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
585      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
586 $#      soft      sofsc1      lc1dab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
587      2      0.1      0      1.025      3.0      5      0      1
588 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
589      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
590 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
591 $#      cid                                     title
592      42Dummy_to_Seat
593 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
594      68      57      2      2      0      0      1      0
595 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt

```

```

596      0.3      0.0      0.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
597 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
598      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
599 $#      soft      sofscl      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
600      2      0.1      0      1.025      3.0      5      0      1
601 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
602      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
603 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
604 $#      cid title
605      43Hands_Dummy_to_Wheel
606 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
607      90      69      2      2      0      0      1      0
608 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
609      0.3      0.0      0.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
610 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
611      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
612 $#      soft      sofscl      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
613      2      0.1      0      1.025      3.0      5      0      1
614 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
615      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
616 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
617 $#      cid title
618      44Dummy_Head_to_Chest
619 $#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
620      80      81      2      2      0      0      1      0
621 $#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
622      0.3      0.0      0.0      0.0      20.0      0      0.01.00000E20
623 $#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
624      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0
625 $#      soft      sofscl      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
626      2      0.1      0      1.025      3.0      5      0      1
627 $#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
628      0.0      0      0      0      0      0      0.0      0.0
629 *HOURGLASS
630 $#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw
631      174      4      0.1      1      1.5      0.06      0.0      0.0
632 *HOURGLASS
633 $#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw
634      237      4      0.03      1      1.5      0.06      0.0      0.0
635 *HOURGLASS
636 $#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw
637      238      1      0.1      1      1.5      0.06      0.0      0.0
638 *INITIAL_VELOCITY_GENERATION
639 $#      nsid/pid      styp      omega      vx      vy      vz      ivatn      icid
640      0      1      0.0      0.0      0.0      13.889      1      141
641 $#      xc      yc      zc      nx      ny      nz      phase      irigid
642      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0      1
643 *END

```