

FERNANDO MASSAHARU TAKAKI

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM TANQUE DE
COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO EM CONDIÇÕES DE IMPACTO

São Paulo
2011

FERNANDO MASSAHARU TAKAKI

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM TANQUE DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO EM CONDIÇÕES DE IMPACTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção da Graduação como Engenheiro
Mecatrônico.

Orientadora: Prof. Dra. Larissa Driemeier

São Paulo
2011

AGRADECIMENTOS

À professora Larissa, por todo o apoio, paciência e orientação para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização de simulação numérica para testes de impacto vem aumentando nos últimos anos, pois representam uma economia de recursos e de tempo em relação aos ensaios experimentais. O presente trabalho visa analisar o comportamento de um tanque de combustível quando submetido a diversos testes de impacto veicular definidos por normas, conhecidos como *crash test*. Para a determinação dos parâmetros dos ensaios, foi feito um levantamento das normas em vigor no Brasil e em outros países, que especificam cada tipo de *crash test*, e assim identificar situações críticas para a ocorrência de falhas como ruptura da estrutura do tanque e vazamento do fluido combustível. A norma americana FMVSS 301, que analisa a integridade do sistema de combustível, foi utilizada como parâmetro para as simulações por apresentar velocidade de impacto superior à norma europeia.

ABSTRACT

The use of numerical simulation for impact tests has been increasing in recent years because they represent a saving of time and resources in relation to the real tests. The present work analyzes the behavior of a fuel tank when subjected to various vehicle crash tests defined by standards, known as crash test, that simulates real conditions of impact and aims to assess the safety and integrity of the passengers, optimize the vehicle structure about its ability to absorb impact energy and analyze the behavior of components such as doors, seats, floor. To determine the parameters of the tests, a survey was made of the standards in force in Brazil and other countries, which specify each type of crash test, and to identify critical situations for the occurrence of failures such as rupture of the tank structure and leak of the fluid. The American standard FMVSS 301, that analyses the fuel system behavior, was selected as reference for the simulations since it determines a higher impact speed when compared to the European standard.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| AGRADECIMENTOS | 3 |
| RESUMO | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1. Apresentação do problema | 10 |
| 1.2. O <i>crash test</i> | 10 |
| 1.3. O tanque de combustível | 16 |
| 1.4. Objetivos | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1. Simulação de impacto veicular | 20 |
| 3. NORMAS DE SEGURANÇA VEICULAR | 22 |
| 3.1. Impacto frontal | 22 |
| 3.1.1. FMVSS 208 | 22 |
| 3.1.2. ECE R12 e ECE R94 | 22 |
| 3.2. Impacto lateral | 23 |
| 3.2.1. FMVSS 214 | 23 |
| 3.2.2. ECE R95 | 24 |
| 3.3. Impacto traseiro | 25 |
| 3.3.1. ECE R32 | 25 |
| 3.4. Sistema de combustível | 25 |
| 3.4.1. FMVSS 301 | 25 |
| 3.4.2. ECE R34 | 26 |
| 4. MODELO NUMÉRICO | 28 |
| 4.1. Modelo numérico do veículo | 28 |
| 4.2. Modelo numérico da barreira móvel | 30 |
| 5. SIMULAÇÕES | 31 |
| 5.1. Tanque combustível com material metálico | 35 |
| 5.2. Tanque combustível com material polimérico (PEAD) | 37 |
| 6. CONCLUSÕES | 40 |

| | | |
|----|----------------------------------|----|
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 41 |
|----|----------------------------------|----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Impacto frontal Chevrolet Corsa Classic (LatinNCAP, 2011) | 11 |
| Figura 2 - Impacto lateral Audi A4 (IIHS, 2011) | 11 |
| Figura 3 - Impacto traseiro Renault Fluence (EuroNCAP, 2011) | 12 |
| Figura 4 - Impacto lateral contra um poste Mitsubishi Lancer (ANCAP, 2008) | 12 |
| Figura 5 - Impacto entre dois veículos Honda Accord e Honda Fit (IIHS, 2009) | 13 |
| Figura 6 – Nível de lesão avaliado pelos dummies (NCAP, 2011) | 14 |
| Figura 7 - Movimento do pescoço durante o impacto (NCAP, 2011) | 14 |
| Figura 8 - Resultados do Toyota Corolla modelo 2009 (LatinNCAP, 2010) | 15 |
| Figura 9 - Tanque de combustível de PEAD (BRASKEM, 2011) | 17 |
| Figura 10 - Reservatório de combustível metálico (IGASA, 2010) | 18 |
| Figura 11 - Modelo desenvolvido por Kamal (KAMAL, 1970) | 20 |
| Figura 12 - Simulação do Volkswagen Polo (HAUG, 1986) | 21 |
| Figura 13 – Configuração do teste segundo a norma ECE R94 (UNECE, 2007) | 23 |
| Figura 14 - Configuração do teste conforme a norma FMVSS-214 (NHTSA, 2006) | 24 |
| Figura 15 - Configuração do teste segundo a norma ECE-R95 (UNECE, 2007) | 24 |
| Figura 16 - Configuração do teste ECE-R32 (UNECE, 2007) | 25 |
| Figura 17 - Esquematização do capotamento estático segundo FMVSS-301 (NHTSA, 2006) | 26 |
| Figura 18 - Modelo em elementos finitos utilizado nos estudos (NCAC, 2008) | 28 |
| Figura 19 – Modelo numérico do tanque de combustível (NCAC, 2008) | 29 |
| Figura 20 - Cartão *MAT que define as propriedades do material metálico | 29 |
| Figura 21 - Modelo de elementos finitos da barreira utilizada nos estudos | 30 |
| Figura 22 - Impacto traseiro (a) no início do contato, (b) $t=20\text{ms}$, (c) $t=45\text{ms}$ e (d) $t=70\text{ms}$ para a barreira a 48 km/h. | 32 |
| Figura 23 – Gráficos de velocidade e aceleração para a barreira a 48 km/h. | 32 |
| Figura 24 - Impacto traseiro (a) no início do contato, (b) $t=20\text{ms}$, (c) $t=45\text{ms}$ e (d) $t=70\text{ms}$ para a barreira a 60 km/h. | 33 |
| Figura 25 – Gráficos de velocidade e aceleração para a barreira a 60 km/h. | 33 |
| Figura 26 - Impacto traseiro (a) no início do contato, (b) $t=20\text{ms}$, (c) $t=45\text{ms}$ e (d) $t=70\text{ms}$ para a barreira a 70 km/h. | 34 |
| Figura 27 – Gráficos de velocidade e aceleração para a barreira a 70 km/h. | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material metálico e velocidade de impacto de 48 km/h) | 35 |
| Figura 29 – Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material metálico e velocidade de impacto de 60 km/h) | 36 |
| Figura 30 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material metálico e velocidade de impacto de 70 km/h) | 36 |
| Figura 31 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=20\text{ms}$, $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material polimérico e velocidade de impacto de 48 km/h) | 37 |
| Figura 32 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=20\text{ms}$, $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material polimérico e velocidade de impacto de 60 km/h) | 38 |
| Figura 33 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=20\text{ms}$, $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material polimérico e velocidade de impacto de 70 km/h) | 38 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do problema

O estudo numérico de impacto veicular vem ganhando importância no mercado automobilístico, uma vez que novas normas de segurança surgem para garantir a qualidade e a segurança dos automóveis atuais. Conhecido como *crash test* (teste de impacto), simulam condições reais de impactos e tem como objetivos analisar a segurança e integridade dos passageiros, otimizar a estrutura do veículo quanto à sua capacidade de absorver a energia de impacto e analisar o comportamento dos componentes como portas, bancos, assoalhos, etc.

Através do método de elementos finitos, é possível fazer uma simulação computacional do *crash test*, consumindo menos recursos do que um teste real e servindo como referência para a análise dos resultados obtidos experimentalmente. Todos os veículos devem atender a requisitos mínimos de segurança, baseados nas normas americanas (FMVSS – *Federal Motors Vehicle Safety Standard*) e europeias (ECE – *United Nations Economic Commission for Europe*) para serem vendidos em diversos países.

1.2. O *crash test*

O *crash test* é um teste onde se determina claramente o comportamento da estrutura veicular em condições que simulam acidentes de trânsito. Atualmente, um novo parâmetro passa a ser requisito para que um veículo seja aprovado nesses testes: a segurança dos passageiros, avaliada através de bonecos (*Dummies*) posicionados no interior do veículo impactado e dotados de sensores estrategicamente localizados que avaliam a desaceleração e o impacto sofrido em cada região do corpo, além de danos físicos como choques e mutilações.

Os principais pontos que representam riscos ao ocupante e que são monitorados pelos testes são: deslocamento da coluna de direção, deformações da coluna A (que interfere no vão de abertura das portas), deformações da coluna B (em impactos laterais, pode apresentar riscos à coluna do ocupante), intrusão do painel de instrumentos e da região dos pedais, desaceleração do ocupante e deformações na estrutura do tanque de combustível.

Os testes podem ser divididos em grupos de acordo com a posição do impacto:

- Impacto frontal (figura 1)
- Impacto lateral (figura 2)
- Impacto traseiro (figura 3)



Figura 1 - Impacto frontal Chevrolet Corsa Classic (LatinNCAP, 2011)



Figura 2 - Impacto lateral Audi A4 (IIHS, 2011)



Figura 3 - Impacto traseiro Renault Fluence (EuroNCAP, 2011)

Ainda pode haver variações quanto à estrutura impactante:

- Barreira fixa;
- Barreira móvel;
- Poste (figura 4)
- Outro veículo (figura 5)



Figura 4 - Impacto lateral contra um poste Mitsubishi Lancer (ANCAP, 2008)



Figura 5 - Impacto entre dois veículos Honda Accord e Honda Fit (IIHS, 2009)

Existem ainda testes de capotamento, que podem ser dinâmicos, onde o veículo é lançado de uma plataforma; ou estáticos, onde uma estrutura rígida é pressionada sobre o teto do veículo.

