

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Rafael Costa Rodrigues

**ANÁLISE DINÂMICA PARA DESENVOLVIMENTO DE CONCEITOS
ESTRUTURAIS DE PAINÉIS DE PORTA EM COLISÕES LATERAIS**

Belo Horizonte

2017

Rafael Costa Rodrigues

**ANÁLISE DINÂMICA PARA DESENVOLVIMENTO DE CONCEITOS
ESTRUTURAIS DE PAINÉIS DE PORTA EM COLISÕES LATERAIS**

Proposta de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Pedro Paiva Brito

Belo Horizonte

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

R696a Rodrigues, Rafael Costa
Análise dinâmica para desenvolvimento de conceitos estruturais de painéis de porta em colisões laterais / Rafael Costa Rodrigues. Belo Horizonte, 2017. 82 f. : il.

Orientador: Pedro Paiva Brito
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Acidentes de trânsito. 2. Segurança de trânsito. 3. Vítimas de acidentes de trânsito. 4. Método dos elementos finitos. 5. Automóveis - Projetos e construção. I. Brito, Pedro Paiva. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 629.3.023.25

Rafael Costa Rodrigues

**ANÁLISE DINÂMICA PARA DESENVOLVIMENTO DE CONCEITOS
ESTRUTURAIS DE PAINÉIS DE PORTA EM COLISÕES LATERAIS**

Proposta de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr.-Ing. Pedro Paiva Brito – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Claysson Bruno Vimieiro – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Pedro Américo de Magalhães Jr. – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Alexandre da Silva Scari – UFJF (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 10 de Janeiro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Em especial ao Prof. Pedro Paiva e ao time de professores da PUC Minas, pelas orientações no desenvolvimento do trabalho e pelo apoio nas complexas decisões a respeito da pesquisa.

À FCA Chrysler Automóveis Brasil, aos colegas da Segurança Veicular que ajudaram durante o desenvolvimento do trabalho, em especial aos amigos de empresa pelo suporte, orientações e estrutura fornecidos para desenvolvimento do estudo.

E principalmente aos meus pais (Hamilton e Conceição) e irmã (Renata), pela força e carinho de sempre, e à minha esposa Verônica pela cumplicidade, suporte incondicional e compreensão sem os quais não seria possível finalizar este trabalho, e ao mais novo integrante da família Bernardo pela motivação extra injetada.

RESUMO

Os acidentes de trânsito, em 2011, estavam posicionados como 9ª maior causa de óbitos no mundo, além disso ferem 20 a 50 milhões de pessoas a cada ano. No Brasil a colisão lateral, conforme relatório da Polícia Rodoviária Federal, aparece na terceira posição entre os acidentes de trânsito com maior frequência e com maior número de óbitos. Este trabalho analisa a influência do componente painel de portas em colisões laterais envolvendo veículos que não possuam airbags laterais utilizando métodos experimentais e numéricos para obtenção dos resultados. O estudo foi segmentado em três etapas com o objetivo de identificar a influência dos elementos individualmente. A primeira etapa consiste em analisar a influência da velocidade de intrusão da estrutura do veículo nas lesões do ocupante, a segunda etapa compara diferentes perfis de painéis de porta para verificação dos pontos negativos e positivos de cada solução e a terceira etapa avalia os benefícios biomecânicos da aplicação de absorvedores de energia inseridos no painel de portas. Através das análises foi possível estabelecer boas práticas para desenvolvimento de painéis de portas e estrutura lateral do veículo com foco em colisões laterais.

Palavras-chave: impacto lateral, painel de portas, colisão, absorvedor de energia, acidente

ABSTRACT

Traffic accidents in 2011 were positioned as the 9th leading cause of death in the world, and also hurt 20 and 50 million people each year. In Brazil, according to Polícia Rodoviária Federal report, the side impact is in the third position among the traffic accidents as more frequently and with greater number of deaths. This study analyzes the influence of the door panel component in side collisions involving vehicles that do not have side airbags using experimental and numerical methods to obtain the results. The study is segmented in three steps in order to identify the influence of individual elements. The first step is to analyze the influence of intrusion velocity of the vehicle structure in the occupant injury, the second stage compares different profiles of door panels scanning negative and positive points of each solution and third stage evaluates the biomechanical benefits of applying energy absorbers placed on the door panel. Through the analysis it was possible to establish good engineering practices for vehicle door panel and structure development focused in side collisions.

Keywords: side impact, door panel, collision, energy absorber, accident

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Ranking óbitos/ 100 mil hab. (2010).....	17
FIGURA 2 – Óbitos por tipo de usuário (2010).....	17
FIGURA 3 – Evolução de óbitos no Brasil (2001 a 2012).....	18
FIGURA 4 – Óbitos por estado	19
FIGURA 5 – Óbitos por tipo de usuário - Brasil.....	20
FIGURA 6 – Óbitos por tipo de usuário - Regiões	20
FIGURA 7 – Visualização gráfica dos números de acidente no Brasil por tipo e gravidade (2011).	21
FIGURA 8 – Evolução de feridos no Brasil (2001 a 2012)	22
FIGURA 9 – Evolução da frota brasileira (2001 a 2012).....	22
FIGURA 10 – Panorama geral da evolução de óbitos no Brasil (2001 a 2012).....	24
FIGURA 11 - Panorama geral da evolução da frota no Brasil (2001 a 2012)	24
FIGURA 12 - Panorama geral da evolução de feridos no Brasil (2001 a 2012).....	24
FIGURA 13 – Requisitos frontais FMVSS 208	26
FIGURA 14 – Requisitos laterais FMVSS 214.....	26
FIGURA 15 – Requisitos frontais: a esquerda ECE 137 e a direita ECE 94.	27
FIGURA 16: Requisitos laterais: a esquerda ECE 95 e a direita ECE 135.....	28
FIGURA 17 – Ensaios frontais e laterais previstos no artigo 18 da norma japonesa.....	28
FIGURA 18 – Requisitos frontais conforme NBR 15300.....	29
FIGURA 19 – Requisitos de ensaios laterais Euro NCAP: barreira deformável e poste rígido.	31
FIGURA 20 – Requisito de impacto lateral conforme IIHS.	32
FIGURA 21 – Impactos laterais conforme protocolo Latin NCAP: barreira deformável e poste rígido.....	34
FIGURA 22 – Modelo em elementos finitos para análise de colisão lateral	34
FIGURA 23 – Processo de análise por elementos finitos	36
FIGURA 24 – Exemplos de comportamento não-linear	39
FIGURA 25 – Distribuição de cargas na carroceria do veículo em impactos laterais	42
FIGURA 26 – Aplicação de materiais na carroceria: Volvo V60.....	42
FIGURA 27 – Modelo para estudo do impacto lateral.....	43
FIGURA 28 – Painéis de porta dos veículos com maior volume de venda no Brasil.....	45
FIGURA 29 – Região de impacto do corpo do ocupante em colisões laterais	45

FIGURA 30 – Perfis de painéis de portas simplificados para análise.....	46
FIGURA 31 – Absorvedor de energia em polipropileno expandido (a esq.) e em peça plástica (a dir.)	46
FIGURA 32 – Dimensionamento da barreira móvel deformável.....	47
FIGURA 33 – Configuração de prova conforme normativa ECE 95.....	48
FIGURA 34 – Aplicação do manequim infantil nas provas Latin NCAP.....	48
FIGURA 35 – Distribuição de pontos conforme protocolo de impacto lateral Latin NCAP...	49
FIGURA 36 – Ensaio de crashbox, contatos não-lineares.	51
FIGURA 37 – Modelo virtual para simulação de impacto lateral.....	51
FIGURA 38 – Exemplo de modelos de manequim CAE disponíveis.....	53
FIGURA 39 – Exemplos de modelos de corpo humano CAE disponíveis.	54
FIGURA 40 – Modelos MADYMO manequim EuroSID-2.	54
FIGURA 41 – Segmentação do manequim EuroSID-2	56
FIGURA 42 – Posicionamento acelerômetro: montante B.	58
FIGURA 43 – Modelo para cálculo da primeira fase do estudo	60
FIGURA 44 – Modelo proposto para cálculo da segunda fase	60
FIGURA 45 – Perfis de painel de portas selecionados para cálculo numérico.....	61
FIGURA 46 – Aplicação de absorvedor EPP para cada tipologia de painel de portas	63
FIGURA 47– Padrão de comportamento na aceleração da pélvis do ocupante.....	64
FIGURA 48 – Configuração das simulações numéricas fase 1.	65
FIGURA 49 – Costela superior, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.	66
FIGURA 50 – Costela mediana, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.	66
FIGURA 51 – Costela inferior, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.	66
FIGURA 52 – Abdômen, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.....	67
FIGURA 53 – Pélvis, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.....	67
FIGURA 54 – Configuração das simulações numéricas fase II.....	68
FIGURA 55 – Resultado sem absorvedor: costela superior.....	70
FIGURA 56 – Resultado sem absorvedor: costela mediana	71
FIGURA 57 – Resultado sem absorvedor: costela inferior.....	71
FIGURA 58 – Resultado sem absorvedor: costela superior (VC).....	71
FIGURA 59 – Resultado sem absorvedor: costela mediana (VC)	72
FIGURA 60 – Resultado sem absorvedor: costela inferior (VC).....	72
FIGURA 61 – Resultado sem absorvedor: força na pélvis	72
FIGURA 62 – Resultado com absorvedor: costela superior	74

FIGURA 63 – Resultado com absorvedor: costela mediana.....	74
FIGURA 64 – Resultado com absorvedor: costela inferior	74
FIGURA 65 – Resultado com absorvedor: costela superior (VC).....	75
FIGURA 66 – Resultado com absorvedor: costela mediana (VC).....	75
FIGURA 67 – Resultado com absorvedor: costela inferior (VC).....	75
FIGURA 68 – Resultado com absorvedor: força na pélvis.....	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Óbitos/ 100 mil habitantes - Municípios	19
TABELA 2 – Número de acidentes no Brasil por tipo e gravidade (2011)	21
TABELA 3 – Ranking das 10 melhores e 10 piores cidades em taxa de óbitos por 100 mil habitantes.....	23
TABELA 4 – Composição de nota Euro NCAP (2016 a 2020).....	31
TABELA 5 – Composição de nota Latin NCAP.....	33
TABELA 6 – Métodos alternativos de integração	40
TABELA 7 – Características dos veículos utilizados na análise experimental.....	55
TABELA 8 – Instrumentação utilizada no manequim	56
TABELA 9 – Resultados biomecânicos das simulações fase 1.	68
TABELA 10 – Resultados biomecânicos das simulações fase II.....	69
TABELA 11 – Resultados biomecânicos em painéis sem absorvedor.	70
TABELA 12 – Resultados biomecânicos em painéis com absorvedor.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Anti-lock Braking System
AEB	Autonomous Emergency Braking
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
EPP	Polipropileno expandido
ESC	Electronic Stability Control
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
FEM	Finite Elements Method
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
Latin NCAP	Latin America & Caribbean New Car Assessment Programme
MADYMO®	Mathematical Dynamic Models
MDB	Mobile Deformable Barrier
NBR	Norma Brasileira
NCAP	New Car Assessment Programme
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OMS	Organização Mundial de Saúde
PIB	Produto Interno Bruto
SBR	Seat Belt Reminder
TSP	Top Safety Pick
TSP+	Top Safety Pick Plus
UN/ECE	United Nations Economic Commission for Europe

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	14
1.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificativa	15
1.4 Escopo do trabalho.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Cenário da segurança viária.....	16
2.1.1 Panorama mundo.....	16
2.1.2 Panorama Brasil	18
2.2 Legislação de segurança do ocupante	25
2.2.1 Legislação de segurança do ocupante em âmbito mundial	25
2.2.1.1 Estados Unidos	25
2.2.1.2 Europa.....	27
2.2.1.3 Japão	28
2.2.1.4 Brasil.....	29
2.2.2 Protocolos NCAP mundiais	30
2.2.2.1 Euro NCAP.....	30
2.2.2.2 IIHS	32
2.2.2.3 Latin NCAP	33
2.3 Análise por elementos finitos.....	34
2.3.1 Pré-processamento	36
2.3.2 Solução (<i>Solver</i>)	37
2.3.3 Pós-processamento	38
2.4 Análise não-linear	38

3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
3.1	Estado da arte.....	41
3.2	Normas de ensaios de impacto lateral.....	46
3.2.1	Ensaio lateral: requisitos ECE 95.....	47
3.2.2	Ensaio lateral: requisitos Latin NCAP.....	48
3.3	LS-DYNA.....	50
3.4	MADYMO.....	52
3.4.1	Solver.....	52
3.4.2	Banco de dados de crash dummies e modelos de corpos humanos.....	53
3.4.3	Modelo do manequim Euro SID 2.....	54
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	55
4.1	Instrumentação do manequim.....	55
4.2	Utilização dos dados para cálculo da performance.....	57
4.2.1	Critério de performance da cabeça (HPC).....	57
4.2.2	Critérios de performance do tórax.....	57
4.2.3	Critério de performance do abdômen.....	58
4.2.4	Critério de performance da pélvis.....	58
4.3	Instrumentação do veículo.....	58
5	METODOLOGIA NUMÉRICA.....	59
5.1	Construção do modelo de simulação lateral.....	59
5.2	Análise da influência da velocidade de intrusão da estrutura do veículo.....	61
5.3	Análise dos diferentes perfis de painel de portas.....	61
5.4	Avaliação da aplicação de absorvedores de energia.....	62

6	RESULTADOS	64
6.1	Resultados experimentais	64
6.2	Resultados numéricos	65
6.2.1	Fase I	65
6.2.2	Fase II.....	68
6.3	Análise final dos resultados	76
7	CONCLUSÕES	77
8	BIBLIOGRAFIA	78

1 INTRODUÇÃO

Os dados coletados a respeito de acidentes viários demonstram o grande volume de mortes no trânsito no Brasil e no mundo, a real dimensão desse problema muitas vezes nos assusta. Conforme retrato da segurança viária em 2014 pela consultoria Falconi, acidentes de trânsito são a 9ª maior causa de óbitos no mundo e podem alcançar a 7ª posição em menos de duas décadas. Diante desse cenário, em 2010 a Organização das Nações Unidas (ONU) criou a Década da Ação pela Segurança no Trânsito (2011/2020). Desde então, relevantes iniciativas vem sendo desenvolvidas com o objetivo de reduzir em 50% o número de óbitos no trânsito e salvar 5 milhões de vidas.

No ranking mundial de 2010 da Organização Mundial de Saúde (OMS), o Brasil ocupava a 148ª posição com um indicador de 22,5 óbitos por cem mil habitantes, enquanto países latinos como Chile (12,3), Argentina (12,6) e México (14,7) apresentavam índices consideravelmente menores. A avaliação do custo da segurança viária no Brasil, revelou que são gastos 16 bilhões de reais por ano em decorrência de acidentes. Ao analisar detalhadamente a situação do Brasil em segurança viária, nos deparamos com um número total de 7.008 óbitos em acidentes de trânsito divulgados pela Polícia Rodoviária Federal (2011), sendo que 589 (8%) foram devido a colisões laterais..

Os veículos comercializados em determinados mercados são avaliados de duas maneiras: através de requisitos legislativos mínimos solicitados por cada Governo e através dos programas de avaliação que classificam os veículos através de normativas mais rigorosas que a legislação vigente em cada mercado e informam aos consumidores a respeito dos resultados encontrados em cada modelo testado. Atualmente dentre os mercados Latino Americanos, apenas Chile e Equador exigem requisitos mínimos de segurança em colisões laterais para comercialização de veículos, sendo que Argentina (2018) e México (2019) possuem previsão para implementação da normativa, no Brasil a normativa está em discussão.

A legislação de segurança tem evoluído significativamente nos últimos anos no Brasil, com a introdução de novas normas que exigem maior controle dos veículos e seus componentes. No ano de 2010, foi iniciado o Programa de avaliação de novos carros na América Latina e Caribe (Latin NCAP) que possui o objetivo de informar aos consumidores desse mercado sobre os níveis de segurança dos veículos comercializados, classificados de 0 a

5 estrelas de acordo com os resultados dos ensaios de colisão realizados . No período entre 2013 e 2015 o Programa exigiu que o veículo superasse os requisitos mínimos da normativa europeia ECE 95 para ser classificado como 5 estrelas em seu protocolo, e a partir de 2016 foram introduzidos requisitos avaliativos em impacto lateral baseados no protocolo utilizado no Programa Europeu de Avaliação de Novos Carros (Euro NCAP) para todos os modelos testados, independente de sua classificação.

Portanto, desenvolver novas soluções que possibilitem maior nível de segurança ao ocupante em situações de colisões laterais nos veículos comercializados em mercados emergentes implica em novos desafios para as montadoras, uma vez que alterações que não envolvem um número adequado de horas de Engenharia gastas em seu desenvolvimento resultam em aumento de custo e peso do veículo, e conseqüente perda de competitividade.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver novas diretrizes estruturais para painéis de porta que auxiliem na definição de parâmetros durante a fase inicial de novos projetos focados em aumentar os níveis de segurança dos ocupantes em caso de acidentes de trânsito provenientes de colisões laterais em veículos sem airbag lateral e realizar análises dinâmicas de diferentes conceitos para quantificar as melhorias.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar soluções de painéis de portas dianteiras em veículos comercializados mundialmente em diferentes segmentos de mercado;
- Propor novas soluções de painéis de portas dianteiras para confrontá-las com soluções aplicadas em projetos introduzidos e disponíveis no mercado;
- Analisar diferentes valores de velocidade de intrusão da estrutura da porta com o objetivo de selecionar a velocidade ideal para estudo de novas soluções;
- Desenvolver simulações virtuais utilizando o softwares computacionais (Madymo e LS Dyna) com o objetivo de identificar as performances observadas para cada tipo de solução.

1.3 Justificativa

Em novos desenvolvimentos nota-se que muitas vezes devido aos tempos de projeto não é possível elaborarmos painéis de portas dianteiras que tenham a melhor performance conciliada ao menor custo e melhor design. Este trabalho insere-se neste contexto, de forma a antecipar e divulgar melhores práticas para construção de painéis de portas dianteiras no início do desenvolvimento de projetos de veículos que não possuam airbag lateral como item de série, contribuindo para um projeto mais engenhoso que alia a melhoria de performance, redução de custo e redução de peso ao design mais agradável aos olhos do consumidor final.

1.4 Escopo do trabalho

O presente trabalho constitui a proposta de dissertação de mestrado que, segundo o regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC Minas, deve ser apresentada antes da defesa final da dissertação. Além desta introdução, em que se apresentam a motivação para o desenvolvimento proposto, além dos objetivos do trabalho, integram o presente trabalho a fundamentação teórica (Capítulo 2), revisão bibliográfica (Capítulo 3), metodologia experimental (Capítulo 4), metodologia numérica (Capítulo 5), resultados esperados (Capítulo 6) e o cronograma com as atividades a serem executadas até o término da dissertação (Capítulo 7).

Na fundamentação teórica são apresentados os conceitos básicos ligados ao desenvolvimento do trabalho, englobando a análise da situação dos acidentes de trânsito no Brasil e no mundo, as normas exigidas pelos Governos e protocolos de performance utilizados mundialmente para ensaios de colisão lateral e breves conceitos a respeito da análise em elementos finitos. Em seguida, na revisão bibliográfica, é realizado o levantamento estado da arte dos projetos de painel de portas laterais, a explicação da normativa de ensaio lateral europeia e o protocolo de performance Latin NCAP, além de informações relativas aos softwares de análise virtual utilizados neste estudo. Nos capítulos 4 e 5, são apresentados, respectivamente, a metodologia experimental e numérica utilizadas no desenvolvimento da análise de conceitos de painel de portas em impactos laterais para melhoria da segurança do ocupante em veículos sem airbags laterais. Os capítulos 6 e 7 apresentam respectivamente, os resultados esperados em cada etapa do trabalho e o cronograma de atividades até o término do estudo e apresentação do resultado final.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cenário da segurança viária

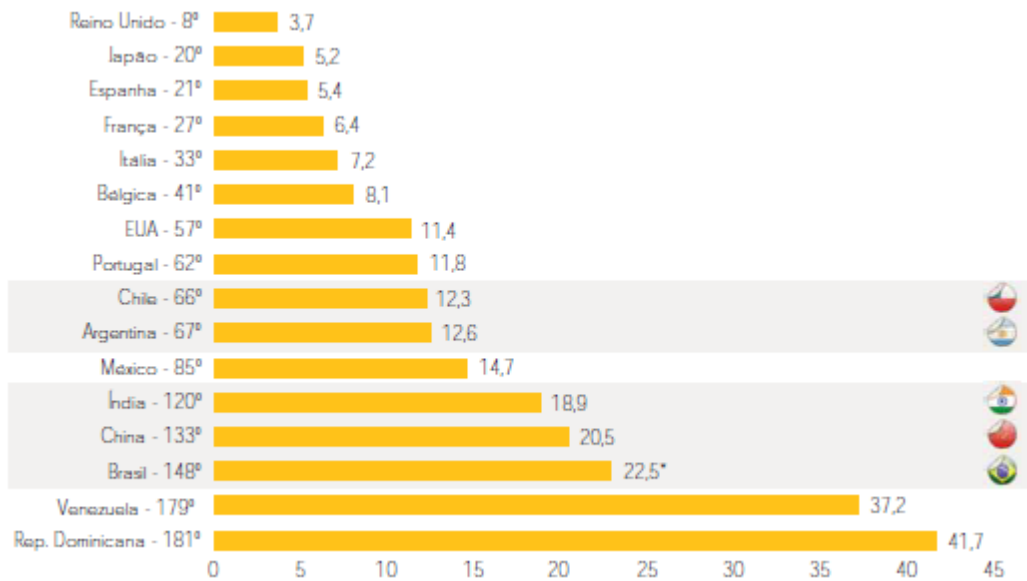
Neste trabalho o cenário de segurança viária foi analisado no âmbito mundial e brasileiro. Foram apresentados resultados de pesquisas realizadas por consultorias, pela Organização Mundial de Saúde (OMS), pela Polícia Rodoviária Federal, pelo DATASUS e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), analisando variáveis que nos permitem entender a situação global dos acidentes de trânsito e a necessidade de intervenções Governamentais que auxiliem na segurança viária.

