UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PAULO CESAR DE OLIVEIRA QUEIROZ

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE BARREIRAS DE SEGURANÇA DE CONCRETO ARMADO PARA USO EM RODOVIAS.

São Carlos, São Paulo.
2016

PAULO CESAR DE OLIVEIRA QUEIROZ

Avaliação do desempenho estrutural de barreiras de segurança de concreto armado para uso em rodovias.

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Civil (Estruturas).

Orientadora: Professora Associada Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs

Co-Orientador: Professor Dr. Vladimir Guilherme Haach

Tese de Doutorado desenvolvida com auxílio do CNPq – Processo 143482/2011-4 e auxílio CAPES – Processo 99999.007226/2014-04

Data da defesa: 13 de maio de 2016

VERSÃO CORRIGIDA: A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

São Carlos – SP
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Q3a

QUEIROZ, PAULO CESAR DE OLIVEIRA QUEIROZ
Avaliação do desempenho estrutural de barreiras de segurança de concreto armado para uso em rodovias / PAULO CESAR DE OLIVEIRA QUEIROZ QUEIROZ; orientadora ANA LÚCIA HOMCE DE CRESCE EL DEBS EL DEBS; coorientadora VLADIMIR GUILHERME HAACH HAACH. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Barreiras de Concreto. 2. Segurança em Rodovias. 3. Testes de Impacto. 4. LS-DYNA. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO CÉSAR DE OLIVEIRA QUEIROZ**.

Título da tese: "Avaliação do desempenho estrutural de barreiras de segurança de concreto armado pra uso em rodovias".

Data da defesa: 13/05/2016

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Profa. Associada **Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs (Orientadora)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Ricardo Carrazedo** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Profa. Associada **Larissa Driemeier** (Escola Politécnica/EP-USP	APROVADO
Prof. Dr. **José Weissmann** (University of Texas at San Antonio/USA)	APROVADO
Prof. Dr. **Arturo Humberto Montoya Rodriguez** (University of Texas at San Antonio/USA)	APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenheira Civil (Engenharia de Estruturas):
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Sergio Lima Segantine**

Dedico este trabalho à minha avó Dulce Pereira de Araújo Marinho, in memorian, um dos pilares da minha vida e formação, aos meus pais, irmãos e tias e a minha namorada Ama Tonantzin.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que nos concede a fé e a força necessária para a superação dos obstáculos e por ter me guiado em todos os momentos da minha vida.

À minha orientadora a professora Drª. Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs e ao meu co-orientador: professor Dr. Vladimir Guilherme Haach, sem os quais não poderia ter concluído esse trabalho.

Ao CNPq e à CAPES pela concessão da bolsa dessa pesquisa e à FAPESP pelo auxílio do suporte computacional

Aos meus amigos Victor Manuel Henriquez, a Ivone Passos Ferreira, ao Gabriel Rocha, às Marcelas, às irmãs Orienta e Indara e ao Rafael Moraes pela valiosa contribuição nesse trabalho.

À Universidade Federal da Paraíba e em especial ao professor Dr. Ângelo Vieira Mendonça, que me iniciou na pesquisa científica e no mundo acadêmico.

À *The University of Texas at San Antonio*, em especial ao professor Ph.D. Jose Weissmann e ao professor Ph.D. Arturo Montoya pelo suporte nessa pesquisa e aos colegas Bruno Itaquy, Diego Seiti, Guilherme Maia, Igor Catellani, Carolina Quintana, Babak Ravaji e Wes Fielder.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Estruturas pelo valioso apoio ao longo da pesquisa, em especial aos professores Mounir El Debs, Humberto Coda, Edson Leonel, Samuel Giogo, Rodrigo Paccola, André Beck e Ricardo Carrazedo pelo apoio à minha formação e aos funcionários Dorival Piedade, Roberto Fagá e Masaki Kawabata pelo suporte de TI, Luiz Vareda pelo suporte ao Laboratório de Estruturas e às funcionárias Rosi Jordão, Sylvia Helena, Tati e Nadir Minatel pelo suporte acadêmico.

Agradeço também aos meus pais, ao meu irmão Jean Carlos pela amizade e pelo suporte, às minhas tias e familiares, à minha amiga Suênia Marques pelo apoio, e de forma especial à minha avó, Dulce Pereira de Araújo Marinho, pelo seu esforço e empenho em me oferecer uma formação sólida e à minha namorada Ama Tonantzin pela compreensão e paciência.

Finalmente, agradeço a todos aos meus amigos pelo apoio e ajuda, e em geral a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a minha formação.

RESUMO

QUEIROZ, P. C. O. **Avaliação do desempenho estrutural de barreiras de segurança de concreto armado para uso em rodovias.** 2016. 203 p. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

As barreiras de concreto são dispositivos utilizados como componentes de segurança em rodovias, que visam absorver o choque lateral de veículos desgovernados, propiciando sua recondução à faixa de tráfego e minimizando os danos aos ocupantes do veículo. Neste trabalho é analisado o desempenho de barreiras de concreto com o uso de modelos experimentais e numéricos baseados nas recomendações das normas brasileiras e internacionais. O estudo consiste em analisar a eficiência estática e dinâmica dessas barreiras. A análise estática engloba o estudo de distribuição de tensões na barreira considerando diferentes tipos de conectores, modo de ruptura, bem como a resistência desses conectores através de ensaios experimentais. Os ensaios são realizados de acordo com os critérios estabelecidos pela norma americana AASHTO LRFD 2012. A análise numérica, realizada com o uso de software de elementos finitos LS-DYNA©, contempla a atuação da geometria e da rigidez da barreira no processo de absorção de energia de impacto entre a barreira e o veículo, a eficiência do seu redirecionamento e adequação para os níveis de contenção estabelecidos em normas internacionais. Os resultados evidenciaram que a geometria da barreira é um fator importante para o desempenho da mesma, e, também que o uso de conectores em barreiras temporárias são primordiais para o bom funcionamento do sistema de contenção.

Palavras-chaves: Barreiras de concreto. Segurança em rodovias. Testes de Impacto. LS-DYNA.

ABSTRACT

QUEIROZ, P. C. O. **Structural Performance evaluation of reinforced concrete safety barriers for use on highways**. 2016. 203 p. Thesis (Dr. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

Concrete barriers are devices used as safety components in roads, which aim at absorbing side impact of unguided vehicles, redirecting them to the traffic lane and minimizing damage to the vehicle occupants. The present work analyzes the performance of concrete barriers through experimental and numerical models based on the recommendations of the Brazilian and international standards. The study consists in analyzing the static and dynamic efficiency of these barriers. The static analysis includes determining the stress distribution and yield lines in the barrier for different types of connectors, as well as studying the resistance of these connectors by performing experimental tests; these tests were conducted according to the criteria established by the American Standard AASHTO LRFD 2012. The numerical analysis, conducted with the commercial finite element software LS-DYNA© , evaluates the effect of geometry and stiffness of the barrier on the energy absorption performance., efficiency in redirecting the vehicles and suitability for providing restraint levels established in international standards. The results showed that the geometry of the barrier is an important factor for the barrier performance. In addition, the use of connectors in temporary barriers is essential for the smooth operation of the containment system.

Keywords: Concrete Barriers. Safety Road. Crash Test. LS-DYNA.

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	*Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEF	Análise de Elementos Finitos
ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestre
ASI	*Acceleration Severity Index*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BCP	Barreiras de Concreto Pré-fabricadas
BNJ-M	*Barreira New Jersey com conector Montana*
BNJ-NY	*Barreira New Jersey com conector Nova York*
CEN	*European Committee for Standardization*
CG	Centro de Gravidade
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CTB	Código de Transito Brasileiro
DENATRAN	Departamento Nacional de Transito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EN	European Standard
FHWA	*Federal Highway Admnistration*
LRFD	*Load-and-Resistance Factor Design*
MASH	*Manual for Assessing Safety Hardware*
MEF	Método dos Elementos Finitos
NCAP Latina	Programa de Carros Novos para América Latinha e o Caribe
NCHRP	*National Cooperative Highway Research Program*
NHTSA	*National Highway Traffic Safety Administration*
OMS	Organização Mundial da Saúde
ORNL	*Battelle Memorial Institute, Oak Ridge National Laboratory*
PCB	*Precast/Portable Concrete Barrier*
PHD	*Post-impact head deceleration*
THIV	*Theoretical head impact velocity*
UTK	University of Tennessee at Knoxville
VCDI	*Vehicle Cockpit Deformation Index*

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras maiúsculas

F_f	Função de falha ao cortante
F_c	Função de endurecimento "*cap*";
G_f	É a energia de fratura (à tração ou à compressão)
G_f^{vp}	Valor ampliado com o efeito viscoplástico
B	Parâmetro de forma de amolecimento dúctil
C_H	Velocidade de Endurecimento
CTX	Compressão Triaxial
D	Parâmetro de forma de amolecimento frágil
D_1	Parâmetro de endurecimento linear
D_1	Parâmetro de forma linear
D_2	Parâmetro de endurecimento quadrático
D_2	Parâmetro de forma quadrática
E	Módulo de elasticidade
G	Módulo de cisalhamento
G_{fc}	Energia de fratura de compressão uniaxial
G_{fs}	Energia de fratura de cisalhamento puro
G_{ft}	Energia de fratura de tração uniaxial
K	Módulo de Bulk
NH	Iniciação do Endurecimento
R	Proporção do CAP
S_{ij}	Tensor de tensões desviador
TTX	Tração triaxial
W	Máxima deformação volumétrica plástica
X_0	Localização inicial do CAP

Letras minúsculas

$f'c$	Resistência a compressão
d	Fator de dano

Letras gregas

$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação
β'	Parâmetro de endurecimento
$\Re$	Função de escala Rubin
ε_v^p	É a deformação volumétrica plástica
σ_{ij}^d	Tensão com o componente de dano
σ_{ij}^{vp}	Tensão sem dano
$\varepsilon_{\max}$	Máxima deformação principal
τ_b	Termo de energia que depende da acumulação da deformação total
κ	Parâmetro de endurecimento da superfície
α	CTX superfície constante
θ	CTX superfície linear
λ	CTX superfície não-linear
β	CTX superfície exponencial
η_{0c}	Parâmetro de ajuste de compressão simples
η_{0t}	Parâmetro de ajuste de tração simples
α_1	TOR superfície constante
θ_1	TOR superfície linear
λ_1	TOR superfície não-linear
β_1	TOR superfície exponencial
α_2	TTX superfície constante
θ_2	TTX superfície linear
λ_2	TTX superfície não-linear
β_2	TTX superfície exponencial
η_c	Parâmetro de ajuste de compressão simples
η_t	Parâmetro de ajuste de tração simples

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO **25**

1.1. Panorama de Utilização das Barreiras nas Rodovias Brasileiras *29*

1.2. Barreiras Pré-fabricadas de Concreto Armado *33*

1.3. Objetivos *35*

1.4. Justificativa *35*

1.5. Metodologia *37*

CAPÍTULO II - LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO **38**

2.1. Barreiras de Concreto: Generalidades *38*

2.2. Barreiras de Concreto Pré-fabricadas *44*

2.3. Análise Numérica *47*

2.4. Pesquisas realizadas no Brasil *51*

2.5. Revisão Normativa *52*

CAPÍTULO III - SISTEMAS DE CONTENÇÃO VEICULARES **55**

3.1. Barreiras de Segurança *55*

3.1.1. Barreiras Flexíveis 56

3.1.2. Barreiras Semirrígidas 56

3.1.3. Barreiras Rígidas 57

3.2. Níveis de Contenção *58*

3.3. Desempenho dos Sistemas de Contenção *60*

3.3.1. Adequação Estrutural 60

3.3.2. Risco ao Ocupante 61

3.3.3. Trajetória Veículo Pós-impacto 65

3.4. Sistemas de Proteção e Restrição do Ocupantes *66*

3.4.1. Cinemática do Trauma 67

CAPÍTULO IV - PROGRAMA EXPERIMENTAL **70**

4.1. Descrição dos protótipos *70*

4.2. Caracterização dos Materiais *71*

4.2.1. Conectores 71

4.2.2. Armaduras 72

4.2.3. Concreto 73

4.3. Descrição dos Ensaios *74*

4.3.1. Instrumentação 75

4.4. Resultados dos Ensaios *76*

4.4.1. Protótipo BNJ-NY 77
4.4.2. Protótipo BNJ-M 80
4.4.3. Barreira Unitária BNJ-M 84

4.5. Considerações sobre os Ensaios 86

CAPÍTULO V - MODELOS NUMÉRICOS 90

5.1. Barreiras de Contenção 90
5.1.1. Descrição da Malha 91
5.1.2. Descrição dos Elementos de Barra 93
5.1.3. Descrição dos Elementos de Casca 93
5.1.4. Descrição dos Materiais 94

5.2. Veículos de Testes 98
5.2.1. Veículo 36000V 98
5.2.2. Veículo 2000P 100
5.2.3. Veículo 1100C 100
5.2.4. Veículo TB11 101

5.3. Contato Veículo x Barreira 102
5.3.1. Veículo 36000V 104
5.3.2. Veículo 2000P 104
5.3.3. Veículo 1100C 105
5.3.4. Veículo TB11 105

CAPÍTULO VI - RESULTADO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS 106

6.1. Análise de Desempenho de Barreiras de Concreto New Jersey 810 mm Engastada na Base 107

6.1.1. Simulação com Veículo TB 11 107

6.1.2. Simulação com Veículo 1100 C 114

6.2. Análise de Desempenho de um Modelo de Barreira Temporária de Concreto New Jersey 810 mm com conector New York. 120

6.2.1. Simulação com Veículo 2000 P 120

6.2.2. Comparação de dois Sistemas de Barreiras Temporárias: Barreira Tipo F 810 mm livres e Barreira New Jersey 810 mm com conectores utilizando um veículo TB11... 134

6.3. Análise de Desempenho de Algumas Geometrias de Barreiras 141

*6.4. Comparação entre os modelos constitutivos *MAT_ELASTIC (*MAT_001) e MAT_CSCM_CONCRETE (*MAT_159) 150*

CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 156

7.1. Conclusões Finais 156

7.2. Sugestões para Futuras Linhas de Investigações 160

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 161

APÊNDICE A - O MODELO MAT_CSCM (*MAT_159)..... 171

APÊNDICE B - PROJETOS BNJ-NY E BNJ-M 196

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Geometria de uma barreira New Jersey: (a) barreira dupla, (b) barreira simples 26

Figura 1.2 - Comparação entre a Frota de Veículos Americanos x Veículos Brasileiros com suas respectivas taxas de fatalidade por 100 mil veículos 27

Figura 1.3 - Distribuição percentual de acidentes fatais por tipo de objeto - AASHTO (2011) 28

Figura 1.4 – Condições das rodovias brasileiras em 2015 – CNT (2015). 29

Figura 1.5 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país – CNT (2015). 30

Figura 1.5 – Acidentes envolvendo sispositivos de contenção: (a) Acidente com barreira de uma ponte no interior do Maranhão (cedida ao autor por locais), (b) Motorista morre após bater carro em mureta (CAMERA REC, 2014) e (c) Acidente na SP-310 em São Carlos (G1, 2015); (d) Acidente na SC-401 mata duas mulheres (NDOLINE, 2016), (e) Homem morre após caminhão colidir em mureta (O Diário, 2016), (f) Morte de operário por falta de barreira temporária (CAMERA REC, 2013), (g) Carro colide em defensa metálica na BR 101 e passageira morre em SE (G1, 2014), (h) Motociclista morre em acidente na Washington Luis em São Carlos (REGIÃO EM DESTAQUE, 2015) 31

Figura 1.6 – Instalações inapropriadas que podem causar acidentes: (a), (b) obstáculos impedindo o funcionamento das barreiras e (c) ausência de sistema de transição (Vrum, 2014); (d) forma irregular da barreira agravando o acidente (Viacertanatal, 2012); (e) resistência estrutural inadequada da barreira (Band News FM, 2014); (f) ausência de barreira causando acidente (Portal G1, 2014); (g); (h) instalação inadequada e falta de manutenção (Vias Seguras, 2013) e (i) fixação ineficiente da barreira (L'attualitá, 2016). 32

Figura 1.6 – Processo de montagem de barreiras pré-fabricadas de concreto. (Serguvia, 2012). 33

Figura 1.7 – Modelos de vínculos: (1) Pino com alça, (2) Conector macho/fêmea (3) Inserto com chapa (4) Tarugo duplo, (5) Perfil I e (6) Junta de emenda - Atahan (2006). 34

Figura 1.8 – Representação sistemática do impacto com as barreiras. (Serguvia, 2012). 34

Figura 1.9 – Taxa de mortalidade por acidentes de carros, (OMS, 2013) 35

Figura 1.10 – Perfil Tipo F: (a) barreira dupla, (b) barreira simples (2015). 36

Figura 2.1 – Geometria de barreiras: (a) *F-shape*, (b) *Single Slop*, (c) GM *Shape*. 39

Figura 2.2 – Representação de equivalência de teste de impacto com pendulo (adaptado de Mitchell et. al., 2007). 41

Figura 2.3 – Carga de impacto e linhas de ruptura equivalentes para barreira de concreto. (LRFD Bridge, 2011) 42

Figura 2.4 – (a) impacto na junção, (b) impacto na parte interna da barreira. (Jeon et. al., 2011) 44

Figura 2.5 – (a) Alternativa de linha de ruptura proposta por Jeon et. al. (2011), (b) detalhe do modo de falha YL4. 45

Figura 2.6 – Geometria de barreiras: (a) Vertical, (b) Invertida, (c) Conectores testado por Dhafer et. al. (2007). 46

Figura 2.7 – modelos de outros tipos de conexão (a) SB-50 (DeltaBloc, 2014), (b) J-J Hooks (Easi-Set Industries, 2014), (c) T-LOC (Saferoads, 2009) 47

Figura 2.8 – Evolução dos modelos de veículos para análise numérica: (a) GM Saturn 1991 (Atahan, 2010 apud Wekezer et al. (1993)), (b) C-1500 pick-up truck (Atahan, 2010 apud Zaouk et al. (1996)), (c) C-1500 pickup truck (NCAC, 2002)..... 48

Figura 2.9 – Validação do modelo: (a) teste em escala real, (b) teste com modelo numérico (Marzougui et al., 1998)..... 48

Figura 2.10 – Validação do modelo: (a) teste em escala real, (b) teste com modelo numérico (Consolazio et al., 2002). 49

Figura 2.11 – Simulação de desempenho de barreiras temporárias tie-down (Reid , 2004).... 49

Figura 2.12 – Simulação de impacto avaliada por Bonin et. al. (2004)..... 50

Figura 2.13 – Modelo numérico desenvolvido por Lima (2006). 50

Figura 2.14 – Modelo numérico desenvolvido pela NTRCI (2009)..... 50

Figura 2.15 – Deflexão dinâmica (D) e largura de trabalho (W) (EN1317-2, 1998). 53

Figura 2.16 – Geometria de barreiras: (a) *Single-Slope* simples, (b) Ontário *tal wall* simples e (c) Ontário *tal wall* duplo. Fonte: NBR 14885:2016. 54

Figura 3.1 – Tipos de sistemas de contenção (adaptado da EN 1317-1(1998))..... 55

Figura 3.2 - Exemplos de barreiras rígidas: (a) *New Jersey* (Dktanks, 2014), (b) *Single Slop Barrier (Texas A&M,2014)*, (c) *F-Shape Barrier* (WSDOT, 2014) e (d) Barreira de Concreto Vertical (*Safesite Facilities*, 2014). 57

Figura 3.3 – Índices VCDI para deformação do veículo: (a) vista lateral, (b) vista traseira. .. 63

Figura 3.4 – Índices VCDI para localização da deformação do veículo: (a) todos os assentos, (b) assentos frontais e assentos traseiros, (c) assento da direita e assento da esquerda, (d) frente da direita, frente esquerda, traseira direita e traseira esquerda. 63

Figura 3.5 – Trajetória do veículo de ensaio, (Sistemas de Retenção Rodoviários, 2010)..... 66

Figura 3.6 – Dispostivos de proteção ao ocupante (Carros.ig, 2016): (a) habitáculo com barras laterais, (b) cintos de segurança, (c) *airbags*, (d) encosto da cabeça..... 67

Figura 3.7 – Comparativo entre o uso e o não uso do cinto de segurança (PHTLS, 2012): (a) Sem o uso do cinto de segurança, (b) Uso correto do cinto de segurança, (c) Uso incorreto do cinto de segurança..... 68

Figura 3.8 – Comparativo entre o uso do encosto da cabeça (PHTLS, 2012): (a) Uso correto, (b) uso incorreto..... 68

Figura 3.9 – Simulação numérica com dummy: (a) com cinto de segurança, (b) sem sinto de segurança..... 69

Figura 4.1 – (a) Conector BNJ-NY, (b) Conector BNJ-M..... 70

Figura 4.2 – (a) Barreira com conector BNJ-NY, (b) Barreira com conector BNJ-M 71

Figura 4.3 – (a) Padrão de encaixe do pino conector BNJ-NY, (b) Vista superior do conector BNJ-M..... 71

Figura 4.4 – Padrão de encaixe do conector BNJ-M 72

Figura 4.5 – Armaduras dos protótipos das barreiras: (a) representação gráfica, (b) modelos construídos. 72

Figura 4.6 – Etapas do processo de fabricação das barreiras: (a) Fôrmas, (b) teste de abatimento do concreto, (c) concretagem e (d) desforma 73

Figura 4.7 – Cenário do ensaio BNJ-NY: (a) Sistema de aquisição de dados, (b) Transdutores de deslocamento – T_1 a T_6, (c) Macaco hidráulico com célula de carga, (d) Barra de transmissão de esforços, (e) Extensômetros colados na armadura. (f) Dispositivos de engaste do protótipo, (g) pórticos de reação, (h) Laje de reação e (i) vista superior. 74

Figura 4.8 – Cenário do ensaio de um módulo BNJ-M: (a) Posicionamento dos transdutores, (b) Extensômetros e (c) vista superior. 75

Figura 4.9 – (a) Extensômetros das barras longitudinais, (b) Posicionamento da barra de reação e da célula de carga. 76

Figura 4.10 – Etapas do Ensaio BNJ-NY: (a) Primeiro Carregamento, (b) Segundo Carregamento 77

Figura 4.11 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-NY no 1.º Carregamento. 78

Figura 4.12 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-NY no 2.º Carregamento. 78

Figura 4.13 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-NY2 para o 1º carregamento. 79

Figura 4.14 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-NY2 para o 2º carregamento. 79

Figura 4.15 – Estado Final do Ensaio BNJ-NY: (a) Deslocamento máximo obtido no ensaio, (b) Dano ocasionado pelo contato entre as extremidades inferiores da barreiras, (c) e (d) Ruptura das extremidades inferiores, (e) Desprendimento do conector, (f) Ruptura das soldas dos pinos, (g), (h) e (i) fissuras ocasionadas pelo ensaio. 80

Figura 4.16 – Etapas do Ensaio BNJ-M: (a) Primeiro Carregamento, (b) Segundo Carregamento 81

Figura 4.17 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-M no 1.º Carregamento. 81

Figura 4.18 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-M no 2.º Carregamento. 82

Figura 4.19 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-M2 para o 1º carregamento. 83

Figura 4.20 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-M2 para o 2º carregamento. 83

Figura 4.21 – Danos provocados pelo ensaio estático BNJ-M: (a) vista a jusante do carregamento, (b) contato entre a BNJ-M2 e a BNJ-M1, (c) contato entre a BNJ-M2 e a BNJ-M3. 84

Figura 4.22 – Etapas do Ensaio BNJ-M Unitária. 84

Figura 4.23 – Etapas do Ensaio BNJ-NY: (a) Primeiro Carregamento, (b) Segundo Carregamento 85

Figura 4.24 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores medidas pelo extensômetros (S_1 e S_2). 85

Figura 4.25 – Condições da barreira BNJ-M2: (a) Modo de engaste da barreira, (b) Dano na parte inferior devido ao esforço no topo da barreira, (c) desprendimento do concreto na poção

superior do conector, (d) Ruptura da parte superior da barreira, (e) Vista da barreira a jusante do esforço, (f), (h) vista superior da barreira mostrando o desprendimento do concreto nas proximidades do conector, (g) e (i) fissuras ocasionadas pelo ensaio. 86

Figura 4.26 – Linhas de ruptura na barreira BNJ-NY 87

Figura 4.27 – Linhas de ruptura na barreira BNJ-NY 88

Figura 4.28 – Rompimento da parte superior próxima ao conector da barreira BNJ-M 88

Figura 5.1 – Cenário de impacto entre veículo e barreira 90

Figura 5.2 – Barreiras de contenção com material elástico linear: (a) *New Jersey* com 810 mm de altura, (b) *New Jersey* com 1400 mm de altura (c) *Single-Slope* com 1074 mm de altura, (d) barreira Plana com 1066 mm de altura. 90

Figura 5.3 – Barreiras de concreto New Jersey com 810 mm de altura: (a) Engastada com 30 m de comprimento, (b) Temporária de 2 e 6 m com conectores NY, (c) Temporária de 6 m com conectores M, (d)) Temporária com Perfil Tipo F de 2 m de comprimento e sem conectores. 91

Figura 5.4 – Tempo de processamento em função do elemento sólido 91

Figura 5.5 – Topologia das malhas utilizada nas barreiras modeladas com concreto. 92

Figura 5.6 – Topologia das malhas utilizada nas barreiras com material elástico. 92

Figura 5.7 – Elementos de Barras: (a) Para barreiras de módulo de 6,0 m, (b) Para barreiras de módulo de 2,0 m, (c) Para barreiras perfil tipo F. 93

Figura 5.8 – Elementos de Casca: (a) Conector BNJ-NY, (b) Pino de conexão do Conector BNJ-NY. 94

Figura 5.9 – Comportamento Elasto-plástico com endurecimento cinemático e isotrópico, onde l_0 e l são os comprimentos indeformados e deformados do corpo de prova sob tensão uniaxial. E_t é a inclinação da curva bilinear tensão *versus* deformação. 94

Figura 5.10 – Cartão de entrada para o material **MAT_PLASTIC_KINEMATIC*. 95

Figura 5.11 – Cartão de entrada para o material **MAT_ELASTIC*. 96

Figura 5.12 – Cartão de entrada para o material **MAT_CSCM_CONCRETE*. 97

Figura 5.13 – Cartão de entrada para o material **MAT_CSCM*. 98

Figura 5.14 – Modelo real e detalhes do modelo numérico de "*crash test*" desenvolvido pela NTRCI. 99

Figura 5.15 – (a) Localização dos acelerômetros no veículo, (b) Localização dos Centros de Gravidade (CG) do veículo e a origem do modelo em relação às coordenadas globais. 99

Figura 5.16 – Modelo de Elementos Finitos de uma Camionete Chevrolet© C2500 Pickup. 100

Figura 5.17 –Localização dos acelerômetros no veículo. 100

Figura 5.18 – Modelo de Elementos Finitos de um carro de passeio Toyota© Yaris. 101