Existe uma instituição, a NCAP (New Car Assessment Program), que realiza testes de impacto em diversos veículos e disponibiliza os resultados para que os consumidores possam ter conhecimento do desempenho do veículo em relação à proteção aos ocupantes. A NCAP tem sede em diversos mercados: Austrália e Nova Zelândia (ANCAP), China (CNCAP), Europa (EuroNCAP), Japão (JNCAP), Coreia (KNCAP), Estados Unidos (USNCAP) e, recentemente criada, América Latina (LatinNCAP).

Atualmente, a NCAP realiza dois tipos de testes de impacto: impacto frontal com barreira deformável e impacto lateral. No caso do impacto frontal, o veículo a ser testado é impactado contra uma barreira deformável com 40% de sobreposição, ou seja, apenas uma parcela da parte frontal do veículo entra em contato com a barreira. O teste foi desenvolvido nesta configuração para simular um acidente de colisão frontal entre dois veículos, tipo de acidente comum em estradas e que resultam em graves lesões aos ocupantes. Já o impacto lateral é realizado com uma barreira deformável impactando no veículo na região do passageiro da frente, simulando também outra forma comum de acidente.

Os dummies são posicionados nos bancos frontais do veículo e medem os níveis de lesões que os ocupantes sofrem durante o impacto devido à intrusão do painel e outras partes da cabine, conforme a figura 6. O efeito do movimento do pescoço durante o impacto também é analisado, conforme a figura 7.



Figura 6 – Nível de lesão avaliado pelos dummies (NCAP, 2011)



Figura 7 - Movimento do pescoço durante o impacto (NCAP, 2011)

Outra análise também realizada pela NCAP é em relação à segurança de passageiros infantis nos veículos. Neste caso, são posicionados dummies representativos de crianças de 18 meses e três anos de idade na cadeirinha infantil. Os testes analisam desde a clareza nas instruções para a instalação da cadeirinha, como a sua segurança e eficiência na proteção contra lesões.

De acordo com o desempenho do veículo frente a estas duas análises – proteção do passageiro adulto e do passageiro infantil -, este é classificado por estrelas como mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do veículo em função da segurança do ocupante (NCAP, 2011)

| | |
|-------|-------------------------------|
| ★★★★★ | Menos de 10% de risco de vida |
| ★★★★ | 11% a 20% de risco de vida |
| ★★★ | 21% a 35% de risco de vida |
| ★★ | 36% a 45% de risco de vida |
| ★ | Mais de 46% de risco de vida |

Para a realização dos testes, são necessários alguns procedimentos: devem ser retirados todos os fluidos do veículo para evitar incêndios e substituídos por água. Todos os itens originais de fábrica devem ser mantidos em seus devidos lugares. Na parte externa do veículo são colados adesivos que servirão para avaliar as suas deformações.

A figura 8 mostra os resultados obtidos pelo veículo Toyota Corolla ano modelo 2009, comercializado no mercado do MERCOSUL (exceto o Brasil), para os testes realizados pela LatinNCAP em 2010, disponibilizados em seu web site.



Figura 8 - Resultados do Toyota Corolla modelo 2009 (LatinNCAP, 2010)

1.3. O tanque de combustível

Geralmente posicionado próximo ao eixo traseiro do veículo, o tanque de combustível é um recipiente de segurança, que basicamente tem a função de armazenamento do fluido combustível de um veículo para a alimentação do motor. Este armazenamento deve ser feito de maneira segura para evitar emissões por evaporação e existência de faíscas. A distribuição do combustível é feita através de uma bomba instalada no interior do tanque.

Desde os primeiros veículos dotados de motores de combustão interna até os automóveis atuais, o sistema de armazenamento e alimentação de combustível apresenta os mesmos componentes básicos: o reservatório de combustível, a bomba para recalque do combustível para o motor e as linhas de transmissão. A grande diferença é apenas em relação às tecnologias e materiais empregados na fabricação dos componentes. Atualmente existem dois materiais básicos utilizados na fabricação do tanque: polímero de alta densidade (PEAD) e o aço de baixo carbono.

1.3.1. Polietileno de alta densidade (PEAD)

Os tanques de material polimérico (figura 9) começaram a ser fabricados em escala em 1976, quando a Volkswagen introduziu o tanque fabricado pelo processo de sopro moldado no veículo VW-Passat. A grande motivação para o uso dos tanques de plástico é a possibilidade de se produzir formas diversas e complexas com um custo inferior em relação aos tanques metálicos, possibilitando que o reservatório se adapte à estrutura do assoalho otimizando a sua capacidade de armazenagem.

O problema de um tanque ser fabricado a partir do PEAD é a sua permeabilidade de hidrocarbonetos (HC) e consequentemente a emissão desses gases para o meio ambiente. Para solucionar este problema, foi implementado o PEAD multicamadas, onde o componente responsável por bloquear as emissões evaporativas é uma subcamada de um copolímero formado de etileno-vinil álcool (EVOH).

O desenvolvimento do tanque de combustível de material plástico multicamada foi necessário quando os Estados Unidos criaram a primeira norma que controlava as emissões de hidrocarbonetos (*“Low Emission Vehicle”* – LEV) para reduzir a poluição do ar, no ano de 1995. No Brasil, atualmente, não há regulamentação para emissão de poluentes, mas a partir de Janeiro de 2013 entra em vigor a regulamentação L6, baseada no padrão europeu Euro5.



Figura 9 - Tanque de combustível de PEAD (BRASKEM, 2011)

A tabela 2 mostra algumas propriedades típicas do PEAD, aplicado a tanques de combustível fabricados pela Braskem, e que serão utilizados na simulação numérica.

Tabela 2 - Propriedades típicas de placa de PEAD GM7746C (BRASKEM, 2011)

| | Unidade | Valor |
|------------------------|---------------------|----------|
| Módulo de Elasticidade | MPa | 900 |
| Coeficiente de Poisson | - | 0,35 |
| Yield Stress | MPa | 23 |
| Densidade | ton/mm ³ | 9,44E-10 |

1.3.2. Chapas metálicas de aço carbono

O aço utilizado na fabricação de tanques de combustível (figura 10) é o aço de baixo carbono e como apresenta uma baixa resistência à corrosão, as chapas devem passar por processos de revestimento de zinco ou estanho. Tanto o lado interno como o lado externo do tanque está sujeito à corrosão, devido à exposição ao meio ambiente e ao combustível, respectivamente.

Para garantir a qualidade do produto, os tanques de combustível devem ser submetidos a alguns testes, tais como a resistência ao fogo; resistência ao impacto, dentre outros. Todos estes testes têm seus métodos padronizados segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para aplicações nacionais.



Figura 10 - Reservatório de combustível metálico (IGASA, 2010)

A tabela 3 mostra alguns valores típicos das propriedades do aço carbono, utilizado na fabricação de tanques de combustível e que serão utilizados nas simulações numéricas.

Tabela 3 – - Propriedades típicas de placa de aço carbono (NCAC, 2008)

| | Unidade | Valor |
|------------------------|---------------------|---------|
| Módulo de Elasticidade | MPa | 2800 |
| Coeficiente de Poisson | - | 0,3 |
| Yield Stress | MPa | 45 |
| Densidade | ton/mm ³ | 7,89E-9 |

1.4. Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do tanque de combustível do veículo frente aos diversos tipos de *crash tests* especificados por norma, detectando possíveis falhas sistemáticas tais como ruptura da estrutura.

O pré-processamento dos modelos foi realizado utilizando o software Altair Hypermesh®, que possui uma interface gráfica didática e, depois de finalizada a edição dos modelos, estes podem ser facilmente exportados para o LS-Dyna®,

onde é executada a simulação do impacto (solver). O LS-Dyna® é um software que permite análise explícita e, portanto, recomendado para simulações de impacto.

Depois de realizadas as simulações, os resultados foram analisados (fase de pós-processamento) através do software Altair Hyperview®.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Simulação de impacto veicular

O primeiro desenvolvimento matemático para a modelagem e simulação de impactos veiculares contra barreira rígida foi realizado por Kamal (1970) e o seu modelo era composto por sistemas massa-mola-amortecedor, conforme mostra a figura 11. Porém, toda a calibração do modelo, ou seja, a definição dos parâmetros dos componentes era obtida a partir de testes de impacto aplicados separadamente em cada componente.

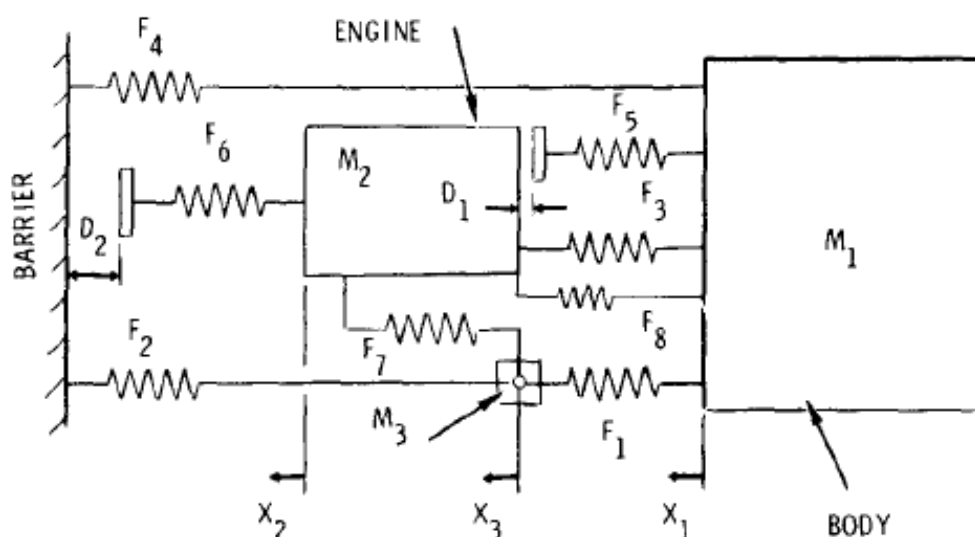


Figura 11 - Modelo desenvolvido por Kamal (KAMAL, 1970)

Em 1986, Haug et al. realizou a primeira simulação de impacto veicular utilizando o método de elementos finitos. O veículo estudado foi um Volkswagen Polo, colidido contra uma parede rígida, em um teste de impacto frontal, conforme mostra a figura 12.