2.1.1 Panorama mundo

Em 2014 um estudo realizado pela consultoria Falconi indicou que os acidentes de trânsito eram a 9ª causa de morte em âmbito mundial, o que significava que anualmente 1,3 milhão de pessoas morriam nas vias, o que resultava em 3400 pessoas por dia levadas a óbito enquanto caminhavam, andavam de motocicleta, automóvel ou outros tipos de veículos. Ainda foi demonstrado que 50 milhões de pessoas eram feridas a cada ano. E o panorama atual sugere que, até 2030, o número de mortos em acidentes pode chegar a 1,9 milhão de pessoas.

Ao observarmos o levantamento da Organização Mundial de Saúde (OMS) em 2013, podemos verificar grandes disparidades nas taxas de mortalidade em decorrência de acidentes de trânsito entre os países de diferentes regiões do planeta, sendo que o Brasil ocupava a 148ª posição no ranking, com um indicador de 22,5 óbitos em cada 100 mil habitantes, atrás de países como Índia, China, além de países da América Latina como Argentina e Chile, como pode ser verificado na Figura 1.

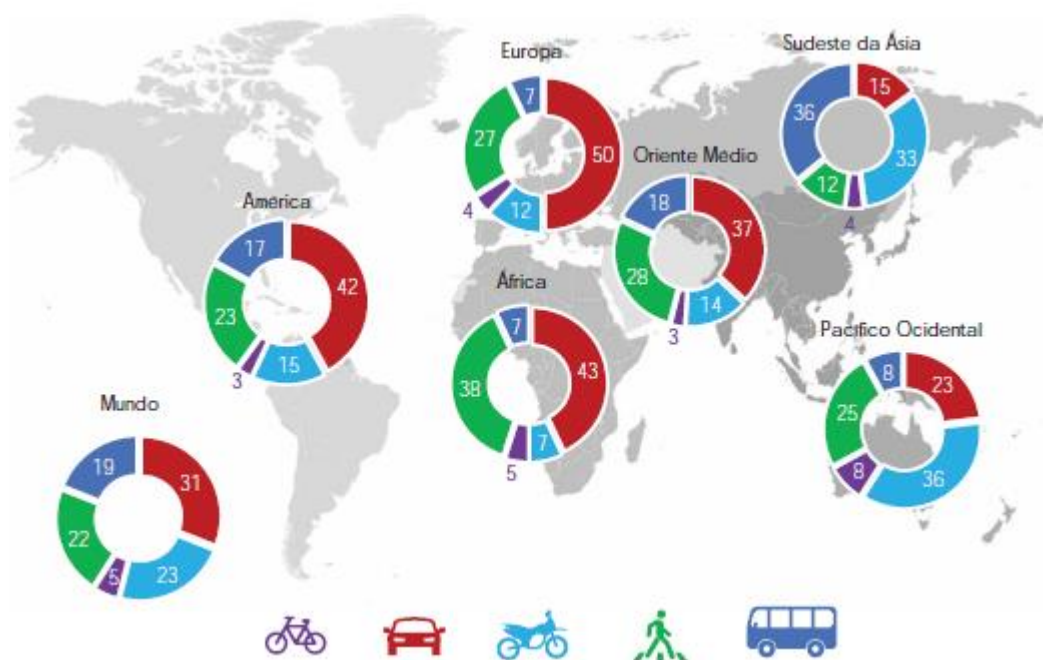
Figura 1 – Ranking óbitos/ 100 mil hab. (2010)



Fonte: Organização Mundial de Saúde, 2013.

Avaliando ainda os tipos de usuário de forma isolada, a pesquisa apontou que os ocupantes de automóveis são os que mais morrem em decorrência de acidentes de trânsito. Ao fazer a comparação mundial da proporção de morte entre os diferentes tipos de usuário é possível verificar o panorama da Figura 2.

Figura 2 – Óbitos por tipo de usuário (2010)



Fonte: Organização Mundial de Saúde, 2013.

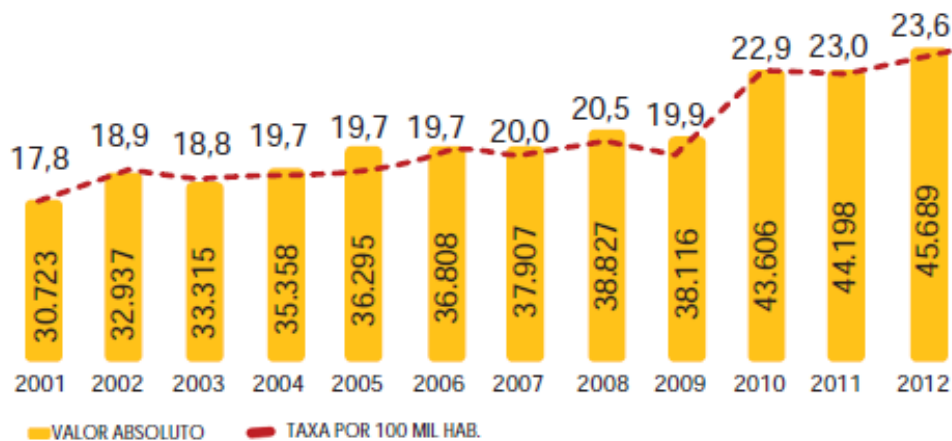
De acordo com o levantamento da OMS, outro padrão observado é que, para cada morte causada por acidente de trânsito, 20 a 50 pessoas ficam feridas, porém os dados não informa sobre a gravidade das lesões.

2.1.2 Panorama Brasil

Sede da Segunda Conferência Ministerial Global pela Segurança Viária em 2015, o país é um dos maiores focos da América Latina para análise dos indicadores de melhoria em relação à segurança viária, o que deve servir como motivação para avanços legislativos quando somado ao compromisso firmado na Década de Ação pela Segurança no Trânsito.

Segundo o estudo realizado pela consultoria Falconi, o Brasil está entre os países com maior quantidade de acidentes de trânsito no mundo. Desde 2001, o número de mortos aumenta a cada ano, sendo que o acréscimo verificado de 2001 a 2012 foi de 48,7%, conforme Figura 3. O número total de óbitos nesse período foi de 453.779 segundo relatório de segurança viária publicado em 2014.

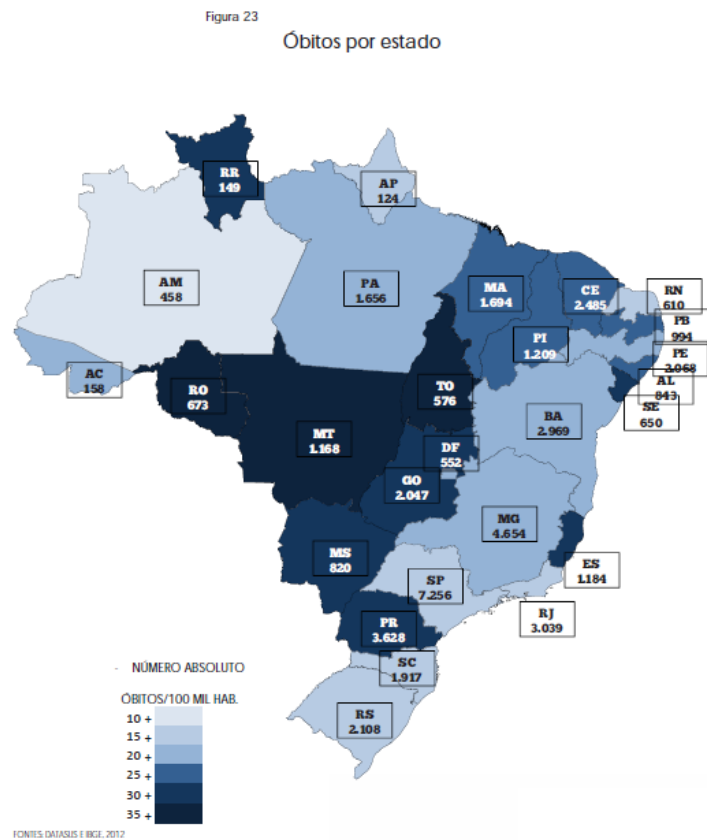
Figura 3 – Evolução de óbitos no Brasil (2001 a 2012)



Fonte: DATASUS e IBGE, 2012.

As três cidades (com mais de 20 mil habitantes) com maior número de óbitos por habitantes no Brasil são Presidente Dutra, no Maranhão, com 237 mortos por 100 mil habitantes, seguida de Barbalha, no Ceará, com 194,4/100 mil habitantes. O ranking de óbitos por estado está demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Óbitos por estado



Fonte: DATASUS e IBGE, 2012.

Ao analisar as dez cidades mais populosas do país, Recife é a que possuía maior taxa de mortes por 100 mil habitantes, com 34,7 óbitos por 100 mil habitantes, seguida de Fortaleza com 27,1/100 mil habitantes. As cidades com menor taxa de óbitos são São Paulo e Porto Alegre, conforme Tabela 1.

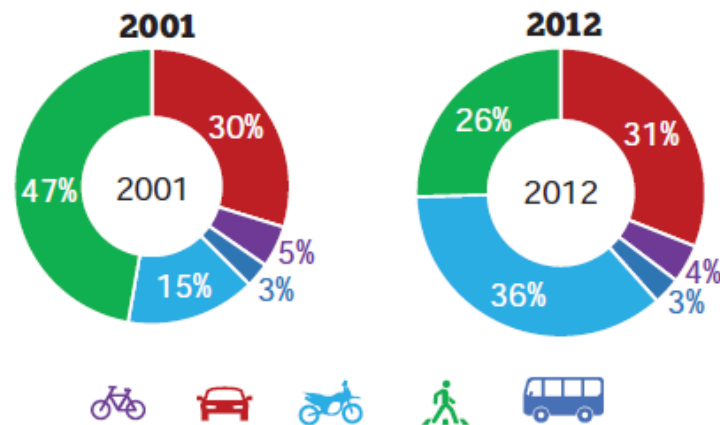
Tabela 1 – Óbitos/ 100 mil habitantes - Municípios

Municípios	Número absoluto óbitos	População	Óbitos/100 mil hab.
Recife	539	1.555.039	34,7
Fortaleza	678	2.500.194	27,1
Belo Horizonte	539	2.395.785	22,5
Brasília	553	2.648.532	20,9
Curitiba	356	1.776.761	20,0
Manaus	321	1.861.838	17,2
Rio De Janeiro	1.063	6.390.290	16,6
Salvador	446	2.710.968	16,5
São Paulo	1.343	11.376.685	11,8
Porto Alegre	166	1.416.714	11,7

Fonte: DATASUS e IBGE, 2012.

Ao analisar a distribuição de óbitos por tipo de usuário no Brasil, pode-se verificar que a proporção aumentou de 2001 a 2012, sendo que o aumento da proporção de motociclistas (140%) foi a maior entre elas. Entre os usuários de automóvel a proporção manteve-se praticamente estável, como mostra a Figura 5.

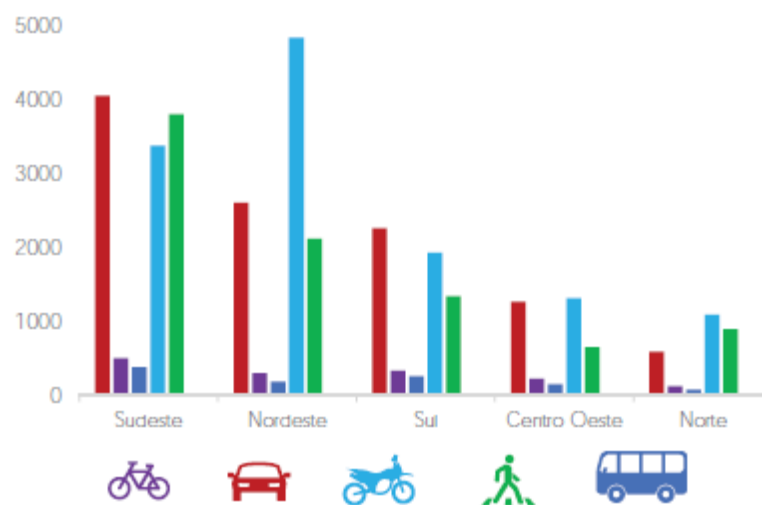
Figura 5 – Óbitos por tipo de usuário - Brasil



Fonte: DATASUS, 2012.

A análise por regiões na Figura 6 mostra que a região sudeste apresenta os maiores valores indicados na pesquisa, agravado pela densidade demográfica e pelo maior número de veículos da frota na região que contempla as maiores cidades do país.

Figura 6 – Óbitos por tipo de usuário - Regiões



Fonte: DATASUS, 2012.

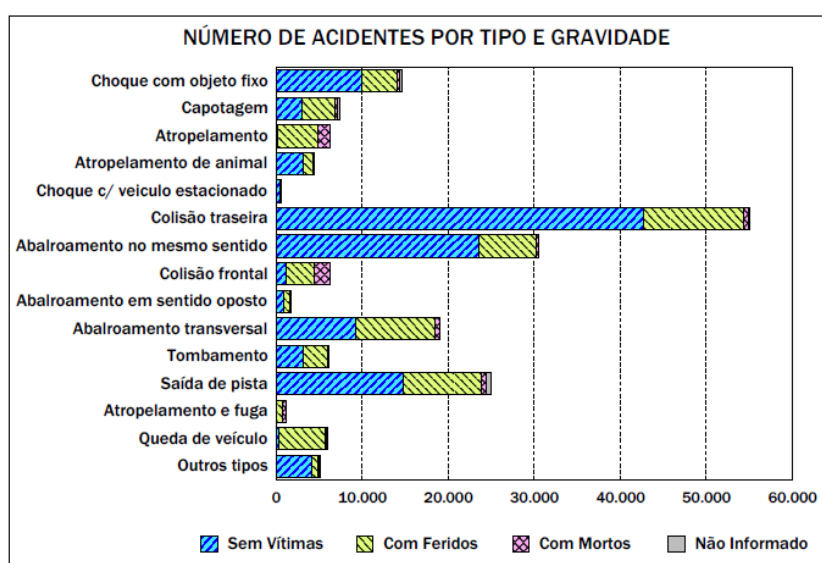
O anuário da Polícia Rodoviária Federal publicado em 2011, detalha o número de acidentes com veículos em rodovias federais por tipo e gravidade. Nesse relatório podemos verificar que colisões laterais, que é o foco deste trabalho, representam 10% do total de acidentes ocorridos nesse ano. Um total de 19.065 acidentes de colisões laterais, ocasionaram 589 mortes (3%). A Tabela 2 e Figura 7 apresentam os resultados publicados em 2011.

Tabela 2 – Número de acidentes no Brasil por tipo e gravidade (2011)

TIPO DO ACIDENTE	DISTRIBUIÇÃO SEGUNDO A GRAVIDADE DO ACIDENTE				
	TOTAL	C/ Morto	C/ Ferido	S/ Vítima	Não Inf.
Choque com objeto fixo	14.699	327	4.190	9.905	277
Capotagem	7.352	317	3.849	2.995	191
Atropelamento	6.221	1.348	4.699	167	7
Atropelamento de animal	4.365	77	1.076	3.197	15
Choque com veículo estacionado	546	13	83	447	3
Colisão traseira	54.999	590	11.691	42.688	30
Abalroamento no mesmo sentido	30.549	361	6.643	23.529	16
Colisão frontal	6.218	1.734	3.232	1.240	12
Abalroamento em sentido oposto	1.717	115	703	899	0
Abalroamento transversal	19.065	589	9.173	9.292	11
Tombamento	6.150	158	2.774	3.176	42
Saída de pista	24.933	665	8.967	14.844	457
Atropelamento e fuga	1.133	394	732	4	3
Queda de veículo	5.927	237	5.327	322	41
Outros tipos	5.051	83	841	4.086	41
Total	188.925	7.008	63.980	116.791	1.146

Fonte: Anuário estatístico das rodovias federais - Acidentes de trânsito e ações de enfrentamento ao crime, 2011.

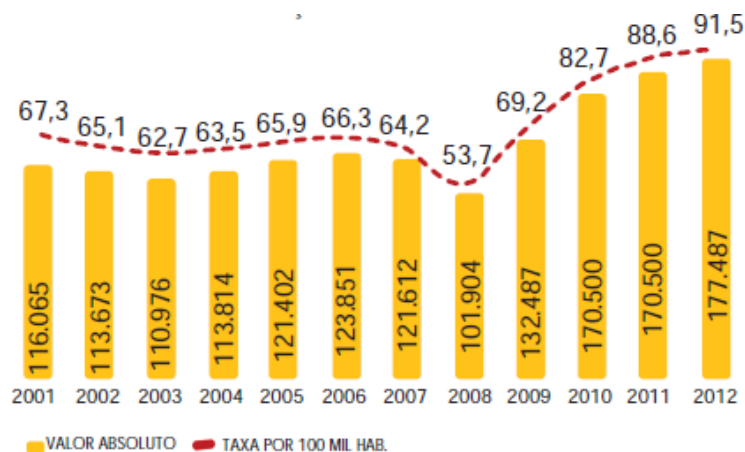
Figura 7 – Visualização gráfica dos números de acidente no Brasil por tipo e gravidade (2011).



Fonte: Anuário estatístico das rodovias federais - Acidentes de trânsito e ações de enfrentamento ao crime, 2011.

O número absoluto de feridos em acidentes viários no Brasil entre 2001 e 2012, segundo DATASUS, aumentou num ritmo muito mais acelerado que o número de óbitos, foram 116.065 feridos em 2001 e 177.487 feridos em 2012, conforme Figura 8, um aumento de 52.2%. No período avaliado 1.6 milhão de pessoas necessitaram de internação por mais de 24 horas após colisões e atropelamentos.

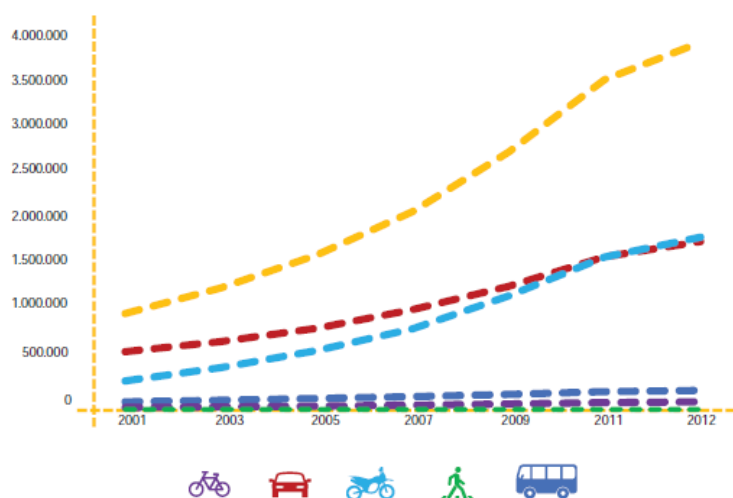
Figura 8 – Evolução de feridos no Brasil (2001 a 2012)



Fonte: DATASUS, 2001-2012

A análise da evolução da frota brasileira demonstra que de 2001 a 2012 a quantidade mais do que dobrou (139%), conforme Figura 9. Nesse período a frota de carros subiu de 24,5 milhões para 50,6 milhões, um aumento de 106%.

Figura 9 – Evolução da frota brasileira (2001 a 2012)



Fonte: DENATRAN/ RENAEST, 2012.

Pesquisas demonstram que o número de acidentes de trânsito é maior em países menos desenvolvidos, e consequentemente maior é o número de óbitos. O mesmo pode ser aplicado em regiões de um mesmo país. Porém a relação entre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), o Produto Interno Bruto (PIB) e o número de óbitos a cada 100 mil habitantes no Brasil não demonstra a mesma tendência. Cidades como Brasília e Curitiba são as duas mais evoluídas dentre os 30 municípios mais populosos do país, porém possuem alto índice de violência no trânsito. É importante ressaltar que dentro de um cenário nacional, por possuírem as mesmas normas de trânsito, o que pode fazer a diferença numa região com mais recursos, entre outras coisas, é a estrutura e a capacidade de fiscalização com maior rigor, conforme mencionado no relatório da consultoria Falconi (2014)..

Abaixo estão os gráficos com os resultados gerais provenientes da pesquisa realizada, nos quais são demonstrados: os rankings com os melhores e piores municípios em taxa de óbitos por 100 mil habitantes na Tabela 3, a evolução dos óbitos em acidentes de trânsito no período de 2001 a 2012 e a evolução dos óbitos por tipo de usuário no período de 2001 a 2012 na Figura 10, a evolução da frota no período de 2001 a 2012 na Figura 11, o número de feridos por tipo de usuário em 2012 e a evolução de feridos devido a acidentes de trânsito no período de 2001 a 2012 na Figura 13.

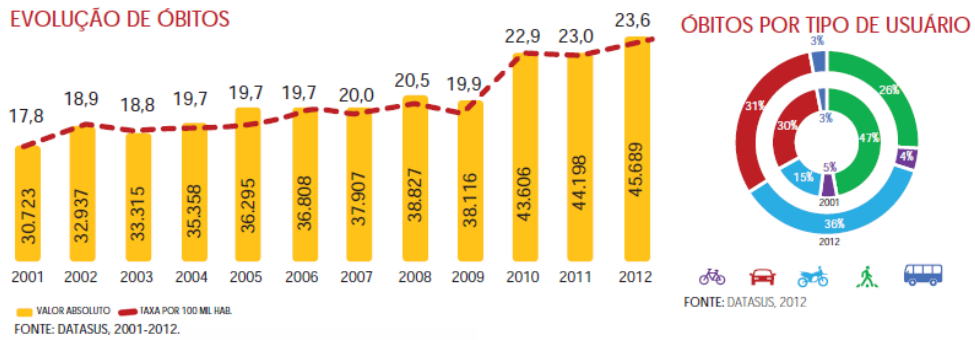
Tabela 3 – Ranking das 10 melhores e 10 piores cidades em taxa de óbitos por 100 mil habitantes.