Figura 5.19 –Localização dos acelerômetros no veículo. 101

Figura 5.20 – Modelo de Elementos Finitos de um carro de passeio GM© Corsa. 101

Figura 5.21 –Localização do acelerômetro no veículo. 102

Figura 5.22 – Etapas do algoritmo de contato do LS-DYNA. 102

Figura 5.23 – Cartão com a opção de contato entre superfícies. 103

Figura 5.24 – Contatos entre as partes do veículo e a barreira: (a) lateral da cabine, (b) pneu lateral dianteiro do cavalo mecânico, (c) pneus laterais traseiros do cavalo mecânico, (d) baú, (e) pneus laterais traseiros do baú, (f) aros laterais dos pneus traseiros do baú. 104

Figura 5.25 – Contatos entre as partes do veículo e a barreira: (a) pneu lateral dianteiro, (c) pneus lateral traseiro. 104

Figura 5.26 – Contato do veículo com a barreira. 105

Figura 5.27 – Contato do veículo com a barreira. 105

Figura 6.1 – Plano de simulações numéricas..... 106

Figura 6.2 – Ambiente de simulação LS-PrePost/LS-DYNA de uma simulação de impacto: veículo TB11 *versus* barreira *New Jersey* 810 mm. 107

Figura 6.3 – Virtualização da simulação de impacto veículo TB11 *versus* barreira *New Jersey* 810 mm: (a) vista superior, (b) a (g) vista lateral. 108

Figura 6.4 – Deslocamento do veículo: (a) direção longitudinal, (b) direção transversal, (c) direção de elevação e (d) deslocamento total. 109

Figura 6.5 – Velocidade do veículo após o impacto: (a) velocidade longitudinal, (b) velocidade transversal, (c) velocidade horizontal e (d) velocidade total. 110

Figura 6.6 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI..... 111

Figura 6.7 – Deformação plástica da barreira ocasionada pelo impacto do veículo: (a) ponto de máxima força de contato, (b) após o impacto e (c) inicio do contato entre veículo e barreira, (d) Força axial da armadura da barreira oriunda do impacto do veículo. 112

Figura 6.8 – Força Resultante de contato entre a barreira e o veículo. 113

Figura 6.9 – Deformações sofridas pelo veículo, na coluna esquerda está o veículo sem deformações e na direita as deformações sofrida pelo veículo após o impacto. 113

Figura 6.10 – Ambiente de simulação LS-PrePost/LS-DYNA de uma simulação de impacto: veículo 1100C *versus* barreira *New Jersey* 810 mm. 114

Figura 6.11 – Virtualização da simulação de impacto veículo 1100C *versus* barreira *New Jersey* 810 mm: (a) vista superior, (b) a (g) vista lateral..... 115

Figura 6.12 – Deslocamento do veículo: (a) direção longitudinal, (b) direção transversal, (c) direção de elevação e (d) deslocamento total. 116

Figura 6.13 – Velocidade do veículo após o impacto: (a) velocidade longitudinal, (b) velocidade transversal, (c) velocidade horizontal e (d) velocidade total. 117

Figura 6.14 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI. 118

Figura 6.15 – Deformação plástica da barreira ocasionada pelo impacto do veículo: (a) ponto de máxima força de contato, (b) após o impacto e (c) inicio do contato entre veículo e barreira, (d) Força axial da armadura da barreira oriunda do impacto do veículo. 119

Figura 6.16 – Força Resultante de contato entre a barreira e o veículo. 119

Figura 6.17 – Deformações sofridas pelo veículo, na coluna esquerda está o veículo sem deformações e na direita as deformações sofrida pelo veículo após o impacto. 120

Figura 6.18 – Ambiente de Simulação Veículo P2000 x BNJ-NY: (a) Ponto de impacto P_1, (b) Ponto de impacto P_2. 122

Figura 6.19 – Velocidade do veículo após o impacto: (a) velocidade longitudinal, (b) velocidade transversal, (c) velocidade horizontal e (d) velocidade resultante. 123

Figura 6.20 – Deslocamento do veículo após o impacto: (a) Deslocamento Longitudinal, (b) Deslocamento Transversal. 124

Figura 6.21 – Redirecionamento do Veículo: (a) Ponto de impacto P_1, (b) Ponto de impacto P_2. 124

Figura 6.22 – Pino do conector arrancado pela contato entre veículo e barreira. 125

Figura 6.23 – Deslocamento vertical do CG do veículo. 126

Figura 6.24 – Vista direita dos deslocamentos do veículo após o impacto, na primeira linha de cada quadro para o impacto no ponto P_1 e na segunda linha para ponto P_2. 127

Figura 6.25 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI. 128

Figura 6.26 – Força de Contato entre o carro e a barreira. 129

Figura 6.27 – Deformações e danos sofridos pela barreira após o impacto: coluna à direita para o impacto no ponto P_1 e à esquerda no ponto P_2. 130

Figura 6.28 – Forças de contato entre o Pino 6 e os conectores das barreiras 5 e 6. 130

Figura 6.29 – Forças axiais nas barras devido ao impacto: (a) Para o ponto de impacto em P_1 e (b) para o ponto de impacto em P_2. 131

Figura 6.30 – Deformações sofridas pelo veículo, na coluna esquerda está o veículo impactado no ponto P_1 e à direita no ponto P_2, na primeira e terceira linha o veículo sem deformações e na segunda e quarta as deformações sofrida pelo veículo após o impacto. ... 132

Figura 6.31 – Detalhes de componentes de teste de impacto: (a) pino de ancoragem da barreira, (b) veículo de testes 2270P usado no impacto real. 133

Figura 6.32 – Comparação teste de impacto real *versus* simulação: (a) impacto do veículo na barreira, (b) dano na barreira, (c) dano no veículo e (d) aceleração longitudinal do CG do veículo. 134

Figura 6.33 – Simulação utilizando dois sistemas de barreiras temporárias: (a) Barreiras Tipo F 810 mm sem engaste e sem conexão entre as mesmas, (b) Barreiras BNJ-NY 810 mm. .. 135

Figura 6.34 – Redirecionamento do Veículo: (a) Sistema Tipo F, (b) Sistema BNJ-NY..... 136

Figura 6.35 – Deslocamento do veículo após o impacto: (a) Deslocamento Longitudinal, (b) Deslocamento Transversal. 137

Figura 6.36 – Deslocamentos transversal: (a) Barreiras Sistema Tipo F, (b) Barreiras Sistema BNJ-NY. 137

Figura 6.37 – Deslocamento vertical do CG do veículo. 138

Figura 6.38 – Vista direita dos deslocamentos do veículo após o impacto, na primeira linha de cada quadro para o impacto no sistema Tipo F e na segunda no sistema BNJ-NY. 139

Figura 6.39 – ASI do veículo para os dois sistemas. 139

Figura 6.40 – Dano oriundo do impacto: (a) Sistema Tipo F, (b) Sistema BNJ-NY. 140

Figura 6.41 – Deformações sofridas pelo veículo: na coluna esquerda está o veículo impactado no sistema e à BNJ-NY direita no sistema Tipo F. 141

Figura 6.42 – Ambiente de simulação LS-PrePost/LS-DYNA de um veículo 36000V *versus* barreira *Single Slope*. 142

Figura 6.43 – Resultado do redirecionamento do veículo para cada geometria (vista superior/vista lateral): (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm. 144

Figura 6.44 – Registro de maior elevação do veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm. 144

Figura 6.45 – Deslocamentos do veículo: (a)Longitudinal, (b)Transversal, (c)Vertical e (d) Total. 145

Figura 6.46 – Velocidade do veículo para cada geometria após o impacto: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm. 146

Figura 6.47 – Desaceleração Longitudinal do Veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm. 147

Figura 6.48 – Aceleração Transversal do Veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm. 148

Figura 6.49 – Aceleração vertical do veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm. 148

Figura 6.50 – Comparação entre os ASI's máximo das geometrias 149

Figura 6.51 – Forças de contato entre o veículo e a barreira: (a) Entre a cabine e a barreira, (b)Entre o baú do veículo e a barreira, (c)Entre o veículo completo e a barreira. 150

Figura 6.52 – Redirecionamento do Veículo: (a) Ponto de impacto P_1, (b) Ponto de impacto P_2. 150

Figura 6.53 – Comparação do redirecionamento do veículo entre os modelos elástico e concreto: (a) Vista superior, (b) Vista lateral. 151

Figura 6.54 – Velocidade do veículo: (a)Longitudinal, (b)Transversal, (c)Vertical e (d) Resultante. 152

Figura 6.55 – Deslocamentos do veículo: (a)Longitudinal, (b)Transversal, (c)Vertical e (d) Total. 152

Figura 6.56 – Comparação do deslocamento longitudinal entre os materais elástico e concreto. 153

Figura 6.57 – Comparação dos materais concreto e elástico: (a) concreto com dano, (b) elástico sem dano. 155

Figura 6.58 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI. 154

Figura A.1 – (a) (Mills & Zimmerman, 1970, apud Murray, 2007), (b) Exemplo de concreto plotado em um plano desviador (Launay & Ganchon, 1972, apud Murray, 2007) 173

Figura A.2 – Representação gráfica das superfícies de falhas do plano desviador para o modelo *MAT_159 do LS-DYNA (Murray, 2007) 173

Figura A.3 – (a)Resposta do Amolecimento do Concreto em Compressão Uniaxial (CEB-FIP, 1993); (b)Resposta da Variação do Amolecimento do Concreto com Confinamento (Joy & Moxley, 1993 , apud Murray, 2007). 174

Figura A.4 – Perda de rigidez do concreto através de ciclos de carga e descarga (Reinhardt, 1984). 174

Figura A.5 – Velocidade de deformação para diferentes casos de carregamentos, adaptado de Bischoff (1991) e Crespo (2011). 175

Figura A.6 – (a)Relação entre a velocidade de deformação e a resistência à compressão, (b) o mesmo gráfico com as recomendações da CEB, adaptado de Bischoff(1991). 176

Figura A.7 – Superfície de Escoamento adaptado de Murray(2007): (a) Vista tridimensional da superfície de plastificação no eixo das tensões principais, (b) Forma geral da superfície de escoamento do concreto em duas dimensões no plano meridional. 176

Figura A.8 – Fluxograma de cálculo do tensor de tensões..... 177

Figura A.9 – Curva da pressão-deformação volumétrica para uma compressão isótropa para os parâmetros W, D_1, e D_2 (adaptado de Murray, 2007). 179

Figura A.10 – Vista de uma superfície de escoamento no plano desviador e comparado com o círculo obtido em um modelo baseado em duas invariantes (Murray, 2007). 180

Figura A.11 – Gráfico da Perda de resistência e o módulo de elasticidade com o fator de dano (Murray, 2007)..... 181

Figura A.12 –Adaptado de Zadeh (2011): (a)Modelo cilíndrico CSCM_CONCRETE com as condições de contorno, (b) Resultado Tensão x Deformação cilindro (101,60 x 203,20 mm), (c) Resultado Tensão x Deformação cilindro (203,20 x 406,40 mm), (c) Resultado Tensão x Deformação cilindro (406,40 x 812,80 mm). 189

Figura A.13 –Fator de incremento dinâmico em relação à velocidade de carregamento do modelo de um concreto padrão..... 195

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Condições das defensas em curvas perigosas, CNT (2015). 33

Tabela 2.1 – Sumário de estudos realizados com dimensões de barreiras de concreto, Zain & Mohammed (2015). 40

Tabela 2.2 – Ábaco para a determinação dos parâmetros de Hirsch (1978). 43

Tabela 3.1 – Exemplos de barreiras flexíveis 56

Tabela 3.2 – Exemplos de barreiras semirrígidos 57

Tabela 3.3 – Critério de Ensaio de colisão de veículos adaptado da EN 1371 (2008). 58

Tabela 3.4 – Níveis de Contenção adaptado da EN 1371. 58

Tabela 3.5 – Níveis de Contenção adaptado do NCHRP Report 350 e MASH. 59

Tabela 3.6 – Comparativo dos níveis de contenção adaptado da NBR 15486 (Tabela A.4). .. 60

Tabela 3.7 – Diretrizes de Avaliação de Segurança (adaptação Tabela 5-1 do MASH) 60

Tabela 3.8 – Níveis de gravidade de colisão de acordo com a EN 1317 63

Tabela 3.9 – Diretrizes de Avaliação de Segurança (adaptação Tabela 5-1 do MASH) 64

Tabela 3.10 – Distância para o critério de caixa de saída de acordo com a EN 1317-2 (2000) 66

Tabela 6.1 – Parâmetros de Entrada para o material das barreiras e suas condições de contorno 107

Tabela 6.2 – Parâmetros de Entrada para o material das barreiras e suas condições de contorno 142

Tabela 6.3 – Quadro de Simulações para análise do desempenho da geometria das barreiras 142

Tabela A-1 – Coeficientes para o ajuste da superfície de ruptura ao cisalhamento em função da resistência à compressão simples, Crespo (2011). 178

Tabela A-2 – Parâmetros de entrada para calibração *MAT_159 192

Tabela A-3 – Valores padrões para o módulo de Bulk e módulo de cisalhamentos derivados do módulo de elasticidade através das equações relacionadas no CEB – Murray (2007). 193

Tabela A-4 – Valores padrões para o módulo de Bulk e módulo de cisalhamentos derivados do módulo de elasticidade através das equações relacionadas no ACI – Murray (2007). 194

Tabela A-5 – Sistemas de unidades *MAT_159_Concrete 194

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O *Roadside Design Guide* (2011) da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) afirma que os conceitos de projeto de rodovias e de segurança são relativamente recentes. A maior parte dos fundamentos do projeto dos componentes de rodovias foi estabelecida após 1940, entretanto os aspectos de segurança não eram muito discutidos antes da década de 60, após esse período esse aspecto começou a ser incorporado e regulamentado nos projetos das rodovias americanas.

Segundo o relatório *National Cooperative Highway Research Program* – NCHRP denominado *Synthesis 244: Guardrail and Median Barrier Crashworthiness* (1997), embora não se tenha certeza quando ou onde foram utilizadas as primeiras barreiras medianas de concreto, os primeiros registros são de meados dos anos 40 em US-99 na descida das Montanhas Tehachapi no vale central sul de Bakersfield, Califórnia. Esta primeira geração de barreiras de concreto foi desenvolvida para minimizar o número de acidentes com caminhões desgovernados, ficando conhecida como barreiras Califórnia.

As barreiras New Jersey (*Jersey Barrier*) foram desenvolvidas pelo Instituto Stevens de Tecnologia, na cidade Hoboken, estado de New Jersey, Estados Unidos, motivo pelo qual levou o nome. As primeiras foram instaladas em 1955 e tinham apenas 46 cm de altura, possuindo a aparência de um muro baixo com um meio-fio de cada lado.

Essas primeiras barreiras não foram desenvolvidas com o uso de testes de impacto. Com a observação de problemas operacionais, sua forma foi sendo alterada até a forma como hoje é conhecida, conforme mostrado na Figura 1.1. Tanto o modelo New Jersey quanto o Califórnia continuaram em experimentação até o início de 1960, até que a barreira New Jersey foi amplamente adotada pela Califórnia, e o seu uso se expandiu desde então para diversas partes do mundo.

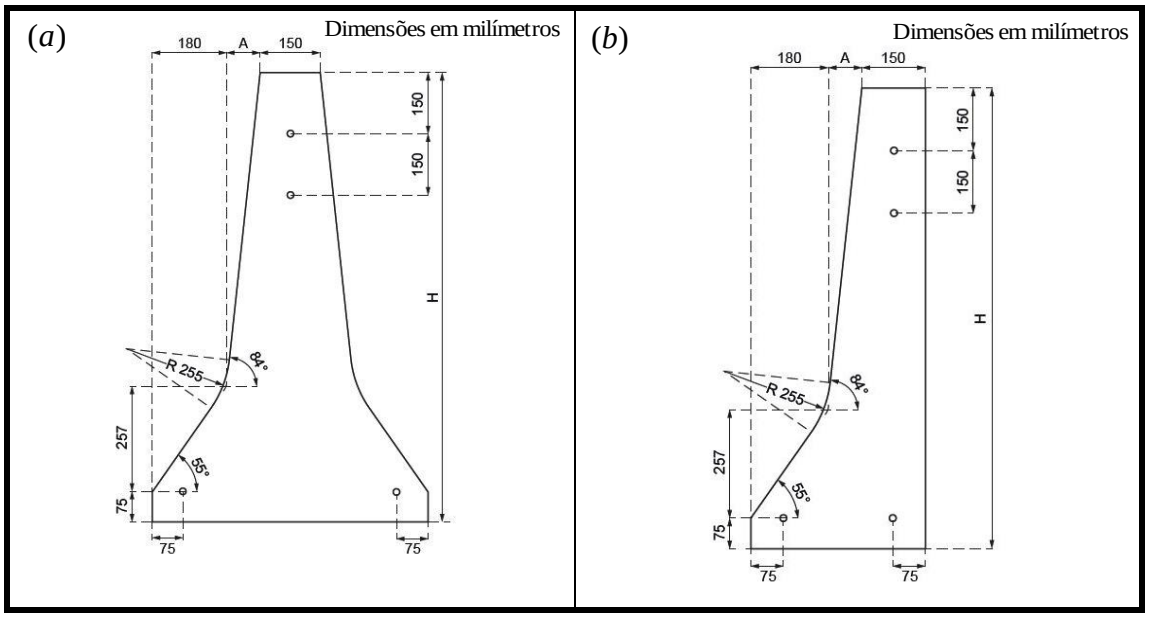


Figura 1.1 – Geometria de uma barreira New Jersey: (a) barreira dupla, (b) barreira simples

O uso das barreiras New Jersey se consagrou pelo fato dela apresentar as seguintes virtudes:

a) A barreira promove a desaceleração do veículo que com ela colide através do atrito exercido pela parte vertical correspondente ao meio-fio e devido ao movimento de subida da roda pela parte inclinada.

b) O ângulo de restituição do veículo à pista possui certa proporção ao ângulo formado entre o veículo e a barreira no momento da colisão, o que implica em uma menor probabilidade de choque com outro veículo para pequenos ângulos.

c) É pequena a probabilidade de um veículo passar por cima da barreira.

d) Quase não há danos à barreira em virtude dos choques habituais, exigindo pouca ou nenhuma manutenção.

e) Os danos ao veículo são, na maior parte dos casos, menores do que os causados pelas defensas metálicas.

A segurança de tráfego depende não apenas das características das vias de tráfego, mas também da zona adjacente às vias na qual o motorista que, eventualmente, tenha perdido o controle da direção possa recuperá-lo e evitar uma colisão fatal com algum objeto. No entanto, segundo a AASHTO (2011), este aspecto passou a ser efetivamente incorporado no projeto de rodovias nos Estados Unidos apenas a partir da década de 70.

A melhoria da segurança nas vias de tráfego traz resultados significativos com relação ao número de acidentes fatais. A partir de dados obtidos da *National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA* (2014) é possível verificar a evolução do número da frota e a redução

da taxa de fatalidade (número de óbitos por número da frota) nos últimos 21 anos nos Estados Unidos. Mesmo com o aumento da frota o número de vítimas fatais reduziu de 2,31 para 1,28 (por 100 mil habitantes), conforme mostrado na Figura 1.2.

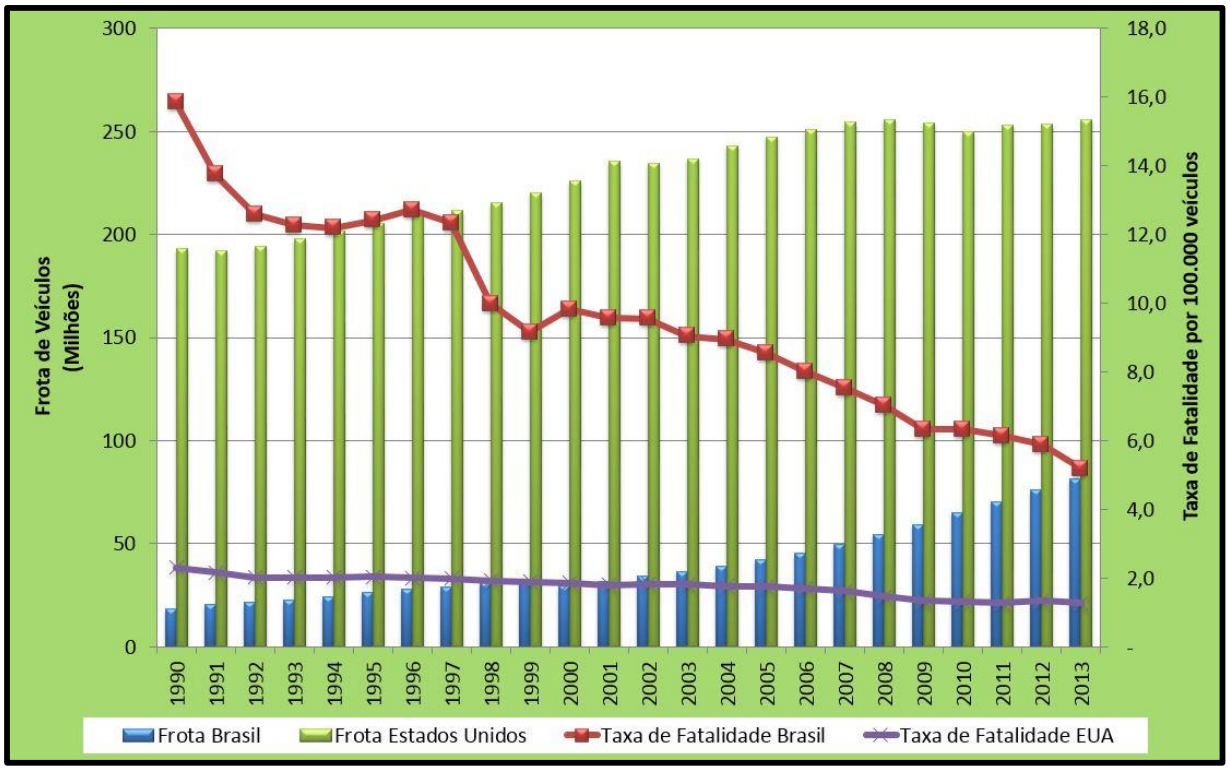


Figura 1.2 - Comparação entre a Frota de Veículos Americanos x Veículos Brasileiros com suas respectivas taxas de fatalidade por 100 mil veículos

Para efeitos comparativos, foi apresentado no mesmo gráfico da Figura 1.3 os dados de acidentes de trânsito e evolução da frota de veículos no Brasil no mesmo período, obtidos da base de dados do Departamento Nacional de Transito - DENATRAN (2013). Verifica-se no início da década de noventa uma taxa de fatalidade 15,85 que corresponde a 686% a mais que a americana que possuía uma frota 1057% maior no mesmo período, com o aumento da frota brasileira houve um decréscimo desse índice, entretanto, no ano de 2011 esse índice ainda foi de 480% maior com uma frota 359% menor que a americana.

Ainda de acordo com a AASHTO (2011), as razões para esta redução são melhorias na segurança dos veículos e no projeto das rodovias, tanto com relação ao traçado quanto à segurança lateral às vias, e no comportamento dos motoristas.

No entanto, ainda hoje acidentes laterais às vias de tráfego ainda representam boa parte das fatalidades. Em 2008, 23,1% dos acidentes fatais ocorreram com veículos isolados que perderam a direção e saíram das vias de tráfego. Logo, a conclusão é que a segurança lateral às vias tem grande influência na redução do número de acidentes fatais (AASHTO, 2011).

Quase a totalidade dos acidentes de colisão de veículos com objetos laterais às vias envolve apenas um veículo. A Figura 1.3 mostra a distribuição de mortes em colisões por tipo de objetos laterais fixos. Árvores são os objetos com maior porcentagem de colisões fatais (48%), seguidos de postes de serviço (12%) e barreiras de segurança (8%).

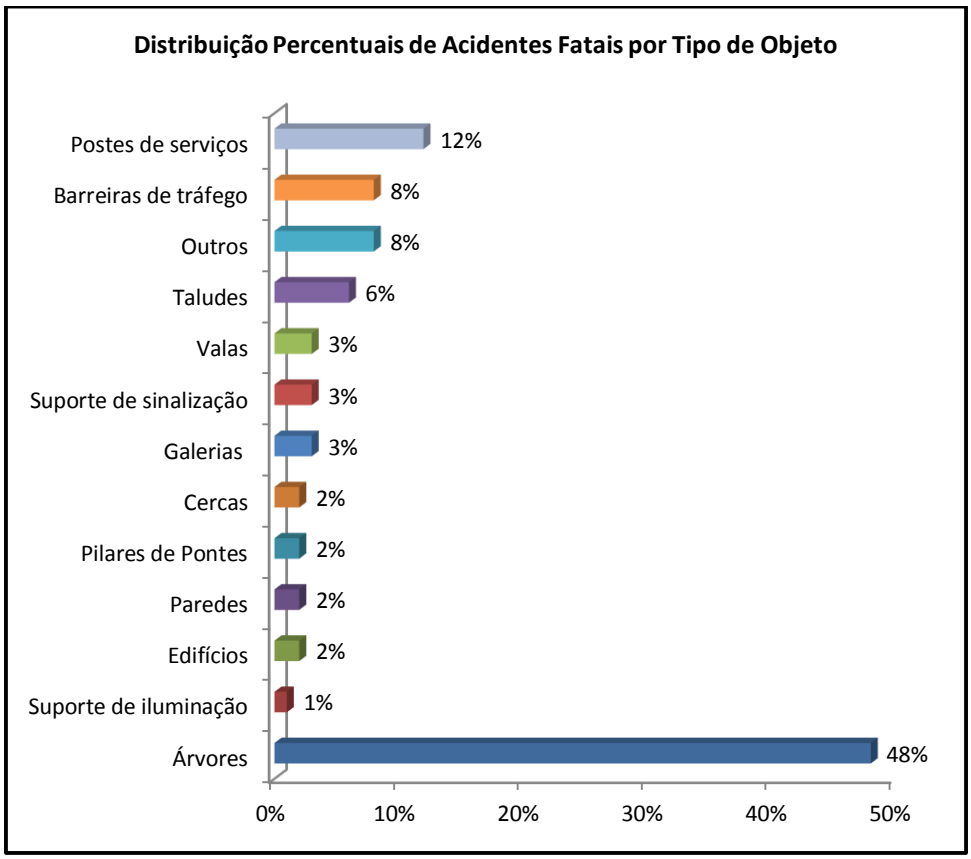


Figura 1.3 - Distribuição percentual de acidentes fatais por tipo de objeto - AASHTO (2011)

Segundo a AASHTO (2011), as razões principais para um veículo perder a direção e sair das vias de tráfego são fadiga, distração ou falta de atenção do motorista, velocidade excessiva, direção sob influência de álcool ou drogas, manobra para evitar uma colisão na via, condições adversas na via, como gelo, neve ou chuva, falha de algum componente do veículo e pouca visibilidade. Em qualquer caso, um ambiente lateral às vias livre de objetos e com poucas declividades permite ao motorista retomar o controle do veículo e reduzir a gravidade da colisão.