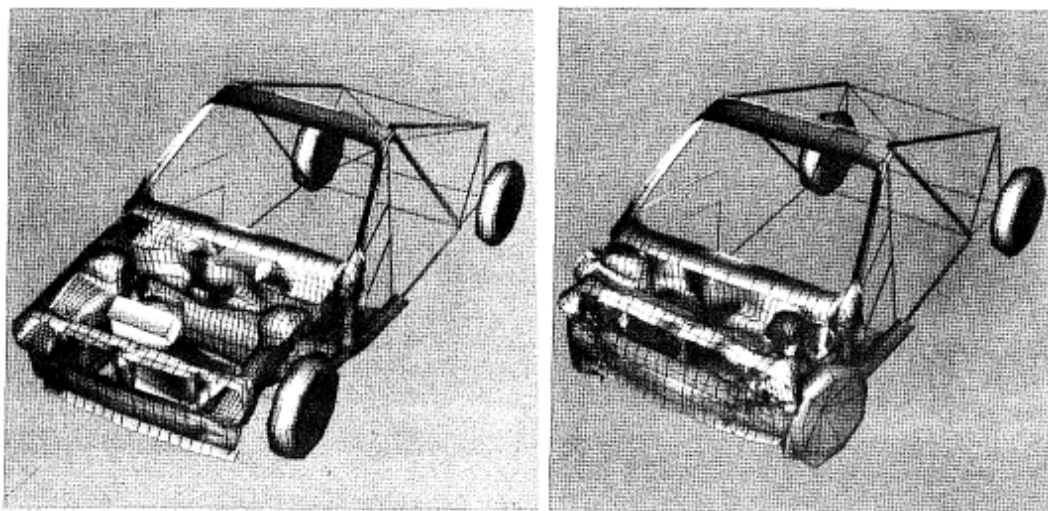


Figura 12 - Simulação do Volkswagen Polo (HAUG, 1986)

Atualmente, as simulações de impacto são muito utilizadas no desenvolvimento de um veículo, pois uma simulação computacional requer menos tempo e recursos materiais do que um teste real. E a preocupação em fabricar veículos cada vez mais seguros, capazes de absorver a energia de um impacto apresentando níveis de lesões mínimos aos ocupantes, impulsiona o aperfeiçoamento das técnicas de simulação do crash test.

3. NORMAS DE SEGURANÇA VEICULAR

Foi feito um levantamento das principais normas que especificam os testes de impacto veicular para a determinação dos parâmetros necessários para a realização das simulações numéricas. As normas selecionadas como base são as normas americanas e europeias, por se apresentarem mais rigorosas e além de servirem como base para as normas brasileiras.

3.1. Impacto frontal

3.1.1. FMVSS 208

Os testes de impacto frontal são os mais importantes no projeto de um veículo, pois representam o principal tipo de acidente veicular com vítimas. A principal norma utilizada no desenvolvimento do veículo é a norma americana FMVSS-208, onde o veículo deve ser impactado a uma barreira rígida de concreto com a velocidade de 56 km/h, e devem ser analisados os níveis de lesões sofridos pelos dummies segundo a classificação da NHTSA.

Os pontos do interior do veículo que interferem diretamente nos níveis de lesão do ocupante e que, portanto, devem ser monitorados durante o impacto são: deslocamento da coluna de direção, deformação da coluna A e deslocamentos do painel de instrumentos e da região dos pedais.

3.1.2. ECE R12 e ECE R94

As normas europeias referentes a testes de impacto frontal são a ECE R12 e a ECE R94. A norma ECE R94 define valores máximos para a movimentação da coluna de direção de 80 mm no eixo z e 100 mm no eixo x. Segundo esta norma, o veículo deve ser impactado a 57 km/h contra uma barreira deformável com 40% de sobreposição, conforme a figura 13.

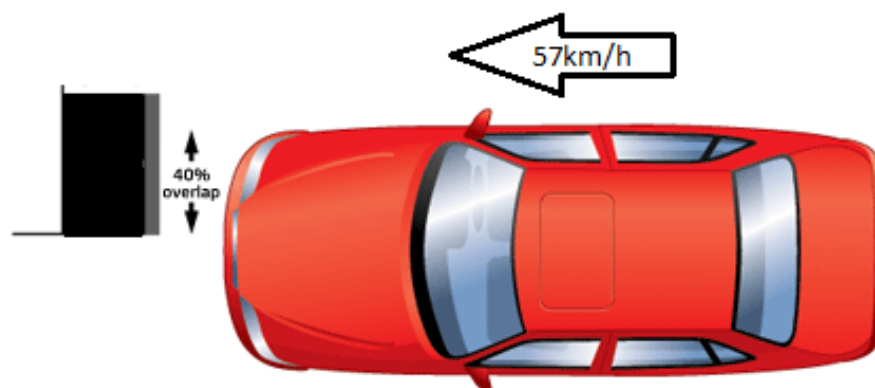


Figura 13 – Configuração do teste segundo a norma ECE R94 (UNECE, 2007)

A norma ECE R12 estabelece valores máximos para a movimentação da coluna de direção e que o sistema de combustível não apresente vazamentos. Segundo a norma, o veículo deve ser impactado contra uma barreira rígida a uma velocidade de 50 km/h.

3.2. Impacto lateral

Os testes de impacto lateral, definidos tanto pela norma americana como pela norma europeia, visam avaliar os níveis de lesão na cabeça, pescoço, tórax, abdômen e pernas dos dummies, posicionados nos bancos da frente do veículo a ser impactado. O principal ponto da estrutura do veículo que deve ser monitorado durante os testes de impacto lateral é a coluna B, pois é a região que pode entrar em contato com o ocupante e, portanto, apresenta riscos de lesão.

3.2.1. FMVSS 214

Para os testes de impacto lateral, a norma americana FMVSS214 determina que o veículo analisado deva ser impactado lateralmente por uma barreira de 1500 kg a 54 km/h e com um ângulo de 27°, conforme ilustrado na figura 14.

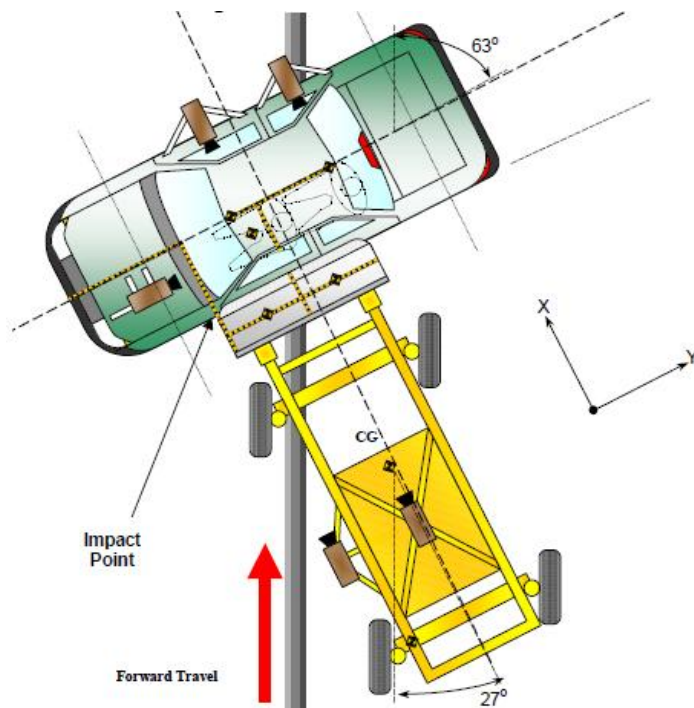


Figura 14 - Configuração do teste conforme a norma FMVSS-214 (NHTSA, 2006)

3.2.2. ECE R95

A norma europeia ECE R95 especifica que o veículo deva ser impactado perpendicularmente por uma barreira de 970 kg a uma velocidade de 50 km/h, conforme ilustrado na figura 15.

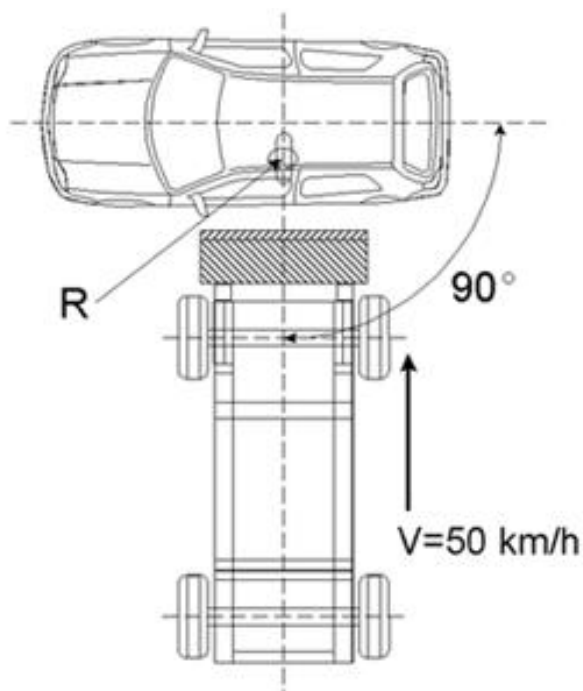


Figura 15 - Configuração do teste segundo a norma ECE-R95 (UNECE, 2007)

3.3. Impacto traseiro

3.3.1. ECE R32

As normas para testes de impacto traseiro analisam a integridade do sistema de combustível do veículo e será o tema deste trabalho. A norma ECE R32 determina que o veículo deve se encontrar parado com os freios acionados e ser impactado por uma barreira rígida de 1100 kg a 38 km/h, como mostra a figura 16.