RANKING DAS 10 PIORES CIDADES - TAXA DE ÓBITOS POR 100 MIL HAB.*			RANKING DAS 10 MELHORES CIDADES - TAXA DE ÓBITOS POR 100 MIL HAB.*		
1º	PRESIDENTE DUTRA (MA)	237,03	1º	BARREIRAS (BA)	0,71
2º	BARBALHA (CE)	194,43	2º	IGARAPÉ-MIRI (PA)	1,70
3º	PIRAÍ DO SUL (PR)	122,40	3º	LAGOA SANTA (MG)	1,83
4º	DIAMANTINO (MT)	121,33	4º	SÃO JOÃO DE MERITI (RJ)	2,17
5º	SOBRAL (CE)	108,73	5º	XIQUE-XIQUE (BA)	2,19
6º	PARNAMIRIM (PE)	102,82	6º	FERRAZ DE VASCONCELOS (SP)	2,32
7º	CAMPINA GRANDE DO SUL (PR)	98,97	7º	CAETÉ (MG)	2,41
8º	MIRACATU (SP)	98,42	8º	CAETÉ (MG)	2,41
9º	CAMPO MOURÃO (PR)	92,96	9º	LÁBREA (AM)	2,56
10º	ARAPIRACA (AL)	90,31	10º	CATENDE (PE)	2,58

*Taxa por 100 mil hab. consideradas apenas cidades com mais de 20 mil habitantes

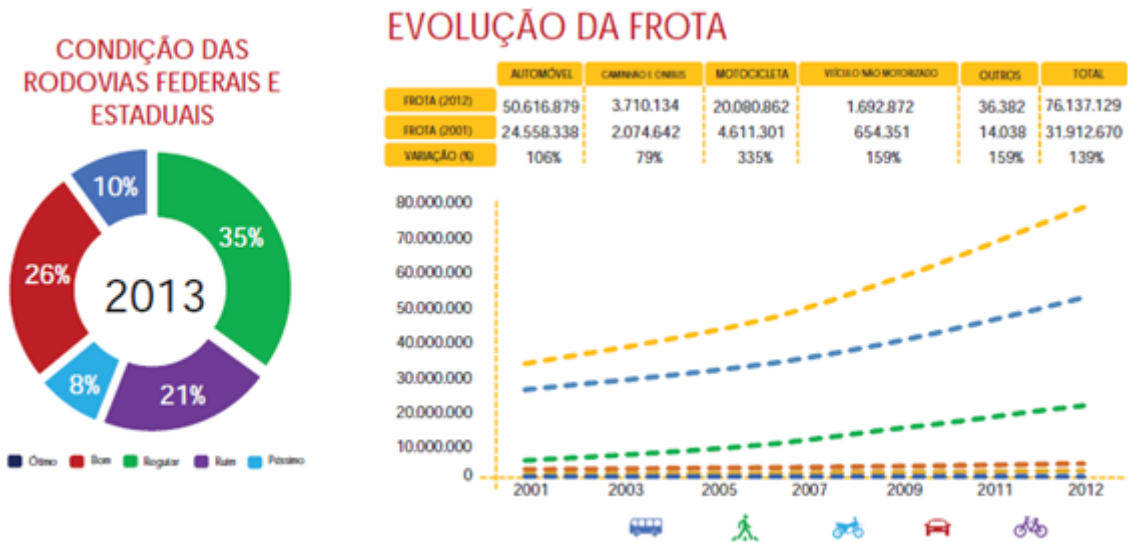
Fonte: DENATRAN, 2012.

Figura 10 – Panorama geral da evolução de óbitos no Brasil (2001 a 2012)



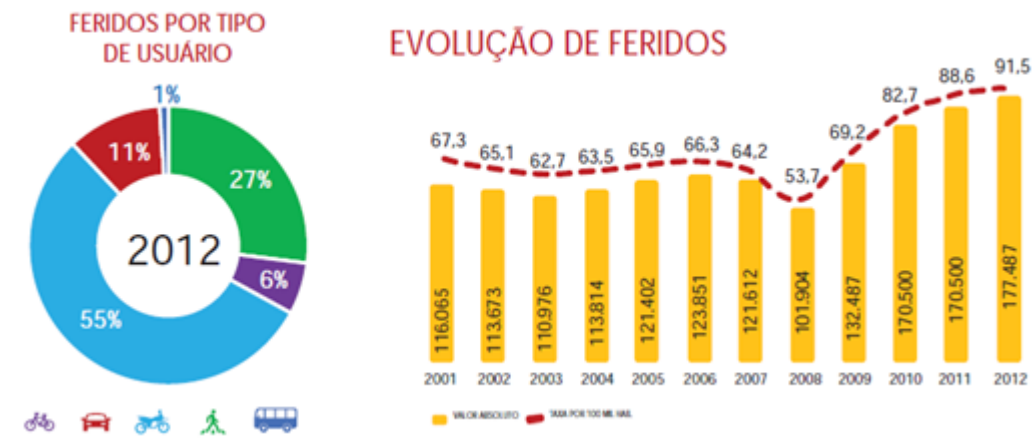
Fonte: DATASUS, 2001-2012.

Figura 11 - Panorama geral da evolução da frota no Brasil (2001 a 2012)



Fonte: Organização Mundial de saúde, 2013 e DENATRAN, 2001-2012.

Figura 12 - Panorama geral da evolução de feridos no Brasil (2001 a 2012)



Fonte: DENTRAN, 2012 e DATASUS 2001-2012.

2.2 Legislação de segurança do ocupante

A legislação de segurança do ocupante foi analisada na perspectiva de ensaios de alta velocidade, que reproduzem situações reais de acidentes de trânsito com automóveis em diferentes condições e em velocidades permitidas pelas normativas locais. A análise foi dividida em duas partes: legislação de segurança em âmbito mundial e protocolos NCAPs mundiais. A primeira demonstra o cenário atual das legislações exigidas em cada região para comercialização de automóveis, enquanto a segunda analisa o cenário dos protocolos que avaliam a performance em segurança dos automóveis em cada mercado com rigor e requisitos mais exigentes que a legislação local.

A análise legislativa engloba os principais países de diferentes continente, sendo eles: Estados Unidos, Japão, Brasil e países europeus que seguem as normas da UNECE. A pesquisa de protocolos NCAP considera Europa (Euro NCAP), Estados Unidos (US NCAP e IIHS), América Latina (Latin NCAP) e Japão (JNCAP).

2.2.1 Legislação de segurança do ocupante em âmbito mundial

A legislação de segurança do ocupante em geral é detalhada por tipo de colisão, sendo dividida em impacto frontal, impacto lateral e impacto traseiro, sendo que cada região define suas normativas de acordo com as condições do país e do mercado interno. As duas regiões referência em segurança do ocupante são Europa e Estados Unidos, porém elas possuem requisitos bastante diferentes entre si. Nos itens subsequentes serão repassadas informações gerais a respeito das normativas em cada país, focadas em impacto frontal e lateral.

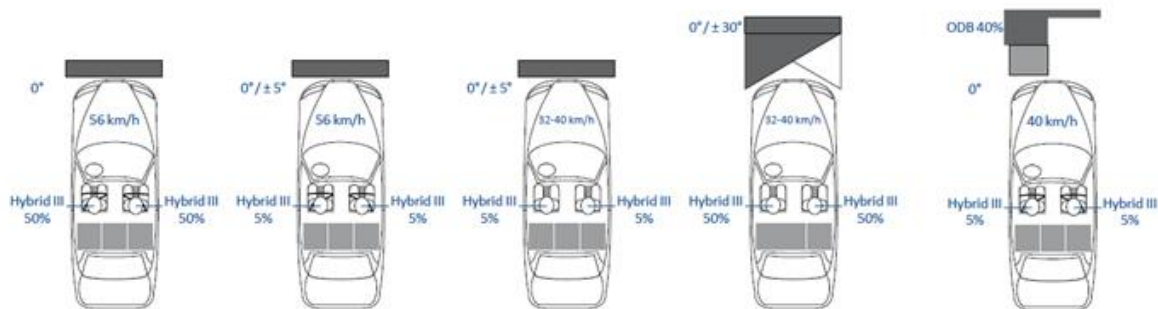
2.2.1.1 Estados Unidos

A legislação americana é definida pela NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), e os requisitos das normativas de segurança são descritos nas normas FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations).

Os requisitos para ensaios frontais são descritos na FMVSS 208, conforme Figura 13, e englobam testes frontais com barreira rígida plana e angulada de 30° impactando em 100% do frontal do veículo, com ocupantes de peso correspondentes a 5% e 50% da curva de peso

da população mundial, em velocidades que variam dependendo da aplicação do cinto de segurança: 32 a 40 km/h nos casos sem aplicação do cinto de segurança e 56 km/h nos casos em que os ocupantes estejam utilizando o cinto de segurança, e com barreira deformável deslocada impactando em 40% do frontal do veículo a 40 km/h, com ocupantes de peso correspondentes a 5% da curva de peso da população mundial.

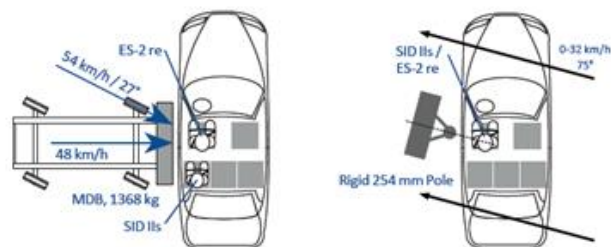
Figura 13 – Requisitos frontais FMVSS 208



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

Os requisitos para ensaios laterais são descritos na FMVSS 214, conforme Figura 14, e detalha o teste de impacto lateral com barreira deformável pesando 1368 kg a 54 km/h a 27°, com ocupantes no banco dianteiro e traseiro no lado impactado e o teste de impacto lateral com poste rígido com diâmetro de 254 mm a 32 km/h a 75°, com ocupante no banco do motorista.

Figura 14 – Requisitos laterais FMVSS 214



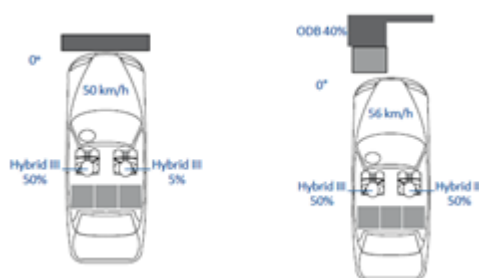
Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

2.2.1.2 Europa

A legislação europeia é definida pela UN/ECE (Economic Commission for Europe of the United Nations), e os requisitos das normativas de segurança são descritos em regulamentos numerados.

Os requisitos de ensaios de impacto frontal são descritos nas normativas ECE 137 e ECE 94, ambos utilizando ocupantes com cinto de segurança, conforme Figura 15. A primeira é relativa ao impacto de 100% do frontal em uma barreira plana impactando a 50km/h com ocupantes dianteiros, sendo o motorista com o peso equivalente a 50% na curva de peso da população mundial e o passageiro com o peso equivalente a 5%. A segunda é relativa ao ensaio frontal impacto de 40% do frontal em barreira deformável a 56 km/h com ocupantes dianteiros com peso equivalente a 50% da curva de peso da população mundial.

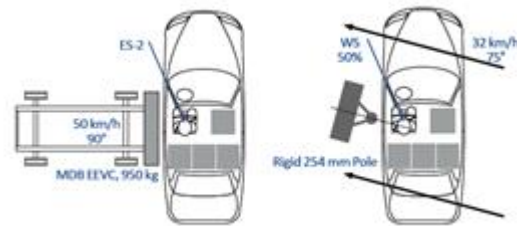
Figura 15 – Requisitos frontais: a esquerda ECE 137 e a direita ECE 94.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

Os requisitos aplicados aos ensaios laterais são descritos na ECE 95 e na ECE 135, conforme Figura 16. A primeira é relativa ao impacto lateral com barreira deformável pesando 950 kg a 50 km/h perpendicular ao sentido de marcha do veículo, com ocupante no banco do motorista. A segunda descreve os requisitos para impacto lateral do poste rígido de 254 mm a 32 km/h a 75° da ordem de marcha do veículo, utilizando ocupante no banco do motorista.

Figura 16: Requisitos laterais: a esquerda ECE 95 e a direita ECE 135.



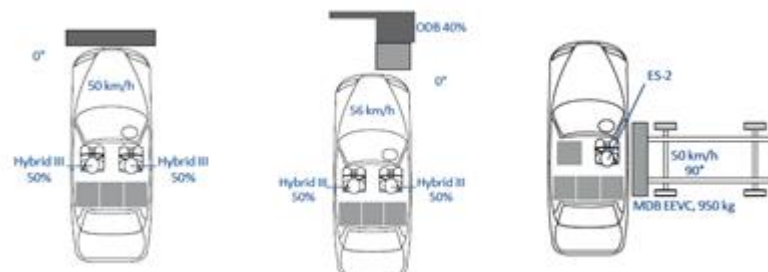
Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

2.2.1.3 Japão

A legislação japonesa é definida pelo artigo 18 da norma de regulamentação para veículos rodoviários, e os requisitos das normativas de segurança são todos descritos no mesmo artigo.

A comercialização de veículos no mercado japonês exige que as montadoras projetem veículos de direção do lado direito que cumpram os requisitos de ensaios frontais e laterais, sendo que o impacto frontal em barreira deformável baseia-se na norma europeia ECE 94 e o impacto lateral na ECE 95, porém do lado oposto devido ao fato da direção japonesa ser do lado direito. O impacto em 100% do frontal em barreira plana é similar ao previsto na norma ECE 137, porém o ocupante dianteiro do lado passageiro possui peso equivalente a 5% da curva de peso da população mundial. As configurações gerais dos ensaios estão descritas nas Figuras 17 abaixo.

Figura 17 – Ensaios frontais e laterais previstos no artigo 18 da norma japonesa.



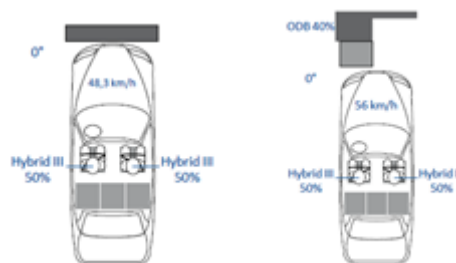
Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

2.2.1.4 Brasil

A legislação brasileira é definida pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), e os requisitos dos ensaios de segurança são descritos nas NBRs 15300-1, 15300-2, 15300-3, que dizem respeito apenas a impactos frontais.

O Governo permite que a homologação do veículo seja feita a utilizando ou o ensaio de impacto frontal em barreira rígida, ou o ensaio de impacto frontal em barreira deformável deslocada. A ABNT NBR 15300-2 é relativa ao impacto de 100% do frontal em uma barreira plana impactando a 48,3 km/h com ocupantes dianteiros, sendo os ocupantes dianteiros com o peso equivalente a 50% na curva de peso da população mundial. A ABNT NBR 15300-3 é relativa ao ensaio frontal impacto de 40% do frontal em barreira deformável a 56 km/h com ocupantes dianteiros com peso equivalente a 50% da curva de peso da população mundial, conforme ECE 94. A Figura 18 exemplifica as opções de ensaios de proteção ao ocupante para homologação de veículos no mercado brasileiro.

Figura 18 – Requisitos frontais conforme NBR 15300.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

O impacto lateral, foco de estudo deste trabalho, ainda não é uma exigência do Governo Federal para comercialização de veículos no Brasil, porém no Chile e Equador a norma de ensaio lateral baseada na regulamentação europeia ECE 95 é exigida para comercialização de veículos. Na Argentina (2018) e México (2019) o impacto lateral possui previsão para início de aplicação. As discussões com o Governo Federal brasileiro já foram iniciadas e até mesmo uma NBR (16204) foi criada com os requisitos para impacto lateral.

2.2.2 Protocolos NCAP mundiais

Os Programas de avaliação de novos carros (New Car Assessment Program - NCAP) existem em diferentes regiões mundiais, sendo que o Global NCAP conduz e orienta todos os outros programas NCAP. O objetivo dos Programas é promover e conduzir pesquisas independentes que avaliam as características de segurança dos veículos comercializados comparando a performance e informando ao público sobre os resultados (GlobalNCAP). Neste estudo, além dos programas NCAP ao redor do mundo, foi inserido o Instituto de Seguro para Segurança em Rodovias (Insurance Institute for Highway Safety – IIHS) que apresenta os resultados de pesquisas de segurança do ocupante aos consumidores.





Os ensaios realizados pelo Programa NCAP e IIHS classificam os veículos de acordo com o ranking de cada um deles, sendo que o primeiro classifica de 0 a 5 estrelas e o segundo classifica em diferentes faixas de performance (pobre, marginal, aceitável e bom), e a construção da nota final é feita de diferentes modos de acordo com o mercado.

Uma vez que este estudo irá desenvolver sua metodologia focada em ensaios de impacto lateral, para os Programas NCAP e IIHS as descrições serão feitas de maneira geral, detalhando apenas as configurações do ensaio lateral.

2.2.2.1 Euro NCAP

O protocolo Euro NCAP possui uma nota final única em que a composição é o somatório de testes de diferentes especialidades, conforme Tabela 4. São realizados ensaios que avaliam o nível de proteção adulto e infantil, proteção ao pedestre e segurança ativa.

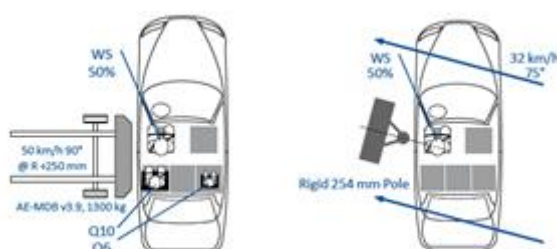
Tabela 4 – Composição de nota Euro NCAP (2016 a 2020).

Proteção ao ocupante adulto				Proteção ao ocupante infantil			Proteção ao pedestre			Segurança ativa					
	2016	2017	2018		2016	2017	2018		2016	2017	2018		2016	2017	2018
	pontuação máx.				pontuação máx.				pontuação máx.				pontuação máx.		
Impacto frontal 40%	8	8	8	Impacto frontal	16	16	16	Impacto cabeça	24	24	24	Aviso sonoro cinto	3	3	3
Impacto frontal 100%	8	8	8	Impacto lateral	8	8	8	Impacto bacia	6	6	6	Assistente velocidade	3	3	3
Impacto lateral (MDB)	8	8	8	Instalação CRS	12	12	12	Impacto perna	6	6	6	Controle de estabilidade	-	-	-
Impacto lateral (poste)	8	8	8	Veículo	13	13	13	AEB pedestre	6	6	6	LDW/LKA/LSS	3	4	4
Whiplash banco diant.	2	1.5	1.5					AEB ciclista	-	6	6	AEB urbano	3	3	4
Whiplash banco tras.	1	0.5	0.5									Assistente junção	-	-	2
AEB cidade	3	4	4												
Máx.	38	38	38	Máx.	49	49	49	Máx.	42	48	48	Máx.	12	13	16

Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

Na avaliação da proteção adulto são realizadas provas de impacto frontal com barreira deformável deslocada e barreira plana rígida, impactos laterais com barreira móvel deformável e poste rígido (Figura 19), provas de avaliação da segurança oferecida pelos bancos dianteiros e traseiros (whiplash) e provas de AEB - assistente de frenagem automático.

Figura 19 – Requisitos de ensaios laterais Euro NCAP: barreira deformável e poste rígido.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

A avaliação de proteção ao ocupante infantil são verificados os níveis de segurança da criança nos ensaios de impactos realizados conforme descrito acima, além de avaliação da dificuldade de instalação de cadeirinhas infantis e itens disponíveis do veículo que aumentam os níveis de segurança infantil.

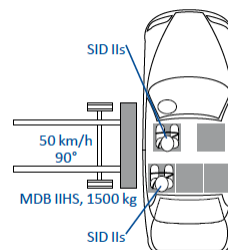
A proteção ao pedestre é avaliada conforme resultado das provas de atropelamento que quantificam os riscos de acordo com a biomecânica resultante do impacto em diferentes regiões do corpo do pedestre (cabeça, bacia e perna) e avaliação do assistente de frenagem automático (AEB VRU-Pe) em situações que simulam uma pessoa atravessando em frente ao veículo.

A avaliação de segurança ativa inclui provas que verificam o funcionamento dos sistemas: lembrete de cinto de segurança (SBR), sistema de assistência de velocidade, controle eletrônico de estabilidade (ESC), assistência de faixas da via e assistência em frenagem de emergência (AEB Inter-urban).

2.2.2.2 IIHS

O protocolo IIHS possui nota final para cada especialidade testada: impacto em 40% do frontal do veículo em barreira deformável, impacto em 25% do frontal do veículo em barreira rígida, impacto lateral com barreira móvel deformável de 1500 kg (Figura 20), ensaio de avaliação da segurança proporcionada pelo banco (whiplash), avaliação dos sistemas de frenagem de emergência automática (AEB) e prova de esmagamento do teto. As classificações de segurança possíveis são pobre, marginal, aceitável e boa. Sendo que existem duas premiações de honra para os veículos: Top Safety Pick (TSP) e Top Pick Safety Plus (TSP+). Em ambas as premiações deve-se atingir a nota máxima em todos os ensaios, porém para a TSP o veículo deve ser classificado como básico na avaliação AEB, enquanto para receber o TSP+ o veículo deve ser classificado como avançado.

Figura 20 – Requisito de impacto lateral conforme IIHS.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.


2.2.2.3 Latin NCAP

O programa de avaliação de novos veículos na América Latina e Caribe (Latin NCAP) classifica os veículos em duas diferentes especialidades: proteção ao ocupante adulto e proteção ao ocupante infantil. O Programa surgiu em 2010 apenas com o ensaio de impacto em 40% do frontal do veículo a 64 km/h para avaliação da proteção adulto e criança.

Em 2013 o protocolo evoluiu e foram inseridos pré-requisitos para recebimento das 5 estrelas pela Latin NCAP. Os pré-requisitos inseridos foram alarme de utilização dos cintos de segurança (SBR) para motorista e passageiro, ABS 4 canais de série no veículo mais básico e superar os requisitos exigidos pela norma europeia ECE 95 de impacto lateral. A partir do presente ano o protocolo foi alterado novamente e agora foram inseridos 16 pontos provenientes do impacto lateral com barreira móvel deformável de 950 kg a 50 km/h como prova padrão na avaliação de proteção ao ocupante adulto e foram inseridos novos pré-requisitos para atingimento da nota final a partir de 3 estrelas. A composição da nota final, a partir de 2016, para ambas especialidades está explicada na Tabela 5, inclusive detalhando os novos pré-requisitos: alarme de utilização dos cintos de segurança (SBR), controle eletrônico de estabilidade (ESC) e superação dos requisitos mínimos exigidos na norma de impacto lateral com poste rígido a 29 km/h e 90° com o sentido de ordem de marcha (latinNCAP).