Na existência de algum obstáculo que possa sofrer a colisão de veículos, as medidas corretivas recomendadas pela AASHTO (2011) são as seguintes: remoção do obstáculo; modificações no obstáculo para que o mesmo possa ser atravessado pelo veículo sem que ocorra o impacto; movimentação do obstáculo para um ponto no qual ele tenha menor probabilidade de ser atingido; reduzir a severidade do impacto utilizando algum dispositivo que se fragmente

com o impacto e proteção do obstáculo com uma barreira de segurança de tráfego longitudinal, projetada para redirecionar o veículo.

1.1. Panorama de Utilização das Barreiras nas Rodovias Brasileiras

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o Brasil é o quinto maior país do mundo em extensão territorial com uma área de 8.547.403 km², onde o principal meio de transporte é por via terrestre, respondendo por 60% do transporte de pessoas e cargas. Segundo a Agência Nacional de Transporte Terrestre - ANTT (2012) a malha rodoviária do País é de aproximadamente 1,72 milhões de quilômetros, sendo que pouco mais de 213 mil encontram-se asfaltados. Na Figura 1.4, obtida da Pesquisa CNT de 2015, mostra o atual cenário das condições das rodovias brasileiras.

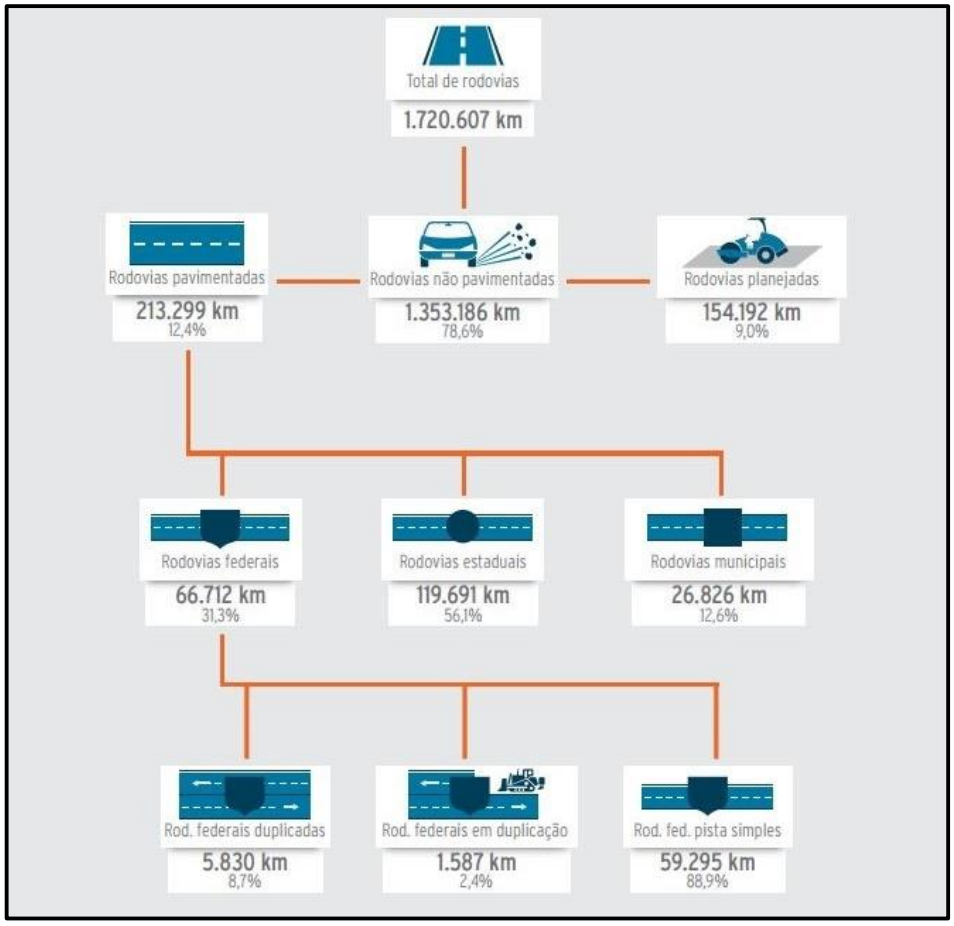


Figura 1.4 – Condições das rodovias brasileiras em 2015 – CNT (2015).

Em comparação entre os seis maiores países em extensão territorial, o Brasil ocupa a última posição quando se compara a densidade da malha rodoviária pavimentada (ver Figura

1.5), sem levar em consideração o tamanho da população, o que o deixaria ainda em pior condição.

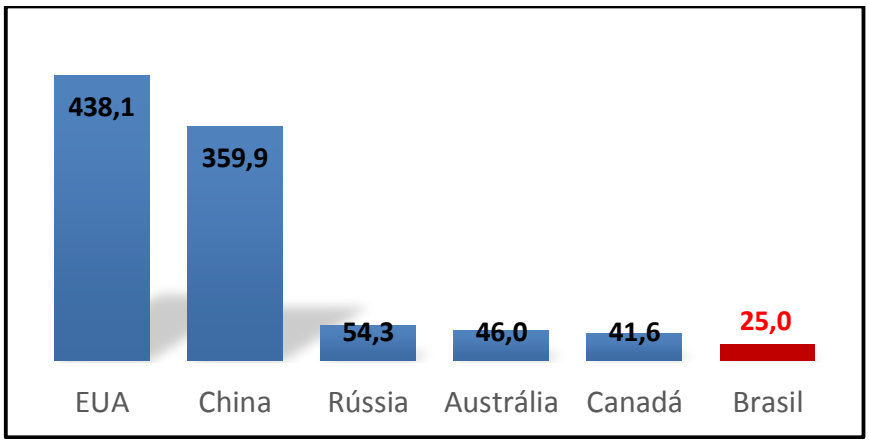


Figura 1.5 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país – CNT (2015).

Apesar das transformações ocorridas nos projetos das estradas brasileiras em favor da segurança, muito ainda precisa ser feito para que os níveis de segurança possam atingir um patamar considerado satisfatório, de acordo com os níveis internacionais.

As defensas e barreiras, adotadas como dispositivos para o aumento da segurança nas estradas brasileiras são abordados pelo Código de Transito Brasileiro - CTB (2008) como dispositivos auxiliares de proteção contínua. São descritas no Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) como estruturas rígidas e indeformáveis (no caso das barreiras) ou não rígidas (no caso das defensas), que são dispostas longitudinalmente à pista. Sua função é impedir que veículos desgovernados saiam da plataforma, se choquem com objetos ou obstáculos fixos ou invadam outras pistas adjacentes, podendo ainda reorientar o veículo para a sua trajetória correta com o mínimo possível de danos aos ocupantes dos veículos.

A Confederação Nacional de Transportes - CNT (2013), em seu relatório anual sobre as rodovias brasileiras, revela que em 45,1% (45.446 km) dos 87.328 km de extensão das rodovias pesquisadas, não possuíam os dispositivos necessários de proteção contínua e 21,6% (18.862,85 km) estavam presentes em partes do percurso apenas.

De acordo com a solicitação ao sistema de acesso a informação SIC/DNIT (2013) ainda não existe uma estatística de acidentes por tipo de objeto fixo na estrada, que possibilitaria dar a dimensão quantitativa de acidentes envolvendo dispositivos de contenção, bem como qualitativamente em referência a sua eficiência.

Apesar de não haver estatísticas oficiais com dispositivos de contenção, uma rápida procura nos sistemas de buscas da internet revela valores expressivos envolvendo tanto

barreiras de concreto, quanto defensas metálicas, como pode ser visto na Figura 1.6 ilustrando alguns dos intermináveis acidentes encontrados na pesquisa, muitos dos quais podem ser facilmente verificado que seu agravamento se deu ou pela instalação inadequada do dispositivo, ou por estarem obsoletos, ou ainda por estarem em situação precária, evidenciado a falta de manutenção.

Na Figura 1.6(a) e Figura 1.6(e) o acidente é agravado quando o veículo colide com a barreira, que é inapropriada para esse tipo de veículo. Na Figura 1.6(b) onde tem uma barreira Tipo F, deveria ter uma barreira dupla e sem meio fio de forma a fazer a correta orientação do veículo. Nas Figuras (c), (d) e (g) mostram acidentes gravíssimos devido à má instalação/manutenção e em alguns casos modelos obsoletos de defensas metálicas. Na Figura 1.6(f) um caso comum de atropelamento de um trabalhador de pavimentação por falta de um sistema de contenção temporário e Figura 1.6(h) um acidente de impacto de moto com a defensa metálica

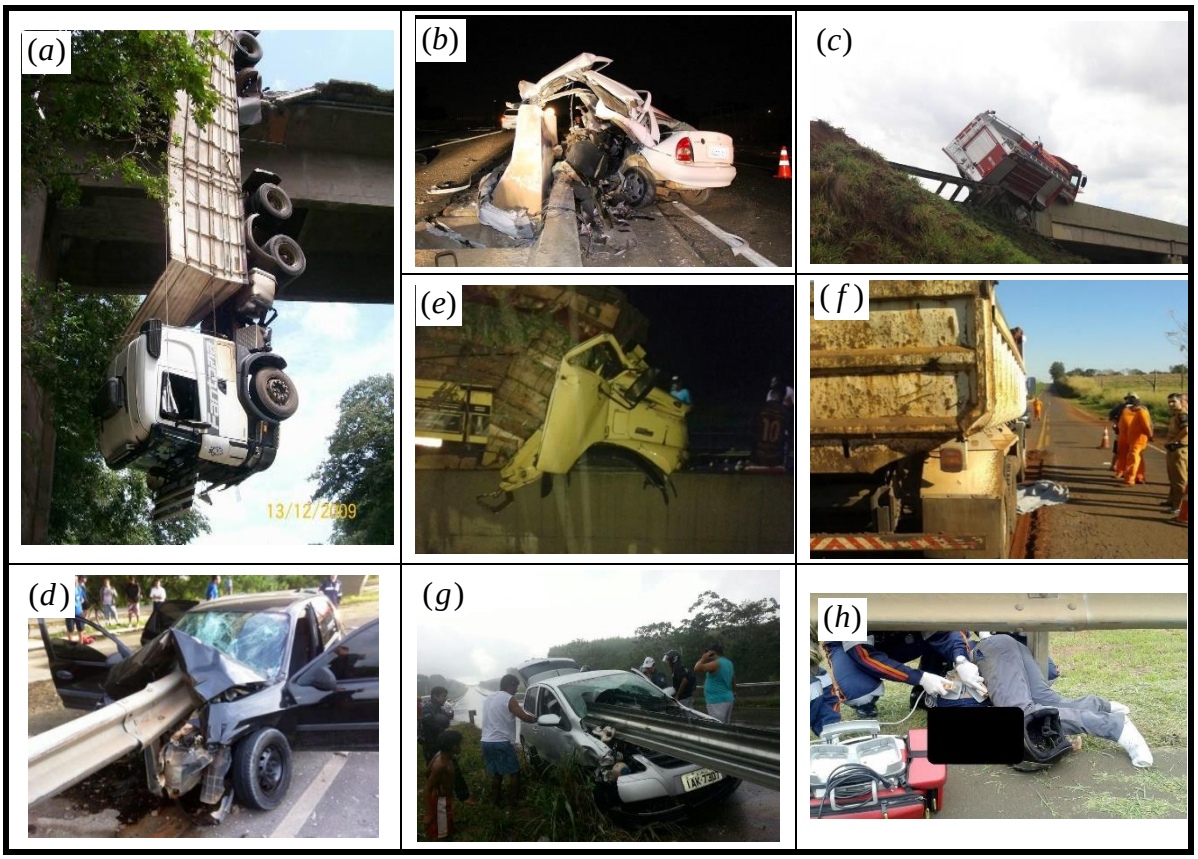


Figura 1.6 – Acidentes envolvendo dispositivos de contenção: (a) Acidente com barreira de uma ponte no interior do Maranhão (cedida ao autor por locais), (b) Motorista morre após bater carro em mureta (CAMERA REC, 2014) e (c) Acidente na SP-310 em São Carlos (G1, 2015); (d) Acidente na SC-401 mata duas mulheres (NDOLINE, 2016), (e) Homem morre após caminhão colidir em mureta (O Diário, 2016), (f) Morte de operário por falta de barreira temporária (CAMERA REC, 2013), (g) Carro colide em defensa metálica na BR 101 e passageira morre em SE (G1, 2014), (h) Motociclista morre em acidente na Washington Luís em São Carlos (REGIÃO EM DESTAQUE, 2015) .

A falta de rigor na produção e implantação das barreiras de concreto no Brasil, com deficientes descontinuidades, além de não cumprirem sua função como dispositivo de segurança, acaba por se tornar uma armadilha perigosa para os condutores de veículos, o que é mostrado na Figura 1.7.

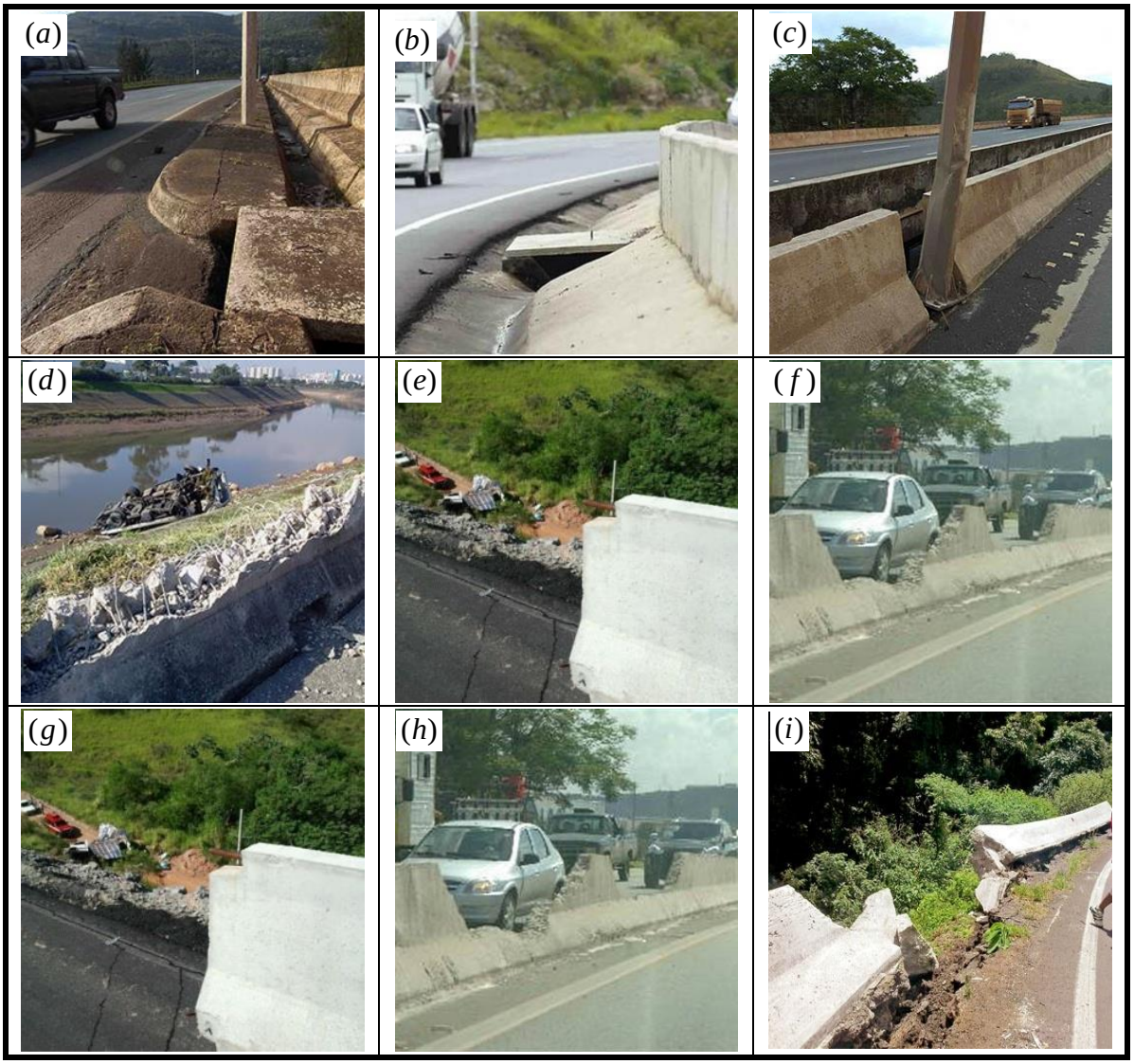


Figura 1.7 – Instalações inapropriadas que podem causar acidentes: (a), (b) obstáculos impedindo o funcionamento das barreiras e (c) ausência de sistema de transição (Vrum, 2014); (d) forma irregular da barreira agravando o acidente (Viacertanatal, 2012); (e) resistência estrutural inadequada da barreira (Band News FM, 2014); (f) ausência de barreira causando acidente (Portal G1, 2014); (g); (h) instalação inadequada e falta de manutenção (Vias Seguras, 2013) e (i) fixação ineficiente da barreira (L'attualitá, 2016).

Uma grande quantidade de acidentes poderia ser evitada ou minimizada todos os anos, caso houvesse uma melhoria significativa nas condições das rodovias, com melhoria de sinalização e implantação de dispositivos de proteção. Acidentes por ausência de dispositivos de contenção é bastante comum no Brasil e na maioria das vezes, não há um reconhecimento que o acidente poderia ter sido evitado se no local houvesse um dispositivo de proteção

apropriado, onde a culpa é geralmente atribuída apenas ao condutor e/ou condições do veículo. Na Tabela 1.1, é mostrado um quantitativo e ausência e presença em curva que necessitam de dispositivos de contenção.

Tabela 1.1 – Condições das defensas em curvas perigosas, CNT (2015).

Condições de curvas perigosas	Gestão Concedida		Gestão Pública	
	Km	%	Km	%
Com curvas perigosas com placas legíveis e defensas completas	2.634	41,5	2.690	9,4
Com curvas perigosas com placas legíveis e sem defensas completas	1.815	28,6	10.040	35,1
Com curvas perigosas sem placa e com defensas metálicas	595	9,4	2.467	8,6
Com curvas perigosas sem placa e sem defensas metálicas	1.297	20,5	13.414	46,9
Total	6.341	100,0	26.611	100,0

1.2. Barreiras Pré-fabricadas de Concreto Armado

As barreiras pré-fabricadas surgiram como uma solução para obtenção desse dispositivo em escala industrial, de forma contínua que não dependesse de condições climáticas, que interferem na cura do concreto, e que pudesse passar por um controle de qualidade.

Em termos comparativos entre barreiras pré-fabricadas, barreiras moldadas in loco e outros sistemas de contenção, as pré-fabricadas levam significativa vantagem em termos operacionais, tais como: o tempo de permanência de operários na rodovia para instalação é limitado, com isso diminui o tempo de paralisação do tráfego; diminui a possibilidade de acidentes com operários trabalhando na pista; o tempo de montagem é muito vantajoso em relação ao sistema convencional: uma equipe de seis pessoas com um caminhão-munck consegue montar 600 m de barreira em um turno de 8 horas (Figura 1.8) e em casos de danos causados por batidas, a substituição é imediata.

Figura 1.8 – Processo de montagem de barreiras pré-fabricadas de concreto. (Serguvia, 2012).

Outra vantagem das barreiras pré-fabricadas é que elas podem ser utilizadas para desvio e canteiros de obras, com nível de segurança com as mesmas condições da situação padrão e podem ser removidas sempre que necessário: remoção para recapeamento ou reaproveitamento em outro local, oriundos de expansão ou reconfiguração da pista.

Nesse modelo estrutural os vínculos desempenham um importante papel, uma vez que são responsáveis pela solidarização das peças, pela estabilidade do conjunto e ainda podem ser utilizados como dispositivos de absorção de impacto. Existem muitos modelos desses vínculos, como pode ser visto na Figura 1.9, com diferentes níveis de eficiência, o que tem gerado muitas pesquisas a respeito. Atualmente, esses vínculos têm se tornado cada vez mais eficiente, uma vez que não se limitam apenas a fazer a solidarização das peças, mas, principalmente, servir de dispositivos de amortecimento.

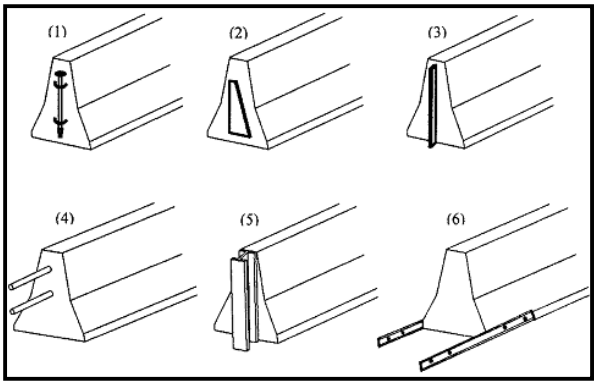


Figura 1.9 – Modelos de vínculos: (1) Pino com alça, (2) Conector macho/fêmea (3) Inserto com chapa (4) Tarugo duplo, (5) Perfil I e (6) Junta de emenda - Atahan (2006).

A solidarização das peças através de vínculos torna o sistema semi-flexível, o que possibilita melhor absorção da energia cinética do veículo e melhora a condição de redirecionamento do mesmo, vide Figura 1.10.

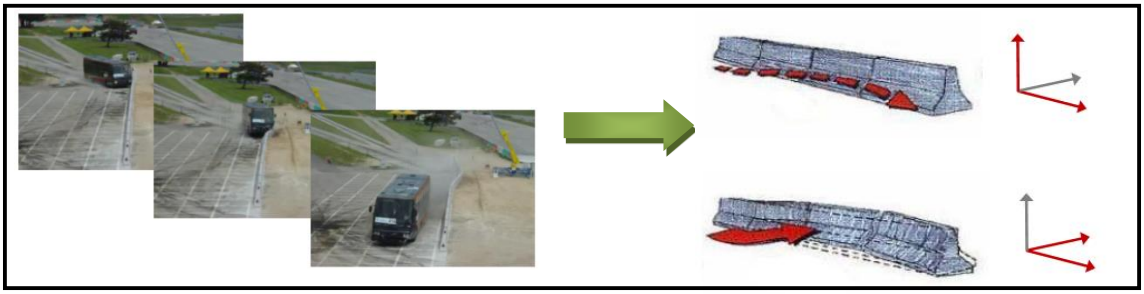


Figura 1.10 – Representação sistemática do impacto com as barreiras. (Serguvia, 2012).

Todavia, se comparadas aos demais sistemas construtivos, as barreiras pré-fabricadas apresentam a desvantagem do maior custo e da necessidade de transporte. Entretanto, se forem

levados em conta benefícios como a segurança, a durabilidade e a facilidade de reutilização, esse sistema se torna bem mais interessante que os demais.

1.3. Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é estudar a eficiência estrutural de barreiras de concreto armado (permanentes e pré-fabricadas), por meio de análises numéricas e experimentais.

Para atingir este objetivo, de acordo com a metodologia de pesquisa adotada, foram estabelecidas algumas metas específicas, sendo elas: efetuar ensaios experimentais para averiguar o comportamento das conexões entre as barreiras, avaliando sua resistência e forma de ruptura e comparar os valores obtidos com os valores mínimos correspondentes à resistência de impacto prevista em normas; obter as informações necessárias para a calibração dos softwares de análise estrutural; estudar a geometria da barreira como fator preponderante de desempenho da mesma, utilizando simulação numérica através de pacotes de elementos finitos.

1.4. Justificativa

Estudos sobre o impacto de veículos em estruturas civis, bem como sobre a eficiência das barreiras de concreto em garantir a segurança nas rodovias, ainda são incipientes no Brasil. A maior parte da bibliografia que aborda esses temas é oriunda de países que há muitos anos já mantêm pesquisas sobre o assunto.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde – OMS (2013), o Brasil é 56º país com maior número de acidentes de carros com vítimas fatais no mundo, com uma média de 23,4 para cada 100 mil habitantes (Figura 1.11), o que o coloca na primeira posição no continente americano.

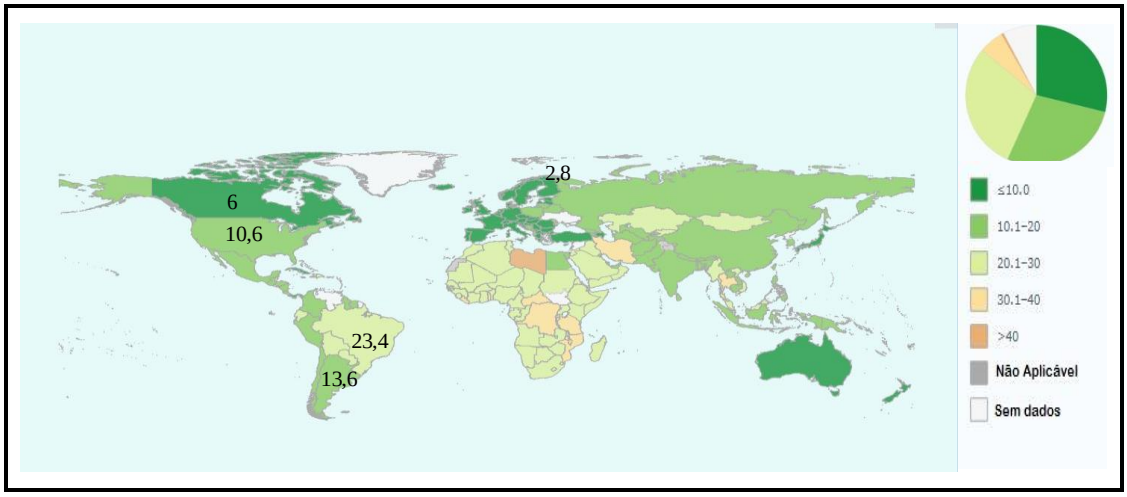


Figura 1.11 – Taxa de mortalidade por acidentes de carros, (OMS, 2013)

A falta de investimentos em infraestrutura rodoviária não é apenas um fator de entrave para o desenvolvimento econômico do país, ela reflete diretamente no aumento das estatísticas de acidentes. As políticas de prevenção de acidentes de trânsito são insuficientes e ineficazes, muitas estão focadas apenas em arrecadações com multas, sem o devido investimento em educação de trânsito e melhorias das vias.

O projeto de barreiras de contenção é um processo dinâmico que necessita de muitas pesquisas, uma vez que as vias estão em constantes mudanças. Todos os anos são lançados no mercado uma grande variedade de modelos de veículos, com diferentes características de desempenho e geometrias, e projetos de barreiras podem ser eficientes apenas por determinado período ou tipo de rodovia.

Atualmente no Brasil, com a nova publicação da NBR 15486 de março de 2016, outros modelos começam a ser aceitos no Brasil, antes apenas os modelos New Jersey (Figura 1.12(a)) e Tipo F (Figura 1.12(b)) eram adotados e não existia um critério de certificação e validação desses modelos, um cenário que mudou com a publicação da NBR 15486.