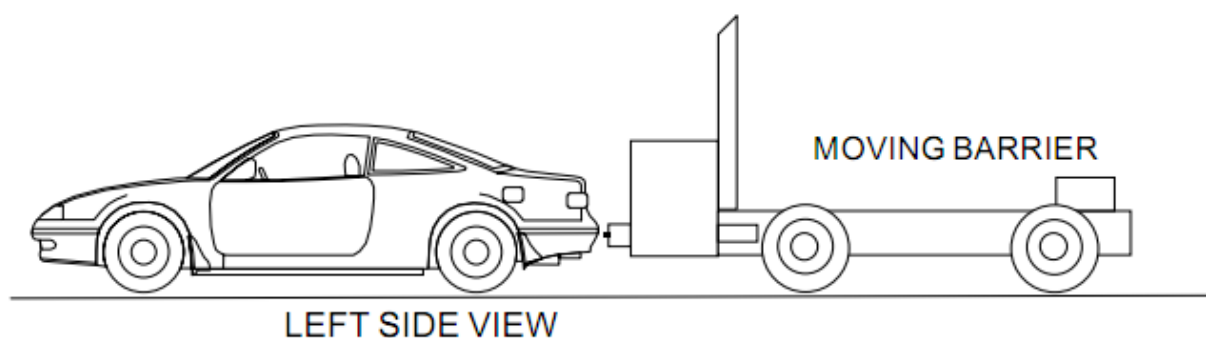


Figura 16 - Configuração do teste ECE-R32 (UNECE, 2007)

3.4. Sistema de combustível

Uma importante função dos testes de impacto veicular é verificar a integridade do sistema de combustível do automóvel após uma colisão, preservando a segurança dos seus ocupantes.

3.4.1. FMVSS 301

A principal norma que analisa o comportamento do tanque de combustível e todo o seu sistema de alimentação em condições de impacto é a norma americana FMVSS-301, onde o veículo é submetido a três tipos de testes de impacto: frontal, lateral ou traseiro, e depois a uma verificação para detectar a ocorrência de vazamento do combustível por um processo de capotamento estático.

O impacto frontal consiste em colidir o veículo a uma barreira fixa de concreto a uma velocidade de 47,3 km/h, enquanto que no teste de impacto

traseiro a barreira rígida de 910 kg que se movimenta à mesma velocidade contra o veículo estacionado. O teste de impacto lateral tem as mesmas configurações da norma FMVSS-214 descrita no item 3.2.1.

Durante os testes de impacto o veículo deve estar com 92% a 94% da capacidade do tanque preenchida com solvente de propriedades químicas e físicas definidas pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) através da norma D484-71, e o vazamento de combustível não deve ser superior a 142g durante os primeiros cinco minutos após o impacto. O capotamento estático onde, após o impacto, o veículo é rotacionado em torno do seu eixo longitudinal de 90° em 90° conforme mostra a figura 17, com um intervalo de cinco minutos entre cada rotação não deve apresentar um vazamento superior a 142 gramas.

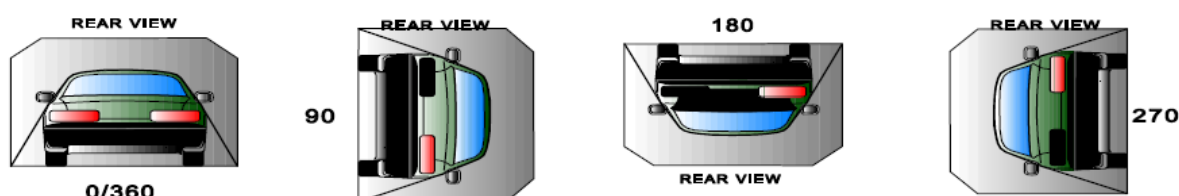


Figura 17 - Esquematização do capotamento estático segundo FMVSS-301 (NHTSA, 2006)

3.4.2. ECE R34

A norma europeia estabelece testes de impacto frontal, traseiro e lateral, seguidos de verificação de vazamento do combustível. Para o teste de impacto lateral, segue-se o estabelecido pela norma ECE R95, mencionada anteriormente, enquanto que para o teste de impacto frontal o veículo deve colidir com uma barreira fixa de concreto a uma velocidade entre 48,3 km/h e 53,1 km/h. No teste de impacto traseiro, o veículo deve se manter estacionado e ser atingido por uma barreira móvel de 1100 kg a uma velocidade entre 35 km/h e 38 km/h.

Após o teste de impacto, o vazamento de combustível ou de qualquer outro fluido não deve ser superior a 30g/min. Em seguida é realizado o procedimento de capotamento estático, nas mesmas condições mencionadas para a norma americana FMVSS 301 na seção 3.4.1.

Deve-se mencionar que os testes de impacto não são realizados com um mesmo veículo, ou seja, um veículo deve ser submetido a apenas um dos testes estabelecidos e seguido pela verificação de vazamento de combustível.

Esta norma ainda especifica testes de segurança a serem aplicados a tanques de material plástico:

- Resistência mecânica: O tanque deve ser totalmente preenchido com água a 53°C e submetido a uma pressão interna que seja o dobro da pressão de trabalho. O sistema deve ser mantido por cinco horas à temperatura de 53°C e a pressão interna do tanque não deve exceder 0,3 bar. Ao final do teste, o tanque não pode apresentar vazamentos ou rachaduras, apenas pequenas deformações.
- Resistência à colisão: O tanque deve ser totalmente preenchido com um líquido com baixo ponto de congelamento e mantido a -40°C para ser atingido por um pêndulo de aço piramidal, com massa total de 15kg. A energia do pêndulo no momento do impacto deve ser próxima de 30Nm e ,após o impacto, o tanque não pode apresentar vazamentos.
- Permeabilidade de combustível: O tanque deve ser preenchido em 50% da sua capacidade com combustível comercial e, sem ser selado, mantido a temperatura de 40°C até que a perda de massa por evaporação fique constante. Então o tanque deve ser esvaziado e preenchido novamente em 50% com o mesmo combustível, mantido a 40°C e selado. Quando a temperatura atingir o equilíbrio com a temperatura ambiente, o tanque deve ser pressurizado e mantido por oito semanas, com a taxa limite de perda de 20g a cada 24 horas de teste.
- Resistência ao combustível: Após o teste de permeabilidade de combustível, o tanque ainda deve atender os requisitos dos testes de colisão e resistência mecânica.
- Resistência ao fogo: O tanque deve ser preenchido com combustível comercial e submetido ao fogo por 2 minutos, não podendo apresentar vazamentos.

4. MODELO NUMÉRICO

4.1. Modelo numérico do veículo

O modelo numérico do veículo utilizado foi disponibilizado pela NCAC (National Crash Analysis Center), instituição americana que desenvolve modelos de elementos finitos de veículos reais, já validados segundo a própria instituição, ou seja, o modelo correlaciona com o veículo real para testes de impacto.

A figura 18 mostra o modelo do veículo, um Ford Taurus do ano de 2001.



Figura 18 - Modelo em elementos finitos utilizado nos estudos (NCAC, 2008)

A escolha do modelo se deve ao fato de que, dentre os modelos disponibilizados pela NCAC em seu site, o Ford Taurus é o que melhor se encaixa para o estudo do comportamento do tanque de combustível por se tratar de um veículo sedan. Todos os demais modelos são de veículos utilitários e a disposição do tanque de combustível nesse tipo de veículo não é adequada para o estudo em questão. A tabela 4 mostra detalhes do modelo.

Tabela 4 - Detalhes do modelo numérico do veículo (NCAC, 2008)

| | |
|---------------------------|---------|
| Número de nós | 936258 |
| Número de sólidos | 99486 |
| Número de vigas | 4 |
| Número de cascas | 805505 |
| Número total de elementos | 1057113 |

A figura 19 mostra o modelo de elementos finitos do tanque de combustível de material metálico, sendo definido no software LS-Dyna® pelo material MAT24 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, utilizado para material elasto-plástico com curva de tensão versus deformação baseada no modelo de plasticidade de Von Mises, e a taxa de deformação é baseada no modelo de Cowper Symond. A figura 20 mostra o cartão que define as propriedades do material, de acordo com as propriedades estabelecidas pela tabela 3 na seção 1.3.2.

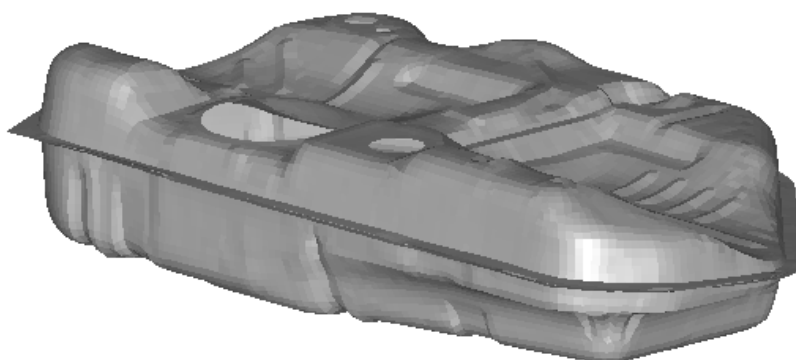


Figura 19 – Modelo numérico do tanque de combustível (NCAC, 2008)

| | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|----------|-----------|------|------|------|------|--|
| *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE | | | | | | | | | |
| MATL24_4000300.651 | | | | | | | | | |
| \$# | mid | ro | e | pr | sigy | etan | fail | tdel | |
| 2000763 | 7.8900E-9 | 2800.0000 | 0.300000 | 45.000000 | | | | | |

Figura 20 - Cartão *MAT que define as propriedades do material metálico

A tabela 5 a seguir mostra os detalhes do modelo numérico do tanque de combustível.

Tabela 5 – Detalhes do modelo numérico do tanque (NCAC, 2008)

| | |
|-----------|-------|
| Elementos | 17716 |
| Nós | 17536 |

4.2. Modelo numérico da barreira móvel

Para a simulação de impacto traseiro, principal foco deste trabalho, foi necessária também a utilização de um modelo numérico para a barreira móvel, disponível no site da *LS Dyna®* e de acordo com a especificações da norma americana FMVSS 301, descrita no item 3.4.1. O modelo da barreira, posicionada no instante do impacto com o veículo, é mostrado na figura 21.