Tabela 5 – Composição de nota Latin NCAP.

Proteção ao ocupante adulto

 Distribuição Estrelas	Pontuação necessária		Requisitos adicionais	
	Impacto frontal + Impacto lateral (máx. 16 + 16 = 32 pts.)	Aviso cinto de segurança (máx. 2pts.)	Controle de Estabilidade GTR-8	Impacto poste EuroNCAP protocolo v.5.2
★★★★★	≥ 27	≥ 1.0	✓	✓
★★★★	≥ 22	≥ 1.0	✓	
★★★	≥ 16	≥ 0.5		
★★	≥ 10			
★	≥ 4			

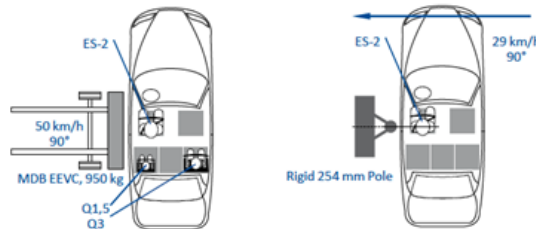
Proteção ao ocupante infantil

 Distribuição Estrelas	Pontuação necessária (máx. 49 pts.)
★★★★★	≥ 43
★★★★	≥ 36
★★★	≥ 25
★★	≥ 14
★	≥ 8

Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

As configurações gerais das provas de impacto lateral listadas na Tabela 5, e presentes no protocolo Latin NCAP a partir de 2016 estão mostradas na Figura 21 abaixo.

Figura 21 – Impactos laterais conforme protocolo Latin NCAP: barreira deformável e poste rígido.



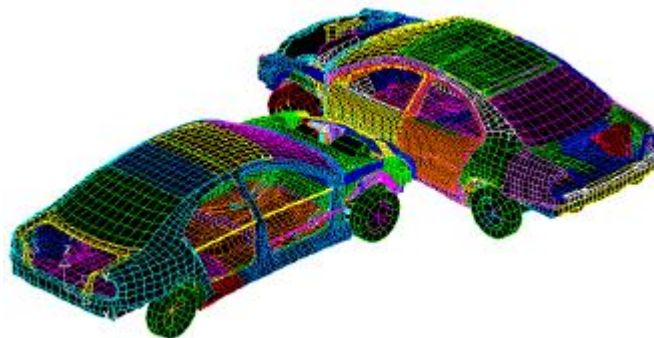
Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

2.3 Análise por elementos finitos

Segundo HUEBNER (1982) “em engenharia o método dos elementos finitos e análises não-lineares foi usado pela primeira vez em 1960 por Clough estudando sobre elasticidade plana”. A partir do trabalho de Clough, o método de elementos finitos foi usado extensivamente para análise de tensões lineares, deflexão e vibração em diversas áreas da engenharia, uma vez que na época a eficácia começava a ser comprovada.

O método dos elementos finitos em simulação de colisão evoluiu bastante nos últimos anos devido à evolução da capacidade computacional (novos programas e hardwares), a maior quantidade de estudos na área de plasticidade de chapas metálicas e novos materiais. Na Figura 22 um exemplo de utilização de software computacional em elementos finitos para análise de colisão lateral entre veículos.

Figura 22 – Modelo em elementos finitos para análise de colisão lateral



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

Segundo HUEBNER (1982) “FEM é uma técnica de análise numérica para se obter soluções aproximadas em uma ampla variedade de problemas”. Para GANDHI (1996) “a maior vantagem desse método é a capacidade de representar detalhes geométricos, materiais da estrutura, assim como a aplicação de múltiplos conceitos de projeto. Sua maior desvantagem é o custo/tempo.”. O desenvolvimento de um modelo FEM para impacto lateral pode ter duração de 2 a 4 meses, sendo que cada simulação pode durar de 10 a 20 horas de CPU, em estações de trabalho com grande capacidade de cálculo.

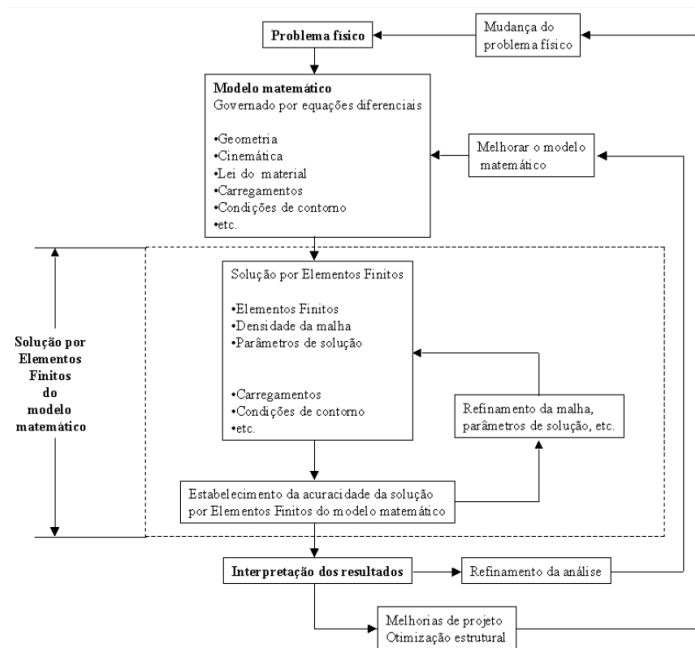
O método de elementos finitos analisa pequenos elementos interligados entre si em uma área definida como foco de análise do problema. A região é modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos. Esses elementos podem ser inseridos em diferentes configurações, modelando em formas geométricas complexas. O método pode ser aplicado em diversos problemas de engenharia que envolvem valores de contorno, aonde a solução é procurada na região do corpo (domínio), enquanto nos contornos dessa região os valores das variáveis dependentes (ou suas derivadas) são conhecidos.

Segundo RAO (1989) e HINTON & OWEN (1980), problemas que podem ser resolvidos pelo método de elementos finitos podem ser classificados em:

- Problemas de equilíbrio (exemplo: análise estática estrutural);
- Problemas de autovalor (exemplo: análise dinâmica estrutural);
- Problemas de propagação (exemplo: análise transiente no tempo).

O processo de análise de elementos finitos é esquematizado na Figura 23.

Figura 23 – Processo de análise por elementos finitos



Fonte: BAHTE, 1996

Segundo HUEBNER (1994), o método de elementos finitos se resume em 3 etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

2.3.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento é a fase na qual se prepara o problema através de modelamento do fenômeno, introdução das condições iniciais de contorno, carregamentos, propriedades dos materiais e simplificações que visam reduzir o tempo de análise sem influenciar negativamente o resultado. Essa etapa subdivide-se em:

- Discretização do modelo: o modelo é subdividido em um número equivalente de elementos finitos, os quais podem ser triângulos ou quadriláteros para problemas 2D, ou tetraedros e hexaedros para 3D. Os elementos possuem nós, os quais podem ser internos ou externos. Assume-se que esses elementos são interligados entre si por nós localizados no contorno dos elementos e os deslocamentos desses nós são as incógnitas do problema. O processo de discretização depende das premissas adotadas pelo engenheiro através do seu conhecimento.

- Seleção das funções de interpolação: para os elementos selecionados na primeira etapa, existem funções de interpolação ou deslocamento classicamente aceitas. As funções assumidas representam, considerando aproximações, a distribuição real ou exata dos deslocamentos. A forma adotada para as funções, em geral, é a polinomial, pela simplicidade de manipulação matemática. Existem três fatores que possuem influência na função de interpolação: a escolha do tipo e grau da função, o tipo das variáveis de campo e o modelo deve satisfazer requisitos que garantam que o resultado numérico se aproxime da solução correta.

2.3.2 Solução (*Solver*)

A etapa de solução depende da configuração do modelo na etapa de pré-processamento. A solução baseia-se num algoritmo numérico que tem o objetivo de solucionar eficientemente uma equação diferencial com todas as restrições impostas ao modelo. Subdivide-se em:

- Obtenção da matriz de rigidez elementar: a matriz de rigidez é constituída pelos coeficientes das equações de equilíbrio derivadas das propriedades geométricas e do material de um elemento e pode ser obtida através do princípio da mínima energia potencial. A rigidez relaciona os deslocamentos nodais às forças aplicadas em cada nó. A relação de equilíbrio entre a matriz de rigidez $[k]$, o vetor força nodal $\{F\}$ e o vetor deslocamento nodal $\{u\}$ é expressa por um conjunto de equações algébricas lineares simultâneas, $\{F\} = [k] \cdot \{u\}$. A matriz de rigidez para um elemento depende da função de interpolação, da geometria do elemento e das propriedades locais do material.
- Montagem das equações algébricas para todo o domínio: montagem da matriz de rigidez global para todo o modelo a partir das matrizes de rigidez elementares e do vetor força global a partir dos vetores força elementares. A base para o método de montagem são as interconexões nodais. Os deslocamentos em um nó devem ser os mesmos para todos os elementos adjacentes.
- Soluções para os deslocamentos desconhecidos: as equações algébricas montadas são resolvidas para os deslocamentos conhecidos. Em problemas lineares, essa é uma aplicação relativamente direta da álgebra matricial. Entretanto em

problemas não-lineares, as soluções são obtidas por uma sequência de atividades, cada uma envolvendo a modificação da matriz de rigidez e/ou vetor força.

- Cálculo das deformações e tensões elementares a partir dos deslocamentos nodais: em determinados casos (deformação em corpos elásticos), os deslocamentos nodais são variáveis em estudo para a solução. Entretanto, muitas vezes outras derivações das variáveis desconhecidas, por exemplo tensão e deformação, devem ser calculadas. Em geral tensão e deformação são proporcionais às derivadas dos deslocamentos.

2.3.3 Pós-processamento

O pós-processamento é a última etapa do método e depende das necessidades do engenheiro. É possível obter dados como:

- Deslocamentos nodais, deformações da geometria;
- Gradientes de tensão de acordo com o critério escolhido;
- Gradientes de temperatura;
- Deslocamentos nodais ao longo do tempo;
- Frequências naturais e modos de vibração.

2.4 Análise não-linear

Dentro do foco do trabalho que é a análise de colisões entre veículos, é importante se levar em conta o comportamento não-linear do fenômeno. A não-linearidade ocorre por várias causas (deformações plásticas, grandes deslocamentos, grandes rotações e efeito derivado do atrito entre chapas metálicas), as quais podem ser agrupadas em três categorias:

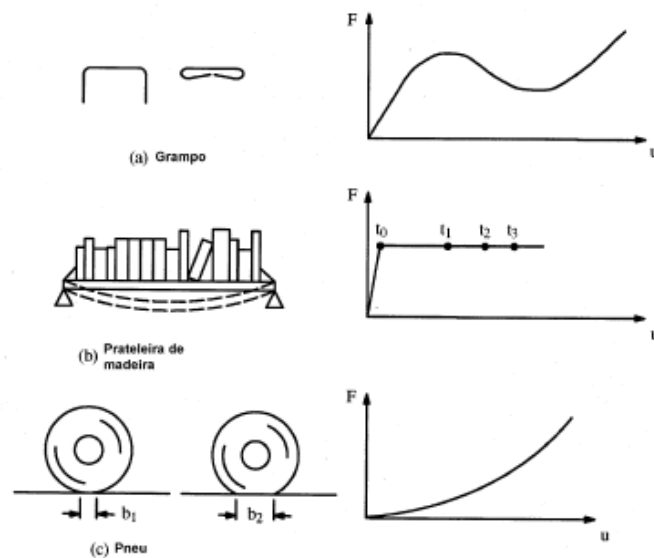
- Não linearidade geométrica;
- Não linearidade de material;
- Mudanças de estado (contato).

A não-linearidade torna a análise extremamente complexa, o que requer o auxílio de algoritmos numéricos sofisticados e recursos computacionais.

BATHE (1996) atribui o comportamento não linear a três principais causas:

- Comportamento não-linear do tipo cinemático devido a grandes deslocamentos, rotações e deformações que ocorrem durante o fenômeno;
- Comportamento linear do tipo constitutivo, devido ao caráter inelástico que caracteriza as deformações do material;
- Caráter não-linear das condições de contorno devido à interação (atrito e contato) que são produzidos entre sólidos.

Figura 24 – Exemplos de comportamento não-linear



Fonte: Manual do usuário ANSYS

A solução de problemas dinâmicos utiliza a equação do movimento (BATHE, 1996):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\}$$

Onde:

[M] = matriz de massa

[C] = matriz de amortecimento

[K] = matriz de rigidez

{ \ddot{u} } = vetor aceleração

{ \dot{u} } = vetor velocidade

{u} = vetor deslocamento

$\{F^a\}$ = vetor de forças aplicadas

As equações se tornam não-lineares quando a matriz de rigidez $[K]$ é dependente do deslocamento $\{u\}$ ou de suas derivadas. Deixando as equações da seguinte maneira:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K(x(t))]\{x(t)\} = \{F(t)\}$$

Segundo BATHE (1996), matematicamente a equação do movimento representa um sistema de equações lineares de segunda ordem, a princípio a solução poderia ser obtida através de equações diferenciais. Contudo, a complexidade da solução pode aumentar caso a ordem das matrizes for muito grande, o que traria a necessidade de procedimentos alternativos para a solução das equações.

Os procedimentos alternativos podem ser divididos em dois grupos: métodos de integração direta no tempo e métodos de superposição de modos. Os métodos de superposição de modos são frequentes em análise de vibrações, quando a geometria básica não muda. Em casos que envolvem plasticidade e contato, os modos de vibrar mudam durante a análise e inviabilizam a utilização desse método.

Tabela 6 – Métodos alternativos de integração

Métodos de integração direta	Métodos de superposição de modos
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Método de Newmark; ▪ Método de diferenças centrais; ▪ Método de Houbolt; ▪ Método θ de Wilson. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mudança de bases para deslocamento modal generalizado; ▪ Análise desconsiderando amortecimento; ▪ Análise considerando amortecimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

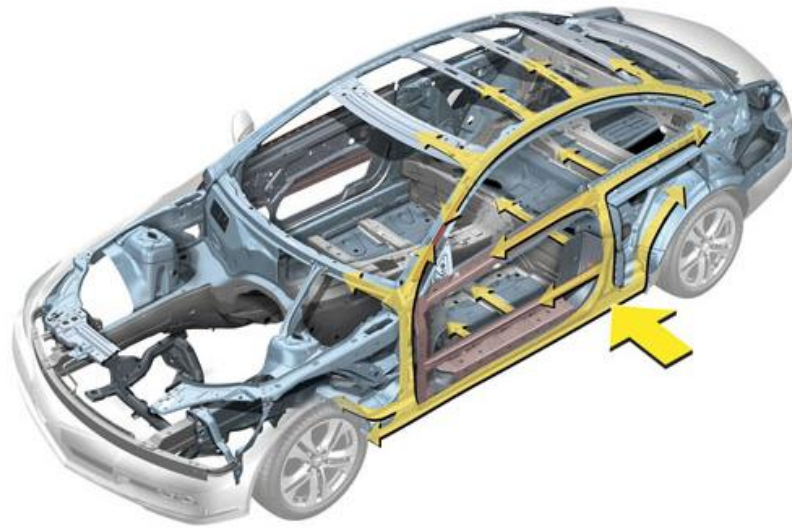
3.1 Estado da arte

O estudo de impactos laterais no cenário atual apresenta diversas linhas de pesquisas conforme mudamos a região de aplicação devido a diferenciação entre as normas de ensaio de impacto em cada mercado. No mercado europeu as linhas de pesquisas estão voltadas para maior absorção de energia da estrutura do veículo em impactos com barreiras de 1300kg aliada à aplicação de sistemas de retenção (airbags) cada vez mais eficientes, além de um grande volume de pesquisas em impacto lateral com poste. No cenário americano podemos encontrar diversas pesquisas ligadas a impactos com barreiras de 1500kg em veículos com sistema de proteção lateral (airbags). No Brasil, por se tratar de uma tecnologia de custo elevado e por não termos requisitos de impacto lateral em nossos carros, os airbags laterais não possuem grande aplicação por aqui. Porém as melhorias de segurança em situações de impacto lateral mostram-se necessárias quando investigamos os dados do IBGE e DATASUS. FILDES (1995) descreve detalhadamente os benefícios aos ocupantes de veículos provenientes da aplicação de normativas de ensaio de impacto lateral.

PAL (2013) evidencia que em impactos laterais fatores como peso, altura e índice de massa corporal afetam o resultado biomecânico do ocupante, porém não tanto quanto o comportamento da estrutura e o projeto dos componentes internos do veículo, como podemos verificar nos estudos de HALLMAN (2010) e GANDHI (1995) respectivamente. GIBSON (2001) faz o levantamento estatístico indicando as regiões do corpo mais afetadas em impactos laterais e as relaciona utilizando as estatísticas de acidentes na Austrália de acordo velocidade de impacto, tipo de veículo, posição do ocupante e massa do veículo.

Segundo WITTEMAN (1999), “em colisões entre veículos, quanto maior a absorção de energia de todos os elementos envolvidos, melhor são as condições de segurança para o ocupante do veículo”. A Figura 25 exemplifica a distribuição de carga em casos de colisões perpendiculares entre veículos. O caminho percorrido pela carga deve ser o mais estável possível para que essa energia possa ser dissipada com eficiência, para isso as montadoras aplicam aços de alta resistência mecânica com o objetivo de evitar rupturas que possam direcionar a carga à regiões não projetadas para suportarem cargas de impacto.

Figura 25 – Distribuição de cargas na carroceria do veículo em impactos laterais



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

A Figura 26 foi extraída da página oficial Volvo e possui a aplicação de diferentes tipos de aços de materiais na carroceria do veículo Volvo V60, e pode-se verificar que nas linhas de cargas solicitadas em impactos laterais são aplicados aços de alta resistência para estabilização da carroceria e maior nível de proteção ao ocupante.

Figura 26 – Aplicação de materiais na carroceria: Volvo V60

- Aço de ultra alta resistência
- Aço de extra alta resistência
- Aço de muito alta resistência
- Aço de alta resistência
- Aço macio
- Alumínio
- Magnésio



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

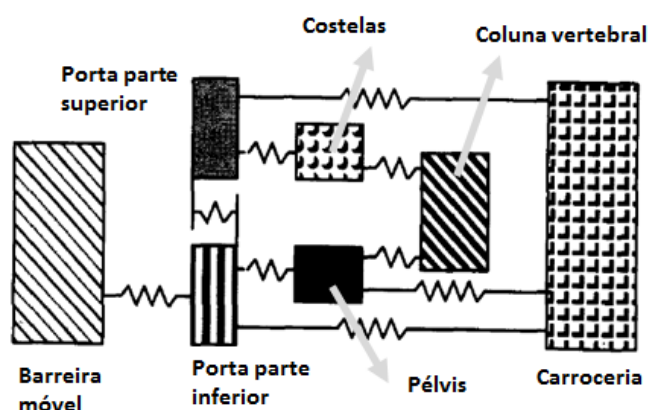
A influência da carroceria neste trabalho será considerada em forma de velocidade de intrusão da estrutura da porta, que conforme TENCER et al (2005), sendo reduzida pode contribuir significativamente na aceleração do tórax, enquanto a aceleração na pélvis pode ser

atenuada pela redução da intrusão e aplicação de elementos mais macios no painel de portas. O foco deste estudo será a influência do painel de portas em estruturas que trabalham da mesma maneira, absorvendo a mesma quantidade de energia e com a mesma característica.

FILDES (1994) menciona que a maior fonte de lesões torácicas, abdominais e pélvicas em impactos laterais são os painéis de porta, e que soluções com maior capacidade de absorção de impacto possuem grande influência na redução de lesões nessas regiões do corpo. Absorvedores e materiais de melhor absorção poderiam reduzir até 30% das cargas provenientes do impacto no corpo ocupante. Ele também menciona que as distâncias entre painel de portas podem contribuir bastante na redução.

Segundo GANDHI (1995) “a geometria interna define a maneira como o ocupante é impactado, por exemplo: o local do impacto e sequência de carregamento tem diferentes influências nas medições de aceleração em diferentes regiões do corpo. As cargas de impacto podem ser reduzidas projetando o veículo de forma que o ocupante possa mover mais cedo”. A movimentação mais cedo do manequim em relação à estrutura mais rígida da lateral do veículo (estrutura da porta) reduz a velocidade relativa de intrusão das cargas no ocupante. GANDHI (1995) ainda propõe um modelo para estudo do impacto lateral.

Figura 27 – Modelo para estudo do impacto lateral



Fonte: GANDHI, 1995.

Dentre as referências utilizadas, CAMPBELL (1999) segue a linha mais próxima ao estudo previsto neste trabalho, ele estuda fatores de projeto que podem influenciar no resultado biomecânico em colisões laterais, tais como: distância entre ocupante e painel de portas, posição do apoio-braço e velocidade de intrusão da estrutura da porta, e conclui que “a

segurança do ocupante em impactos laterais é uma função de milímetros e milissegundos, e que mínimas variações nos sistemas discutidos podem resultar em melhorias ou piores significativas dependendo da situação. Assim como MARKLUND & NILSSON (2001) e ZHANG et al (2007) apresentam resultados da redução de massa, com o foco no pilar B do veículo, o primeiro aplicado em um modelo específico da SAAB, concluindo que é possível reduzir a massa da estrutura mantendo a performance de segurança. No caso estudado foi possível reduzir em 25% otimizando a estrutura sem a necessidade da troca de material.

No mercado europeu, as provas de performance em impactos laterais existem desde o surgimento da Euro NCAP e na atualidade a grande maioria dos veículos utilizam airbags laterais para proteção do ocupante nessa tipologia de colisão. Esse fato dificulta relacionar a performance biomecânica com o formato do painel de portas em veículos europeus. No mercado latino americano as avaliações de performance em impactos laterais foram aplicadas a partir do protocolo deste ano (2016), sendo que a grande maioria dos veículos não possui airbag lateral em seus itens de série. Esse fato possibilitará a visualização mais clara, em um curto espaço de tempo futuro, da influência dos diferentes painéis de portas e estruturas do veículo em casos de colisões laterais.