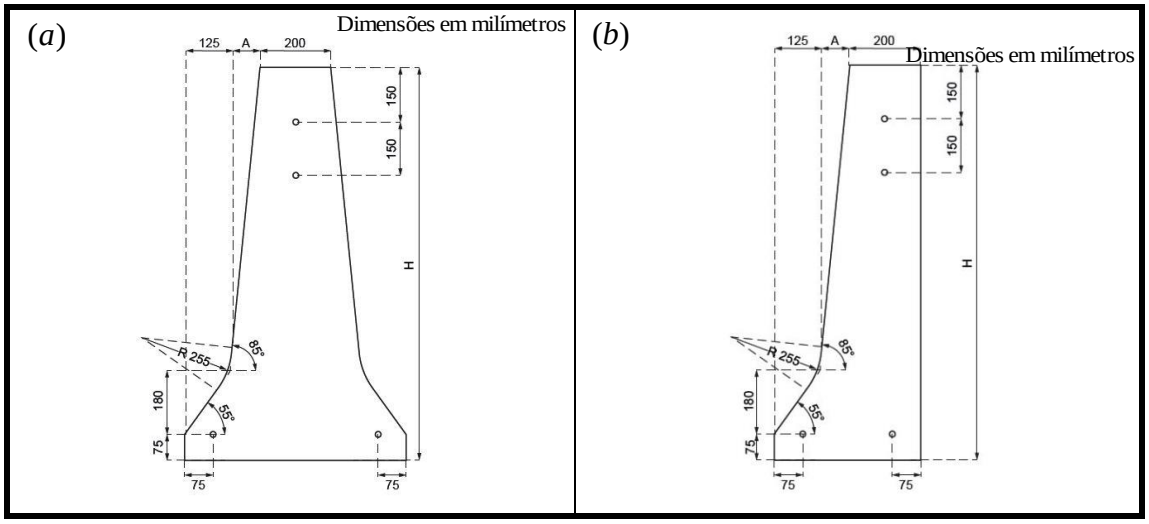


Figura 1.12 – Perfil Tipo F: (a) barreira dupla, (b) barreira simples (2015).

Como a nova edição da norma ainda é muito recente, os modelos de barreiras no país são baseados em modelos internacionais, não levando em conta que um determinado modelo utilizado em outro país pode não ter a mesma eficiência se usados aqui, pois as condições de veículos e de tráfego são diferentes. Esse tipo de análise é bem visível quando se comparam modelos de carros brasileiros, iguais e do mesmo fabricante, com modelos fabricados no exterior. Muito dos modelos brasileiros foram reprovados e os mesmos modelos estrangeiros receberam alto índice de aprovação, conforme mostra os testes do Programa de Carros Novos para América Latinha e o Caribe - NCAP Latina (2016).

É indiscutível a importância de pesquisas que abordam essa temática, visto que tem grande relevância para a sociedade por estarem diretamente ligadas ao fator de segurança, à preservação da vida e de patrimônio. Além disso, é visível a necessidade de pesquisas com barreiras de segurança, de forma que os projetos sejam condicionados pela realidade brasileira e se mostrem realmente eficientes.

1.5. Metodologia

Foram utilizados recursos experimentais e numéricos para o desenvolvimento do presente trabalho. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC). As análise numéricas foram realizadas com o uso do pacote LS-DYNA, baseado no método dos elementos finitos (MEF).

A metodologia proposta nesse trabalho consiste de três etapas fundamentais: revisão bibliográfica, ensaios de laboratório e modelagem computacional.

Na etapa de revisão bibliográfica, foram selecionadas bibliografias de relevância para o tema destacando o que já foi realizado, as metodologias empregadas, os modelos de cálculo e de análise experimental e teórico.

Na etapa experimental foram construídos dois conjuntos de barreiras temporárias do tipo New Jersey, cada conjunto com três módulos, sendo um conjunto com conector NY e outro com conector M. Na etapa de fabricação foram caracterizados os materiais utilizados.

Os ensaios experimentais consistiram em prender as extremidades de cada conjunto pelos seus conectores e então aplicar uma força horizontal no módulo central, de forma que pudesse ser avaliado tanto a resistência dos conectores, quanto as linhas de ruptura geradas pela aplicação da força.

Concluído os ensaios experimentais, a última etapa foi a calibração do software e as simulações numéricas com o uso do LS-DYNA.

CAPÍTULO II

LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

2.1.Barreiras de Concreto: Generalidades

De acordo com Ray & McGinniso (1997), embora não se saiba exatamente quando ou onde surgiram as primeiras barreiras medianas de concreto, parece que elas foram usadas pela primeira vez em meados dos anos 1940 em rodovia na descida das Montanhas Tehachapi, no vale central sul de Bakersfield, na Califórnia. Esta primeira geração de barreiras, que foi desenvolvida sem uso de testes de impacto e sem estudos aprofundados, foi instalada para minimizar o número de acidentes com caminhões desgovernados, ficando conhecida como "barreira Califórnia".

Ainda segundo Ray & McGinniso (1997) a "barreira New Jersey" (*Jersey Barrier*) foi originalmente desenvolvida pelo Instituto de Stevens da Tecnologia, na cidade Hoboken, estado de New Jersey, Estados Unidos, sob a direção do Departamento de Estradas local.

Grzebieta (2005) afirma que as barreiras New Jersey foram amplamente testadas nos campos de prova da GM (General Motors) com a intenção de desenvolver uma barreira que minimizasse os danos ao veículo em caso de colisão.

Estas barreiras foram instaladas primeiramente em New Jersey no ano 1955, cujo desenho se assemelhava a uma parede vertical baixa com uma aba em cada lado, ela sofreu várias modificações, principalmente em relação à sua altura, que foi aumentada a princípio para 24 polegadas (60,96 cm), em 1958 e, posteriormente, para 32 polegadas (81,28 cm) em 1959, chegando à sua forma definitiva que é adotada nos dias de hoje, em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil.

Aparentemente não foram realizados testes de impactos no desenvolvimento das modificações das barreiras New Jersey, eles foram baseados apenas na experiência de acidentes reais (Grzebieta, 2005 apud Ray e McGinnis, 1997).

À medida que o volume de tráfego e a velocidade dos veículos começaram a mudar a partir do início dos anos 1950, as barreiras de concreto começaram a ser utilizadas para prevenir que veículos se chocassem com partes estruturais de pontes. Em 1955 o Estado da Califórnia conduziu uma série de cinco ensaios de colisão à escala real que permitam aperfeiçoar os projetos de barreiras para pontes (Grzebieta, 2005 apud Beaton, 1956).

Desde então, diversos testes de colisão em escala real têm sido realizados a fim de desenvolver barreiras de concreto eficientes que visem redirecionar veículos com o menor risco de danos aos seus ocupantes. Como resultado, algumas barreiras de concreto têm provado ter um desempenho satisfatório para impactos de veículos, tais como a barreira do *F-shap* (desenvolvida em 1976, ver Figura 2.1(a), e a barreira *Single* S*lop* (desenvolvido em 1989), ver Figura 2.1(b), enquanto algumas outras demonstraram ter desempenho inaceitável tal como a barreira de concreto *GM-shape* (Michie, 1971) e (Rosenbaugh et al., 2007), Figura 2.1(c).

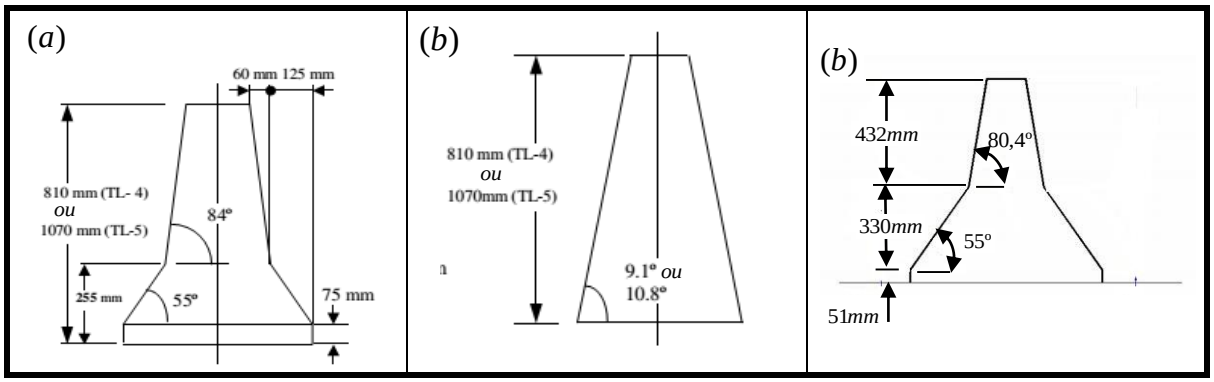


Figura 2.1 – Geometria de barreiras: (a) *F-shape*, (b) *Single Slop*, (c) GM *Shape.*

Na Europa, vários modelos de barreiras de concreto foram desenvolvidos na década de 1960, como o alemão DAV, o belga Trief, o francês Sabla e os italianos Sergad e Vianini (Michie, 1971). No entanto, a maioria destas barreiras de concreto tiveram desempenhos insatisfatórios após testes e de acidentes reais ao redor do mundo. Os países europeus, atualmente, também usam o modelo New Jersey como suas barreiras de concreto padrão (Fema, 2000).

As pesquisas de impacto com barreiras evoluíram e se especializaram à medida que os recursos tecnológicos se desenvolveram. Snider (1964) descreve os recursos de instrumentação utilizados na época e é fácil ver a evolução do sistema através Connolly (2007), onde equipamentos mais sofisticados podem obter dados mais eficazes e seguros. Também se percebe que o foco principal deixa de ser o veículo e/ou a barreira, para se concentrar nos efeitos fisiológicos dos ocupantes dos veículos no evento do impacto com o uso de bonecos instrumentados que simulam o corpo humano, conhecidos como *dummies.*

Zain & Mohammed (2015), fizeram uma lista sobre os estudos de dimensões para as barreiras de concreto com vários autores, mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Sumário de estudos realizados com dimensões de barreiras de concreto, Zain & Mohammed (2015).

Autor(es), (ano)	Largura da Base (mm)	Largura Superior (mm)	Altura (mm)	Tipo de Barreira de Concreto
(McDevitt, 2000)	820	300	1070	New Jersey + F-shape
(Richard et al., 2002)	610	150	810	New Jersey
(Consolazio et al., 2003)	711	381	508	Modelo de teste
(Zhao et al., 2004)	380	300	810	Barreira de concreto para ponte
(D. C. Alberson et al., 2004)	382	152	813	New Jersey
	254	152	1100	Barreira de concreto para ponte
(Roger et al., 2005a)	600	235	813	F-shape
(MRSF, 2006)	570	203	813	F-shape
(Bullard et al., 2006)	300	200	1067	Barreira de concreto para ponte single-slope
(Polivka et al., 2006)	381	152	813	New Jersey shape
(Itoh et al., 2007a)	680	250	1100	F-shape
(Menges et al., 2007)	610	240	813	F-shape
	610	203	1067	*Single-slope*
(Rosenbaugh et al., 2007)			813	GM shape
(Dhafer et al., 2007)			813	5 - Tipos padrão
(Se-Jin et al., 2008)	420	230	1320	Barreira de concreto para ponte
(Atahan and Sevim, 2008)	450	250	1000	New Jersey
(Kuebler, 2008)	580		1070	Barreira de concreto para ponte
(Esfahani et al., 2008)	610	152	813	New Jersey +F-shape
			940	New Jersey +F-shape
			1067	New Jersey +F-shape
(Zhong et al., 2009)	566	203	810	*F-shape*
(Nauman et al., 2009)			1067	*Single-slope*
(Atahan, 2009)	610	203	810	New Jersey
			950	New Jersey
			100	New Jersey
			1050	New Jersey
(Coughlin et al., 2010)	610		1070	Retangular
(Uttipec, 2010)	610	170	810	Divisor Parabólico
(Bin-Shafique et al., 2011)	600	240	1060	New Jersey
(Claude et al., 2011)	830	380	904	Barreira de concreto para ponte
(Amato et al., 2011)	750		750	Retangular

Os testes de impacto ainda são a maneira mais eficiente e segura para se avaliar a eficiência das barreiras. Outras formas paralelas de análise, no entanto, vêm se desenvolvendo,

com o intuito de diminuir os custos dos ensaios em escala real, como os ensaios estáticos, as simulações numéricas e os ensaios de pêndulos de impacto, valendo lembrar que os mesmos não substituem o ensaio em escala real, mas tornam-se complementares aos mesmos.

À medida que os estudos de segurança e contenção viária foram avançando, outros tipos de dispositivos foram criados concorrendo ou complementando o uso de barreiras de concreto, como as barreiras semi-flexíveis de perfil metálico e as flexíveis de cabos de aço com poste frágil (Lima, 2006).

Em Mitchell et. al. (2006) é descrito um projeto de pêndulo (Figura 2.2), que visa fazer uma correlação com o teste de impacto de um veículo com massa equivalente, o seu funcionamento é simples, baseia-se em colocar um peso equivalente ao de um veículo e elevá-lo a uma altura que seja suficiente para se obter a energia cinética equivalente de um veículo, entretanto, esse sistema é limitado pela altura do pêndulo, quanto maior a velocidade necessária, maior a altura do mesmo. Nota-se que esse tipo de ensaio, apesar de bem prático e de custo inferior, limita-se apenas a avaliar o desempenho estrutural da barreira com a carga de impacto.

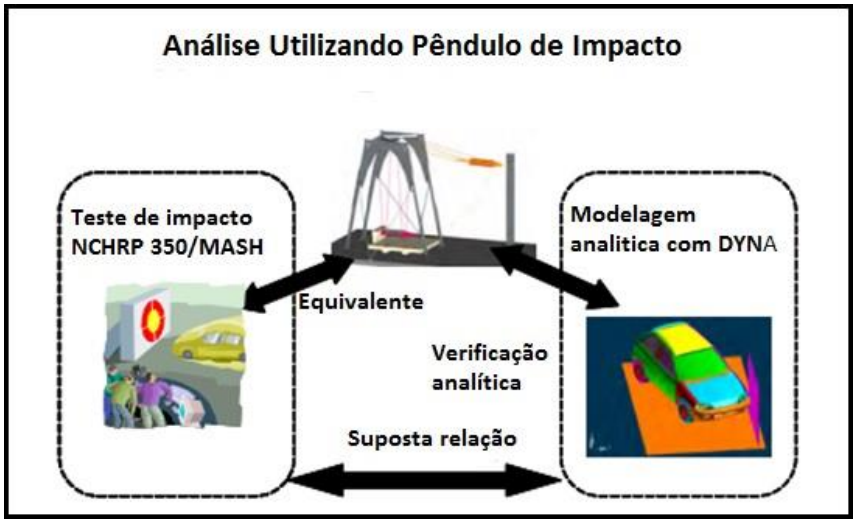


Figura 2.2 – Representação de equivalência de teste de impacto com pendulo (adaptado de Mitchell et. al., 2007).

Para a análise estática Hirsch (1978) propôs a teoria linha de ruptura e as fórmulas relacionadas para a barreira de concreto, baseadas em análises experimentais, que posteriormente foram incorporadas na Norma Americana *Load-and-Resistance Factor Design* (LRFD Bridge, 2011) da AASHTO. Na Figura 2.3 são mostrados os componentes da carga de impacto e as linhas de ruptura equivalente proposta pelo autor.

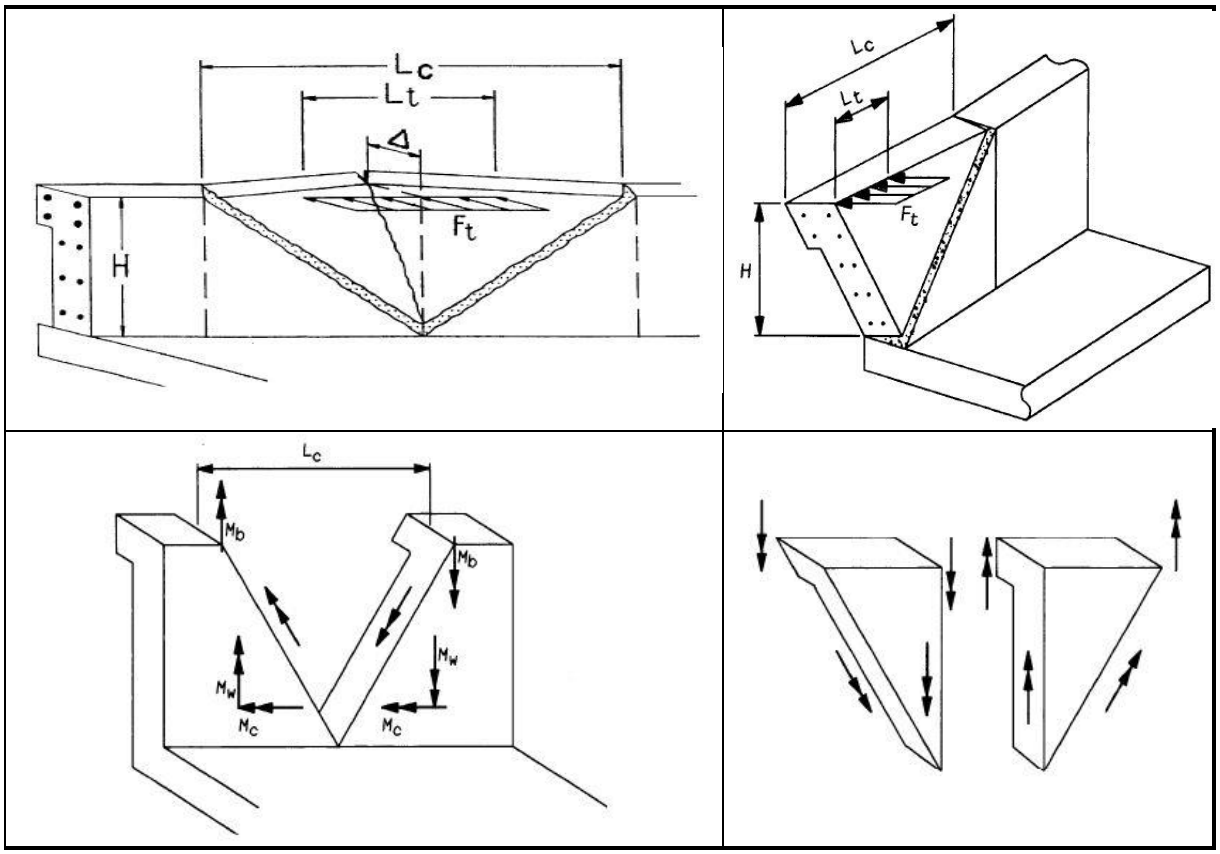


Figura 2.3 – Carga de impacto e linhas de ruptura equivalentes para barreira de concreto. (LRFD Bridge, 2011)

Segundo esses procedimentos, a resistência nominal de uma barreira, R_w, onde atua uma carga transversal, pode ser determinada utilizando uma abordagem da linha de ruptura como:

a) Para impactos dentro de um segmento da barreira

$$R_w = \left(\frac{2}{2L_c - L_t}\right)\left(8M_b + 8M_w + \frac{M_c L_c^2}{H}\right) \tag{2-1}$$

O comprimento crítico da parede, L_c, sobre a qual o mecanismo de linha de ruptura deve ocorrer, é dado como:

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 \left(\frac{8H(M_b + M_w)}{M_c}\right)} \tag{2-2}$$

b) Para impactos no final da barreira ou nas articulações

c) $$R_w = \left(\frac{2}{2L_c - L_t}\right)\left(M_b + M_w + \frac{M_c L_c^2}{H}\right) \tag{2-3}$$

O comprimento crítico da parede, L_c, sobre a qual o mecanismo de linha de ruptura deve ocorrer, é dado como:

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 \left(\frac{H(M_b + M_w)}{M_c}\right)} \tag{2-4}$$

Onde (ver Figura 2.3),

F_t = força transversal especificada na Tabela do Anexo A1, assumindo que a ação esteja atuando no topo da barreira de concreto (kN)[1]. H = altura da parede (m).

L_c = comprimento crítico da linha de ruptura do padrão de falha (m).

L_t = comprimento longitudinal da força de impacto distribuída (m).

Rw = resistência transversal total da barreira (kN).

M_b = resistência à flexão adicional da barra em adição a M_w, se existir, na parte superior da parede (kN.m).

M_c = resistência à flexão de balanço das paredes sobre um eixo paralelo ao eixo longitudinal da ponte (kN.m).

M_w = resistência à flexão da parede sobre seu eixo vertical[2]

A análise de linha ruptura mostrado na Figura 2.3 inclui apenas a capacidade de flexão final do componente de concreto. Devem ser fornecidos estribos ou tirantes de resistir ao cisalhamento e/ou forças de tensão diagonais.

Tabela 2.2 – Ábaco para a determinação dos parâmetros de Hirsch (1978).

Designação	**Und.**	**Nível de Testes**					
		TL-1	**TL-2**	**TL-3**	**TL-4**	**TL-5**	**TL-6**
F_t Transversal	kips	13,5	27,0	54,0	54,0	124,0	175,0
	kN	60,1	120,2	240,3	240,3	551,8	778,8
F_L Longitudinal	kips	4,5	9,0	18,0	18,0	41,0	58,0
	kN	20,0	40,1	80,1	80,1	182,5	258,1
F_v Vertical	kips	4,5	4,5	4,5	18,0	80,0	80,0
	kN	20,0	20,0	20,0	80,1	356,0	356,0
L_t e L_L	ft	4,0	4,0	4,0	3,5	8,0	8,0
	m	1,2	1,2	1,2	1,1	2,4	2,4
Lv	ft	18,0	18,0	18,0	18,0	40,0	40,0
	m	5,5	5,5	5,5	5,5	12,2	12,2
He (min)	in	18,0	20,0	24,0	32,0	42,0	56,0
	cm	45,7	50,8	61,0	81,3	106,7	142,2
Menor altura do parapeito	in	27,0	27,0	27,0	32,0	42,0	90,0
	cm	68,6	68,6	68,6	81,3	106,7	228,6

[1] O sistema de unidades usado na LRFD Bridge (2011) é o Sistema Inglês, para esse trabalho todas as unidades foram convertidas para o Sistema Internacional.

[2] Para uso nas equações acima, M_c e M_w não devem variar significativamente ao longo da altura da parede. Para os outros casos, uma análise rigorosa linha ruptura deve ser usado.

2.2.Barreiras de Concreto Pré-fabricadas

O uso das primeiras barreiras de concreto pré-fabricadas - BCP, também conhecidas como barreiras removíveis (*Precast/Portable Concrete Barrier – PCB*), é tão incerto quanto o início da pré-moldagem com artefatos de concreto.

Em trabalhos como de Albin, et al. (2014) já menciona o uso dessas barreiras em meados dos anos 70, tanto com utilização temporária como fixa que se consagrou pela facilidade de instalação para aplicações de zonas de trabalho e pelo fato de ser construída de concreto torna mais durável e mais fácil de manter do que outras barreiras semirrígidas, como as defensas metálicas. O seu design modular também permite a remoção de seções para reparação, substituição ou aberturas de emergência.

Jeon et. al. (2011) estudaram o modo de falha e tensão última de barreira de concreto pré-moldado. Eles realizaram um teste estático em grande escala, onde a parte inferior da barreira é suportada por uma plataforma que pode ser aproximada por um apoio fixo.

A partir desses estudos, eles propuseram um modo de falha alternativa e equações preditivas correspondentes às equações da LRFD para a resistência máxima, levando em consideração as características e forma da barreira. A descontinuidade longitudinal de segmentos pré-moldados da barreira também foi abordada, bem como a localização do impacto e de possíveis modos de falhas, conforme mostrado na Figura 2.4.

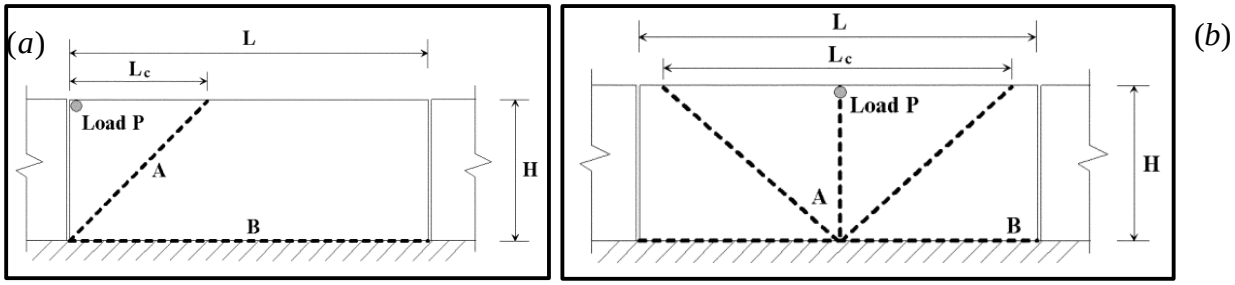


Figura 2.4 – (a) impacto na junção, (b) impacto na parte interna da barreira. (Jeon et. al., 2011)

Os autores constataram que quando não existe qualquer ligação conjunta ou a ligação do conjunto é fraca resulta, geralmente, em uma baixa resistência.

Eles também concluíram que dois aspectos devem ser levados em conta para o desenvolvimento de um sistema de barreira pré-moldada, quando existe um método de ligação frágil entre as elas. Inicialmente, o comprimento mínimo longitudinal do segmento de barreira para impedir o modo de falha em balanço indesejável deve ser determinado, e em seguida, as diferenças entre os modos de falha e as forças finais correspondentes devem ser investigadas,

de acordo com o comprimento longitudinal do segmento de barreira e a localização da colisão do veículo.

Na Figura 2.5 os autores propõem a linha de ruptura para o caso da barreira pré-moldada, abordando as características anteriormente citadas, onde também comparam com o modelo da AASHTO LRFD e outros dois possíveis modelos de falhas.