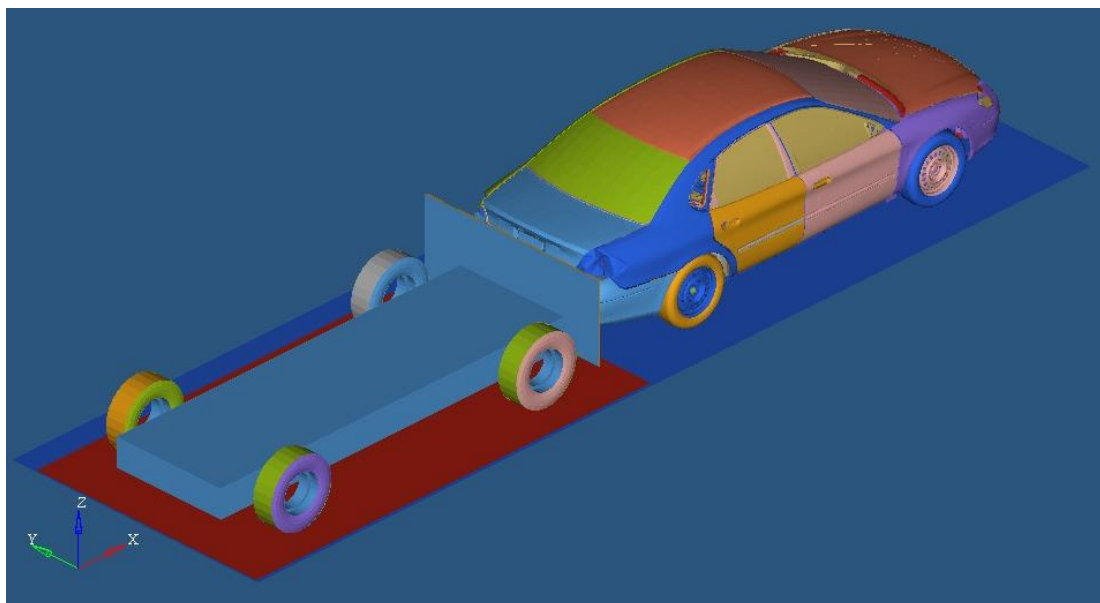


Figura 21 - Modelo de elementos finitos da barreira utilizada nos estudos

A tabela 6 mostra alguns detalhes referentes ao modelo numérico da barreira.

Tabela 6 – Detalhes do modelo numérico da barreira

| | |
|---------------------------|--------|
| Número de nós | 3205 |
| Número de sólidos | 640 |
| Número de cascas | 2779 |
| Número total de elementos | 3429 |
| Massa total | 910 kg |

5. SIMULAÇÕES

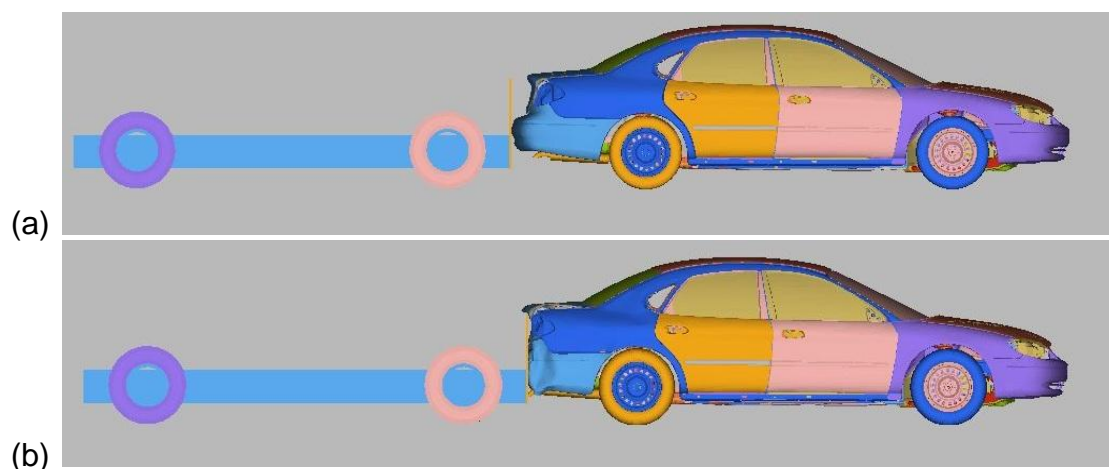
Nesta seção serão realizadas as simulações numéricas dos testes de impacto selecionados que apresentam mais riscos ao sistema de combustível, a fim de identificar possíveis pontos críticos na estrutura do tanque em relação à ruptura da superfície do tanque. A norma americana FMVSS 301, descrita no item 3.4.1, onde a barreira móvel impacta a uma velocidade de 48 km/h contra o veículo estacionado foi selecionada como parâmetro por estipular uma velocidade de impacto superior às outras normas de impacto traseiro.

As simulações foram divididas em duas partes: a primeira consiste nas simulações com o tanque de combustível com material metálico, de acordo com as propriedades especificadas na tabela 3 do item 1.3.2, e na segunda parte o material do tanque de combustível foi modificado para o PEAD, de acordo com as propriedades da tabela 2 do item 1.3.2.

Para cada material especificado para o tanque de combustível serão simuladas três condições de impacto, variando-se a velocidade da barreira no instante do impacto.

O critério de falha utilizado nas simulações foi o de máxima deformação plástica equivalente, onde o elemento que atinge a deformação limite do material é retirado da malha.

As primeiras simulações foram realizadas de acordo com a norma americana para verificação da integridade do sistema de combustível. A figura 22 mostra uma sequência do impacto.



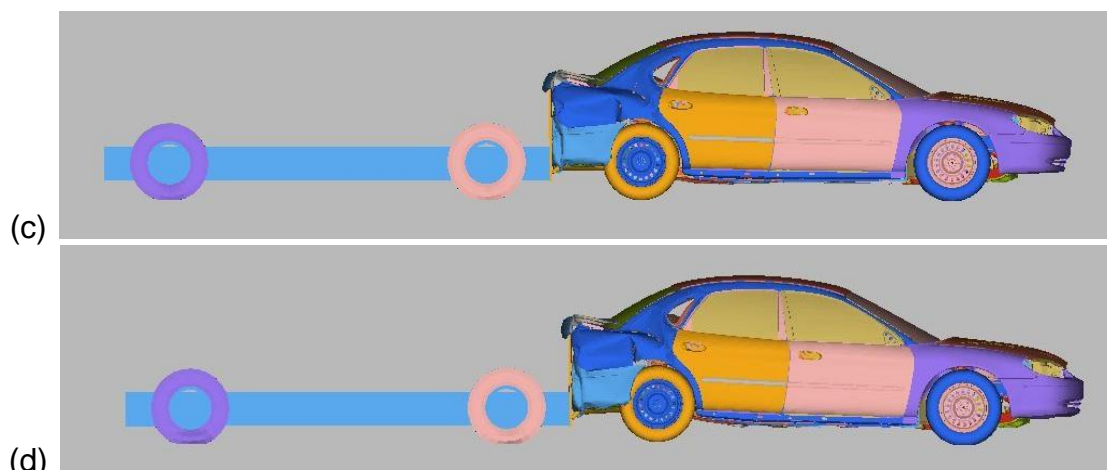


Figura 22 - Impacto traseiro (a) no início do contato, (b) $t=20\text{ms}$, (c) $t=45\text{ms}$ e (d) $t=70\text{ms}$ para a barreira a 48 km/h.

A figura 23 mostra a velocidade e aceleração de pontos de referência no veículo: para-choque traseiro, para-choque dianteiro e o tanque de combustível. É possível observar que a fase crítica do impacto, que apresenta maiores variações de aceleração, ocorre até 70ms após o contato entre a barreira e o veículo.

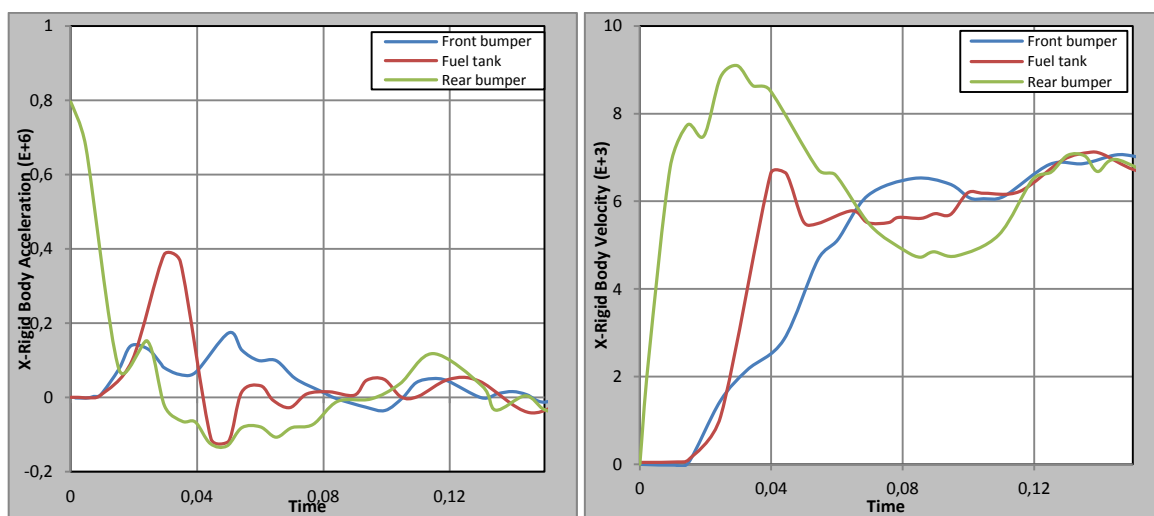


Figura 23 – Gráficos de velocidade e aceleração para a barreira a 48 km/h.

Para acentuar as diferenças de comportamento do tanque de combustível entre os dois materiais analisados, a velocidade da barreira no instante do impacto foi aumentada para 60 km/h e 70 km/h, como mostram as figuras 24 a 27.