Na Europa e Estados Unidos, a grande maioria dos estudos atuais consideram o airbag lateral em situações de colisão, como podemos verificar nas referências de YOGANANDAN et al (2007) e HALLMAN et al (2010), uma vez que a aplicação desses itens de segurança atingem praticamente todos os veículos comercializados. No Brasil e América Latina, o volume de estudos divulgados na área de segurança veicular passiva considerando impactos laterais ainda é baixo. Uma das possíveis causas pode ser o fato de que muitas montadoras possuem sua engenharia fora do país, além da aplicação do airbag lateral, apesar de ser uma solução de valor elevado, é uma opção de performance garantida e eficiência comprovada conforme estudo de MIKHAIL & HUELKE (1997), que menciona que a solução aliada a utilização de outros sistemas de retenção do ocupante são responsáveis por poupar a vida de diversos passageiros durante uma colisão de alta velocidade.

Nos veículos comercializados no Brasil, podemos verificar diferentes soluções de painéis de porta, conforme Figura 28, e essas terão sua influência avaliada na proteção do ocupante.

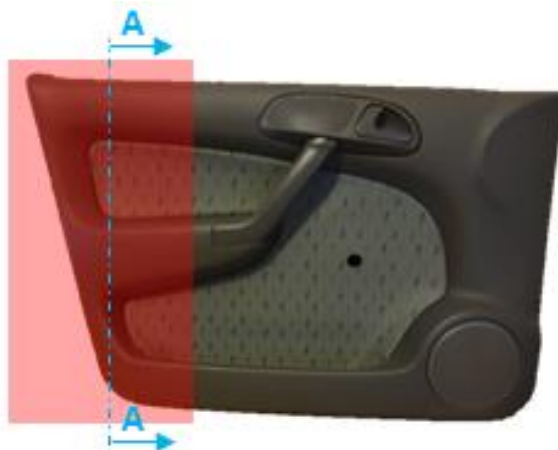
Figura 28 – Painéis de porta dos veículos com maior volume de venda no Brasil



Fonte: Removida do banco de dados interno FCA.

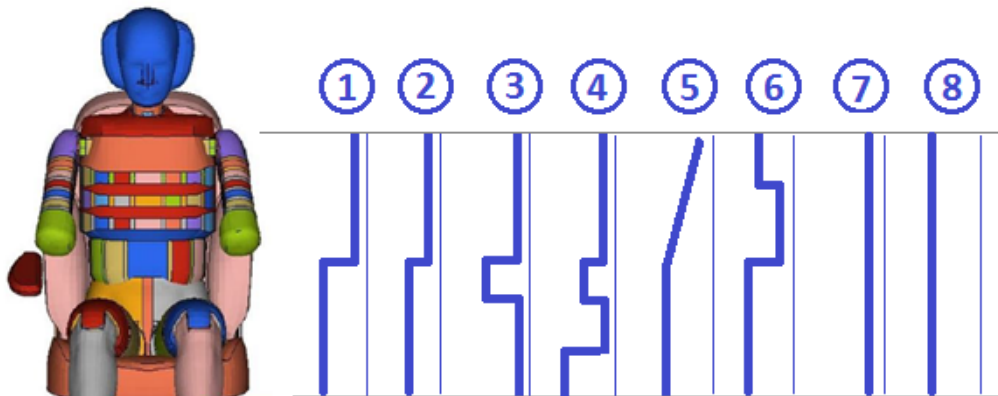
Em uma colisão lateral, a região que efetivamente entra em contato com o corpo do ocupante é a parte mais próxima a coluna B do veículo. Dentre os painéis de portas aplicados em veículos comercializados no Brasil pode-se verificar diversos perfis diferentes na região de impacto com o ocupante dianteiro. Esses perfis provenientes do corte A-A indicado na Figura 29 foram simplificados na Figura 30 e alguns serão selecionados para estudo virtual.

Figura 29 – Região de impacto do corpo do ocupante em colisões laterais



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Perfis de painéis de portas simplificados para análise.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma solução aplicada a projetos de painéis de porta é o absorvedor de energia estrategicamente localizados para reduzir as cargas em regiões determinadas do corpo humano. O objetivo além de redução de cargas em alguns projetos, é o de sequenciar o carregamento das cargas de impacto e deslocar o ocupante para redução da velocidade relativa de impacto (velocidade analisada entre intrusão da estrutura e deslocamento do ocupante), como pode ser observado em GANDHI (2005). A Figura 31 apresenta veículos que aplicam absorvedor de energia no painel de portas dianteiro.

Figura 31 – Absorvedor de energia em polipropileno expandido (a esq.) e em peça plástica (a dir.)



Fonte: Removida do banco de dados interno FCA.

3.2 Normas de ensaios de impacto lateral

Este trabalho utiliza os requisitos das normas de impacto lateral ECE 95 e protocolo de proteção adulto da Latin NCAP como referência para desenvolvimento da análise. A primeira

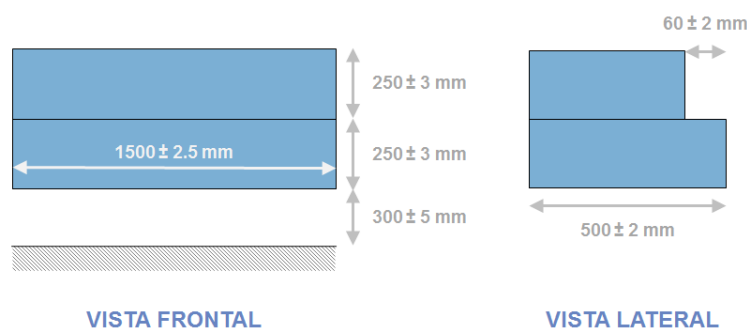
é utilizada para homologação de veículos no mercado europeu e é a referência para as normas de diversas regiões do mundo. A segunda é o protocolo que avalia os veículos comercializados no mercado latino americano e publica relatórios para os consumidores.

3.2.1 Ensaio lateral: requisitos ECE 95

O regulamento número 95 da Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) contém as prescrições uniformes relativas à homologação de veículos no que diz respeito à proteção dos ocupantes em caso de colisão lateral. O procedimento europeu exige o impacto lateral de uma barreira móvel deformável a 50 km/h em um veículo estacionário.

A barreira de 950 kg é composta por seis blocos independentes de alumínio alveolado, preparados para transmitir um nível progressivo de força com o aumento da deformação e dimensionados conforme Figura 32. O impactador deve ser centralizado no ponto R do veículo durante a preparação do ensaio.

Figura 32 – Dimensionamento da barreira móvel deformável.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O veículo deve estar com a massa de ordem de marcha somada a massa equivalente ao tanque de combustível preenchido 90% e os reservatórios completos. Um manequim EuroSID-2 deve ser posicionado no banco do motorista que deve ser regulado longitudinalmente na metade do curso total do trilho e na altura do banco que não possui regulagem de altura. A inclinação do encosto deve ser ajustada pelo fabricante do veículo.

A regulamentação possui critérios estruturais que não permitem abertura das portas do veículo durante o ensaio, não permitem vazamento de combustível e critérios biomecânicos a serem preenchidos para que seja possível a aprovação no ensaio, são eles:

- Critério de comportamento funcional da cabeça (HPC) inferior ou igual a 1000;
- Critério de deflexão das costelas (RDC) inferior ou igual a 42 mm;
- Critério viscoso da caixa torácica (VC) inferior ou igual a 1,0 m/s;
- Força máxima exercida na sínfise púbica (PSPF) inferior ou igual a 6 kN;
- Força máxima exercida no abdômen (APF) inferior ou igual a uma força interna de 2,5 kN (equivalente a uma força externa de 4,5 kN);

Figura 33 – Configuração de prova conforme normativa ECE 95.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

3.2.2 Ensaio lateral: requisitos Latin NCAP

Os ajustes de prova do impacto lateral do protocolo Latin NCAP são similares às configurações de provas apresentadas na ECE 95, porém com a diferença do posicionamento do banco do motorista, que deve estar ajustado longitudinalmente entre o ponto R (correspondente ao ponto H do manequim de 95%ile) e a posição mais adiantada possível. Outro ponto de diferenciação dos ensaios é a aplicação de manequins infantis nos bancos posteriores, conforme Figura 34, e o critério de avaliação que quantifica a performance geral do veículo.

Figura 34 – Aplicação do manequim infantil nas provas Latin NCAP.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

O critério básico de avaliação, indicado na Figura 35, utilizado para o ensaio de impacto lateral Latin NCAP consiste da utilização de limites inferiores e superiores de performance, aonde valores que superam a melhor performance recebem a nota máxima (4 pontos), valores que não superam a pior performance recebem a nota zero, e valores intermediários são calculados através de interpolação linear. A máxima pontuação do ensaio é de 16 pontos, sendo que os pontos são distribuídos por região do corpo: cabeça (4 pontos), tórax (4 pontos), abdômen (4 pontos) e pélvis (4 pontos).

Figura 35 – Distribuição de pontos conforme protocolo de impacto lateral Latin NCAP.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

A região da cabeça é avaliada através do critério de lesão da cabeça (HIC) e a aceleração resultante durante um período mínimo de 3ms. O primeiro item considera como performance superior valores abaixo de 500 e inferior valores acima de 700. O segundo considera como performance superior valores abaixo de 72g e inferior valores acima de 88g.

O tórax possui dois indicadores que são considerados para avaliação da performance, a deflexão dinâmica do tórax e o critério viscoso da caixa torácica. O primeiro item considera como performance superior valores abaixo de 22 mm de compressão, e inferiores valores acima de 42 mm. Para o segundo item a performance superior representa valores abaixo de 0,32 e a inferior valores acima de 1,00.

A região abdominal é avaliada através da força aplicada nesta área do corpo do manequim durante o impacto. Os valores de performance superiores estão abaixo de 1,0 kN e os valores inferiores estão acima de 2,5 kN.

A região pélvica tem como indicador apenas a força máxima na sínfise púbica, no qual forças abaixo de 3,0 kN são considerados performances superiores e valores abaixo de 6,0 kN são performances inferiores.

O protocolo Latin NCAP além de indicar fatores que pontuam a performance no impacto lateral, indica fatores que penalizam a performance, são eles:

- Carga na placa instalada no manequim: força no eixo-y em uma placa localizada na região posterior do manequim, que pode penalizar em até 2 pontos na avaliação do tórax;
- Modificador T12: força no eixo-y e momento no eixo-x medidos no ponto da vértebra toráco-lombar T-12, que pode penalizar em até 2 pontos na avaliação do tórax;
- A abertura de portas durante o impacto penaliza a performance um ponto por porta aberta, sem limite máximo de redução de pontuação.

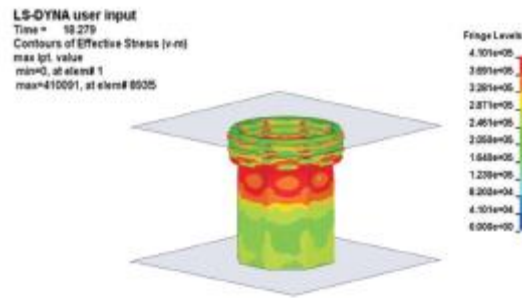
3.3 LS-DYNA

LS-DYNA é um solver para análise estrutural por elementos finitos através do método explícito. Este método é utilizado para resolver problemas em regime transiente que envolvam grandes não-linearidades, sejam elas geométricas, de contato, grandes deformações ou complexas relações constitutivas de materiais.

Conforme indicado na página da internet do LS-DYNA, as características das simulações que envolvem cálculo explícito contemplam geralmente durações de intervalo de tempo muito pequenos, tipicamente menores que 1 s. Modelos de falha para representar dano permanente ou falha completa do material em análise são facilmente implementáveis.

Com o LS-DYNA podem ser simuladas várias situações complexas da engenharia, tais como processos de conformação mecânica e contatos altamente não-lineares (Figura 36).

Figura 36 – Ensaio de crashbox, contatos não-lineares.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

Modelos de materiais complexos são possíveis de implementar, bem como o estudo de propagação de ondas em estruturas. Drop Tests com equipamentos eletrônicos ou da linha branca e Crash Tests (Figura 37), entre outras, também são possíveis aplicações para o LS-DYNA.

Figura 37 – Modelo virtual para simulação de impacto lateral.



Fonte: CARHS – Safety Companion, 2016.

A indústria da mobilidade, por sinal, é a maior cliente do software, que possui ferramentas específicas para reproduzir matematicamente impactos envolvendo dummies, air bags, cintos de segurança, muros rígidos, etc. Dentre as diversas capacidades de análise do LS-DYNA, estão:

- Dinâmica não-linear
- Dinâmica de corpos rígidos
- Simulações quase estáticas
- Modos normais
- Estática linear
- Análises térmicas

- Acoplamento de dinâmica FEM-rígido multi-corpos (MADYMO, Cal3D)
- Análises de falha
- Propagação de trincas

3.4 MADYMO

O software de simulação de segurança do ocupante MADYMO (MATHematical DYNAMIC MOdel) foi desenvolvido pela TNO Automotive Safety Solutions (TASS) localizada na Holanda, e consiste de: um solver, banco de dados de dummies e modelos de corpos humanos, pré e pós-processador e outros componentes.

3.4.1 Solver

Os modelos tridimensionais utilizados para simulações de segurança do ocupante podem ser divididos entre multi-corpos e modelos de elementos finitos. Modelos multi-corpos são capazes de simular de maneira eficiente o movimento tridimensional de um sistema dinâmico constituído por complicadas cinemáticas de corpos interconectados. Modelos de elementos finitos são capazes de simular não somente movimento tridimensional de elementos finitos mas também deformações estruturais locais e distribuição de tensões em elementos finitos. Comparado aos modelos multi-corpos, os modelos de elementos finitos geralmente demandam mais tempo para serem criados e requerem maior tempo de cálculo para executar a simulação.

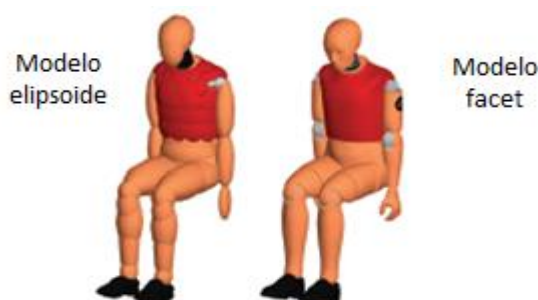
O solver MADYMO é compatível com modelos multi-corpos e de elementos finitos. Segundo TAKEO (2012) em projetos iniciais, as características de modelos multi-corpos de necessitar de menos tempo de cálculo podem ser explorados para estudos de otimização e vários outros parâmetros. Adicionalmente, o solver MADYMO suporta o acoplamento com outros programas de elementos finitos (LS-DYNA, Pam-Crash, Radioss, ABAQUS) para simulação. Essa característica pode ser utilizada para detalhamento e análise mais aprofundada com respeito a deformação estrutural.

3.4.2 Banco de dados de crash dummies e modelos de corpos humanos

Dentre os modelos CAE de corpos humanos, modelos numéricos de crash dummies são um deles, tais como Hybrid III e Euro SID, utilizados em testes de colisão automotiva enquanto outros são modelos numéricos baseados na estrutura atual do corpo humano. Nos modelos CAE dos crash dummies, a característica de resposta do modelo são reproduzidas entrando com dados relevantes tais como dimensões do dummy, massa, momento de inércia, ângulos das juntas móveis e características das superfícies de contato.

A ferramenta MADYMO possui o auxílio de um banco de dados de vários modelos multi-corpos CAE de crash dummies. Existem dois tipos de modelos multi-corpos de crash dummies: o elipsoide e os facet models, conforme Figura 38. Esses modelos são utilizados para correta representação do manequim utilizado em ensaios de colisão em simulações de impacto.

Figura 38 – Exemplo de modelos de manequim CAE disponíveis.



Fonte: Manual do modelo MADYMO versão 7.6.

Segundo TAKEO (2012) o crash dummy consiste de elementos mecânicos que limitam as possibilidades de análises precisas do corpo humano e as lesões em caso de colisões. Por outro lado, é possível em computadores recriar com algumas restrições as propriedades dinâmicas, estruturais e funções do corpo humano, que tornam possível estudar algumas disciplinas que não seriam possíveis com os crash dummies tais como características de resposta humana e mecanismo de lesão.

O MADYMO possui um banco de dados com diversos modelos CAE multi-corpos do corpo humano (ocupantes e pedestres exemplificados na Figura 39). Como eles são modelos multi-corpos, é relativamente fácil de alterar dimensões, postura e propriedades dinâmicas.

Esses modelos são utilizados em simulações de performance em ensaios de impactos entre veículos.

Figura 39 – Exemplos de modelos de corpo humano CAE disponíveis.



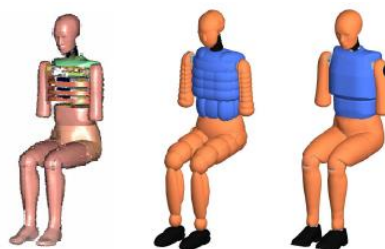
Fonte: Manual do modelo MADYMO versão 7.6.

3.4.3 Modelo do manequim Euro SID 2

Seguindo a demanda do mercado por modelos eficientes e com respostas precisas de manequins utilizados em ensaios de impacto entre veículos, foram desenvolvidos e disponibilizados no software MADYMO, os modelos elipsoide e modelos facet do manequim Euro SID 2 utilizado em impactos laterais, indicados na Figura 40. O manequim Euro SID 2 foi adotado na Europa para os protocolos da Euro NCAP e ECE 95 em 2003 e 2004 respectivamente, e corresponde a um ocupante homem de estatura média (50% ile) adulto.

Conforme o manual do modelo da Tass International (2015), modelos elipsoide e facet consistem de 202 corpos cada, sendo 29 restrições, 176 outras restrições cinemáticas e tem 35 saídas MADYMO e 61 critérios de lesões predefinidos, cobrindo assim todas as possibilidades de instrumentação hardware disponíveis e todos os critérios de lesões requeridos para avaliação nos protocolos nos quais são utilizados o manequim Euro SID 2.

Figura 40 – Modelos MADYMO manequim EuroSID-2.



Fonte: Manual do modelo MADYMO versão 7.6.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consiste no impacto de veículos de diferentes segmentos e massas em ordem de marcha, com o objetivo de identificar padrões de comportamento e analisar os resultados estruturais e biomecânicos de veículos de diferentes montadoras e conceitos de projeto. Devido ao sigilo exigido pela FCA Chrysler Automóveis no desenvolvimento de novos produtos, os nomes dos modelos utilizados para o desenvolvimento da metodologia experimental serão ocultados neste trabalho.

A Tabela 7 evidencia as características mais relevantes dos veículos utilizados para análise experimental.

Tabela 7 – Características dos veículos utilizados na análise experimental.

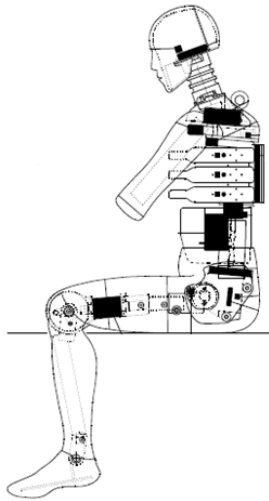
Veículo	Segmento	Massa em teste [kg]
1	B SUV	1300.0
2	A	1050.0
3	C Pickup	1950.0
4	B Pickup	1700.0
5	B	1150.0

O ensaio foi realizado conforme especificações da norma ECE 95, que consiste em um ensaio de impacto lateral de uma barreira móvel deformável de 950 kg centralizada na coordenada 'x' do ponto-R do banco a uma velocidade de 50 km/h. Para avaliação do resultado biomecânico é utilizado o manequim EuroSID-2 na posição do motorista.

4.1 Instrumentação do manequim

A avaliação dos resultados biomecânicos é realizada a partir da compilação de resultados provenientes da instrumentação aplicada no manequim aplicado durante o ensaio. O manequim é composto de partes que equivalem a regiões do corpo humano: cabeça, pescoço, tórax, abdômen, pélvis, braços, pernas e pés, conforme Figura 41.

Figura 41 – Segmentação do manequim EuroSID-2



FONTE: CARHS – Safety Companion, 2016.

No caso específico da norma europeia utilizada nos ensaios experimentais, são avaliadas as regiões listadas e caracterizadas na Tabela 8. Em cada região são aplicados acelerômetros, células de carga ou medidores de deflexão, de acordo com o índice biomecânico avaliado segundo normativa.

Tabela 8 – Instrumentação utilizada no manequim

Localização	Parâmetro	Critério de lesão
Cabeça	Acelerações A_x, A_y, A_z	HPC (head protection criterion)
Tórax T1	Acelerações A_x, A_y, A_z	Verificação de performance
Tórax T12	Aceleração, A_y	Verificação de modificadores
Costelas	Aceleração, A_y	Verificação de performance
	Deflexão, Drib	RDC e VC
Abdômen	Forças, F_y	APF
Backplate	Forças F_x, F_y	Verificação de modificadores
	Momentos M_y, M_z	
T12	Forças F_x, F_z	Verificação de modificadores
	Momentos M_x, M_y	
Pélvis	Acelerações A_x, A_y, A_z	Verificação de performance
Sínfise púbica	Força, F_y	PSPF

4.2 Utilização dos dados para cálculo da performance

Os parâmetros controlados durante o ensaio experimental são utilizados na fase de cálculo dos parâmetros biomecânicos para avaliação da segurança do ocupante no veículo testado. Os critérios da norma ECE 95 serão utilizados na fase experimental, uma vez que a performance estrutural possui comportamento e medições similares à prova Latin NCAP com barreira deformável, porém com menor quantidade de requisitos, o que reduz o custo do ensaio de impacto lateral.

4.2.1 Critério de performance da cabeça (HPC)

O critério de performance da cabeça (HPC) é calculado no período de tempo entre o contato inicial da cabeça com o airbag (t_1) e o instante final de contato (t_2). HPC é o valor máximo encontrado na expressão:

$$(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right)^{2,5}$$

Onde 'a' é a aceleração resultante no centro de gravidade da cabeça em metros por segundo por segundo dividido por 9,81 gravado versus tempo e filtrado em canal de classe de frequência de 1000 Hz, conforme normativa ECE 95 da Comissão Econômica Europeia .