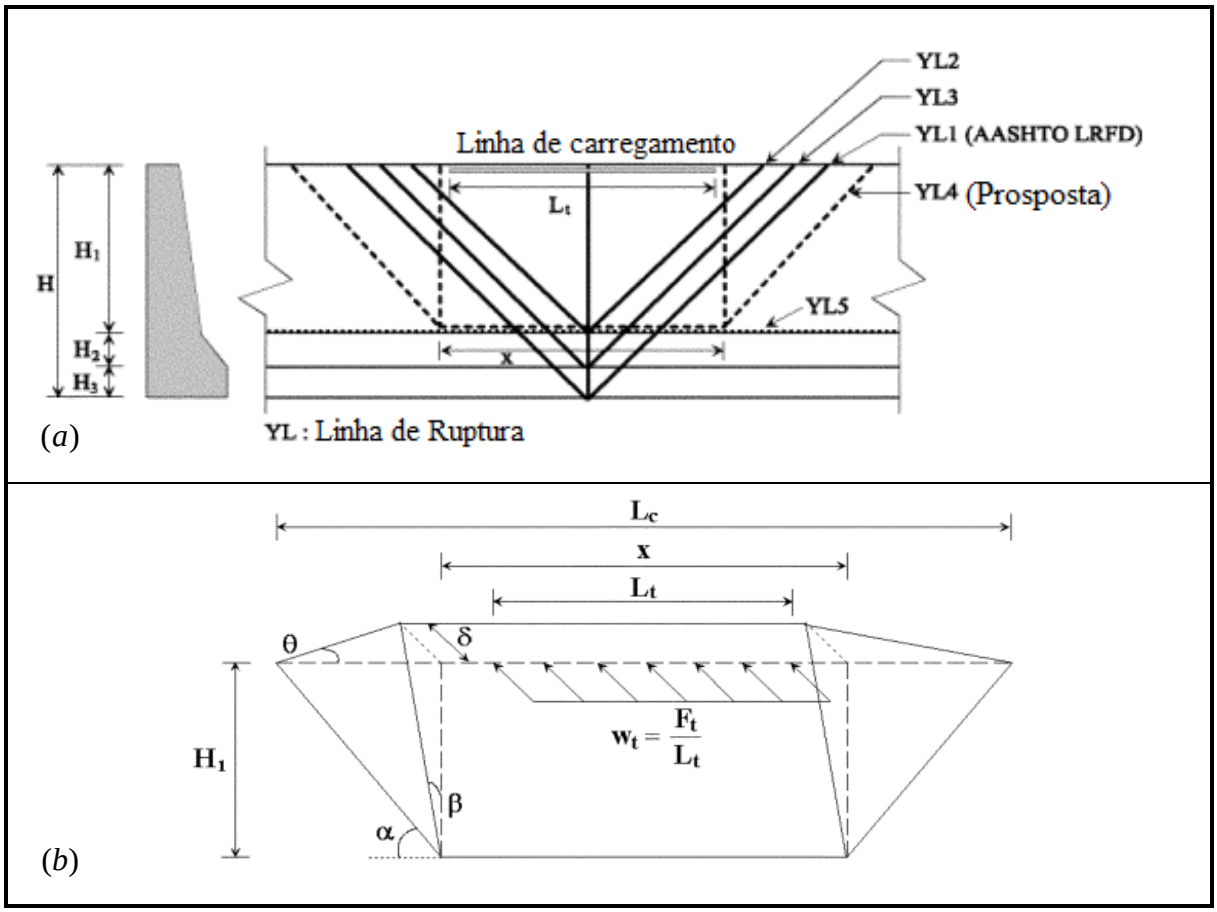


Figura 2.5 – (a) Alternativa de linha de ruptura proposta por Jeon et. al. (2011), (b) detalhe do modo de falha YL4.

A partir do modelo de falha indicado na Figura 2.5, eles propuseram as equações preditivas de falhas mostradas nas Eqs. (2-5) e (2-6).

$$R_w = 4\sqrt{\frac{2M_{c1}M_{w1}}{H_1}} + \left(\frac{H(M_b + M_t)}{M_c}\right) \tag{2-5}$$

$$L_c = 2 + \sqrt{\frac{2M_{c1}M_{w1}}{M_{c1}}} + L_t \tag{2-6}$$

Onde,

M_{w1} e M_{c1} são as mesmas da Eq. (2-1), onde o "1" adicional indica o momento com a altura H_1.

No intuito de melhorar a eficiência das barreiras em absorver a energia de impacto dos veículos, abriu-se uma frente de estudos que visam não apenas analisar a sua geometria (até então o principal recurso utilizado nesse tipo de contenção), mas, também, suas conexões (Atahan, 2006; Dhafer et al., 2007; Bielenberg, 2009), suas propriedades de resistência e até mesmo seu material constituinte com adição de materiais que visem melhorar a absorção de energia (Bina et. al., 2006; Shklyan, 2009; Charron et al, 2011).

Conforme já discutido, as conexões nas BCP's desempenham um papel importante na absorção de energia de impacto (vide Figura 1.10), em face disso muitas pesquisas tem sido realizadas com diferentes tipos de vínculos no intuito de deixar essas barreiras mais eficientes.

Marzougui, et. al. (2007) estuda um sistema de conexão conhecido como pino-laço, muito utilizado no EUA (Figura 2.6(c)), com uma combinação de cinco diferentes geometrias: F-*Shape*, New Jersey, *Single-Slope*, Plana (Figura 2.6(a)) e Invertida (Figura 2.6(b)).

Os laços são incorporados em segmentos opostos de barreira e unidos por um pino que passa verticalmente através deles. O número de loops incorporados à conexão varia de acordo com os requisitos e especificações de uma agência. Em geral, o sistema de pino e laço, bem como outros modelos de ligação, oferece uma resistência à torção e outras forças, quando um segmento da barreira é atingido.

Essas juntas de conexão tem um controle direto sobre a resposta de impacto das BCP's, particularmente sobre o deslocamento dinâmico da barreira. Um projeto inadequado dessas juntas pode induzir a instabilidade do veículo, ou levá-lo a um desvio inaceitável e/ou causar falha na conexão.

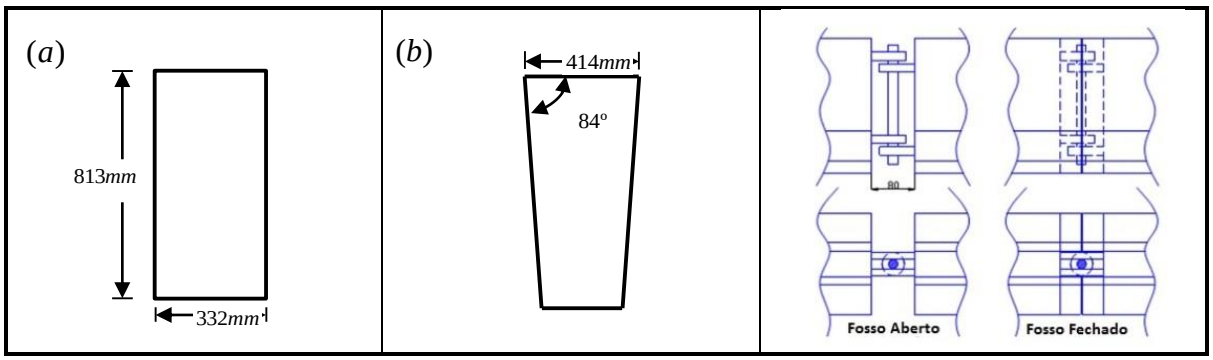


Figura 2.6 – Geometria de barreiras: (a) Vertical, (b) Invertida, (c) Conectores testado por Dhafer et. al. (2007).

Embora o sistema pino-laço seja o mais comum e bastante empregado, existem no mercado sistemas mais complexos, a maioria de particulares como mostrado na Figura 2.7, como o da europeia Delta Bloc, com certificação pela EN-1371, Figura 2.7(a) e as americanas *Easi-Set Industries e Saferoads* Figura 2.7 (b) e (c).

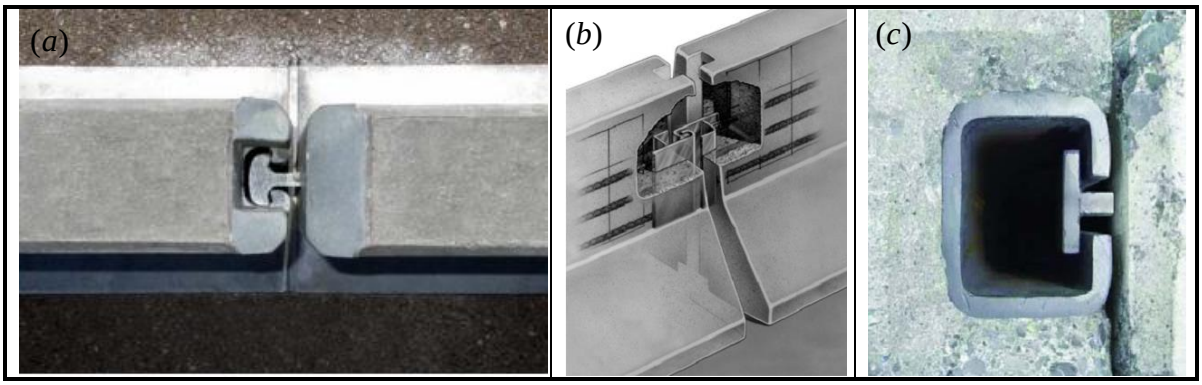


Figura 2.7 – modelos de outros tipos de conexão (a) SB-50 (DeltaBloc, 2014), (b) J-J Hooks (Easi-Set Industries, 2014), (c) T-LOC (Saferoads, 2009)

2.3.Análise Numérica

De acordo com Jiang et. al. (2004) a análise numérica utilizando programas de simulação computacional tem sido utilizado em pesquisas de projeto de barreira desde 1960. Muitos dos programas de simulação têm sido desenvolvidos, tais como: HVOSM, Barrier VII, GUARD, DYNA3D e MADYMO. Desde os anos 1990 o DYNA3D (versão anterior do LS-DYNA), um programa de elementos finitos não-linear de propósito geral, e o ADYMO, um programa de dinâmica multi-corpo, foram gradualmente substituídos os outros programas e têm sido amplamente utilizados na pesquisa e projeto de sistemas de barreira de segurança rodoviária.

Segundo Atahan (2010) os avanços nas técnicas de simulação numérica e recursos de computador têm feito programas de simulação uma ferramenta importante para a investigação de problemas complexos de interação dinâmica, de difícil solução. Durante a última década, este método inovador tem sido amplamente utilizado para o desenvolvimento de estruturas de segurança resistentes a colisões para uso em rodovias.

Várias instituições, universidades e centros de pesquisa estão ativamente envolvidos no desenvolvimento de modelos numéricos de veículos, dummies e dispositivos de segurança de rodovias para uma variedade de aplicações de colisão. O uso da não linearidade para grandes deformações e a Análise de Elementos Finitos (AEF) para simular acidentes na estrada tem atraído atenção significativa ao longo dos últimos anos, Atahan (2010).

Nos últimos anos, os modelos de veículos para análise numérica que vem sendo desenvolvidos, estão cada vez mais complexos, sendo capazes de permitir uma boa avaliação da segurança do ocupante do veículo, bem como avaliar itens importantes tanto para o projeto do veículo, quanto para avaliar o desempenho dos dispositivos de segurança para impactos. Na Figura 2.8 é mostrada a evolução dos modelos numéricos de veículos de testes.

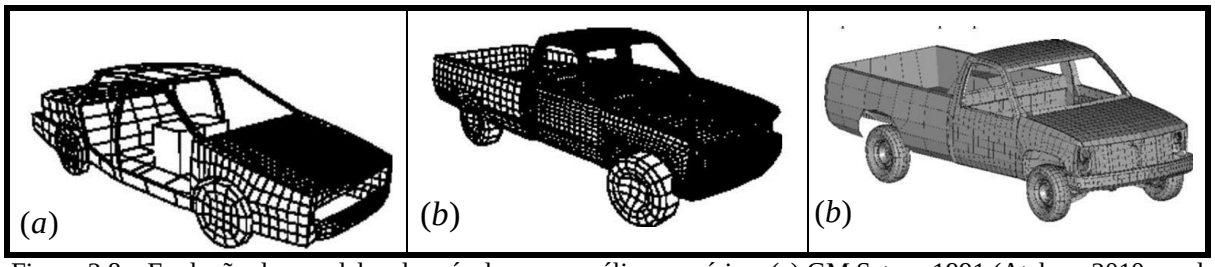


Figura 2.8 – Evolução dos modelos de veículos para análise numérica: (a) GM Saturn 1991 (Atahan, 2010 apud Wekezer et al. (1993)), (b) C-1500 pick-up truck (Atahan, 2010 apud Zaouk et al. (1996)), (c) C-1500 pickup truck (NCAC, 2002).

À medida que os modelos de veículos de testes numéricos foram evoluindo, a análise numérica dos dispositivos de segurança rodoviária começa a incorporar simulações utilizando esses veículos. Marzougui et al. (1998) realizou simulações utilizando elementos finitos para avaliar o desempenho do teste de impacto com barreiras de concreto portáteis (BCP), com três diferentes detalhes da conexão. Esses modelos foram validados com testes de colisão em escala real (ver Figura 2.9), depois de provado a precisão e fidelidade dos modelos, foram avaliados o desempenho de teste de colisão de outros dois tipos de BCPs com diferentes detalhes da conexão por meio de simulação numérica.

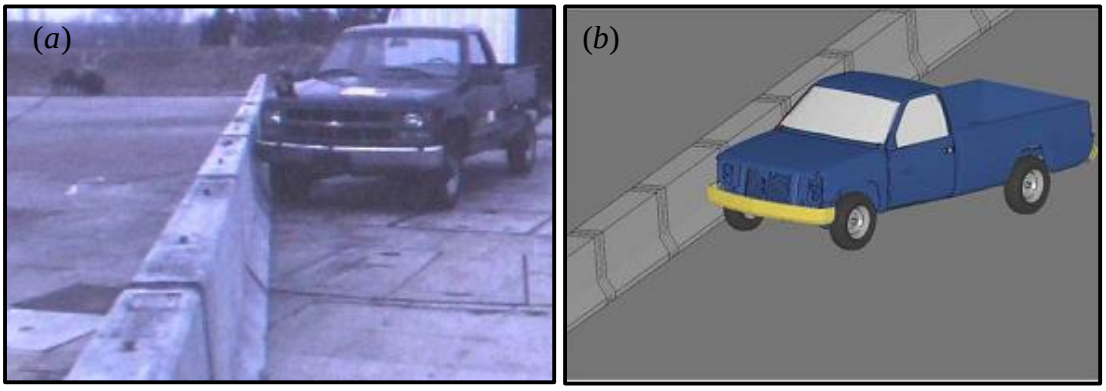


Figura 2.9 – Validação do modelo: (a) teste em escala real, (b) teste com modelo numérico (Marzougui et al., 1998).

Consolazio et al. (2002), apresenta o desenvolvimento de um sistema de barreira de concreto de baixo perfil para uso em zonas de trabalho na estrada (Figura 2.10). Ao fazer uso extensivo da AEF dinâmica não-linear, vários refinamentos de projeto conceitual foi realizado, e com isso, ele conseguiu uma grande economia com os custos de testes de colisão em grande escala.

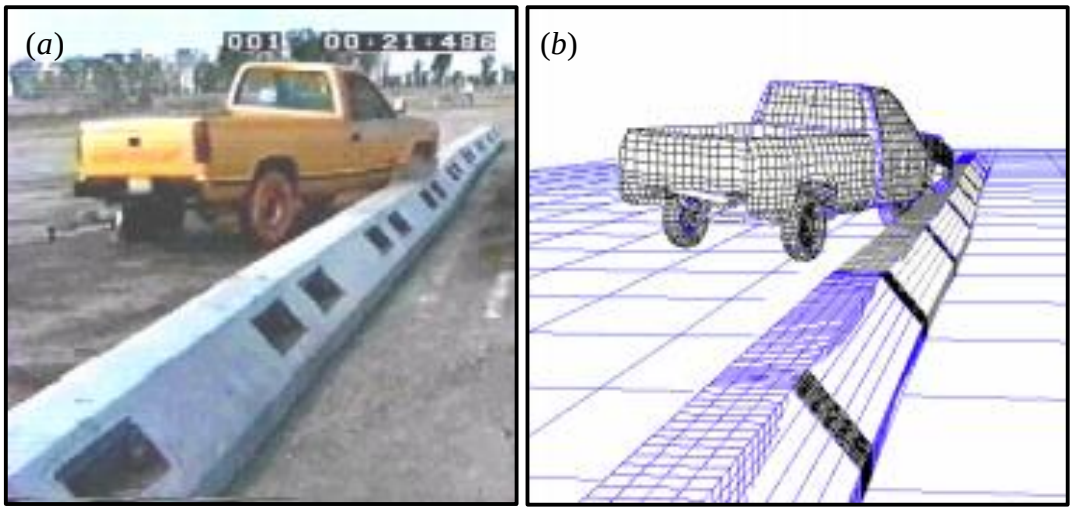


Figura 2.10 – Validação do modelo: (a) teste em escala real, (b) teste com modelo numérico (Consolazio et al., 2002).

Bielenberg et al. (2003) analisaram o desempenho de barreiras de concreto temporária *tie-down* utilizando simulação numérica com o LS- DYNA, ver Figura 2.11. Uma quantidade considerável de simulações foi realizada para obter desempenho aceitáveis quando impactadas por uma caminhonete 2000P (ver NCHRP Report 350) viajando a 100 km/h e um ângulo de 25 °. Após simulações bem sucedidas com o LS- DYNA foram realizados testes de colisão em grande escala para a aprovação final, confirmando os bons resultados obtidos pela simulação numérica.

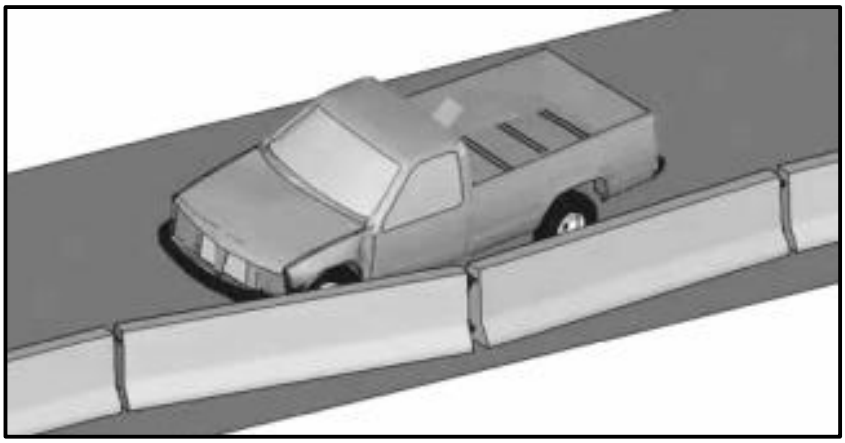


Figura 2.11 – Simulação de desempenho de barreiras temporárias tie-down (Reid, 2004).

Bonin et al. (2004) simularam o impacto de veículos pesados (30,000 kg) com barreiras de concreto de alta contenção, utilizando os critérios da EN 1317 Figura 2.12. Os resultados da simulação foram comparados com os resultados de testes de colisão em escala real para validar a precisão do modelo de elementos finitos para as barreiras.

Figura 2.12 – Simulação de impacto avaliada por Bonin et. al. (2004).

Lima (2006) estudou o comportamento das barreiras de segurança, entre elas as de concreto, quanto ao seu funcionamento e capacidade resistente face à colisão de veículos, adotando os critérios da EN 1371, desenvolvendo um modelo numérico simplificado de um veículo pesado (ver Figura 2.13), para análise no programa de elementos finitos ABAQUS.

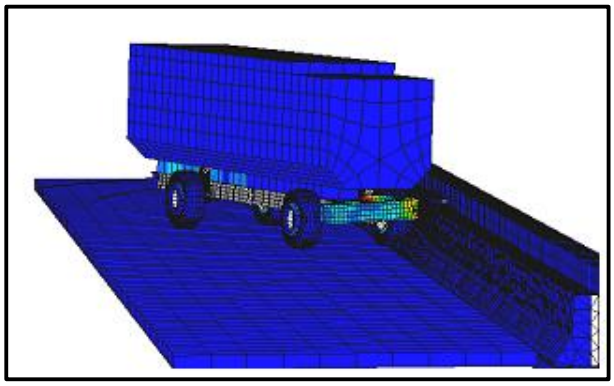


Figura 2.13 – Modelo numérico desenvolvido por Lima (2006).

A *National Transportation Research Center Inc.* (NTRCI), juntamente com o *Battelle Memorial Institute*, *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) e a University of Tennessee at Knoxville (UTK), desenvolveram um modelo numérico de um veículo pesado (aproximadamente 36 t) para auxiliar nas simulações de dispositivos de segurança rodoviários, no intuito de aumentar a segurança nas rodovias, o modelo é mostrado na Figura 2.14.

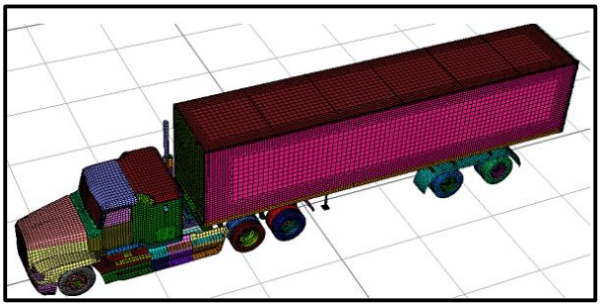


Figura 2.14 – Modelo numérico desenvolvido pela NTRCI (2009).

O uso de AEF tem incrementado o potencial para a melhoria dos projetos de dispositivos de segurança de estradas. Ele pode ajudar a identificar e corrigir problemas no projeto antes do teste, também pode ajudar em algumas condições quando o teste é impraticável ou impossível, tais como o teste com todos os modelos de veículos de teste, vários ângulos de impactos laterais, etc. Embora testes de colisão em grande escala sempre será uma parte crucial e final da pesquisa de desenvolvimento de dispositivos de segurança para rodovias, a AEF tornou-se parte integrante do processo de concepção (Atahan, 2010 apud Ray, 1996).

2.4.Pesquisas realizadas no Brasil

No Brasil ainda são poucas as pesquisas envolvendo dispositivos de segurança rodoviários e raramente abordam os quesitos de desempenho estrutural e eficiência de contenção. Missato (2011) estudou o uso de dispositivos de proteção lateral, analisando as recomendações e critérios utilizados no Brasil e no exterior e compondo uma relação entre essas recomendações e a ocorrência de acidentes, porém, nenhum estudo de eficiência desses dispositivos foi realizado.

Andrade (2011) desenvolveu um modelo para a quantificação do risco na saída de veículos da pista em rodovias de duas faixas, apesar dos sistemas de contenção não ter sido o foco desse trabalho, eles são abordados com uma breve descrição do seu funcionamento e da sua importância no redirecionamento do veículo.

Matos (2013) estudou a influência do posicionamento de barreiras rígidas centrais na visibilidade de projeto em rodovia de pista dupla, baseando-se na análise de simulações gráficas tridimensionais de modo a fornecer indicativos auxiliadores nas tomadas de decisões no projeto geométrico da via.

Neves (2013) investigou o desempenho de defensas metálicas rodoviárias sujeitas ao impacto de automóveis e comparou com o desempenho da barreira New Jersey e da Barreira Plana, ambas de concreto. Para realizar os testes dinâmicos das defensas metálicas, ele utilizou uma máquina construída no princípio de propagação de ondas longitudinais em barras cilíndricas por Hopkinson e Kolsky, disponível no Laboratório de Impacto da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os testes dinâmicos para as barreiras de concreto não foram realizados, apenas simulações numéricas com o uso do LS-DYNA foram implementadas para caracterizar o desempenho dos sistemas e compará-los.

Yoneda (2013) avaliou a eficiência de defensas metálicas maleável simples, utilizadas nas rodovias brasileiras. Para isso ele realizou ensaios experimentais de corpos de prova, para

a caracterização dos materiais e realizou simulações numéricas com uso de veículo com a utilização de modelos simplificados.

2.5.Revisão Normativa

A *National Cooperative Highway Research Program – NCHRP* através do Report 350 (1993) e do *Manual for Assessing Safety Hardware* (*MASH*), da AASHTO (AASHTO, 2009), norma em vigor nos EUA, contém recomendações para o ensaio de colisão e avaliação de barreiras de segurança. Pois, segundo as mesmas, devido à complexidade da dinâmica da colisão, a forma mais confiável de avaliar o desempenho destas barreiras é através de ensaios padronizados com colisões de veículos em escala real.

Essas normas propõem seis níveis de ensaio para avaliação do risco aos ocupantes do veículo, integridade estrutural da barreira e comportamento pós-impacto do veículo para uma variedade de massas de veículos, velocidades e ângulos de impacto.

O desempenho é avaliado em termos do risco de ferimentos aos ocupantes dos veículos, adequação estrutural e comportamento pós-impacto. A filosofia adotada para a definição dos critérios para os ensaios nos diferentes níveis foi utilizar a pior condição possível na combinação de veículo de teste, velocidade de impacto e ângulo de impacto. Para a velocidade e ângulo de impacto esta condição é definida com um percentil de 85%. Para a massa de veículos de passageiros adotam-se os percentis de 5% e 95%.

Um nível de ensaio é definido a partir da velocidade e ângulo de impacto e tipo do veículo. Os três níveis menores representam veículos de passageiros e os três maiores caminhões pesados. Os menores níveis de ensaio se aplicam aos locais com reduzida velocidade e volume de tráfego, como estradas rurais, locais ou ruas de cidades. Os níveis mais altos de ensaio se aplicam a rodovias de alta velocidade e volume de tráfego.

A mesma preocupação relacionada com as questões de segurança rodoviária levou a Europa a criar documentos normativos na mesma linha do *MASH* (AASHTO, 2009), com o objetivo de padronizar ensaios de colisão e determinar parâmetros críticos na análise da segurança de barreiras. Desta forma, na Europa foi criada pelo CEN a EN 1317 – "Sistemas de Segurança Rodoviária", a qual se divide em seis partes:

EN 1317-Parte 1:1998 - Terminologia e critérios gerais dos métodos de ensaios de colisão;

EN 1317-Parte 2:1998 - Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Barreiras de Segurança;

EN 1317-Parte 3:2000 – Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Atenuadores de Colisão;

EN 1317-Parte 4:2001 – Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Terminais e Transição das Barreiras de Segurança;

prEN 1317-Parte 5:2001 – Critérios de durabilidade e avaliação de conformidade;

prEN 1317-Parte 6:1998 – Sistemas de barreiras de segurança para pedestres.

A norma europeia ainda define mais um tipo de classificação para as barreiras, relacionada à chamada "largura de trabalho". Esse parâmetro é definido como a distância entre o lado da barreira voltado para o tráfego, antes do impacto, e qualquer parte do sistema de segurança o mais afastado possível da posição inicial, após o impacto (Figura 2.15).

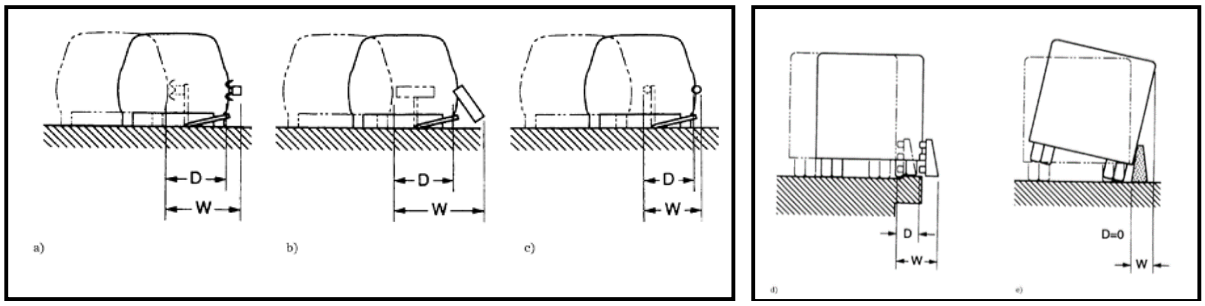


Figura 2.15 – Deflexão dinâmica (D) e largura de trabalho (W) (EN1317-2, 1998).