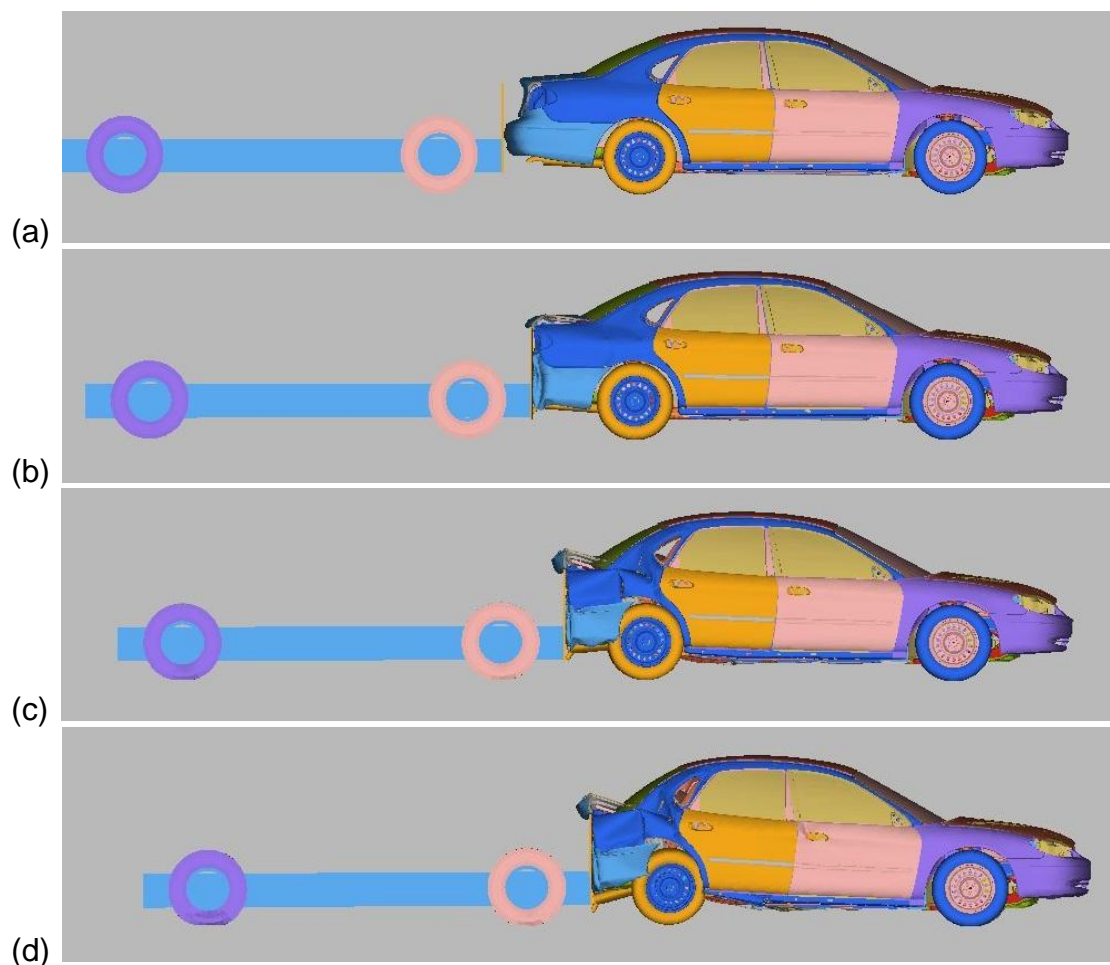


Figura 24 - Impacto traseiro (a) no início do contato, (b) $t=20\text{ms}$, (c) $t=45\text{ms}$ e (d) $t=70\text{ms}$ para a barreira a 60 km/h .

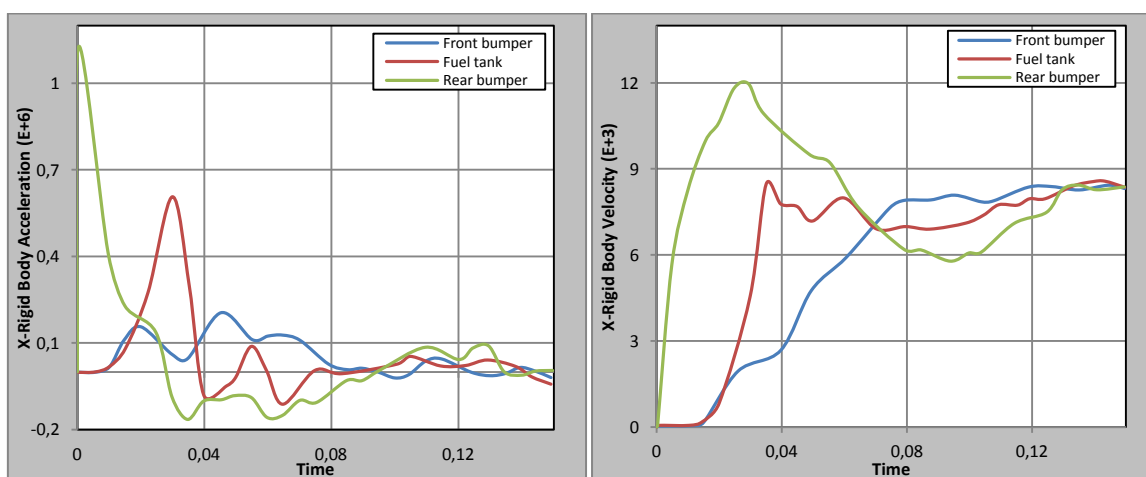


Figura 25 – Gráficos de velocidade e aceleração para a barreira a 60 km/h .

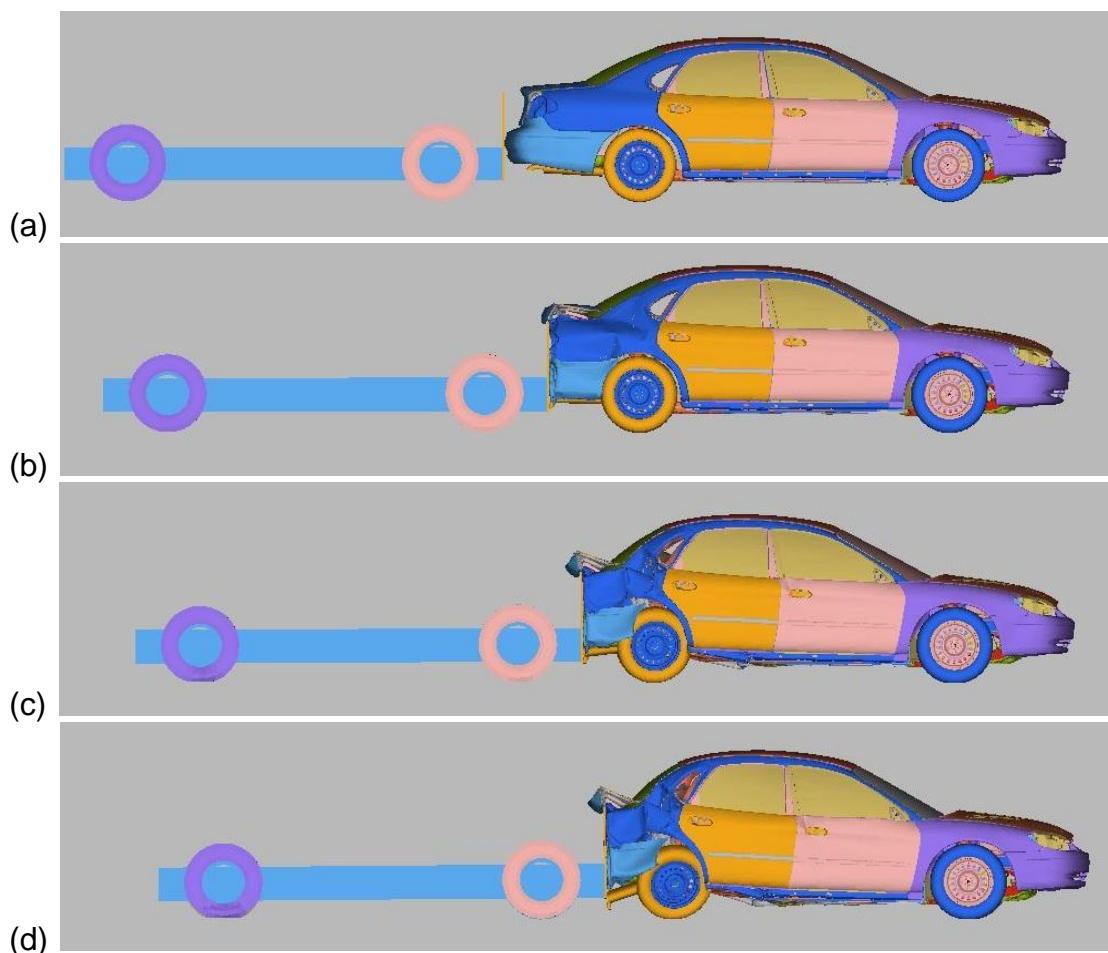


Figura 26 - Impacto traseiro (a) no início do contato, (b) $t=20\text{ms}$, (c) $t=45\text{ms}$ e (d) $t=70\text{ms}$ para a barreira a 70 km/h .

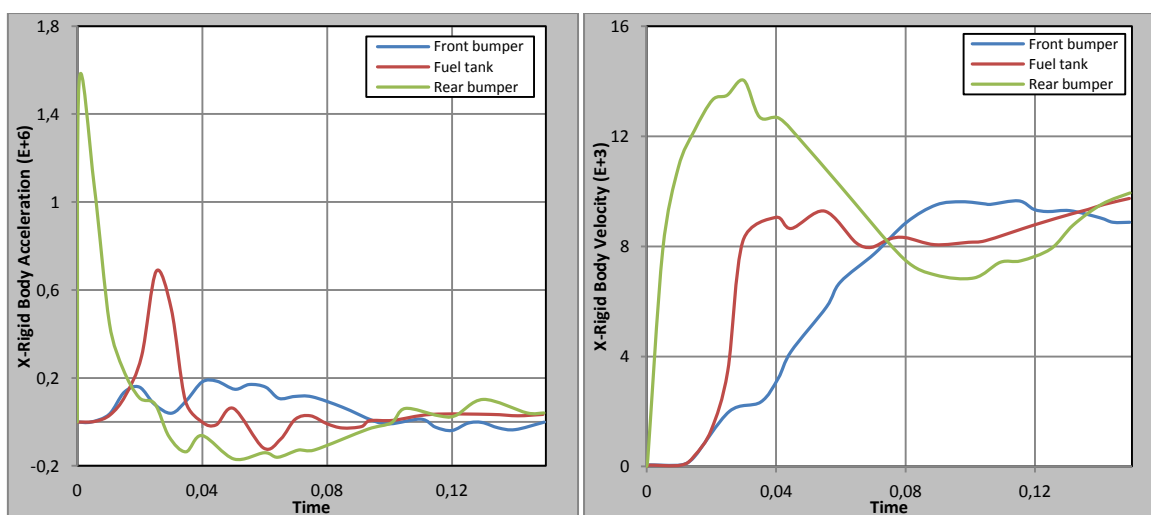


Figura 27 – Gráficos de velocidade e aceleração para a barreira a 70 km/h .