4.2.2 Critérios de performance do tórax

Os critérios utilizados para avaliação da performance do tórax são: a deflexão do tórax e o critério viscoso, sendo que o primeiro item é mensurado de forma direta e filtrado em canal de classe de frequência de 180 Hz. O segundo é o valor máximo de resposta de viscosidade do tórax filtrados em canal de classe 180 Hz, e é calculado do produto instantâneo entre compressão do tórax relativa a metade do tórax e a velocidade de compressão. Para propósito de padronização, o valor de metade do tórax para o manequim EuroSID-2 é 140mm. O critério viscoso (VC) pode ser calculado através da expressão:

$$VC = \text{máx.} \left[\frac{D}{0,14} \frac{dD}{dt} \right]$$

Onde D é a deflexão das costelas em metros.

4.2.3 Critério de performance do abdômen

O pico de força abdominal é o valor máximo do somatório das três forças medidas pelos transdutores montados na região do abdômen, filtrados em canal de classe 600 Hz.

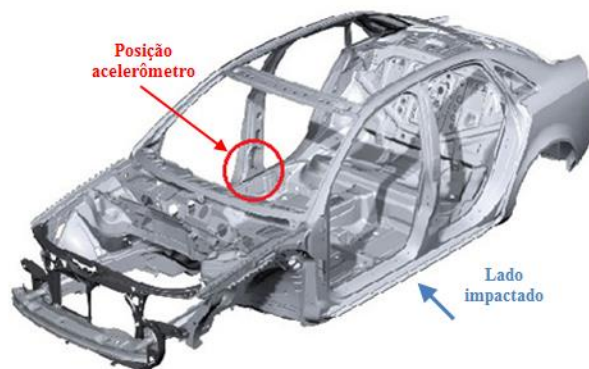
4.2.4 Critério de performance da pélvis

O pico de força na sínfise púbica (PSPF) é o valor máximo do somatório das três forças medidas pelos transdutores localizados na pélvis, filtrados em canal de classe 600 Hz.

4.3 Instrumentação do veículo

A avaliação da performance estrutural do veículo além de contar com a inspeção visual após impacto, neste estudo conta também com a medição de aceleração no montante B (lado não impactado) do veículo de teste, conforme Figura 42.

Figura 42 – Posicionamento acelerômetro: montante B.



FONTE: Adaptada da figura presente no CARHS – Safety Companion, 2016.

5 METODOLOGIA NUMÉRICA

O procedimento de metodologia numérica tem o objetivo de organizar e definir bem as atividades a serem realizadas durante a preparação da simulação virtual. Essa fase de desenvolvimento do trabalho será dividida nas seguintes etapas:

- Construção do modelo de simulação lateral;
- Análise da influência da velocidade de intrusão da estrutura do veículo;
- Análise dos diferentes perfis de painel de portas;
- Avaliação da aplicação de absorvedores de energia.

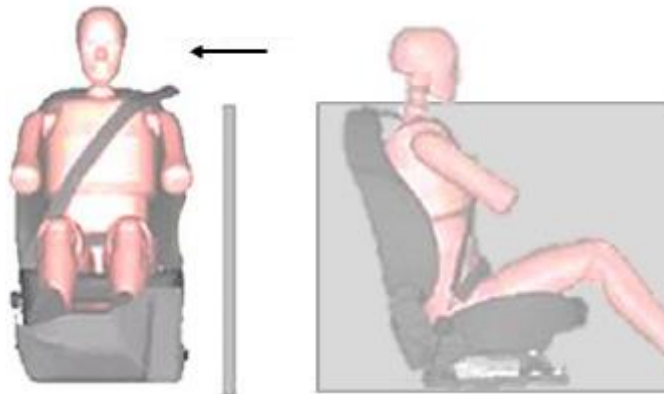
5.1 Construção do modelo de simulação lateral

A simulação lateral será realizada em duas etapas, sendo a primeira etapa realizada no software MADYMO e a segunda etapa utilizando o recurso de coupling do LS-DYNA.

A primeira fase do estudo numérico tem o objetivo de encontrar a velocidade de intrusão da estrutura que será utilizada nas etapas subsequentes. O modelo será constituído de três elementos para simulação da interação: o painel de portas, o banco do veículo, o cinto de segurança e o ocupante.

O modelo do painel de portas plano construído em superfície elipsoide, utilizará propriedades de polietileno utilizado em veículos populares comercializados no Brasil e terá como dado de entrada a velocidade de intrusão que será proveniente da análise de resultados experimentais em veículos de diferentes segmentos conforme descrito no item 4 deste trabalho. O banco será modelado e representado apenas como uma superfície para deslizamento e posicionamento do corpo do ocupante sem atuação da força de atrito. O cinto de segurança, por não possuir grande influência em impactos laterais, será o cinto de segurança já modelado e correlacionado para simulação de um veículo que já está disponível no mercado. O ocupante será o modelo elipsoide do EuroSID-2 comercializado pela Humanetics e disponível no software MADYMO. O cálculo e interação entre os elementos será realizada utilizando o método de corpos rígidos. A Figura 43 ilustra o modelo utilizado na primeira fase da metodologia numérica.

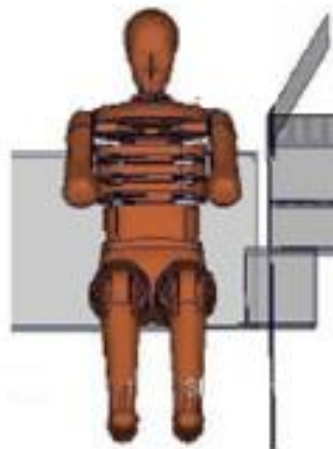
Figura 43 – Modelo para cálculo da primeira fase do estudo



Fonte: Elaborada pelo autor.

A segunda fase do estudo numérico tem o objetivo de verificar a influência de diferentes perfis de painéis de portas e seus efeitos nos resultados biomecânicos no ocupante após o impacto lateral. O modelo será composto pelos mesmos componentes da primeira fase, porém sua modelagem seguirá linhas diferentes em seus principais elementos, sendo o ocupante EuroSID-2 elipsoide proveniente do software MADYMO e modelado em corpos rígidos, enquanto o painel de portas será modelado em elementos finitos (modelado em casca, com triângulos e quadriláteros) seguindo os moldes da do modelo construído por Schönplflug (2004), ilustrado na Figura 44. Uma vez que a comportamento dinâmico do painel de portas e sua deformação é um ponto chave no resultado da análise numérica da segunda fase, será necessário realizar a segunda fase utilizando o recurso coupling do LS-DYNA.

Figura 44 – Modelo proposto para cálculo da segunda fase



Fonte: Schönplflug, 2004.

5.2 Análise da influência da velocidade de intrusão da estrutura do veículo

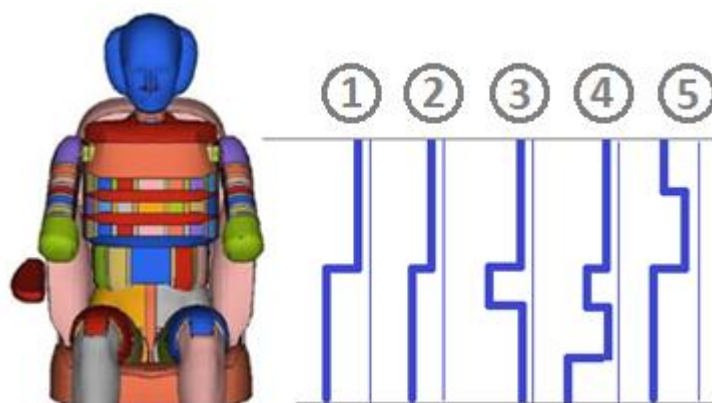
A análise da influência da velocidade de intrusão será resultado da análise de padrões dos resultados da primeira fase do cálculo numérico. Os fatores avaliados serão os dados biomecânicos de saída do ocupante diante de diferentes velocidades de intrusão da estrutura do veículo provenientes dos ensaios realizados na etapa experimental.

O objetivo é a definição de uma velocidade de intrusão da estrutura do veículo que possibilite trabalhar em melhorias e que influências negativas possam ser percebidas, ou seja, seria selecionar uma velocidade que resulte em uma segurança do ocupante intermediária para que resultados negativos e positivos possam ser percebidos.

5.3 Análise dos diferentes perfis de painel de portas

A partir da seleção da velocidade de intrusão da estrutura do veículo realizada a partir do cálculo numérico descrito no item 5.2, esse parâmetro será fixado para que iniciar a segunda fase da metodologia numérica. Nela utilizaremos os perfis de painel de portas indicados na Figura 45, provenientes da análise do item 3.1 deste estudo e adequação às condições de recursos e tempo de simulação disponíveis.

Figura 45 – Perfis de painel de portas selecionados para cálculo numérico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram selecionados 5 tipos de painéis de portas em formas elementares, baseado nos componentes disponíveis em veículos populares disponíveis no mercado brasileiro. Eles foram classificados em 5 tipos:

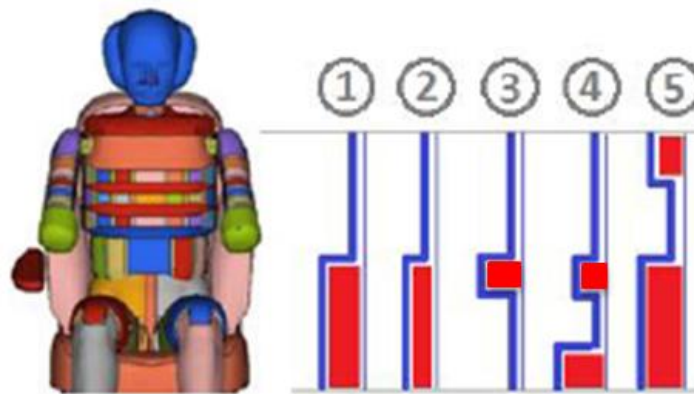
- Painel tipo 1: distância mínima (10mm) entre a chapa metálica estrutural da porta e o material do painel de portas na região das costelas e 60mm de espaçamento entre esses elementos na região do abdômen e pélvis.
- Painel tipo 2: distância mínima (10mm) entre a chapa metálica estrutural da porta e o material do painel de portas na região das costelas e 30mm de espaçamento entre esses elementos na região do abdômen e pélvis.
- Painel tipo 3: distância mínima (10mm) entre a chapa metálica estrutural da porta e o material do painel de portas na região das costelas, 40mm de espaçamento entre esses elementos na região do abdômen e distância mínima (10mm) na região da pélvis.
- Painel tipo 4: distância mínima (10mm) entre a chapa metálica estrutural da porta e o material do painel de portas na região das costelas, 30mm de espaçamento entre esses elementos na região do abdômen e espaçamento de 60mm na região da pélvis.
- Painel tipo 5: espaçamento de 30mm entre a chapa metálica estrutural da porta e o material do painel de portas na região das costelas e 60mm de espaçamento entre esses elementos na região do abdômen e pélvis.

5.4 Avaliação da aplicação de absorvedores de energia

A avaliação da influência do perfil do painel de portas será a etapa base para continuação da segunda fase de cálculo numérico. Todos os tipos de painéis de porta serão avaliados com a inserção de absorvedores de energia em polipropileno expandido (EPP) de densidade de 30g/dm^3 , com diferentes objetivos para cada localização do absorvedor, a aplicação na região da pélvis tem o objetivo de empurrar o ocupante e ganhar em velocidade relativa, enquanto as aplicações na região das costelas e abdômen tem o objetivo absorver a carga de impacto. Os absorvedores serão inseridos no software LS-DYNA e serão modelados em elementos finitos em formato tetraédrico.

A Figura 46 demonstra os tipos de absorvedores em formas elementares que poderão ser aplicados para cada tipologia de painel de portas indicados no tópico 5.3 deste estudo. O absorvedor aplicado na localização tipo 1 tem o objetivo principal de empurrar a pélvis para reduzir a velocidade de compressão relativa das costelas, enquanto o absorvedor tipo 2 dará o resultado comparativo para uma redução de espessura de 30mm no absorvedor. O absorvedor tipo 3 tem o objetivo de reduzir as cargas na região do abdômen. O absorvedor tipo 4 possui ambos os objetivos: na região da pélvis o absorvedor de maior dimensão (60mm) auxilia na impulsão da região sendo o primeiro ponto de impacto, enquanto o absorvedor de menor dimensão (30mm) no abdômen reduz as cargas na região. O absorvedor tipo 5 segue o mesmo raciocínio do tipo 4 porém unificando as regiões do abdômen e pélvis, além de adicionar um absorvedor na região das costelas com o objetivo de reduzir as cargas na área.

Figura 46 – Aplicação de absorvedor EPP para cada tipologia de painel de portas



Fonte: Elaborada pelo autor.

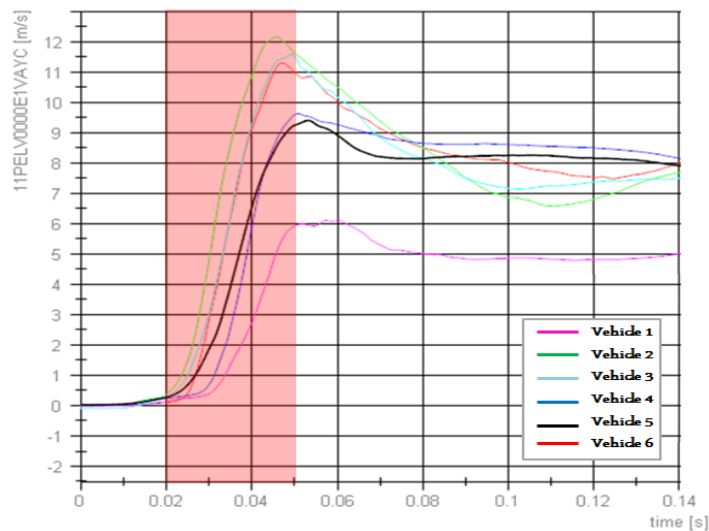
6 RESULTADOS

As metodologias experimentais e numéricas descritas no presente estudo foram executadas e neste tópico os resultados por etapa serão apresentados, descritos em seções segmentadas de acordo com a metodologia utilizada.

6.1 Resultados experimentais

O método experimental impactou lateralmente seis veículos de diferentes montadoras, segmentos de mercado e custo do produto. Utilizando uma larga faixa de massa de veículo (de 900 até 1300kg), segmentos (de A até C) e custo do produto (de R\$30.000 até R\$85.000) foi observado que devido à mesma configuração de prova, o resultado da pélvis seguiu um comportamento padrão. A aceleração medida na região da pélvis em todos os casos manteve a aceleração da região durante 25-30ms após contato entre painel de portas e pélvis, conforme demonstrado nos resultados da Figura 47.

Figura 47– Padrão de comportamento na aceleração da pélvis do ocupante.



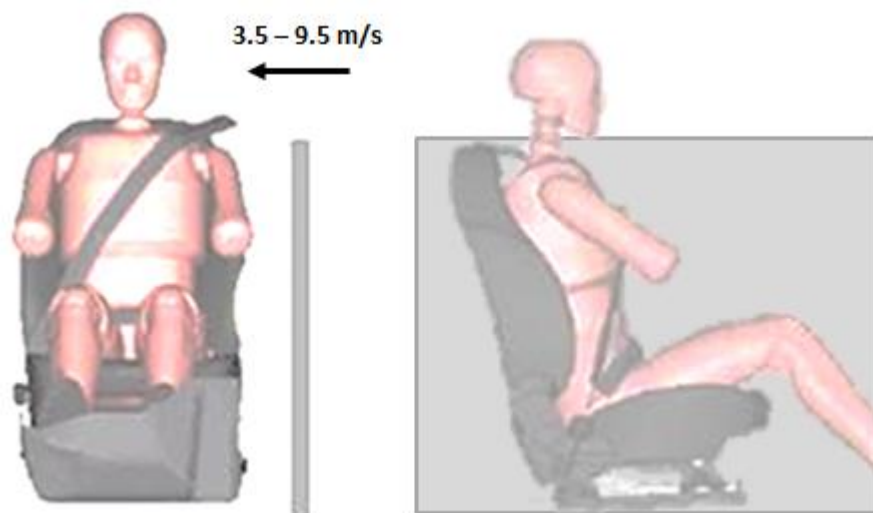
Analisando os resultados experimentais observamos velocidades de intrusão da estrutura lateral desde 3.5 m/s até 9.5m/s, dessa forma foram selecionadas 7 velocidade com incrementos de 1m/s entre elas (3.5 a 9.5m/s) para a primeira fase da etapa numérica. Além disso o tempo padrão de contato entre pélvis e painel de 25ms foi selecionado como base para as simulações numéricas.

6.2 Resultados numéricos

6.2.1 Fase I

A primeira fase da etapa numérica consistiu em simulações virtuais, modeladas conforme metodologia e baseadas no tempo de contato padrão de 25ms entre pélvis e painel de portas observado na etapa de ensaios experimentais. As velocidades de intrusão da estrutura observadas dentre os diferentes veículos utilizados, resultaram em simulações com as seguintes velocidades utilizadas: 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 e 9.5 m/s, conforme Figura 48.

Figura 48 – Configuração das simulações numéricas fase 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As simulações MADYMO da primeira fase indicaram os resultados biomecânicos para o impacto lateral de acordo com as várias velocidades de intrusão selecionadas. As Figuras 49-53 demonstram os resultados para cada região do corpo avaliada. Os gráficos demonstram a tendência esperada de piorar o resultado biomecânico conforme aumentamos a velocidade de intrusão, e os resultados atenderam às expectativas do método aplicado. A região do abdômen não obteve bons resultados, uma vez que ficaram fora do comportamento padrão em provas de impacto lateral, afetando a avaliação dessa região. O método possibilitou encontrarmos resultados biomecânicos desde o mínimo de performance (9.5 m/s) até o máximo de performance (3.5 m/s). A grande faixa de resultados nos possibilitou escolher a melhor velocidade de intrusão para sequência do estudo.

Figura 49 – Costela superior, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.

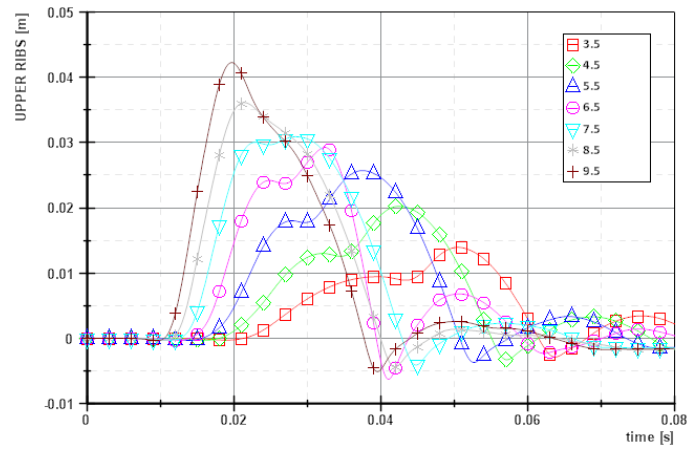


Figura 50 – Costela mediana, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.

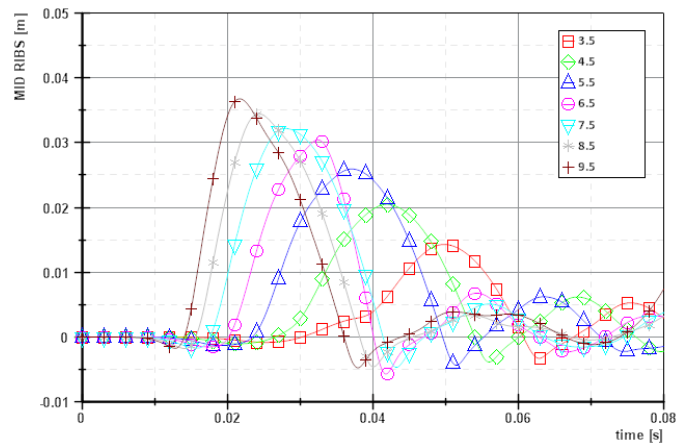


Figura 51 – Costela inferior, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.

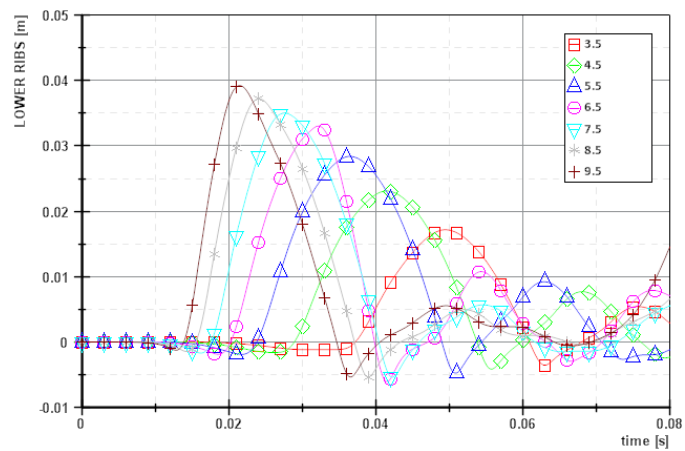


Figura 52 – Abdômen, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.