No Brasil, a normatização para dispositivos de contenção viária é relativamente recente se comparada com a de outros países, apesar de já existirem normas isoladas para dispositivos de contenção viária como a NBR 6970:1975/1999 (Defensas metálicas de perfis), NBR 6971:1976/1978/1983/1999 (Defensas e barreiras) e NBR 14885:2002/2004 (Segurança no tráfego - Barreiras de concreto armado), apenas em 2007 a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, publica a primeira norma de contenção viária, a NBR 15486:2007 (Segurança no tráfego - Dispositivos de contenção viária – Diretrizes), baseada na norma americana *NCHRP Report* 350 (1993).

Em março de 2016 a NBR republica a norma 15486:2016 agora com o nome de Segurança no tráfego - Dispositivos de contenção viária – Diretrizes de projeto e ensaios de impacto. A nova norma é uma compilação de critérios da EN-1317 e da NCHRP 350, possibilitando os uso dos critérios das duas normas.

A NBR 14885:2004 para barreiras de concreto, atualmente em vigor especifica os requisitos mínimos para o projeto construtivo para as barreiras de concreto, e adota apenas dois modelos de barreira: modelo New Jersey e Tipo F, porém não sugere nenhum procedimento pra avaliar o desempenho da barreira, se limitando apenas a especificar, em termos de requisitos

estruturais, a resistência característica mínima do concreto de 25 MPa aos 28 dias e que seja capaz de suportar uma carga dinâmica mínima de 200 kN aplicada na borda superior da barreira de dentro para fora da pista.

A NBR 14885:2004 – “Segurança no tráfego — Barreiras de Concreto”, foi modificada através do projeto de revisão de norma do comitê (ABNT/CB-016), sendo republicada em 13 de maio de 2016. Essa nova norma está relacionada com a nova publicação da NBR 15486:2016, que regulamenta os critérios de testes de impacto. Novos modelos de barreiras são aceitos, desde que homologados por testes de impactos.

A NBR 14885:2016 traz alguns modelos certificados, homologados e de domínio público pela *Federal Highway Admnistration* (FHWA) dos Estados Unidos. Entre esses modelos estão o perfil New Jersey (barreira dupla e simples) com alturas de 810 mm e 1070 mm, o perfil Tipo F (barreira dupla e simples) com alturas de 810 mm e 1070 mm, o perfil *Single-Slope* (barreira dupla e simples) com alturas de 810 mm e 1070 mm e o perfil Ontário *tal wall* (barreira dupla e simples) com alturas de 810 mm e 1070 mm. Os perfis *Single-Slope* simples e Ontário *tal wall* (barreira dupla e simples), não discutidos anteriormente, são mostrados na Figura 2.16(a), na Figura 2.16(b) e na Figura 2.16(c), respectivamente.

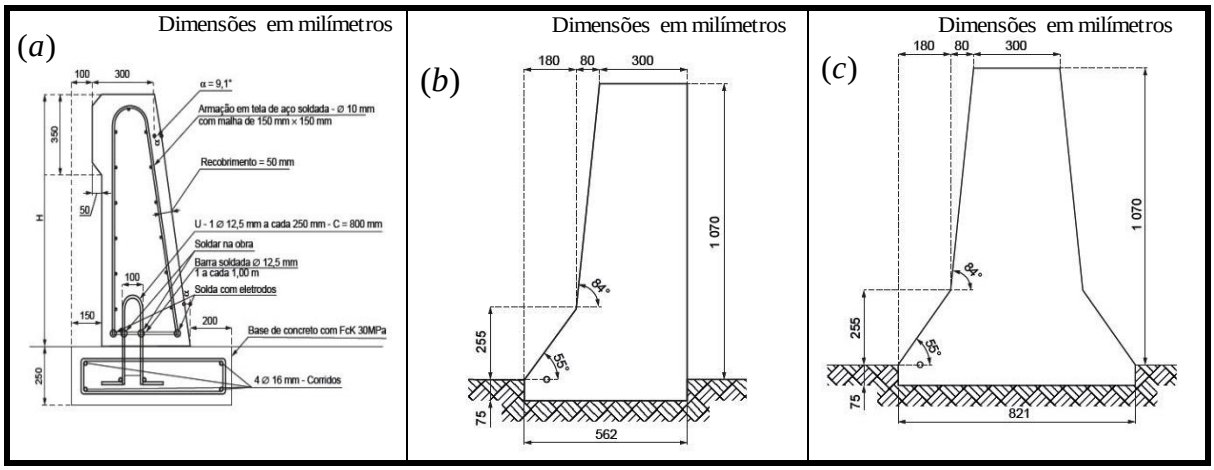


Figura 2.16 – Geometria de barreiras: (a) *Single-Slope* simples, (b) Ontário *tal wall* simples e (c) Ontário *tal wall* duplo. Fonte: NBR 14885:2016.

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE CONTENÇÃO RODOVIÁRIOS E NÍVEIS DE SEGURANÇA

De acordo com a EN 1317-1 (1998) os sistemas de contenção rodoviários são equipamentos instalados na estrada que fornecem um determinado nível de contenção a um veículo descontrolado, diminuindo a gravidade da colisão. Ainda de acordo com essa norma, distinguem-se duas classes de sistemas de contenção rodoviários: os de contenção de veículos e os de proteção para pedestres (vide Figura 3.1). Para esse trabalho apenas as barreiras de segurança serão descritas.

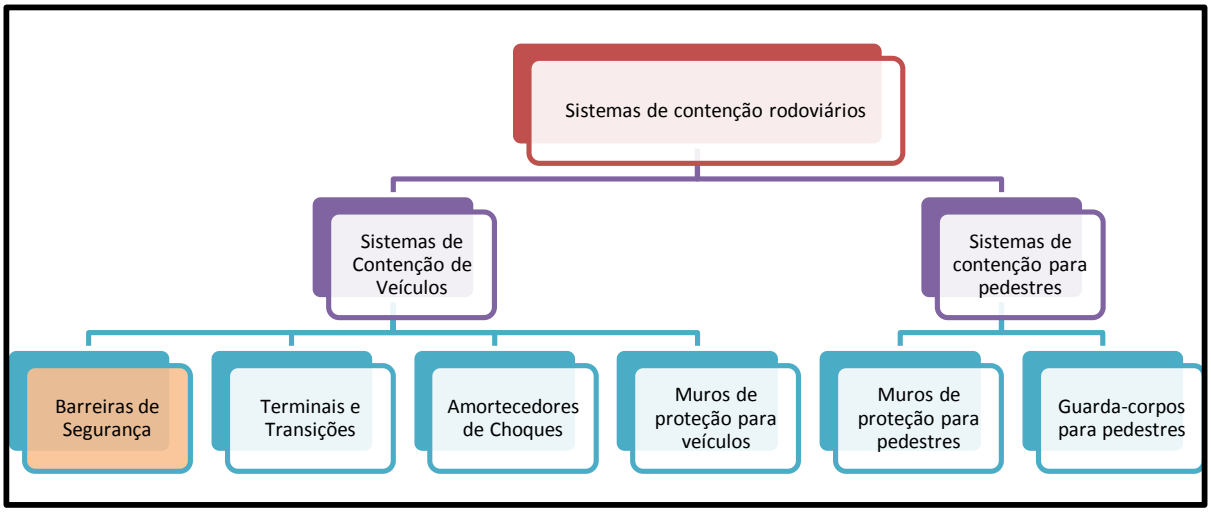


Figura 3.1 – Tipos de sistemas de contenção (adaptado da EN 1317-1(1998)).

3.1.Barreiras de Segurança

As barreiras de segurança são instaladas longitudinalmente ao longo da área adjacente à faixa de rolagem ou do separador central da rodovia, projetadas unicamente para colisões laterais.

O *Roadside Design Guide* (2011) classifica as barreiras de segurança em três categorias: flexíveis, semirrígidas e rígidas, dependendo das características da deflexão resultante do impacto. A seguir serão elencados os principais tipos.

3.1.1. Barreiras Flexíveis

Os sistemas flexíveis geralmente absorvem melhor a energia de impacto quando comparado aos demais, visto que grande parte dessa energia é dissipada pelo desvio da barreira. Na Tabela 3.1 são apresentados alguns exemplos.

Tabela 3.1 – Exemplos de barreiras flexíveis

Tipo	Característica	Exemplo
Cabos de baixa tensão	Esse tipo de barreira é composto por cabos fixados em pequenos postes de grande flexibilidade. A flexibilidade do sistema absorve a energia de impacto e dissipa-a lateralmente, o que reduz as forças transmitidas para os ocupantes do veículo.	(Wikipedia, 2014)
Cabos de alta tensão	Com certa semelhança ao anterior, consiste de três ou quatro cabos pré-esticados e apoiados em postes de grande flexibilidade. Atualmente, todos os sistemas de alta tensão são de propriedade, ou seja, comercializados sob direito exclusivo de um determinado fabricante.	(Roadsbridges, 2014)
Defensas Metálicas com poste fraco	Composta por guia de deslizamento e por postes metálicos de grande flexibilidade conectados por parafusos possui funcionamento semelhante aos anteriores, é bastante empregado nas rodovias brasileiras.	(Modern, 2014)

3.1.2. Barreiras Semirrígidas

Os sistemas semirrígidos possui rigidez intermediária e possui bom desempenho em absorver a energia de impacto. A desvantagem é o custo de manutenção e não ser muito eficiente para veículos para veículos pesados. Na Tabela 3.2 são apresentados alguns exemplos.

Tabela 3.2 – Exemplos de barreiras semirrígidos

Tipo	Característica	Exemplo
Box Beam	A resistência desse sistema é obtida através da flexão e de tração combinada com a rigidez da calha. Os postes próximos ao ponto de impacto são projetados para quebrar ou arrancar, distribuindo assim a força de impacto para os postes adjacentes.	(FHWA, 2014)
Defensas Metálicas MGS,	Possui características semelhantes às defensas convencionais, foi desenvolvida para melhorar o desempenho com impacto com veículos de maior massa e maior centro de gravidade.	(Scarlet, 2014)

3.1.3. Barreiras Rígidas

Os sistemas rígidos são mais resistentes e duráveis que os anteriores, o custo com manutenção é praticamente nula, porém são menos eficientes para absorverem a energia de impacto, muitos estudos tentam melhorar esse desempenho com o uso de vínculos que dão maior flexibilidade a esses sistemas, deixando-os mais eficientes. Na Figura 3.2 são apresentados alguns exemplos.

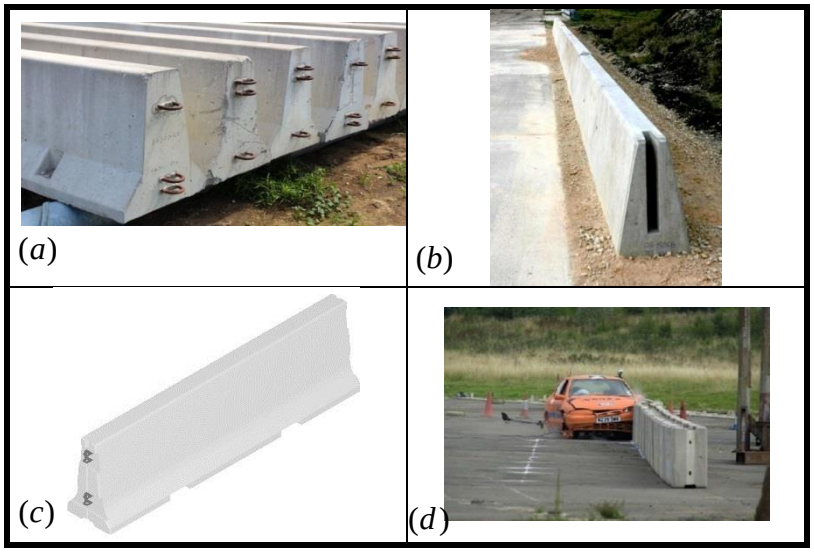


Figura 3.2 - Exemplos de barreiras rígidas: (a) *New Jersey* (Dktanks, 2014), (b) *Single Slop Barrier (Texas A&M,2014)*, (c) *F-Shape Barrier* (WSDOT, 2014) e (d) Barreira de Concreto Vertical (*Safesite Facilities*, 2014).

3.2. Níveis de Contenção

O nível de contenção é a capacidade do sistema para redirecionar um determinado tipo de veículo, considerando sua massa, velocidade e ângulo de impacto, que em termos de energia cinética é a máxima capacidade de carga do sistema. A classificação dos níveis de contenção é extremamente útil para o projeto de rodovias.

A norma europeia EN 1317 estabelece os critérios de testes dos veículos de acordo com sua massa, ângulo de impacto e tipo de veículo (ver Tabela 3.3) e a partir desses critérios classifica os níveis de contenção (ver Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Critério de Ensaio de colisão de veículos adaptado da EN 1371 (2008).

Teste	Velocidade de Impacto (km/h)	Ângulo de Impacto (º)	Massa do veículo (kg)	Tipo de Veículo
TB 11	100	20	900	Automóvel
TB 21	80	8	1.300	Automóvel
TB 22	80	15	1.300	Automóvel
TB 31	80	20	1.500	Automóvel
TB 32	110	20	1.500	Automóvel
TB 41	70	8	10.000	Veículo pesado rígido
TB 42	70	15	10.000	Veículo pesado rígido
TB 51	70	20	13.000	Ônibus
TB 61	80	20	16.000	Veículo pesado rígido
TB 71	65	20	30.000	Veículo pesado rígido
TB 81	65	20	38.000	Veículo pesado articulado

Tabela 3.4 – Níveis de Contenção adaptado da EN 1371.

Nível de contenção	Ensaio de aceitação
	Contenção em ângulo fechado
T1	TB 21
T2	TB 22
T3	TB 41 e TB 21
	Contenção normal
N1	TB 31
N2	TB 32 e TB 11
	Retenção elevada
H1	TB 42 e TB 11
H2	TB 51 e TB 11
H3	TB 61 e TB 11
	Retenção muito elevada
H4a	TB 71 e TB 11
H4b	TB 81 e TB 11

Nota 1: Níveis de contenção num ângulo fechado só deverão ser utilizados em barreiras de segurança temporárias. Também é possível ensaiar as barreiras de segurança temporárias para maiores níveis de contenção

A norma americana NCHRP 350, com critérios semelhantes ao da norma europeia EN 1317, estabelece seis níveis de contenção, conforme é mostrado na Tabela 3.5. Em 2009 a AASHTO, por meio do projeto NCHRP 22-14(02) desenvolveu o MASH, que revisou os critérios de desempenho para as novas características da frota vigente nos EUA, os níveis de testes continuaram os mesmos, porém é incorporada a atualização dos veículos conforme mostrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Níveis de Contenção adaptado do NCHRP Report 350 e MASH.

Nível de teste	**Condições de Teste**					
	NCHRP Report 350 (1993)			**MASH (2009)**		
	Designação Veículo	Velocidade (km/h)	Ângulo de impacto (º)	Designação Veículo	Velocidade (km/h)	Ângulo de impacto (º)
1	820C 700C 2000P	50 50 50	20 20 25	1100C 2270P	50 50	20 25
2	820C 700C 2000P	70 70 70	20 20 25	1100C 2270P	70 70	20 25
3	820C 700C 2000P	100 100 100	20 20 25	1100C 2270P	100 100	20 25
4	820C 700C 2000P 8000S	100 100 100 80	20 20 25 15	1100C 2270P 10000S	100 100 80	20 25 15
5	820C 700C 2000P 36000V	100 100 100 80	20 20 25 15	1100C 2270P 36000V	100 100 80	20 25 15
6	820C 700C 2000P 36000T	100 100 100 80	20 20 25 15	1100C 2270P 36000T	100 100 80	20 25 15

Onde, 0000X: 0000: peso em kg e X: C – *Small Car* (carro de passeio); P – *Pickup Truck* (caminhonete); S – *Single-Unit Van Truck* (caminhão utilitário); V – *Van Trailer/Tractor* (caminhão + semi-reboque baú) T – *Tank trailer/Tractor* (caminhão articulado / caminhão tanque)

As normas americanas e europeias tem se tornado referência ao redor do mundo, sendo adotadas ou adaptadas em muitos países, inclusive no Brasil. Na Tabela 3.6 é feito um comparativo entre as normas NCHRP 350 e a EN-1371, sobre as principais características de cada uma.

Tabela 3.6 – Comparativo dos níveis de contenção adaptado da NBR 15486 (Tabela A.4).

Elemento	NCHRP 350	EN1371
Níveis de ensaio	6	11
Carro	700, 820	900, 1.300, 1.500
Caminhonete	2.000	não
Tipo de ônibus	não	13.000
Tipo de caminhão	8.000S, 36.000V, 36.000T	10.000S, 16.000, 30.000, 38.000
Velocidade (km/h)	50, 70, 100	65, 70, 80, 100, 110
Ângulo	15, 20, 25	8, 15, 20

3.3. Desempenho dos Sistemas de Contenção

De acordo com o NCHRP 350/MASH o desempenho de um sistema de contenção é avaliado a partir de três fatores inter-relacionados: adequação estrutural, o risco ao ocupante e a trajetória do veículo pós-impacto. A EN 1317 (1998) utiliza critérios semelhantes.

3.3.1. Adequação Estrutural

É um dos primeiros fatores a ser avaliado, deve satisfazer a uma série de requisitos que são elencados na NCHRP 350 e no MASH (com algumas alterações) como Diretrizes de Avaliação de Segurança, vide Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Diretrizes de Avaliação de Segurança (adaptação Tabela 5-1 do MASH)

Critérios de avaliação para adequação da estrutura
A. O dispositivo testado deve conter e redirecionar o veículo para uma parada controlada; o veículo não deve penetrar, passar abaixo ou sobrepor a instalação, embora o desvio lateral controlado do dispositivo seja aceitável.
B. O dispositivo testado deve ativar prontamente o modo previsível de ruptura, fratura ou escoamento.
C. O desempenho admissível do dispositivo testado pode ser realizado por redirecionamento, penetração controlada ou parada controlada do veículo.

De acordo com a função do dispositivo, ele deve satisfazer a adequação estrutural de redirecionamento do veículo, parando-o de forma controlada ou permitindo que o veículo avance o dispositivo. Vale salientar que esse critério é referente apenas aos requisitos estruturais relacionados ao impacto.

Para o caso das barreiras de segurança, sendo a EN 1317-2 (1998), a barreira de segurança deve conter e redirecionar o veículo sem registrar a rotação completa dos elementos longitudinais principais do sistema. E ainda, nenhuma parte importante da barreira de segurança

deve soltar-se completamente ou representar um perigo desnecessário para o restante do tráfego, pedestres ou pessoal numa zona de trabalho.

3.3.2. Risco ao Ocupante

A gravidade da colisão é mensurada de acordo com o risco de lesão para os ocupantes do veículo. A EN 1317 (1998) utiliza quatro variáveis na avaliação desse risco, que são baseadas nas acelerações medidas no centro de gravidade do veículo, discutidas a seguir.

O Índice de Gravidade de Aceleração (ASI – Acceleration Severity Index) representa a relação entre a velocidade do veículo no momento do impacto e a gravidade de uma possível colisão de um ocupante do veículo, sentado na proximidade de um determinado ponto, com um objeto próximo.

O ASI é uma função do tempo, sendo calculado pela Eq. (3-1)

$$ASI(t) = \left[(\bar{a}x/\hat{a}x)^2 + (\bar{a}y/\hat{a}y)^2 + (\bar{a}z/\hat{a}z)^2\right]^{1/2} \tag{3-1}$$

Onde,

$\hat{a}x, \hat{a}y$ *e* $\hat{a}z$ são os valores limite para os componentes de aceleração ao longo dos eixos x, y e z do corpo;

$\bar{a}x, \bar{a}y$ *e* $\bar{a}z$ são os componentes de aceleração de um ponto selecionado P do veículo, fazendo média sobre um intervalo de tempo de movimento δ = 50 ms, de modo e são obtidos através da (3-2)

$$\bar{a}x = \frac{1}{\delta}\int_t^{t+\delta} axdt;\ \bar{a}y = \frac{1}{\delta}\int_t^{t+\delta} aydt;\ \bar{a}z = \frac{1}{\delta}\int_t^{t+\delta} azdt \tag{3-2}$$

O índice ASI deve dar a medida da severidade do movimento do veículo para uma pessoa sentada próxima do ponto P durante uma colisão.

As acelerações limite são interpretadas como os valores abaixo dos quais o risco para o passageiro é muito pequeno (apenas ferimentos mínimos, se existentes).

Para passageiros com cintos de segurança, o limite de aceleração normalmente imposto é dados pelos valores da Eq.(3-3).

$$\hat{a}x = 12g,\ \hat{a}y = 9g,\ \hat{a}z = 10g \tag{3-3}$$

Onde,

g = 9,81 m/s²

De acordo com a Eq. (3-3), o ASI é uma quantidade não dimensional, que é uma função escalar do tempo, e de uma forma geral do ponto selecionado do veículo, tendo apenas valores positivos. Quanto mais o ASI excede a unidade, mais risco para o ocupante exceder os limites de segurança; portanto o valor máximo atingido pelo ASI em colisão é assumido como uma única medição de severidade, de acordo com a Eq. (3-4).

$$ASI = máx.[ASI(t)] \tag{3-4}$$

O índice de Velocidade Teórica de Impacto da Cabeça (THIV – *Theoretical head impact velocity*) é utilizado para avaliar a gravidade do impacto para o ocupante do veículo, seu objetivo é indicar o risco de lesão para um ocupante sem sinto de segurança dentro do veículo, procurando recriar os movimentos da sua cabeça. Esse índice considera a cabeça do ocupante como um objeto com possibilidade de movimento livre que, à medida que a velocidade do veículo diminui durante o impacto com um obstáculo, continua a mover-se até embater no interior do habitáculo, com uma determinada velocidade que corresponde a determinado critério.

A Desaceleração Pós-impacto da Cabeça (PHD – *Post-impact head deceleration*) tem como objetivo medir a intensidade da força sobre o ocupante na fase do choque em que este está em contato com a cabine.

Índice de Deformação da Cabina do Veículo (VCDI – *Vehicle Cockpit Deformation Index*) descreve o quanto as superfícies interiores da cabine são deformadas para o interior do veículo em direção aos ocupantes. Essa redução no espaço do compartimento reservado aos ocupantes do veículo está fortemente relacionada com as lesões por eles sofridas.

O VCDI possui sete índices: a – distância entre o painel e o topo da distância traseira, b – distância entre o teto e o assoalho, c – distância entre o assento traseiro e o painel do motor, d – distância entre a parte inferior do painel e o assoalho, e – largura interior, f – distância entre a extremidade inferior da janela direita e a extremidade superior da janela esquerda, g – distância entre a extremidade inferior da janela esquerda e a extremidade superior da janela direita, ver Figura 3.3.

Esses índices indicam a percentagem de redução de sete dimensões interiores, conforme os seguintes índices: 0 – se a redução for inferior a 3%, 1 – se a redução estiver entre 3 a 10% e 2 – se a redução for superior a 10%.

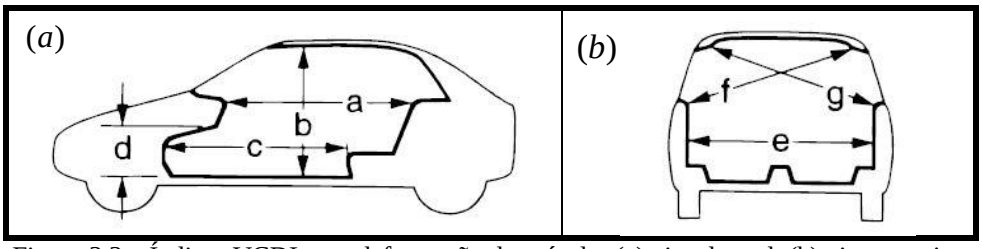


Figura 3.3 – Índices VCDI para deformação do veículo: (a) vista lateral, (b) vista traseira.

A deformação da cabine é ainda indicada pelo lado dos assentos, conforme mostrado na Figura 3.4, onde: AS - todos os assentos, FS - assentos frontais, BS - assentos traseiros, RS - assento da direita, LS - assento da esquerda, RF - frente da direita, LF - frente esquerda, RB - traseira direita e LB - traseira esquerda.

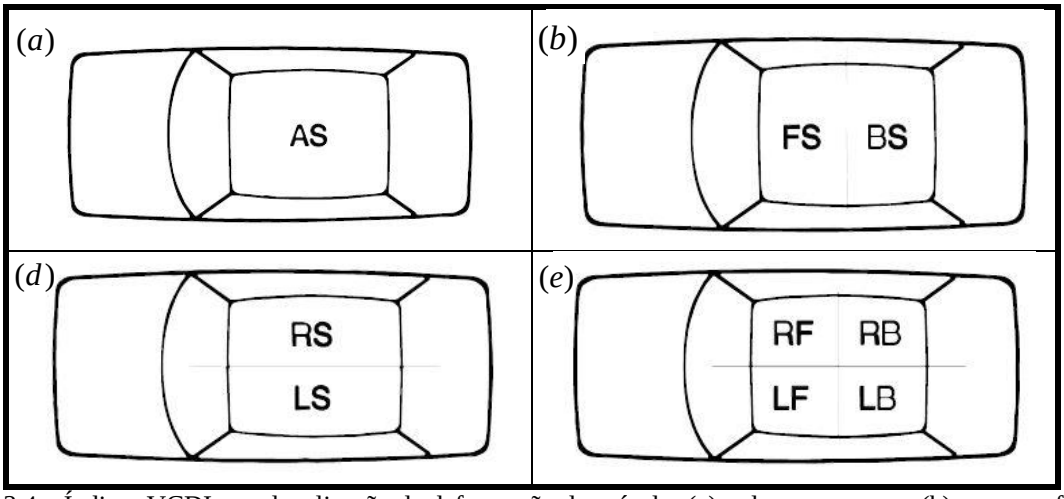


Figura 3.4 – Índices VCDI para localização da deformação do veículo: (a) todos os assentos, (b) assentos frontais e assentos traseiros, (c) assento da direita e assento da esquerda, (d) frente da direita, frente esquerda, traseira direita e traseira esquerda.

A EN 1317 ainda classifica a gravidade do impacto em três classes utilizando THIV ≤ 33 km/h, como mostrado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Níveis de gravidade de colisão de acordo com a EN 1317

Nível de gravidade da colisão	Valores dos índices
A	ASI ≤ 1,0
B	ASI ≤ 1,4
C	ASI ≤ 1,9
Quanto menor o índice ASI maior o nível de segurança.	

Para o *MASH* o risco do ocupante depende em grande parte das características do veículo, como sua resistência ao choque, integridade estrutural do habitáculo dos ocupantes, estofamento, dispositivos de segurança veicular como os *airbags*, etc. Entretanto, é possível mensurar o risco dos ocupantes avaliando as acelerações brutas veiculares, visto que elas são

as principais funções do projeto do dispositivo de segurança e do projeto estrutural externo do veículo de teste.

Os critérios para avaliar os riscos aos ocupantes do veículo como aceitável devem ser seguidos de acordo com as diretrizes de desempenhos dinâmicos, elencados na Tabela 3.9 adaptada do MASH.