Nota-se que, com o aumento da velocidade de impacto, os picos de aceleração e velocidade apresentam um aumento significativo, porém o tempo de acomodação do sistema se mantém próximo de 70 ms .

A seguir é mostrado o comportamento do tanque de combustível frente às três condições de impacto.

5.1. Tanque combustível com material metálico

A simulação do impacto conforme a norma americana FMVSS 301, descrita no item 3.4.1, com o tanque de combustível metálico resultou em pequenas deformações da estrutura e também em algumas regiões com elevado nível de tensão, conforme pode ser observado na figura 28, que mostra os níveis da deformação plástica equivalente. É possível observar que nenhum elemento atingiu o limite de deformação plástica e que não haveria vazamento do fluido combustível.

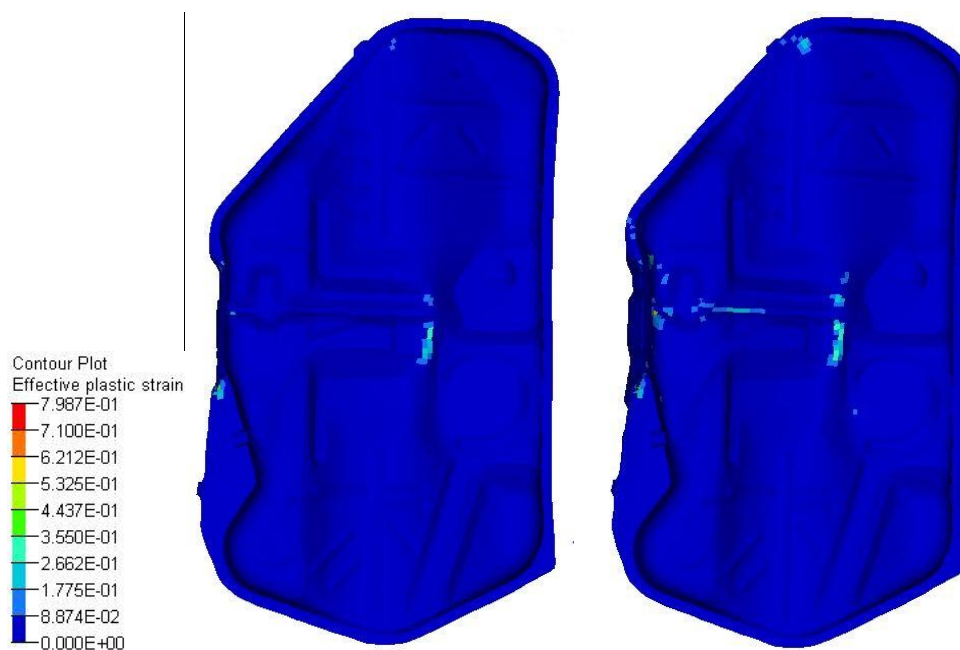


Figura 28 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material metálico e velocidade de impacto de 48 km/h)

A simulação de impacto traseiro com a velocidade da barreira de 60 km/h não mostrou grande variação de resultados quando comparado aos resultados do impacto a 48 km/h em relação aos níveis de tensão, mas apresentou uma deformação um pouco mais acentuada, como mostra a figura 29, inclusive com alguns elementos atingindo o limite de deformação plástica equivalente, representando então a falha do material e o vazamento de fluido combustível.

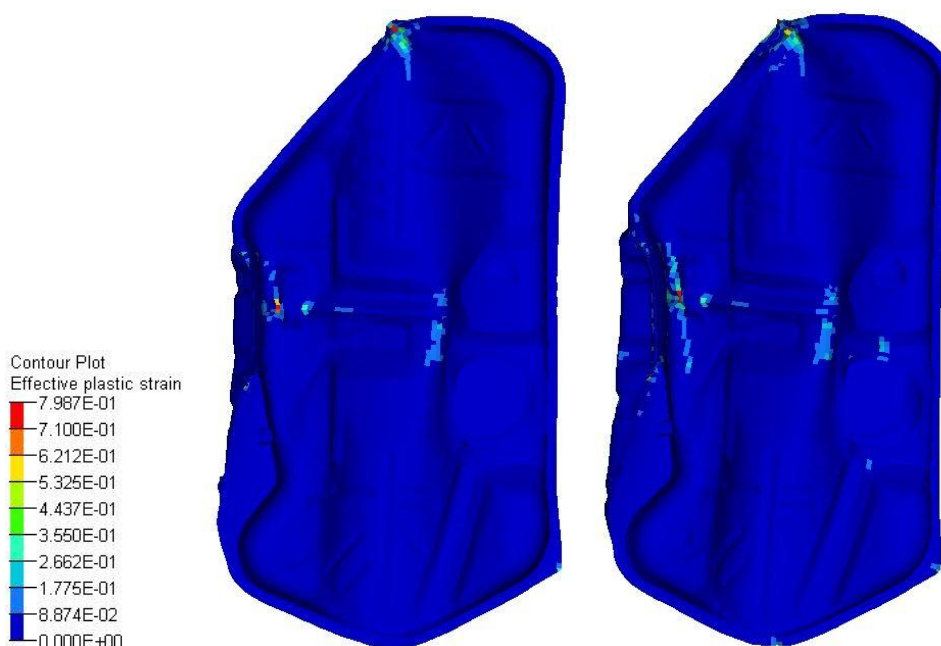


Figura 29 – Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material metálico e velocidade de impacto de 60 km/h)

A simulação de impacto com a barreira a 70 km/h resultou em mais regiões da estrutura do tanque apresentando elevados níveis de tensão, quando comparado às simulações anteriores com velocidades menores de impacto, e também com grade deformação da estrutura do tanque, como mostra a figura 30. É possível observar que já no instante de 45ms do impacto houve falha do material, com elementos atingindo o limite de deformação plástica.

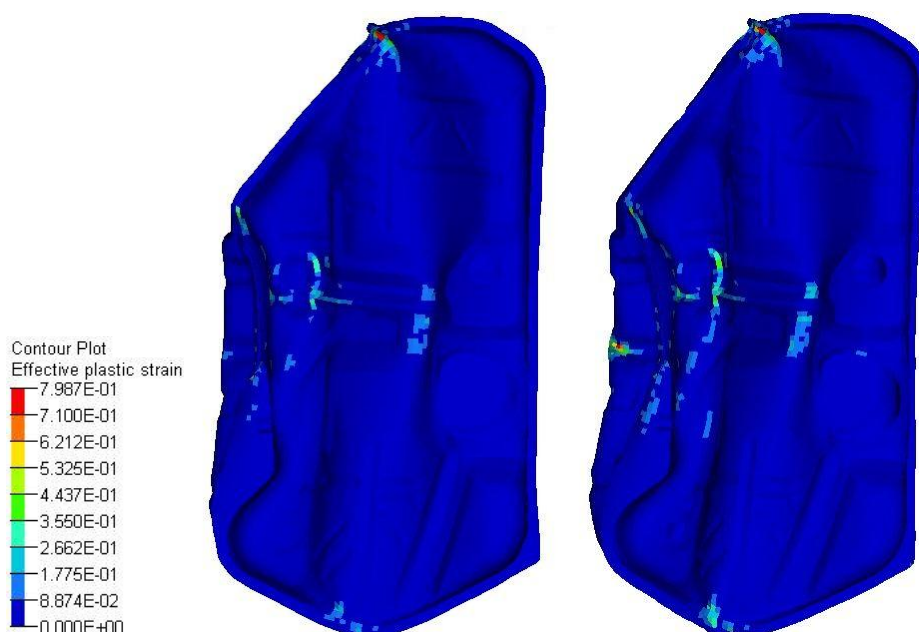


Figura 30 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material metálico e velocidade de impacto de 70 km/h)

5.2. Tanque combustível com material polimérico (PEAD)

A simulação de impacto com o tanque de material polimérico, seguindo a configuração da norma americana FMVSS-301, descrita no item 3.4.1, resultou em poucas regiões com níveis de tensão mais elevados e uma pequena deformação da estrutura do tanque, como mostra a figura 31. Os resultados mostram, inclusive, uma pequena variação em relação ao tanque de material metálico, sob a mesma velocidade de impacto.