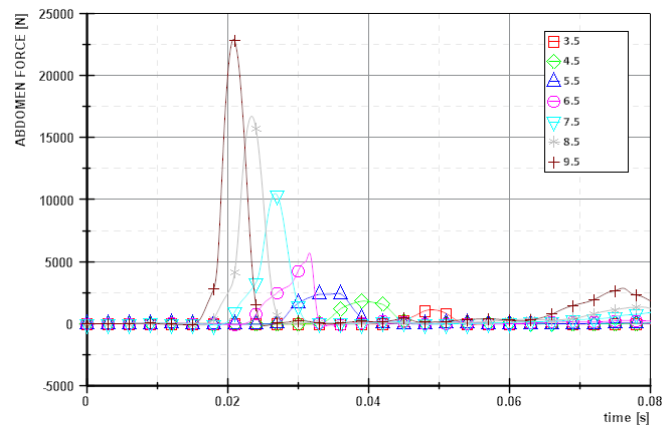
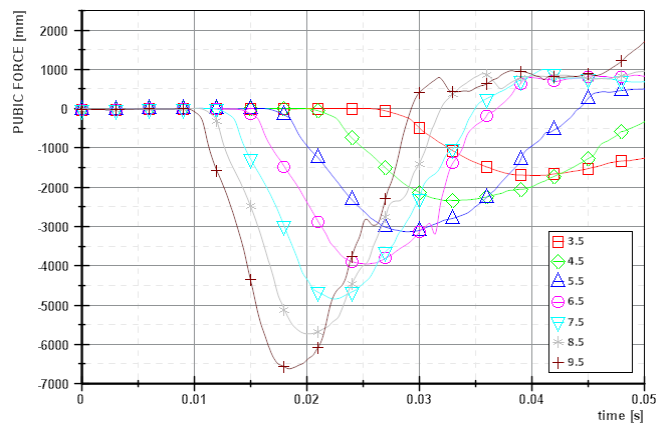


Figura 53 – Pélvis, resultados biomecânicos de diferentes veículos testados.



A avaliação detalhada para cada velocidade de intrusão está demonstrada na Tabela 9, onde podemos entender como uma estrutura de baixa performance pode afetar as lesões do ocupante do veículo em caso de impacto lateral. Os resultados demonstraram que devido à esse fator isolado podemos sair de uma situação mortal para uma situação segura. A tabela demonstra que o incremento de 1m/s na velocidade de intrusão da estrutura do veículo afeta negativamente a segurança do veículo. Por essa razão a estrutura do veículo deve ser projetada para obter o máximo de performance sem perder competitividade do produto.

A análise da Tabela 9 resultou na escolha da velocidade de intrusão de 6.5m/s, uma vez que os resultados biomecânicos são intermediários e nos possibilitam verificar melhorias e perdas de performance na segunda fase da etapa numérica.

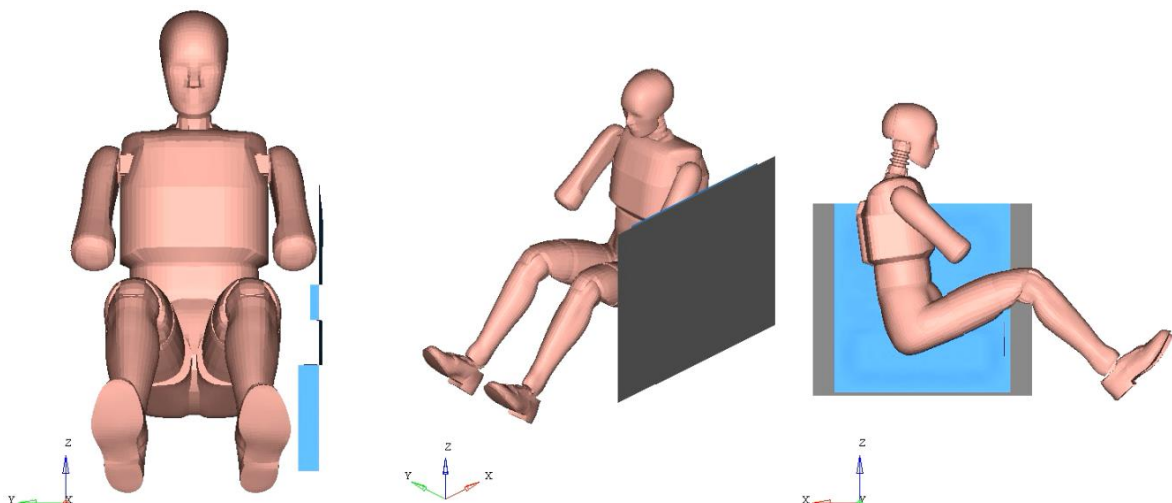
Tabela 9 – Resultados biomecânicos das simulações fase 1.

				3.5 m/s	4.5 m/s	5.5 m/s	6.5 m/s	7.5 m/s	8.5 m/s	9.5 m/s							
TÓRAX																	
Costela sup. Compressão	[mm]	22	42	13,90	4,000	20,20	4,000	25,70	3,260	29,30	2,550	30,90	2,220	36,10	1,180	42,30	0,000
Critério viscoso sup.	[m/s]	0,32	1,00	0,10	4,000	0,19	4,000	0,26	4,000	0,40	3,520	0,63	2,160	0,92	0,480	1,29	0,000
Avaliação costela sup.					4,000		4,000		3,260		2,550		2,160		0,480		0,000
Costela méd. Compressão	[mm]	22	42	14,30	4,000	20,50	4,000	25,90	3,210	30,40	2,310	32,20	1,960	34,50	1,510	36,80	1,050
Critério viscoso méd.	[m/s]	0,32	1,00	0,10	4,000	0,18	4,000	0,30	4,000	0,42	3,400	0,58	2,470	0,82	1,080	1,08	0,000
Avaliação costela méd.					4,000		4,000		3,210		2,310		1,960		1,080		0,000
Costela inf. Compressão	[mm]	22	42	17,20	4,000	23,10	3,780	28,40	2,720	33,00	1,790	35,00	1,400	37,20	0,960	39,20	0,560
Critério viscoso inf.	[m/s]	0,32	1,00	0,13	4,000	0,23	4,000	0,35	3,830	0,48	3,060	0,69	1,850	0,94	0,350	1,21	0,000
Avaliação costela inf.					4,000		3,780		2,720		1,790		1,400		0,350		0,000
AVALIAÇÃO TÓRAX					4,000		3,780		2,720		1,790		1,400		0,350		0,000
ABDOMEN																	
Pico força lateral frontal	[kN]	1,0	2,5	0,10		0,23		0,30		0,40		0,53		0,70		1,20	
Pico força lateral méd.	[kN]	1,0	2,5	0,67		1,01		1,31		3,25		6,00		9,37		12,54	
Pico de força lateral tras.	[kN]	1,0	2,5	0,38		0,59		0,87		2,09		3,98		6,67		9,23	
Pico força lateral total	[kN]	1,0	2,5	1,13	3,660	1,83	1,780	2,45	0,140	5,71	0,000	10,49	0,000	16,72	0,000	22,93	0,000
AVALIAÇÃO ABDOMEN					3,660		1,780		0,140		0,000		0,000		0,000		0,000
PÉLVIS																	
Força sínfise púbica	[kN]	3,0	6,0	1,70	4,000	2,34	4,000	3,13	3,830	3,95	2,730	4,84	1,540	5,73	0,360	6,62	0,000
AVALIAÇÃO PÉLVIS					4,000		4,000		3,830		2,730		1,540		0,360		0,000
AVALIAÇÃO FINAL					15,660		13,560		10,690		8,520		6,940		4,710		0,000
CABEÇA					4,000		4,000		4,000		4,000		4,000		4,000		0,000
TÓRAX					4,000		3,780		2,720		1,790		1,400		0,350		0,000
ABDOMEN					3,660		1,780		0,140		0,000		0,000		0,000		0,000
PÉLVIS					4,000		4,000		3,830		2,730		1,540		0,360		0,000

6.2.2 Fase II

As análises da segunda fase da etapa numérica foram executadas conforme metodologia descritas nos itens 5.3 e 5.4 deste documento, utilizando a velocidade de intrusão da estrutura da porta de 6.5 m/s conforme mencionado no item anterior. A Figura 54 indica a configuração de prova utilizada na segunda fase.

Figura 54 – Configuração das simulações numéricas fase II.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 10 indica o resultado de todas as simulações realizadas na segunda fase da etapa numérica e será detalhada na sequência.

Tabela 10 – Resultados biomecânicos das simulações fase II.

	unid.	mín.	máx.	PORTA 01		PORTA 02		PORTA 03		PORTA 04		PORTA 05											
				c/ absorvedor	s/ absorvedor	c/ absorvedor	s/ absorvedor	c/ absorvedor	s/ absorvedor	c/ absorvedor	s/ absorvedor	c/ absorvedor	s/ absorvedor										
CABEÇA																							
Pico acc. Resultante HIC 36	[g]	72	88	43,16	40,02	39,58	35,17	33,52	36,84	38,45	39,13	27,12	23,35										
Acc. Resultante 3ms	[g]	500	700	49,00	46,00	41,00	34,00	26,00	99,00	47,00	42,00	25,00	31,00										
AVALIÇÃO CABEÇA				4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000										
TÓRAX																							
Costela sup. Compressão	[mm]	22	42	33,30	1,740	41,60	0,090	38,30	0,750	41,50	0,110	32,20	1,970	26,40	3,120	37,10	0,980	40,30	0,340	39,50	0,500	34,90	1,420
Critério viscoso sup.	[m/s]	0,32	1,00	0,43	3,380	0,69	1,800	0,56	2,590	0,72	1,630	0,41	3,480	0,43	3,370	0,44	3,280	0,63	2,180	0,51	2,900	0,62	2,240
Costela méd. Compressão	[mm]	22	42	21,70	4,000	37,40	0,920	30,80	2,280	38,30	0,750	25,10	3,380	19,10	4,000	28,10	2,790	36,60	1,090	31,10	2,190	34,40	3,330
Critério viscoso méd.	[m/s]	0,32	1,00	0,20	4,000	0,54	2,450	0,39	3,550	0,60	2,350	0,25	3,920	0,24	4,000	0,30	3,650	0,50	2,950	0,34	3,370	0,43	3,370
Costela inf. Compressão	[mm]	22	42	13,80	4,000	36,30	1,130	26,50	3,100	38,20	0,750	19,90	4,000	18,80	4,000	22,30	3,940	34,70	1,450	18,80	4,000	34,40	1,510
Critério viscoso inf.	[m/s]	0,32	1,00	0,13	4,000	0,58	2,450	0,40	3,550	0,68	1,900	0,21	4,000	0,23	4,000	0,26	4,000	0,54	2,690	0,29	4,000	0,49	3,020
Costela inf. Avaição				4,000	1,130	3,100	0,750	4,000	0,750	4,000	0,750	4,000	3,940	1,450	4,000	4,000	3,940	1,450	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
AVALIÇÃO TÓRAX				1,740	0,090	0,750	0,110	1,970	3,120	0,980	0,340	0,500	1,420										
ABDOMEN																							
Pico força lateral frontal	[kN]	1,0	2,5	0,41	0,49	0,41	1,87	0,48	1,16	0,35	1,32	0,34	0,45	0,25	0,97	0,25	0,97	0,25	0,97	0,25	0,97	0,25	0,35
Pico de força lateral méd.	[kN]	1,0	2,5	1,30	2,45	1,27	3,55	1,18	3,55	0,88	1,02	1,30	0,95	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
Pico de força lateral tras.	[kN]	1,0	2,5	1,07	1,66	1,07	3,55	1,18	3,55	0,88	1,02	1,30	0,95	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
Pico força lateral total	[kN]	1,0	2,5	2,76	0,000	4,28	0,000	3,55	0,000	0,000	3,16	0,000	2,34	0,440	2,58	0,000	4,24	0,000	2,16	0,920	3,03	0,000	0,000
AVALIÇÃO ABDOMEN				0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PÉLVIS																							
Força sínfise púbica	[kN]	3,0	6,0	3,41	3,450	3,51	3,320	4,29	2,280	3,020	3,19	3,750	3,32	3,570	3,22	3,700	3,45	3,410	3,35	3,530	3,48	3,360	3,360
AVALIÇÃO PÉLVIS				3,450	3,320	2,280	3,020	3,750	3,570	3,700	3,410	3,530	3,360										
AVALIÇÃO FINAL				9,190	7,410	7,030	7,130	9,720	11,130	8,680	7,750	8,950	8,780										
CABEÇA				4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000										
TÓRAX				1,740	0,090	0,750	0,110	1,970	3,120	0,980	0,340	0,500	1,420										
ABDOMEN				0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000										
PÉLVIS				3,450	3,320	2,280	3,020	3,750	3,570	3,700	3,410	3,530	3,360										
				①	①	②	②	③	③	④	④	⑤	⑤										

Os resultados nos permitem eliminar as regiões da cabeça e abdômen da análise, uma vez que devido a ausência do vidro lateral ou estrutura de anel de portas todos os resultados de cabeça atingiram a performance máxima, e na região do abdômen todos os resultados atingiram a performance mínima, uma vez que o formato com quinas elaborado para estudo concentraram as cargas na região em todos os ensaios. Analisando separadamente os resultados sem absorvedor (Tabela 11) e com absorvedor (Tabela 12), podemos concluir individualmente as influências de projeto, posicionamento do absorvedor e distanciamento entre estrutura e painel.

A Tabela 11 com os resultados das análises dos painéis sem absorvedor nos permite concluir que a redução de espessura (entre estrutura da porta e painel de portas) verificada nas análises da região da pélvis e abdômen na porta 01 e 02 é prejudicial para a performance de segurança do ocupante. Outro ponto importante foi a indicação de que um painel de portas com maior dimensão na região das costelas contribui na melhoria de performance nessa área do corpo do ocupante. O painel de portas 03 apresentou um resultado inesperado mas que ao mesmo tempo pode ser explicado pelo fato da área de impacto não ser diretamente instrumentada, e dessa forma deslocar o ocupante nas demais regiões, sem aumento de carga medido. As Figuras 55-61 mostram as curvas para as análises da região da costela e pélvis.

Tabela 11 – Resultados biomecânicos em painéis sem absorvedor.

				PORTA 01	PORTA 02	PORTA 03	PORTA 04	PORTA 05					
				s/ absorvedor	s/ absorvedor	s/ absorvedor	s/ absorvedor	s/ absorvedor					
TÓRAX													
Costela sup. Compressão	[mm]	22	42	41,60	0,090	41,50	0,110	26,40	3,120	40,30	0,340	34,90	1,420
Critério viscoso sup.	[m/s]	0,32	1,00	0,69	1,800	0,72	1,630	0,43	3,370	0,63	2,180	0,62	2,240
Avaliação costela sup.				0,090	0,110	3,120	0,340	1,420					
Costela méd. Compressão	[mm]	22	42	37,40	0,920	38,30	0,750	19,10	4,000	36,60	1,090	34,40	1,530
Critério viscoso méd.	[m/s]	0,32	1,00	0,54	2,680	0,60	2,350	0,24	4,000	0,50	2,950	0,43	3,370
Avaliação costela méd.				0,920	0,750	4,000	1,090	1,530					
Costela inf. Compressão	[mm]	22	42	36,30	1,130	38,20	0,750	18,80	4,000	34,70	1,450	34,40	1,510
Critério viscoso inf.	[m/s]	0,32	1,00	0,58	2,450	0,68	1,900	0,23	4,000	0,54	2,690	0,49	3,020
Avaliação costela inf.				1,130	0,750	4,000	1,450	1,510					
AVALIAÇÃO TÓRAX				0,090	0,110	3,120	0,340	1,420					
PÉLVIS													
Força sínfise púbica	[kN]	3,0	6,0	3,51	3,320	3,73	3,020	3,32	3,570	3,45	3,410	3,48	3,360
AVALIAÇÃO PÉLVIS				3,320	3,020	3,570	3,410	3,360					
AVALIAÇÃO FINAL				7,410	7,130	11,130	7,750	8,780					
CABEÇA				4,000	4,000	4,000	4,000	4,000					
TÓRAX				0,090	0,110	3,120	0,340	1,420					
ABDOMEN				0,000	0,000	0,440	0,000	0,000					
PÉLVIS				3,320	3,020	3,570	3,410	3,360					
				①	②	③	④	⑤					

Figura 55 – Resultado sem absorvedor: costela superior

Costela superior (sem absorvedor)

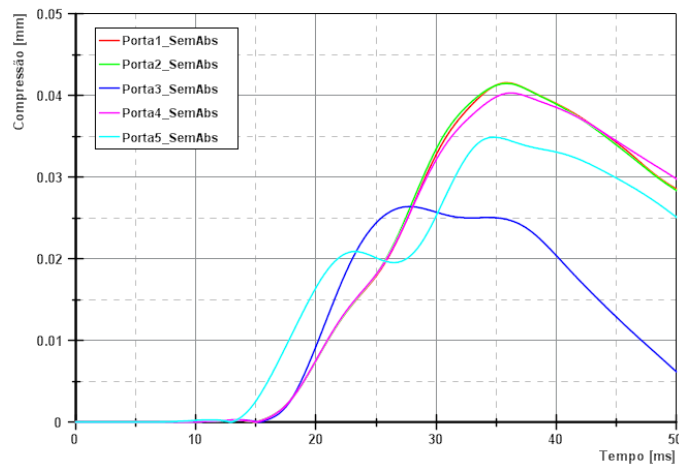


Figura 56 – Resultado sem absorvedor: costela mediana

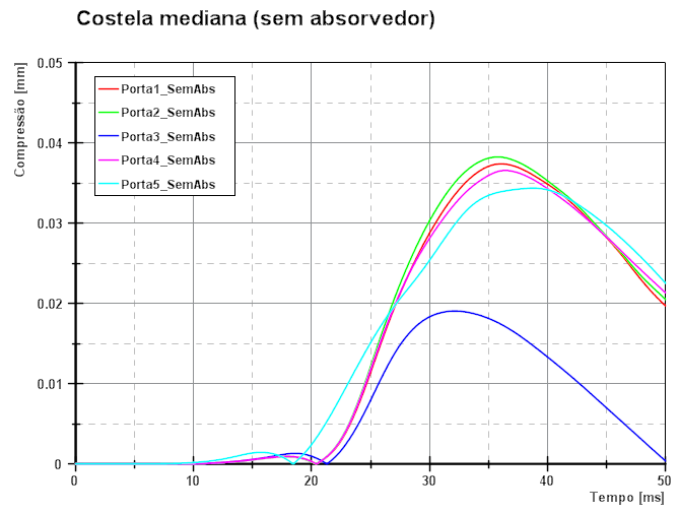


Figura 57 – Resultado sem absorvedor: costela inferior

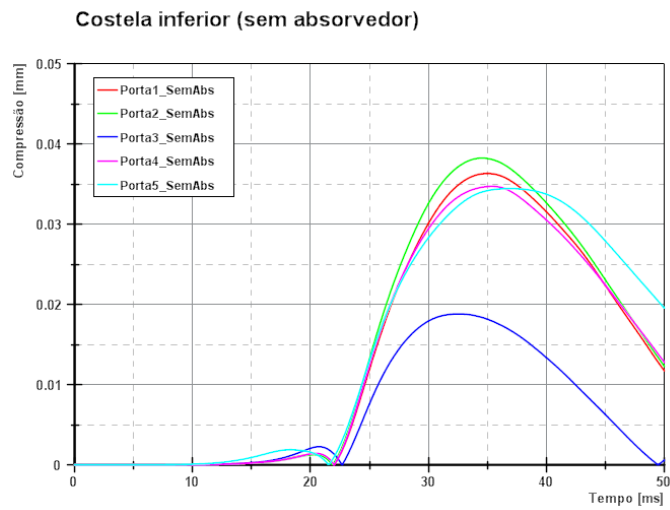


Figura 58 – Resultado sem absorvedor: costela superior (VC)

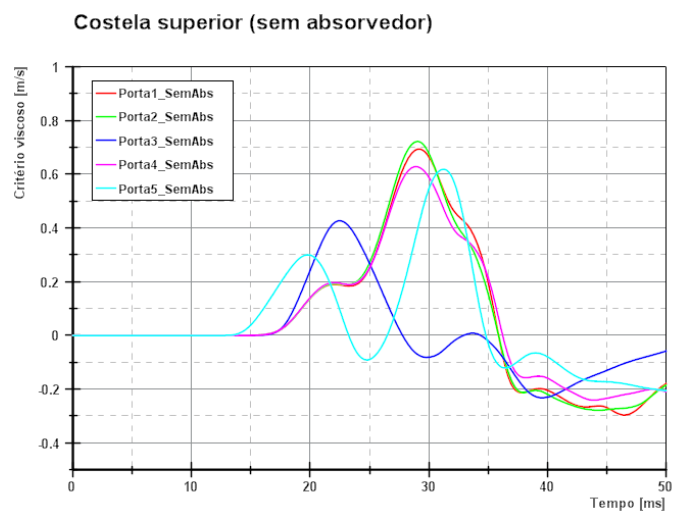


Figura 59 – Resultado sem absorvedor: costela mediana (VC)

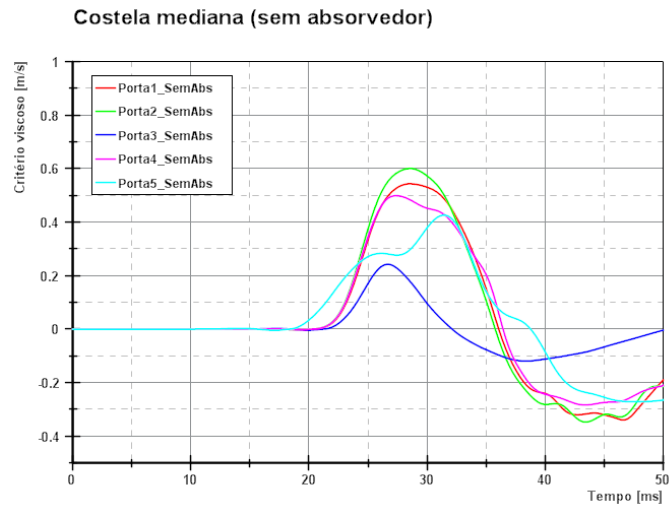


Figura 60 – Resultado sem absorvedor: costela inferior (VC)

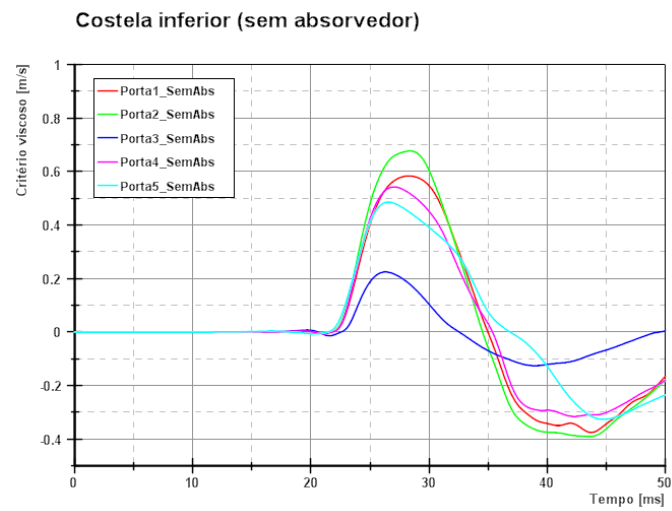
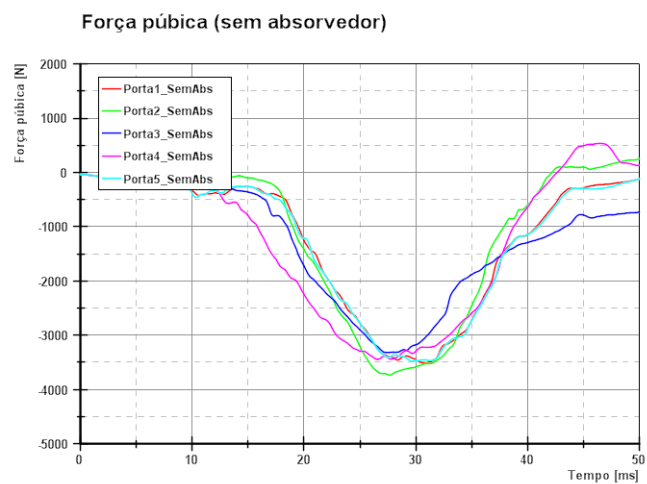


Figura 61 – Resultado sem absorvedor: força na pélvis



A Tabela 12 demonstra além das melhorias devido a inserção de absorvedores em EPP nos painéis de porta, as perdas de performance devido ao mesmo fator. Porém pode-se verificar que a inserção desses elementos de absorção em geral tendem a melhorar bastante a performance quando comparados a painéis sem absorvedores. Comparando a porta 01 com a porta 05 podemos perceber que a presença do absorvedor na região pélvica melhora não apenas a performance dessa região, adicionalmente percebemos uma melhoria na região das costelas quando comparamos ao mesmo painel sem absorvedores, uma vez que ao empurrar a região da pélvis e conseqüentemente o ocupante, reduzimos a velocidade de impacto do painel de portas no ocupante (redução da velocidade relativa). Por outro lado podemos perceber que absorvedores em EPP não funcionam bem na região das costelas, uma vez que eles possuem um limite de compressão e dessa forma aceleram o impacto entre painel de portas e costelas do ocupante. Ao compararmos a porta 01 e porta 02 podemos verificar, e até mesmo quantificar a perda de performance devido à redução de espessura do absorvedor de impacto na região pélvica. As Figuras 62-68 mostram as curvas para as análises da região da costela e pélvis com a aplicação de absorvedores em EPP (30g/dm³).