Tabela 3.9 – Diretrizes de Avaliação de Segurança (adaptação Tabela 5-1 do MASH)

<table>
<tr><th colspan="2">Critérios de avaliação para o risco do ocupante</th></tr>
<tr><td>D.</td><td>Os elementos independentes, fragmentos ou outros detritos do dispositivo testado não devem penetrar nem apresentar potencial risco de penetrar no habitáculo, ou apresentar indevido perigo para os operários de uma obra.
As deformações ou intrusões no habitáculo não devem estabelecer os limites estabelecidos nessa norma.</td></tr>
<tr><td>E.</td><td>Os elementos independentes, fragmentos ou outros detritos do dispositivo testado não devem obstruir a visão do condutor ou de outra forma causar ao motorista a perda do controle do veículo.</td></tr>
<tr><td>F.</td><td>O veículo deve permanecer na vertical durante e depois da colisão. Os ângulos de capotagem e elevação não devem exceder 75 graus.</td></tr>
<tr><td>G.</td><td>É preferível, embora não essencial, que o veículo permaneça na vertical durante e depois da colisão.</td></tr>
<tr><td>H.</td><td>A Velocidades de Impacto dos Ocupantes – OIV (no apêndice da norma existe um procedimento de cálculo) devem satisfazer os seguintes limites:
<table>
<tr><th colspan="3">Limites de velocidade de impacto dos ocupantes m/s</th></tr>
<tr><th>Dispositivo</th><th>Preferido</th><th>Máximo</th></tr>
<tr><td>Longitudinal e Lateral</td><td>9</td><td>12</td></tr>
<tr><td>Longitudinal</td><td>3</td><td>5</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>I.</td><td>A aceleração reduzida do ocupante (no apêndice da norma existe um procedimento de cálculo) deve satisfazer os seguintes limites:
<table>
<tr><th colspan="3">Limites de velocidade de impacto dos ocupantes G’s</th></tr>
<tr><th>Dispositivo</th><th>Preferido</th><th>Máximo</th></tr>
<tr><td>Longitudinal e Lateral</td><td>15</td><td>20</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>J.</td><td>Esse critério que era opcional no NCHRP 350 foi excluído do MASH que se referia ao uso do Hybrid III Dummy e os seus critérios de uso e limitações.</td></tr>
</table>

Ainda de acordo com o *MASH*, dois fatores devem observados e ser feita clara distinção, o primeiro é a penetração, que é quando um dispositivo de teste penetra no habitáculo do ocupante e o segundo é a intrusão ou deformação, na qual o habitáculo é deformado e reduzido de tamanho, mas nenhuma penetração real é observada. O primeiro caso não deve ser admitido

e quanto ao segundo o grau de deformação deve ser limitado de acordo com os seguintes critérios:

- Teto ≤ 102 mm.
- Para-brisa sem ruptura do forro plástico e deformação máxima de 76 mm.
- Sem quebras de janelas laterais que resultem do contato direto com algum componente estrutural do dispositivo testado (o que exige que as janelas laterais estejam na posição vertical para testes). Nos casos em que as janelas são laminadas, as diretrizes de para-brisa serão aplicadas.
- Roda e zona dos pés ≤ 229 mm.
- Painel lateral frontal ≤ 305 mm
- Área da porta lateral frontal (acima do assento) ≤ 229 mm
- Área da porta lateral frontal (abaixo do assento) ≤ 305 mm
- Área do túnel de transmissão e painel do assoalho ≤ 305 mm

As variáveis adotadas pela EN 1317 para avaliar os riscos dos ocupantes dos veículos são referidas no MASH (2009), entretanto não obriga que sejam usadas apenas as tem como recomendação.

3.3.3. Trajetória Veículo Pós-impacto

A trajetória do veículo após o impacto pode ser tão perigosa quanto o impacto em si, pois tem grande potencial de agravar os riscos dos ocupantes quanto causar outros acidentes na via de trânsito.

Para o comportamento da trajetória do veículo durante o ensaio de impacto a EN 1317 determina que o centro de gravidade do veículo não deva atravessar a linha central do sistema deformado e que apesar de serem aceitos o rolamento, o afastamento e guinadas moderadas, o veículo deve permanecer a prumo durante e após a colisão.

Ela também determina que o veículo deva abandonar a barreira de segurança de modo que suas rodas se encontrem dentro de uma área de saída previamente delimitada, que corresponde a uma linha imaginária B que se inicia do ponto de impacto da barreira a uma distância de **A** mais a largura do veículo mais 16% do seu comprimento, correspondente a uma área conhecida como caixa de saída, Figura 3.5. Para os veículos especificados na Tabela 3.3, as distâncias A e B estão especificadas na Tabela 3.10.

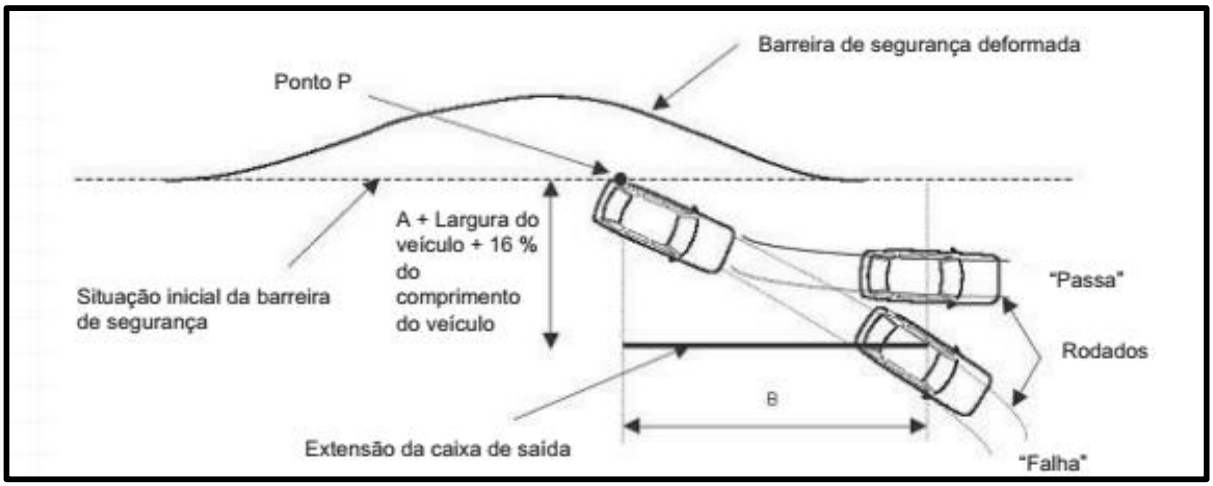


Figura 3.5 – Trajetória do veículo de ensaio, (Sistemas de Retenção Rodoviários, 2010)

Tabela 3.10 – Distância para o critério de caixa de saída de acordo com a EN 1317-2 (2000)

Tipo de veículo	A (m)	B (m)
Automóveis	2,2	10,0
Outros veículos	4,4	20,0

O MASH (2009) utiliza os mesmos critérios de aceitação da EN 1317, para a trajetória do veículo pós-impacto.

3.4. Sistemas de Proteção e Restrição do Ocupantes

Os itens discutidos nessa seção não fazem parte das normas dos sistemas de contenção rodoviários, são pertencentes apenas ao veículo e são padronizados por normas automotivas, que não serão discutidas nesse trabalho. Sendo assim, serão apresentados aqui apenas como complemento de informação aos critérios dos níveis de segurança e risco ao ocupante abordados na EN-1317.

Os sistemas de contenção rodoviários por si só não ineficientes se o veículo não tiver os sistemas mínimos de proteção e restrição dos ocupantes. Os testes de impacto estipulados para pelo EN 1317 e o NCHRP 350/MASH são baseados em veículos padrões, logo não são capazes de cobrir todos os modelos de veículos disponíveis no mercado. Assim, é necessário que os projetistas de veículos compatibilizem seus projetos de forma a se adequar às características dos veículos de testes.

Todos os veículos são obrigatórios possuir requisitos mínimos para a proteção dos ocupantes do veículo. Na Figura 3.6 são apresentado os principais dispositivos para a proteção e restrição dos ocupantes para minimizar os efeitos do impacto na ocasião de uma acidente.

O primeiro item (Figura 3.6(a)) é o habitáculo que deve ser feito de material resistente e que seja capaz de ter uma deformação controlável de forma a absorver a energia do impacto,

sem no entanto comprometer a segurança dos ocupantes do veículo, o segundo item (Figura 3.6(b)) é o cinto de segurança que tem a função de restrição do ocupante no caso de desaceleração brusca, seguidamente dos airbags (Figura 3.6(c)) que possui a função de absorver choques de partes do corpo do ocupante, principalmente a cabeça e por último o encosto da cabeça (Figura 3.6(d)) que possui a função de prevenir lesões no pescoço.

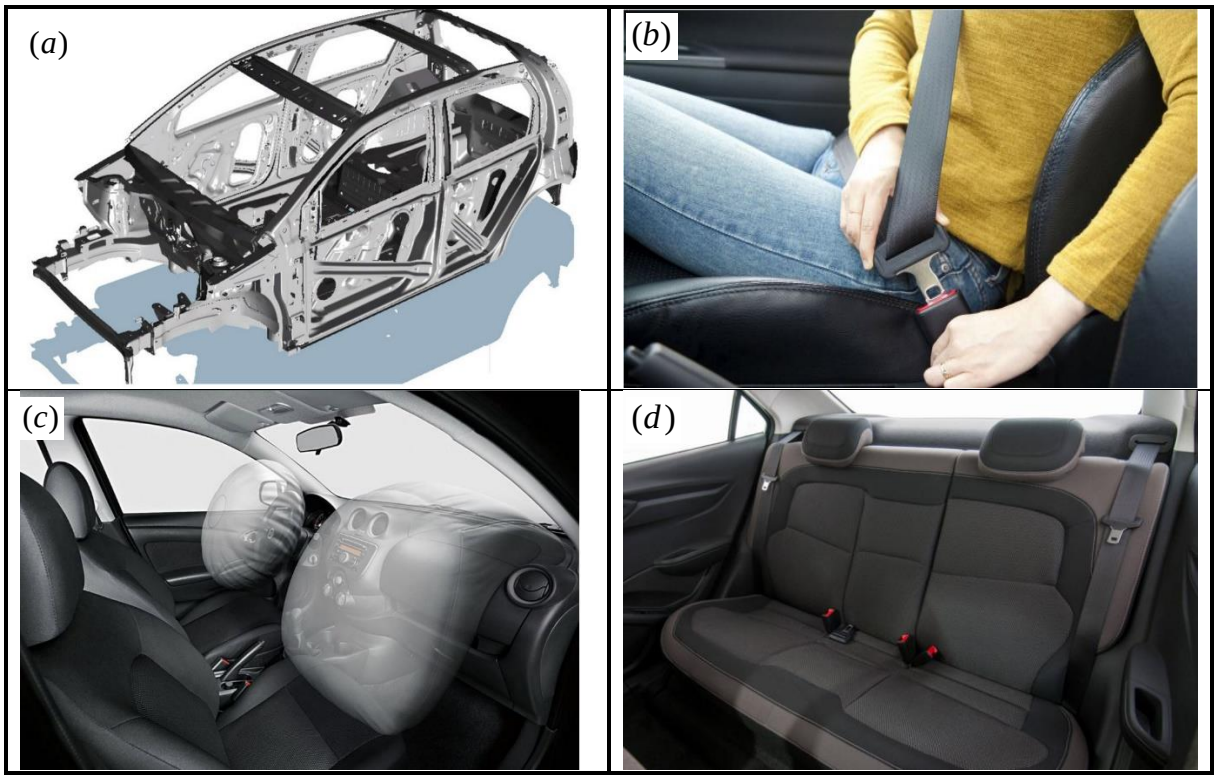


Figura 3.6 – Dispositivos de proteção ao ocupante (Carros.ig, 2016): (a) habitáculo com barras laterais, (b) cintos de segurança, (c) *airbags*, (d) encosto da cabeça.

3.4.1. Cinemática do Trauma

Para compreender melhor a importância dos dispositivos de proteção ao ocupante será feita uma breve discussão sobre o trauma associado ao uso correto ou ao não uso desses dispositivos.

O cinto de segurança, como já mencionado é um sistema de restrição e a sua função é não permitir a projeção do passageiro para fora do veículo e impedir que partes do corpo colida com partes internas do veículo. Na Figura 3.7(a) é mostrado alguns dos possíveis traumas que o condutor pode sofre durante um acidente caso não esteja usando o cinto de segurança. Nota-se que durante o impacto o corpo tende a se chocar com as partes internas do veículo, causando diversos tipos de traumas. Na Figura 3.7(b) é mostrado o correto uso do cinto e na Figura 3.7(c) os possíveis traumas ocasionados pelo mau uso do cinto.

O uso ou não do cinto de segurança é tratada pela EN 1317 (1998) através do índices ASI e THIV, já discutidos anteriormente.

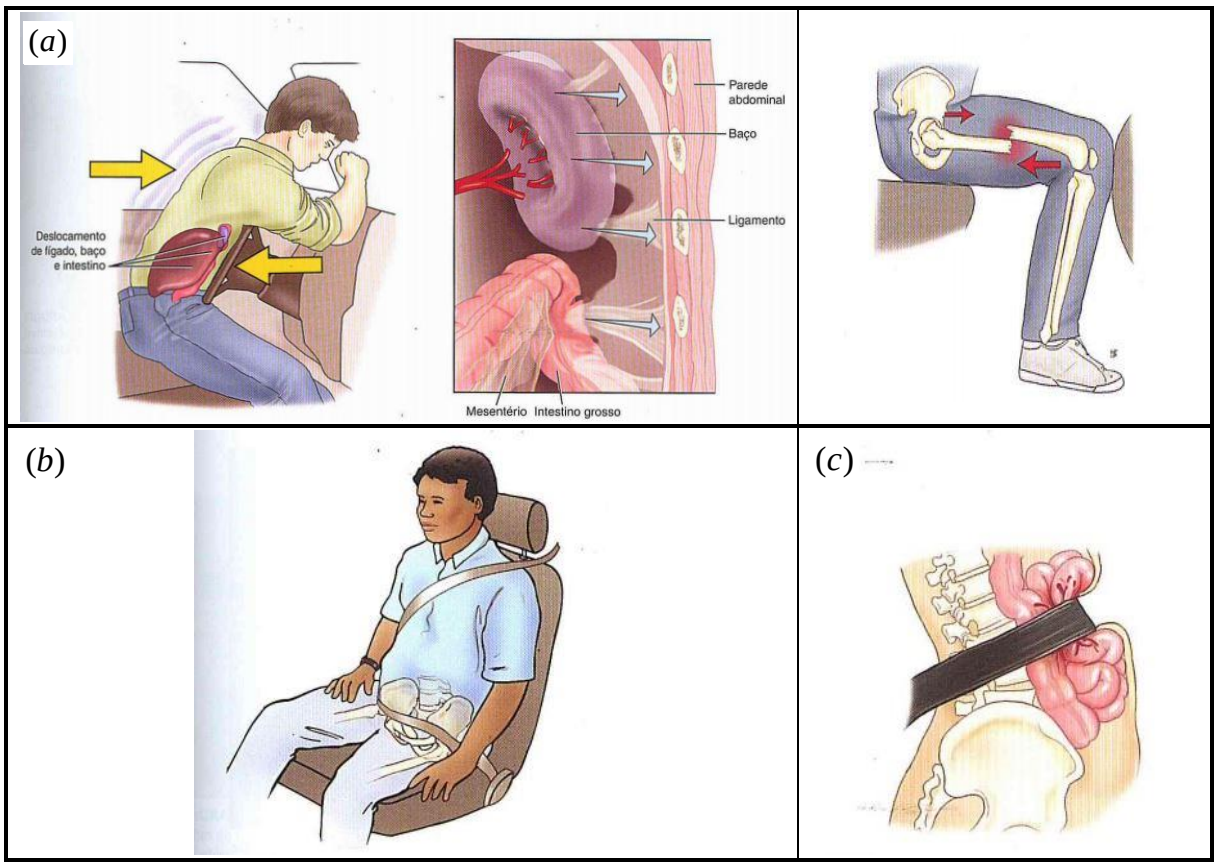


Figura 3.7 – Comparativo entre o uso e o não uso do cinto de segurança (PHTLS, 2012): (a) Sem o uso do cinto de segurança, (b) Uso correto do cinto de segurança, (c) Uso incorreto do cinto de segurança.

O uso correto do encosto da cabeça, Figura 3.8(a), tem a função de prevenir uma possível lesão no pescoço. O seu uso incorreto, Figura(b), poderá levar a cabeça ser hiperestendida sobre a porção superior da estrutura, o que aumenta o risco de lesões no pescoço.

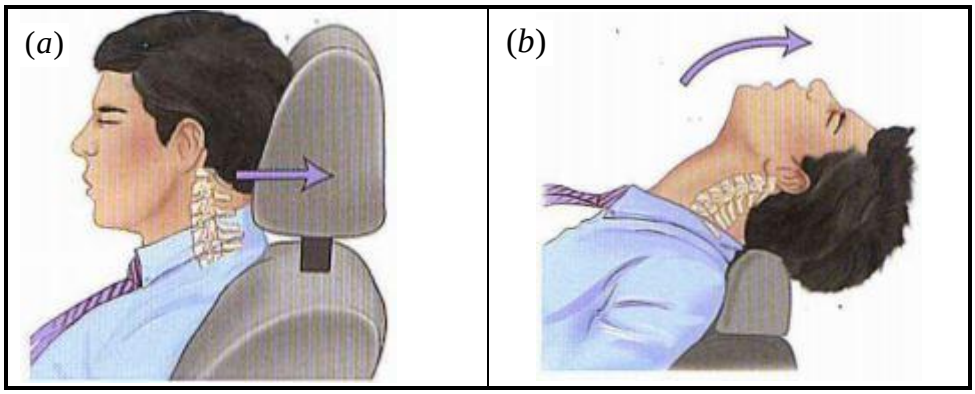


Figura 3.8 – Comparativo entre o uso do encosto da cabeça (PHTLS, 2012): (a) Uso correto, (b) uso incorreto.

Duas simulações numérica com uso de dummies foram realizadas com o propósito de ilustrar os efeito discutidos nessa seção. A primeira foi utilizando o uso de cinto de segurança

e *airbag* (Figura 3.9(a)), e a segunda sem o cinto de segurança apenas com *airbag* (Figura 3.9(b)).

A simulação mostra claramente os pontos de contato entre as partes do dummy e o veículo, bem como uma possível formação de trauma na vértebra do condutor, para o caso sem o uso do cinto de segurança, ver Figura 3.9(b).

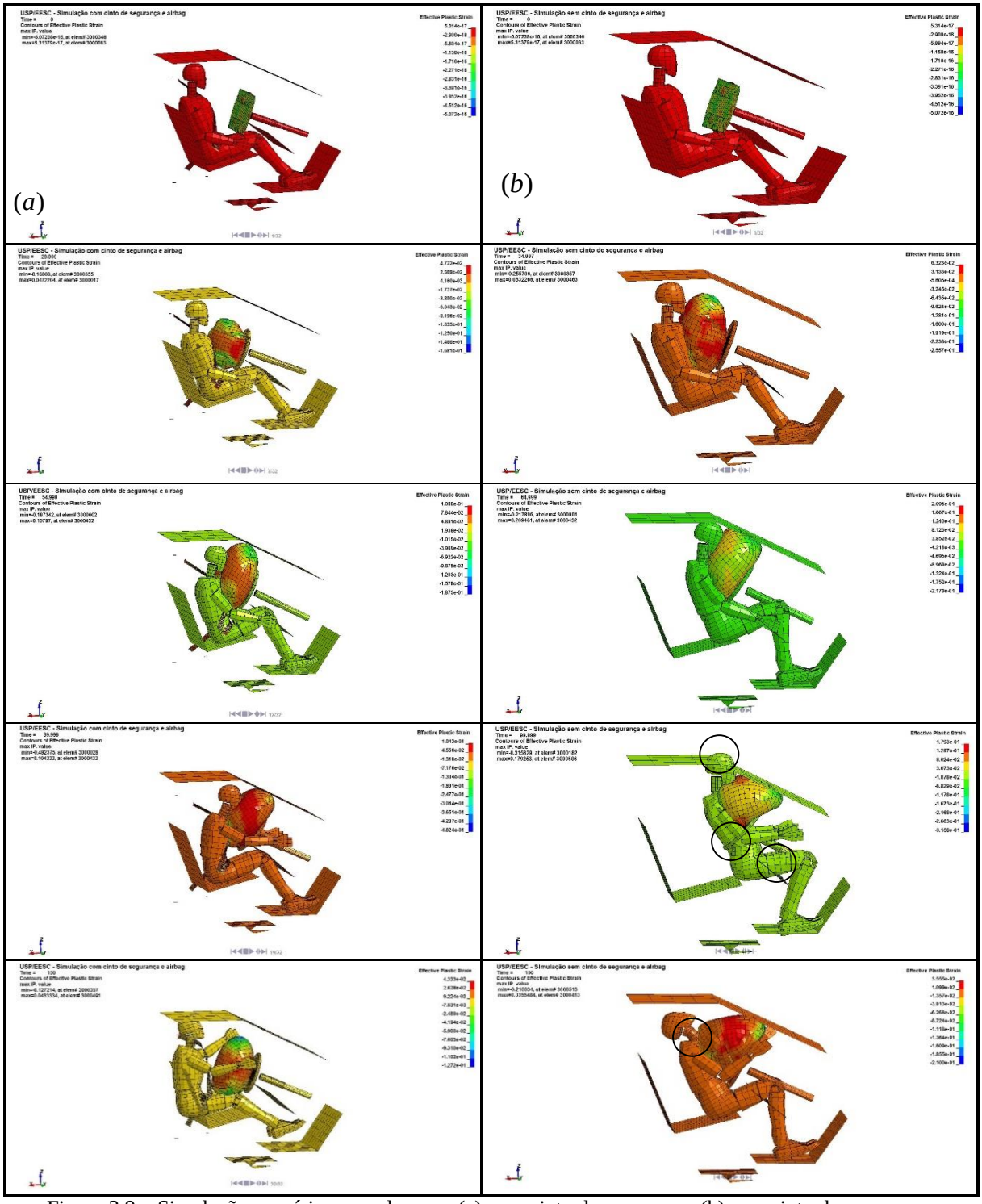


Figura 3.9 – Simulação numérica com dummy: (a) com cinto de segurança, (b) sem sinto de segurança.

CAPÍTULO IV
PROGRAMA EXPERIMENTAL

A análise da eficiência estrutural de barreiras de segurança por meio de experimentos, comumente é feita em duas etapas, sendo a primeira por meio de experimentos estáticos e posteriormente por experimentos dinâmicos. Nesse trabalho, apenas o experimento estático será contemplado.

O objetivo dos ensaios foi analisar o comportamento estrutural dos protótipos, com ênfase no comportamento tanto do concreto quanto dos conectores. A ideia principal dos ensaios foi aplicar uma força transversal no topo da barreira central, conforme procedimentos da Norma Americana *Load-and-Resistance Factor Design* (LRFD Bridge, 2011), já discutidos no item 2.1, para então avaliar seu deslocamento, estabilidade, as deformações e possíveis falhas tanto do concreto quanto dos conectores. Os critérios dos ensaios e os resultados serão discutidos a seguir.

4.1. Descrição dos protótipos

O programa experimental consistiu na análise de dois conjuntos de protótipos de barreiras pré-fabricadas New Jersey, utilizando dois modelos de conectores. O primeiro protótipo com conector tipo pino, referido aqui como conector Nova York ou BNJ-NY (Figura 4.1(a)), por ter sido homologado para o Departamento de Transporte de Nova York, foi baseado em Howard *et. al.* (2009) e Lechtenberg et. al. (2010) e o segundo com conector com chapas aparafusadas, baseado em Buth (2003), referido aqui como conector Montana ou BNJ-M (Figura 4.1(b)), em decorrência de sua homologação ter sido realizada para o Departamento de Transporte de Montana.

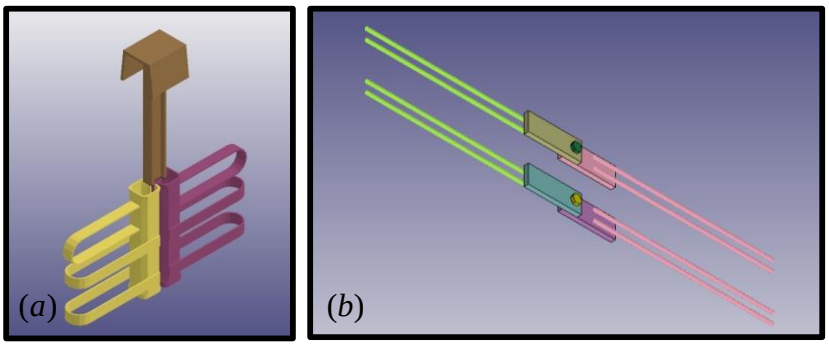


Figura 4.1 – (a) Conector BNJ-NY, (b) Conector BNJ-M

Cada conjunto é composto de três módulos de barreira New Jersey de 810 mm de altura. Cada um módulo foi construído com comprimento de 2,00 m, ver Figura 4.2(a) e Figura 4.2(b), todos os detalhes construtivos estão descritos no Anexo B.

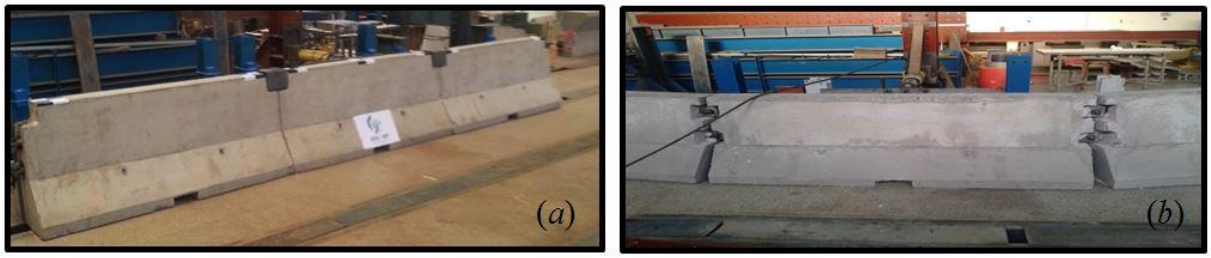


Figura 4.2 – (a) Barreira com conector BNJ-NY, (b) Barreira com conector BNJ-M

4.2.Caracterização dos Materiais

4.2.1. Conectores

Os conectores BNJ-NY foram feitos a partir de tubos quadrados sem costura ASTM A-500 de dimensões 100x100x12,7 mm, usinados a frio para a abertura do encaixe do pino e chapas chatas ASTM A-36 de 12,5 mm de espessura, dobradas a frio.

As características de resistência do aço do tubo, fornecidas pelo distribuidor, foram de 533 MPa para a tensão de escoamento e 664 MPa para tensão de ruptura com alongamento de 30%, e para as barras chatas 260 MPa de limite de escoamento e 510 MPa de limite de resistência, com um alongamento de 20%.