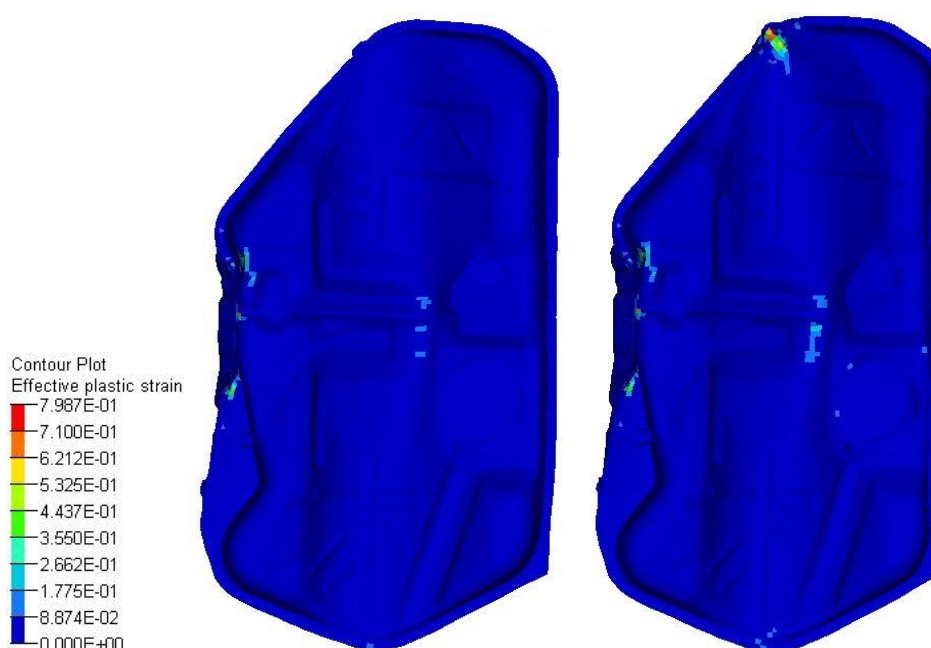


Figura 31 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=20\text{ms}$, $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material polimérico e velocidade de impacto de 48 km/h)

A seguir, a figura 32 mostra os níveis de tensão na estrutura do tanque de combustível em diferentes instantes para uma velocidade de impacto de 60 km/h. A simulação resultou em algumas regiões com índices elevados de tensão e maior deformação da estrutura em relação ao tanque metálico, sob mesma condição de impacto.

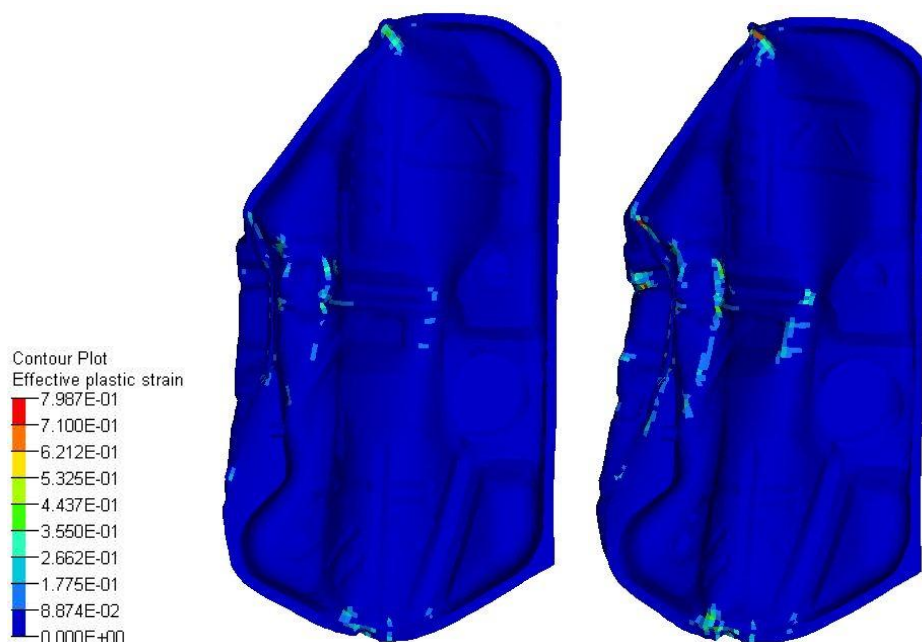


Figura 32 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=20\text{ms}$, $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material polimérico e velocidade de impacto de 60 km/h)

A figura 33 mostra a distribuição de tensão na estrutura do tanque de material polimérico para a velocidade de impacto de 70 km/h.

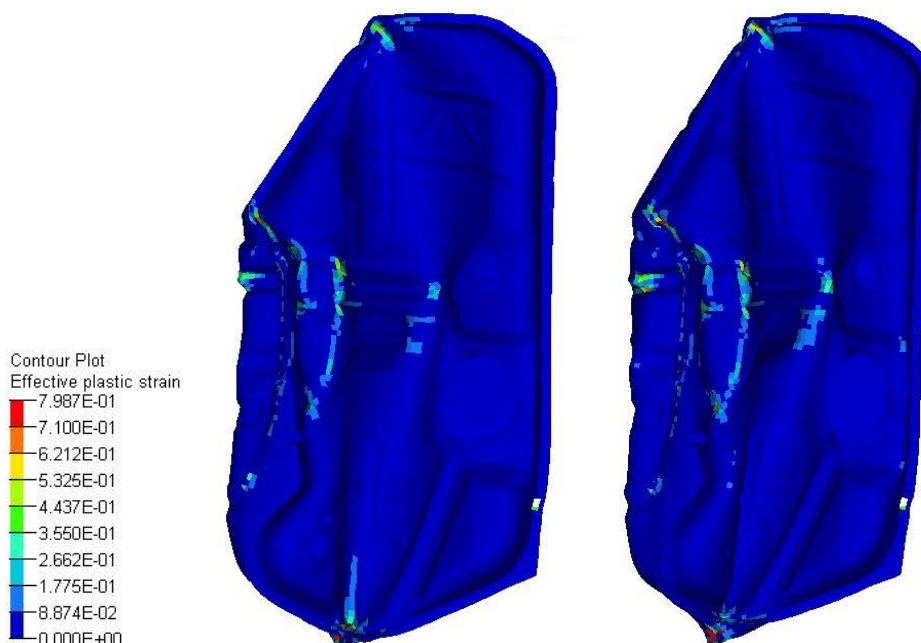


Figura 33 - Distribuição de tensões pelo tanque nos instante $t=20\text{ms}$, $t=45\text{ms}$ e $t=70\text{ms}$ (tanque de material polimérico e velocidade de impacto de 70 km/h)

A simulação de impacto com o tanque de material polimérico e com a barreira a 70 km/h resultou em grandes deformações na estrutura do tanque,

como também em diversas regiões atingindo o limite de deformação plástica equivalente, caracterizando a falha do material e consequentemente o vazamento do fluido combustível. Os resultados obtidos mostram que, para impactos com velocidade próxima a 70 km/h, o material polimérico apresenta um desempenho muito inferior em relação ao material metálico, ou seja, apresentam maiores deformações na estrutura e mais regiões podendo apresentar falha. Porém, pela norma americana FMVSS 301, considerada a mais rigorosa quanto à velocidade de impacto, os dois materiais apresentaram comportamento semelhante.

6. CONCLUSÕES

Primeiramente fez-se uma pesquisa para identificar os testes de impacto veicular que poderiam apresentar riscos ao sistema de armazenamento de combustível do veículo. Foi constatado que as normas americanas estabelecidas pela FMVSS e as normas europeias estabelecidas pela ECE para impacto traseiro são as que mais influenciam a integridade do tanque de combustível, localizado geralmente na parte posterior do veículo.

Fez-se necessário também um estudo sobre os diferentes tipos de materiais aplicados na fabricação do tanque de combustível e as suas propriedades mecânicas, relevantes para o seu estudo estrutural.

Dessa forma, este trabalho consiste no estudo do comportamento do tanque de combustível veicular em condições de impacto e, este estudo, foi feito através do método de elementos finitos e analisando as diferenças de comportamento sob diferentes condições de impacto e diferente material para o tanque.

Os resultados das simulações mostraram que o tanque de combustível de material polimérico apresentam maiores taxas de deformação e mais regiões com índices elevados de tensão, quando comparado ao tanque de material metálico estudado. Essa diferença era esperada devido à diferença das propriedades mecânicas dos dois materiais e se mostrou evidente apenas a elevadas velocidades de impacto (60 a 70 km/h). Porém, para a velocidade de impacto de 48 km/h, estipulada pela norma americana FMVSS 301, os resultados mostram pouca diferença entre o comportamento do tanque de material metálico e polimérico.

Este trabalho faz uma análise qualitativa do problema, por se utilizar um modelo de veículo mais antigo e com um tanque de combustível originalmente feito de aço-carbono, fazendo-se a mudança para o material PEAD alterando as propriedades mecânicas no modelo e não alterando a geometria do mesmo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASKEM. Disponível em <<http://www.braskem.com.br/site.aspx/Consultar-Produtos?codProduto=49&grd=true&Familia=&nmFam=Combust%C3%ADveis&Aplicacao=&Processo=&CurrentPage=0>>. Acesso em: 19 jun. 2011
- EuroNCAP. Disponível em <http://www.euroncap.com/results/renault/fluence_ze/2011/468.aspx>. Acesso em: 24 abr. 2011.
- ECE Regulations. Disponível em <http://www.crash-network.com/Regulations/ECE_Regulations/ece_regulations.html>. Acesso em: 30 abr. 2011.
- HAUG, E.; SCHARNHORST, T.; DU BOIS, P. FEM-Crash Berechnung Eines VDI Berichte, 613, 479-505, 1986
- INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY. Disponível em <<http://www.iihs.org/ratings/rating.aspx?id=1044&seriesId=558>>. Acesso em: 01 dez. 2011.
- KAMAL, M. M. Analysis and Simulation of Vehicle to Barrier Impact. SAE paper 700414, 1970.
- LatinNCAP. Disponível em <<http://latinncap.com/po/?pg=results>>. Acesso em: 10 nov. 2011.
- LS-Dyna Keyword User's Manual Versão 971 – Livermore Software Technology Corporation.
- NATIONAL CRASH ANALYSIS CENTER. Estados Unidos. Finite Element Model Archive. Disponível em: <<http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>>. Acesso em: 30 abr. 2011.

- NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. Estados Unidos. Test Procedures. Disponível em: < [http://www. nhtsa.gov/Vehicle +Safety/Test+Procedures](http://www.nhtsa.gov/Vehicle+Safety/Test+Procedures)>. Acesso em: 19 jun. 2011.
- MATSUMOTO, A. T. Estudo do desempenho de reforços poliméricos em estruturas veiculares submetidas a impacto. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia. 2010.
- OLIVEIRA, J. R. P. Estudo da dinâmica de válvulas de compressores. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007
- SUZUKI, C. E. T. Estudo comparativo de alternativas para o desenvolvimento, projeto e fabricação de tanques de combustível para automóveis de passageiros dentro da General Motors do Brasil. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Automotiva. 2007