Tabela 12 – Resultados biomecânicos em painéis com absorvedor.

				PORTA 01	PORTA 02	PORTA 03	PORTA 04	PORTA 05					
				c/ absorvedor	c/ absorvedor	c/ absorvedor	c/ absorvedor	c/ absorvedor					
TÓRAX													
Costela sup. Compressão	[mm]	22	42	33,30	1,740	38,30	0,750	32,20	1,970	37,10	0,980	39,50	0,500
Critério viscoso sup.	[m/s]	0,32	1,00	0,43	3,380	0,56	2,590	0,41	3,480	0,44	3,280	0,51	2,900
Avaliação costela sup.					1,740		0,750		1,970		0,980		0,500
Costela méd. Compressão	[mm]	22	42	21,70	4,000	30,80	2,230	25,10	3,380	28,10	2,790	31,10	2,190
Critério viscoso méd.	[m/s]	0,32	1,00	0,20	4,000	0,39	3,560	0,25	4,000	0,30	4,000	0,34	3,870
Avaliação costela méd.					4,000		2,230		3,380		2,790		2,190
Costela inf. Compressão	[mm]	22	42	13,80	4,000	26,50	3,100	19,90	4,000	22,30	3,940	18,80	4,000
Critério viscoso inf.	[m/s]	0,32	1,00	0,13	4,000	0,40	3,550	0,21	4,000	0,26	4,000	0,29	4,000
Avaliação costela inf.					4,000		3,100		4,000		3,940		4,000
AVALIAÇÃO TÓRAX					1,740	0,750	1,970	0,980	0,500				
PÉLVIS													
Força sínfise púbica	[kN]	3,0	6,0	3,41	3,450	4,29	2,280	3,19	3,750	3,22	3,700	3,35	3,530
AVALIAÇÃO PÉLVIS					3,450	2,280	3,750	3,700	3,530				
AVALIAÇÃO FINAL				9,190	7,030	9,720	8,680	8,950					
CABEÇA				4,000	4,000	4,000	4,000	4,000					
TÓRAX				1,740	0,750	1,970	0,980	0,500					
ABDOMEN				0,000	0,000	0,000	0,000	0,920					
PÉLVIS				3,450	2,280	3,750	3,700	3,530					

Figura 62 – Resultado com absorvedor: costela superior

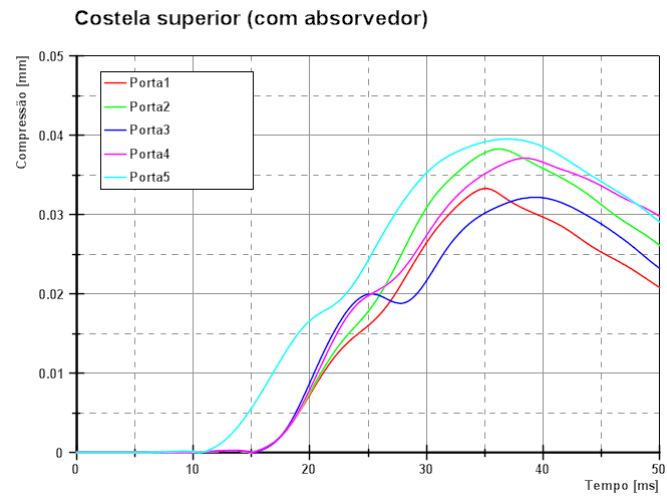


Figura 63 – Resultado com absorvedor: costela mediana

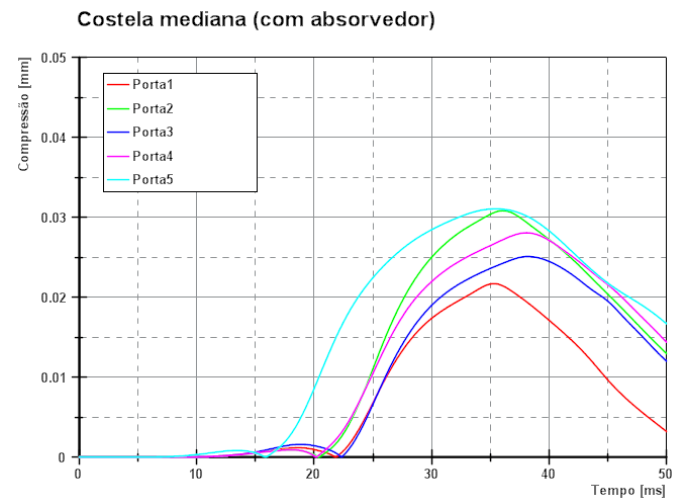


Figura 64 – Resultado com absorvedor: costela inferior

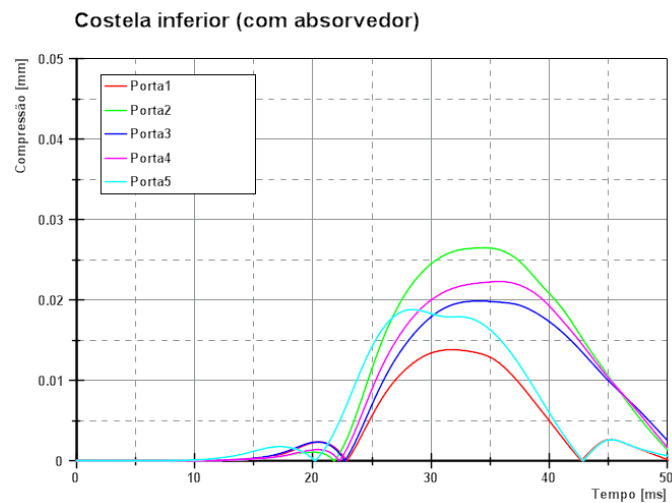


Figura 65 – Resultado com absorvedor: costela superior (VC)

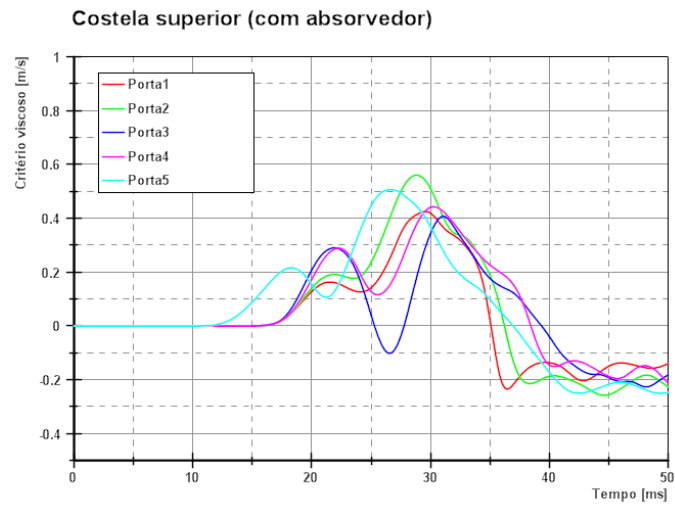


Figura 66 – Resultado com absorvedor: costela mediana (VC)

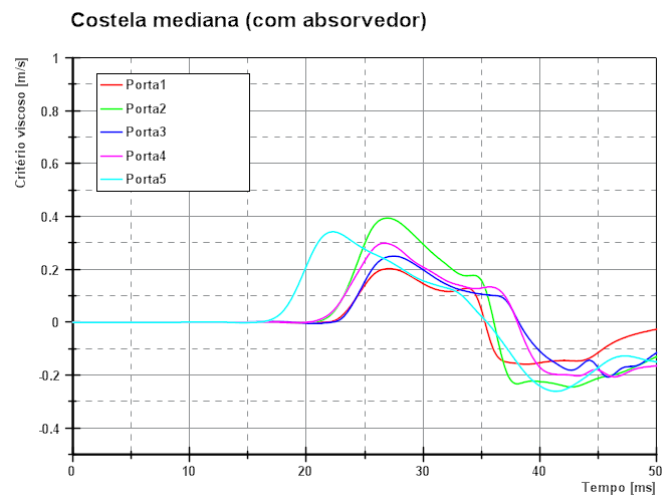


Figura 67 – Resultado com absorvedor: costela inferior (VC)

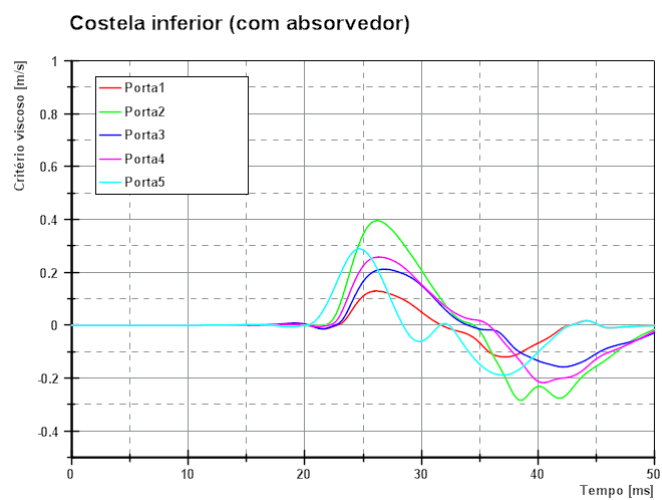
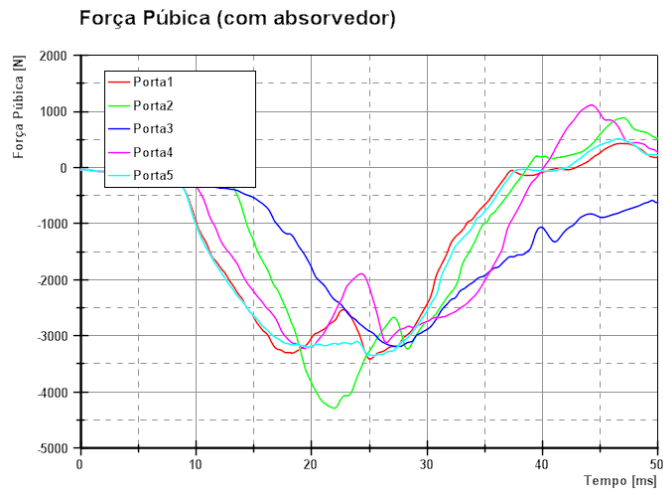


Figura 68 – Resultado com absorvedor: força na pélvis

6.3 Análise final dos resultados

Analisando todos os resultados obtidos podemos perceber que em geral, painéis de porta sem nenhum tipo de absorvedores de impacto apresentam resultados biomecânicos piores, fato que pode ser comprovado em ensaios experimentais em veículos que não possuem airbag lateral. É importante a ser ressaltado que a inserção de absorvedores em EPP deve ser bem dimensionada e estudada, uma vez que pode prejudicar a performance de segurança do veículo quando mal utilizada, conforme verificado na porta 05 com o aumento de carga região das costelas após aplicação do absorvedor. Por último podemos destacar a melhoria de performance com a redução de velocidade relativa de impacto, que foi bem evidenciada com a presença de absorvedor na região pélvica.

O painel de portas 03 apresentou os melhores resultados dentre todas as tipologias analisadas, porém esse fato ocorreu devido à instrumentação utilizada no manequim e o ponto de impacto na simulação numérica, o que descarta esses resultados das análises.

7 CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento deste trabalho, pode-se concluir que a velocidade de intrusão da estrutura da porta é essencial para alcançarmos bons resultados, e que a utilização de absorvedores de impacto, sejam eles em EPP ou outros tipos, em regiões bem controladas do painel de portas mostrou-se bastante eficaz nos resultados biomecânicos dos ocupantes em casos de colisões laterais. Um projeto com absorvedores bem dimensionado permite que o nível de segurança do ocupante seja bem próximo ao oferecido pela aplicação de airbags laterais, com menor custo aplicado ao produto final.

Este trabalho irá auxiliar em desenvolvimentos de projetos futuros, uma vez que foi possível demonstrar a efetividade da aplicação de absorvedores de acordo com sua localização e dimensionamento, além de demonstrar a perda de performance devido à ausência de absorvedores e má localização desses. A análise da velocidade de intrusão permitiu identificar e qualificar velocidades críticas de projeto, fator evidenciado nas provas experimentais realizadas internamente.

Outro fator observado com este trabalho são as diferenciações de normativas regulamentadoras para comercialização de automóveis entre as regiões globais, sendo que a América Latina, mesmo com o alto índice de acidentes e feridos em colisões laterais entre veículos, está começando a se movimentar apenas agora em relação a impactos laterais, enquanto no mercado europeu as normas estão vigentes desde 2005. Atualmente, devido à evolução das normativas de impacto lateral praticamente todos os veículos europeus possuem o airbag lateral para proteção do ocupante em casos de colisão com poste e entre veículos.

Dentre os vários obstáculos encontrados durante o desenvolvimento do trabalho, um deles foi o levantamento detalhado das estatísticas de acidentes urbanos e rodoviários de trânsito atualizadas. Apesar de regulamentado pelo Governo através da NBR 12898, as estatísticas encontram-se desatualizadas desde 2013 no Brasil.

8 BIBLIOGRAFIA

ANSYS User's Manual. Theory Manual. (1995). ANSYS revision 5.2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). ABNT NBR 15300-1 Veículos rodoviários automotores - proteção ao ocupante. Ensaio de impacto frontal parte 1: requisitos de desempenho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). ABNT NBR 15300-2 Veículos rodoviários automotores - proteção ao ocupante. Ensaio de impacto frontal parte 2: procedimento de ensaio de impacto frontal com 100% de sobreposição.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). ABNT NBR 15300-3 Veículos rodoviários automotores - proteção ao ocupante. Ensaio de impacto frontal parte 3: procedimento de ensaio de impacto frontal com 40% de sobreposição.

BATHE, K. J. (1996). **Finite elements procedures**. New Jersey, Prentice Hall, 1037p.

CAMPBELL, M. (2009). **A numerical side impact model to investigate thoracic injury in lateral impact scenarios**. University of Waterloo, Mechanical Engineering, Waterloo.

CARHS (2016). Safety Companion 2016. Germany.

COUNCIL, F. et al., (1997). **A new method for predicting crashworthiness**. Accident analysis and prevention. v.29, n.1, p. 109-123.

DATASUS. **Indicadores de recursos**.

Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi>, acesso em: 14/11/2016 as 15:20

DATASUS. **Informações de saúde**.

Disponível em: <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS>, acesso em: 14/11/2016 as 15:40

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT);
DEPARTAMENTO DE POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL (DPRF) (2010). **Anuário**

estatístico das rodovias federais - Acidentes de trânsito e ações de enfrentamento ao crime. 687 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota de veículos.**

Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/frota.htm>, acesso em: 16/11/2016 as 11:15

ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (2007). Regulation No 95 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) - Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision. Official Journal of the European Union, p. 57.

EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM (2013). Assessment protocol - Adult occupant protection, v.5.5. Disponível em: www.euroncap.com, acesso em: 10/11/2016 as 20:25.

EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM (2012). Side impact - Testing protocol, version 6.0. Disponível em: www.euroncap.com, acesso em: 14/11/2016 as 12:10.

FALCONI; AMBEV; OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA (2014). **Retrato da segurança viária no Brasil.** Brasília. 104 p.

FILDES, B. et al (1995). **Side impact regulation benefits.** Monash University Accident Research Centre, Victoria Australia.

FILDES, B. et al (1994). **Passenger cars and occupant injury: side impact crashes.** Monash University Accident Research Centre, Victoria, Australia.

GANDHI, U. et al (1995). **Data-based approach in modeling automobile crash.** *International journal of impact engineering*. v.16, n.1, p. 95-118.

GANDHI, U. et al (1996). **Data-based models for automobile side impact analysis and design evaluation.** *International journal of impact engineering* v.18, n.5, p. 517-537.

GIBSON T. et al (2001). **Improved side impact protection: a review of injury patterns, injury tolerance and dummy measurement capabilities.** Monash University Accident Research Centre, Victoria, Australia.

GLOBAL NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM (Global NCAP)

Disponível em: www.globalncap.org, acesso em: 09/11/2016 as 17:00.

HALLMAN, J. et al (2010) **Door velocity and occupant distance affect lateral thoracic injury mitigation.** Accident Analysis and Prevention 43 829–839, 11.

HUEBNER, K. et al (1982). **The finite element method for engineers.** 2 ed. New York, John Wiley & Sons.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas populacionais para os municípios brasileiros.**

Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao>, acesso em: 10/11/2016 as 13:20.

INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY (2006). IIHS side impact test program. Rating guidelines. Disponível em: www.iihs.org, acesso em: 14/11/2016 as 16:20.

INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY

Disponível em: www.iihs.org, acesso em: 06/11/2016 as 10:30

LS-DYNA Livermore Software Technology Corporation

Disponível em: www.lstc.com/products/ls-dyna, acesso em: 08/11/2016 as 18:30

MARKLUND, P. et al (2001) **Optimization of a car body component subjected to side impact.** Industrial application and case studies. Struct Multidisc Optim 21, 383–392.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (2011). **Anuário estatístico de acidentes de trânsito.**

MIKHAIL, J. et al (1997). **Airbags: An update.** Journal of emergency nursing.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION – NHTSA. (1999) Federal motor vehicle safety standards (FMVSS). Side impact protection. 49 CFR part 571.

NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM FOR LATIN AMERICA & CARIBE (LATIN NCAP). Disponível em: www.latinncap.com, acesso em: 13/11/2016 as 21:00.

NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM FOR LATIN AMERICA & CARIBE (2015). Assessment protocol - Adult occupant protection, version 3.1. Disponível em: www.latinncap.com, acesso em: 13/11/2016 as 20:00.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Decade of action for road Safety 2011-2020: saving millions lives 2011.** Disponível em: http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic, acesso em: 04/11/2016 as 13:00.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Global status report on road safety 2013: supporting a decade of action.** Genebra: WHO, 2013. 318 p. Disponível em: http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2013, acesso em: 04/11/2016 as 13:20.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Health statistics and information systems.** Disponível em: <http://www.who.int/healthinfo/en/>, acesso em: 03/11/2016 as 12:10.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Projections of mortality and burden disease 2004-2030.** Disponível em: http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease, acesso em: 04/11/2016 as 10:00.

PAL, C. et al (2014). **Effect of weight, height and BMI on injury outcome in side impactcrashes without airbag deployment.** Accident Analysis and Prevention 72, 193–209, 17.

RAO, S. (1989). **The finite element method in engineering.** Oxford, Pergamon Press.

SANCHEZ C. (2001). **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

SEGURADORA LIDER - DPVAT (2014). **Anuário estatístico 2014**. 148 p.

TAKEO U. et al (2012). **Applications of Occupant Safety Simulation using MADYMO**. Komatsu Technical report.

TASS INTERNATIONAL (2015). Madymo - Design, simulation and virtual testing. Model Manual version 7.6.

TENCER, A. et al (2004). **Factors affecting pelvic and thoracic forces in near-side impact crashes: a study of US-NCAP, NASS, and CIREN data**. Accident analysis and prevention, 7.

WITTEMAN, W. J. (1999). **Improved vehicle crashworthiness design by control of the energy absorption for different collision situations**. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.

YOGANANDAN N. et al (2006). **Biomechanics of side impact: Injury criteria, aging occupants, and airbag technology**. Journal of Biomechanics 40, 227–243, 17.

YOGANANDAN N. et al (2006). **Lateral impact injuries with side airbag deployments — A descriptive study**. Accident Analysis and Prevention 39 22–27, 6.

ZHANG, Y. et al (2007). **Lightweight Design of Automotive Front Side Rail Based on Robust Optimisation**. Thin-Walled Structures 45, 670–676.

ZHAO, G. et al (2012). **Whole car side impact mode and response evaluation**. Procedia Engineering 29, 2667-2671, 5.