Figura 4.3 – (a) Padrão de encaixe do pino conector BNJ-NY, (b) Vista superior do conector BNJ-M

Os conectores BNJ-M foram feitos a partir de chapas chatas ASTM A-36 de 25 mm de espessura, nas quais receberam usinagem a frio para a abertura dos encaixes de parafusos ASTM A-325 de 25 mm; a essas chapas foram soldadas barras ASTM A-36 de 19 mm.

Figura 4.4 – Padrão de encaixe do conector BNJ-M

4.2.2. Armaduras

Para os dois modelos de protótipos, adotou-se o mesmo tipo de armaduras, que foram adaptadas de Lechtenberg et. al. (2010), em virtude de limitações inerentes aos fornecedores locais, não foi possível construir a mesma geometria indicada na referência original.

Para as barras longitudinais foram usadas barras de aço CA-50 de 19,00 mm e para os estribos barras CA-50 de 12,50 mm, conectados por arames recozidos. A Figura 4.5 apresenta o arranjo estrutural das armaduras e o respectivo modelo já construído. Mais detalhes podem ser consultados no Anexo B.

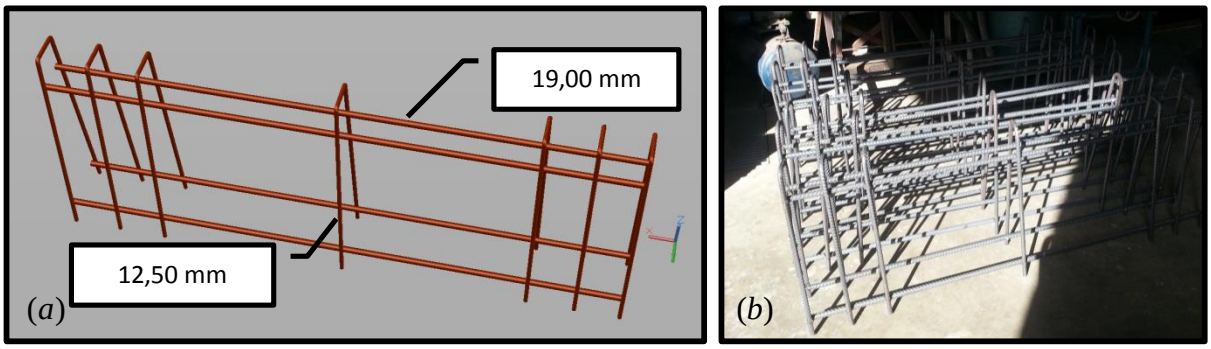


Figura 4.5 – Armaduras dos protótipos das barreiras: (a) representação gráfica, (b) modelos construídos.

Com relação às propriedades mecânicas do aço, apenas as tensões à tração foram obtidas para os diâmetros de barras utilizados, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6892-1:2013, chegando-se aos valores de 577,75 MPa e 656,36 MPa para as tensões máximas do aço CA-50 de 12,50 mm e da barra de 19,00 mm, respectivamente.

4.2.3. Concreto

Devido ao volume necessário de concreto ultrapassar a capacidade de produção do Laboratório de Estruturas, optou-se por adquirir concreto usinado de resistência característica de 35 MPa, como a quantidade de formas era limitada, foi necessário fazer duas concretagens diferentes. As formas utilizadas na concretagem foram confeccionadas em madeira, devido ao menor custo de fabricação, conforme mostrado na Figura 4.6(a).

As etapas de fabricação desde o recebimento do material com o controle do teste de abatimento à desforma são mostradas na Figura 4.6 de (b) a (d).

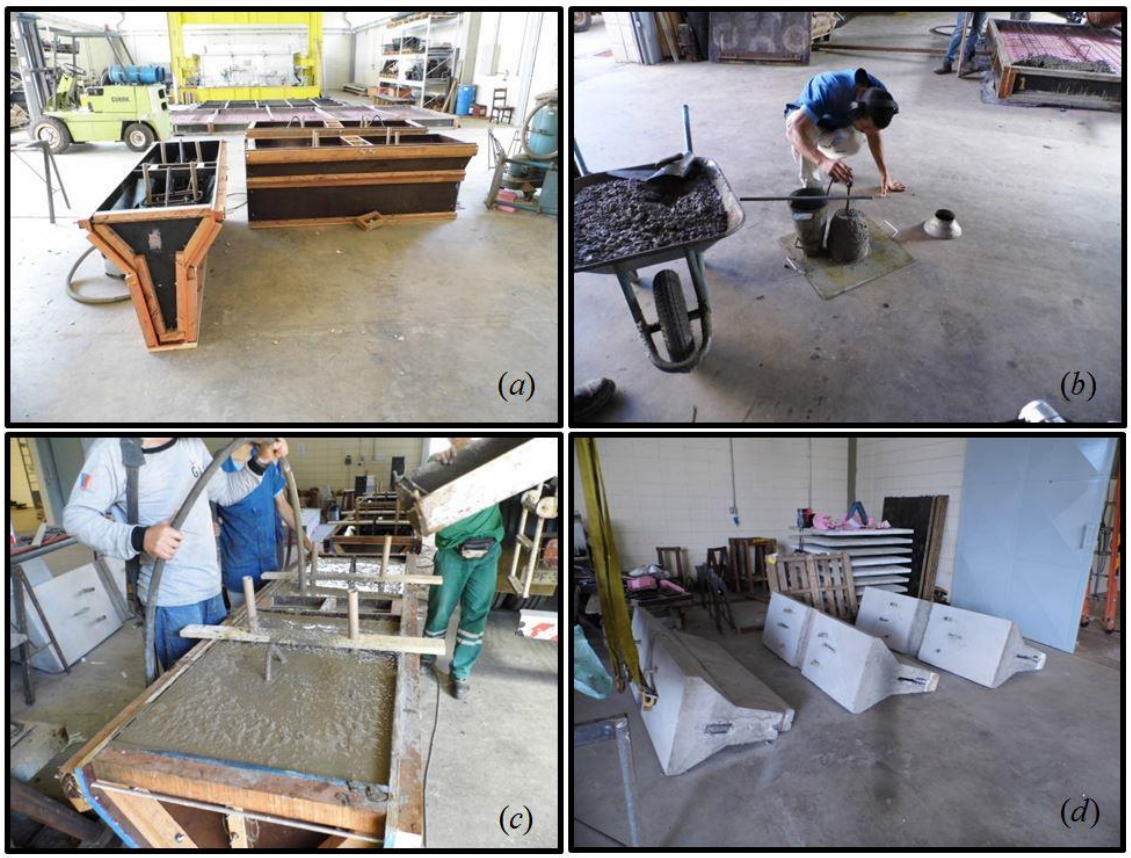


Figura 4.6 – Etapas do processo de fabricação das barreiras: (a) Fôrmas, (b) teste de abatimento do concreto, (c) concretagem e (d) desforma

Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm. Este ensaio foi realizado segundo a norma ABNT NBR 5739:2007, aplicando-se a carga com controle de velocidade de 2,4kN/s até o ponto de ruptura (ou ponto de força máxima). Os valores das resistências médias à compressão dos corpos-de-prova foram calculados de acordo com a norma ABNT NBR 7215:1996.

Os ensaios de compressão do concreto mostraram uma resistência média de 29,45 MPa para o lote usado nas barreiras BNJ-NY e o segundo de 45 MPa para as barreiras BNJ-M.

4.3. Descrição dos Ensaios

Ao todo foram realizados três ensaios: um conjunto BNJ-NY, um conjunto BNJ-M e um de ruptura com uma barreira unitária BNJ-M. Para os dois primeiros ensaios, cada conjunto de três barreiras, foi interligado com o auxílio de conectores específicos do conjunto e suas extremidades presas por meio de barras chatas, onde uma das extremidades estava presa no pórtico de reação, e na outra extremidade, que está em contato com a barreira, a barra estava vinculada a um parafuso que foi fixado à laje de reação, de modo a impedir eventuais translações e permitir apenas as rotações em torno do eixo Z.

Para os três ensaios, as barreiras estavam simplesmente apoiadas sobre a laje de reação, atuando apenas o seu peso próprio e o atrito entre as barreiras e o piso, os coeficientes de atrito não foram considerados nos ensaios. Na Figura 4.7 é mostrado o cenário das duas primeiras simulações.

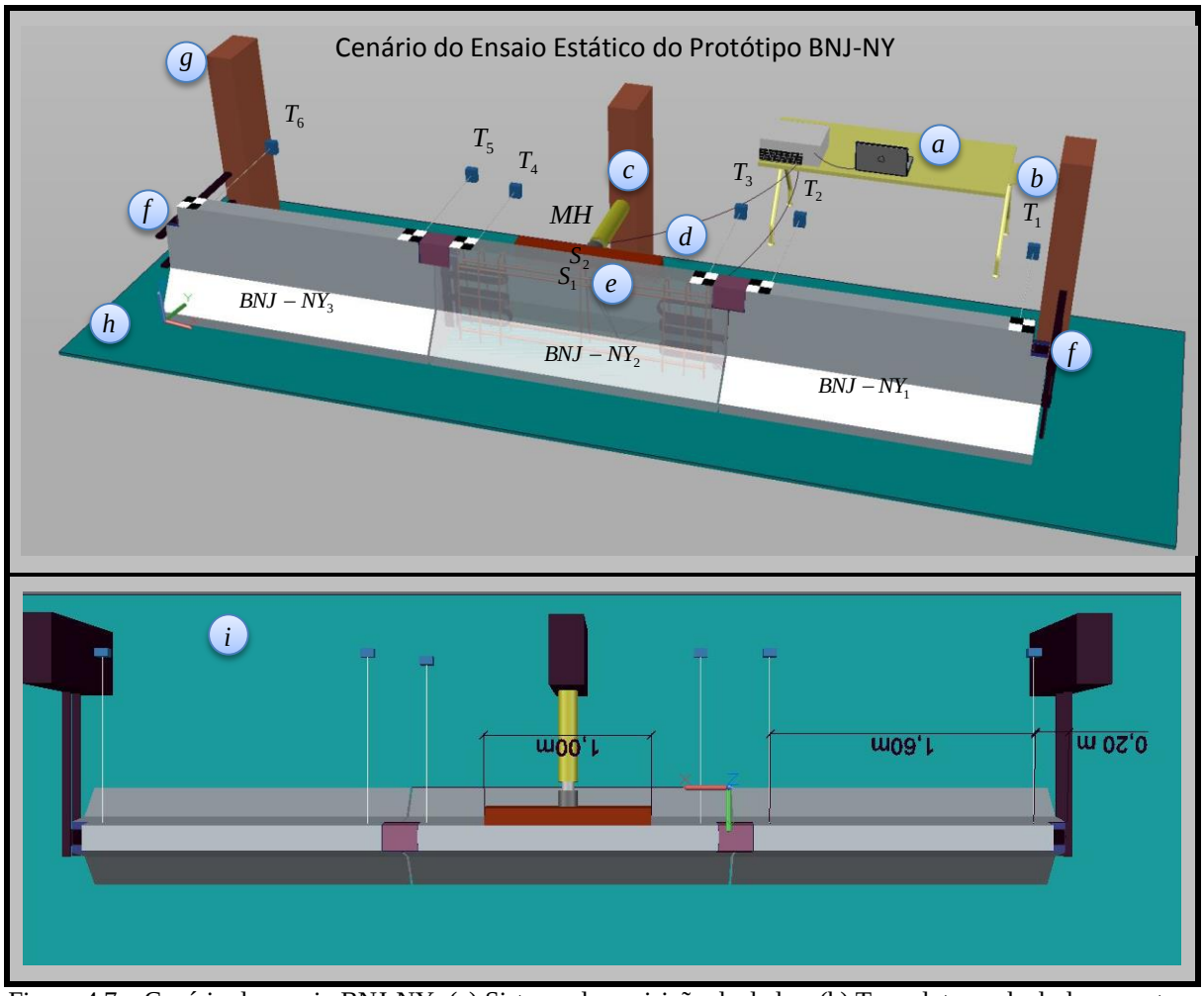


Figura 4.7 – Cenário do ensaio BNJ-NY: (a) Sistema de aquisição de dados, (b) Transdutores de deslocamento – T_1 a T_6, (c) Macaco hidráulico com célula de carga, (d) Barra de transmissão de esforços, (e) Extensômetros colados na armadura. (f) Dispositivos de engaste do protótipo, (g) pórticos de reação, (h) Laje de reação e (i) vista superior.

O terceiro ensaio que consistiu de apenas um módulo BNJ-M, teve suas extremidades restringidas para que não sofressem rotações e nem deslocamentos, de forma que pudesse ser rompido. A instrumentação foi similar a anterior, sendo que foi adicionado mais um transdutor, posicionado na parte central da barreira e os demais a 250 mm das extremidades e 100 mm medidos a partir do topo.

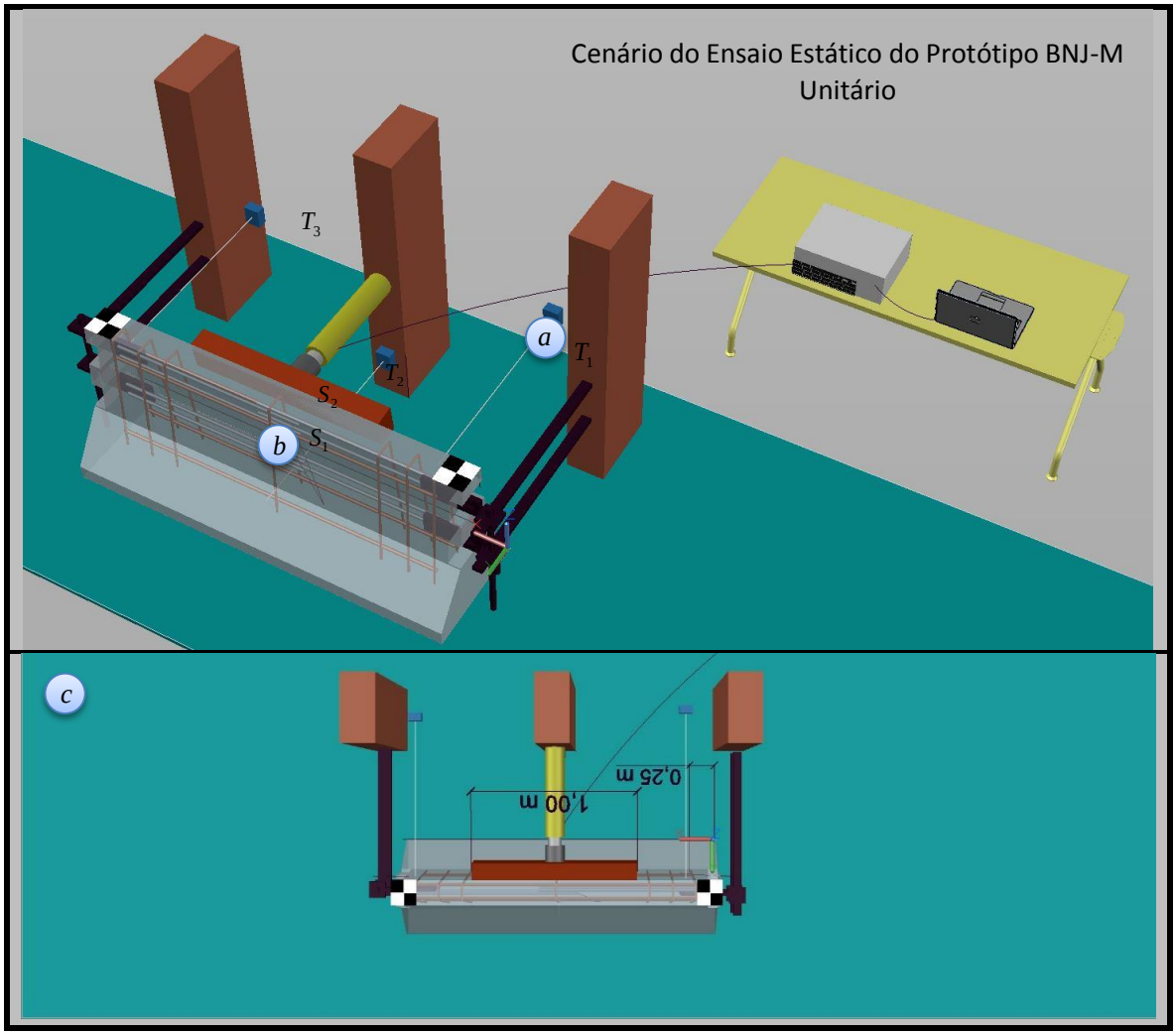


Figura 4.8 – Cenário do ensaio de um módulo BNJ-M: (a) Posicionamento dos transdutores, (b) Extensômetros e (c) vista superior.

4.3.1. Instrumentação

As barreiras foram instrumentadas de modo que fosse possível registrar o carregamento transmitido no topo da barreira central, bem como o deslocamento de todo o conjunto. Pelo fato do sistema exibir um deslocamento excessivo, optou-se pelo o uso de transdutores de

deslocamento por fio com curso de 1270 mm com uma resolução de 0,2 mm da marca Vishay, modelo CDS-50.

Cada barreira recebeu dois transdutores (presos a 200 mm de suas extremidades para o modelo NJ-NY e 250 mm para o modelo NJ-M, com altura de 100 mm medidos a partir do topo de cada barreira) interligados ao sistema de aquisição de dados Vishay modelo System 5.000 conforme mostrado na Figura 4.7(b).

Para imprimir o carregamento do topo da barreira foi utilizando um cilindro hidráulico da marca Enerpac RC5013, com capacidade de 500 kN e curso máximo de 330 mm. A escolha do equipamento foi devido ao seu curso, uma vez que o laboratório não possuía outro equipamento com um curso maior.

Foi conectada ao cilindro hidráulico uma célula de carga ELK DCC 22-50TD com a capacidade compatível com a do cilindro, também de 500 kN. A célula de carga por sua vez estava conectada ao sistema de aquisição para capturar as cargas impostas pelo cilindro e a barra de reação, conforme mostrado na Figura 4.7(c) e (d) e na Figura 4.9(b).

Quanto à instrumentação das barras da armadura, apenas as barras longitudinais superiores foram instrumentadas, recebendo um extensômetro (S_1 e S_2) posicionados na metade de cada barra, conforme mostrado na Figura 4.7(e), Figura 4.8(b) e Figura 4.9(a).

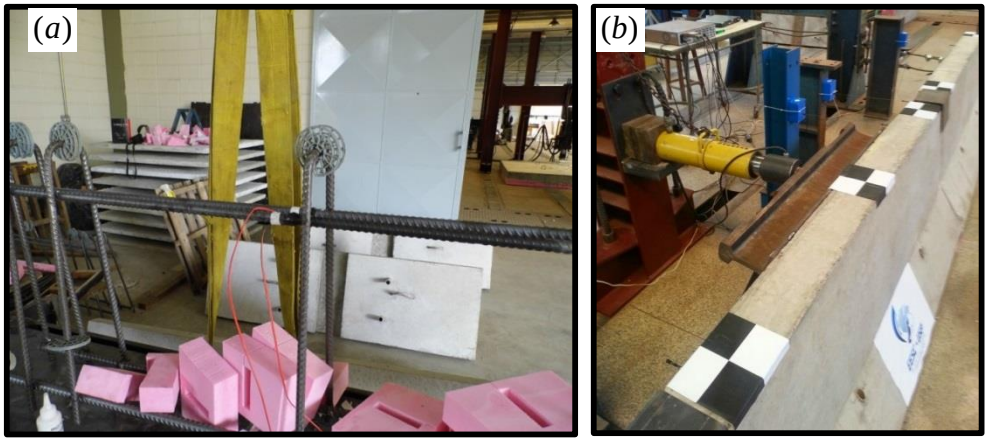


Figura 4.9 – (a) Extensômetros das barras longitudinais, (b) Posicionamento da barra de reação e da célula de carga.

4.4. Resultados dos Ensaios

Os resultados dos três ensaios estáticos: o primeiro com um conjunto de protótipo BNJ-NY, o segundo com o conjunto BNJ-M e por último um ensaio de ruptura de um bloco BNJ-M, serão apresentados e discutidos na sequência.

4.4.1. Protótipo BNJ-NY

A Figura 4.10 apresenta a sequência do ensaio estático BNJ-NY. Devido à limitação do curso do cilindro hidráulico, o ensaio foi realizado em duas etapas. A primeira é mostrada na Figura 4.10(a), onde o cilindro percorreu todo o seu curso, sem romper nenhuma das barreiras ou causar significativos danos, ou mesmo danificar alguns dos seus conectores. Na segunda etapa, optou-se por colocar um apoio entre a barra de transmissão de esforços e o cilindro, de forma que se pudesse ampliar o curso do cilindro, como é mostrado na Figura 4.10(b). Para esse caso, foi possível perceber alguns danos significativos nas barreiras, sem, entretanto, alcançar sua ruptura, conforme era esperado. Como já não era possível incrementar mais o ganho de curso do cilindro hidráulico, o ensaio foi interrompido.

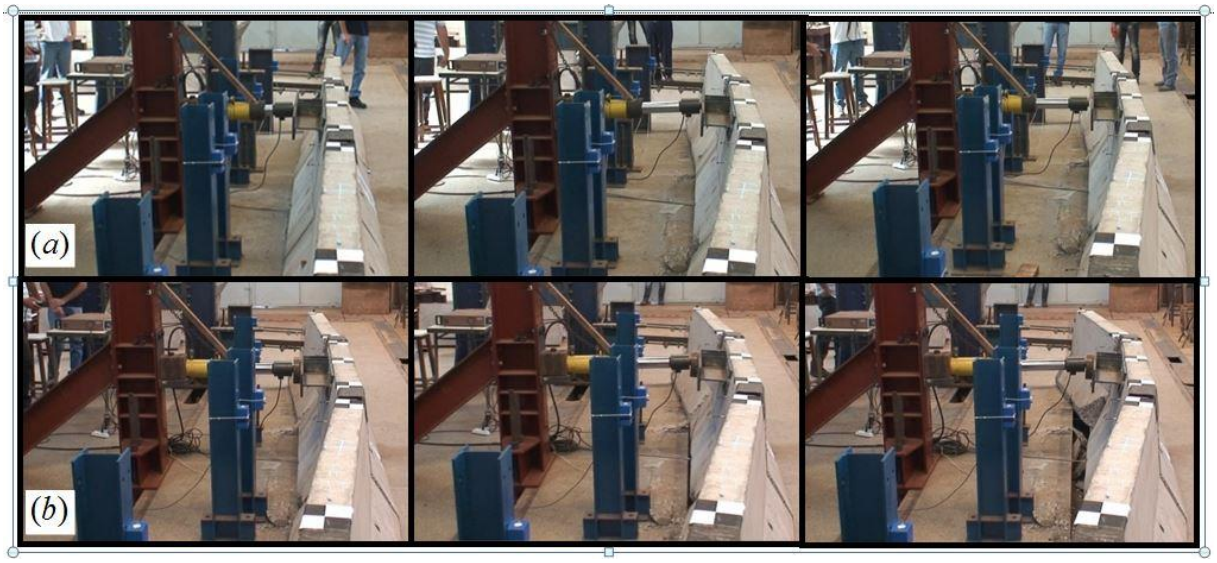


Figura 4.10 – Etapas do Ensaio BNJ-NY: (a) Primeiro Carregamento, (b) Segundo Carregamento.

Na Figura 4.11 é mostrado o gráfico força *versus* deslocamento dos seis transdutores fixados nas barreiras. Para o carregamento máximo chegou-se ao valor de 114,47 kN. Já para os deslocamentos máximos os valores obtidos foram 46,21 mm e 47,31 mm (para os transdutores mais próximos dos apoios - BNJ-NY1 T[1] e BNJ-NY3 T[2]); 212,13 e 219,84 mm para os transdutores das barreiras 1 e 3 (mais próximos da barreira central - BNJ-NY1 T[2] e BNJ-NY3 T[1]) e, finalmente, 252,29 mm e 263,84 mm (barreira central - BNJ-NY2 T[1] e BNJ-NY2 T[2]).

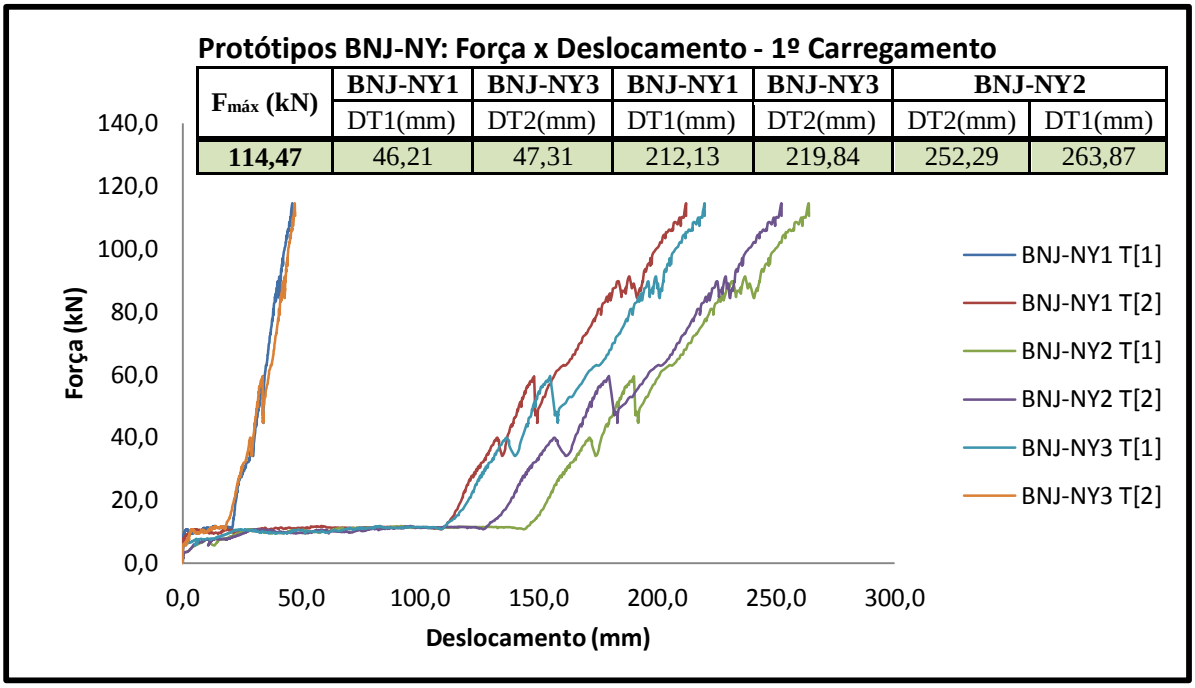


Figura 4.11 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-NY no 1.º Carregamento.

Para o segundo carregamento, conforme mostrado na Figura 4.12, chegou-se ao valor de um de 165,24 kN para a força máxima e deslocamentos de 35,83 e 29,15 mm (para os transdutores mais próximos dos apoios - BNJ-NY1 T[1] e BNJ-NY3 T[2]); 189,57 e 118,98 mm para os transdutores das barreiras 1 e 3 (mais próximos da barreira central - BNJ-NY1 T[2] e BNJ-NY3 T[1]) e, por fim, 210,69 e 141,30 mm (barreira central - BNJ-NY2 T[1] e BNJ-NY2 T[2]).

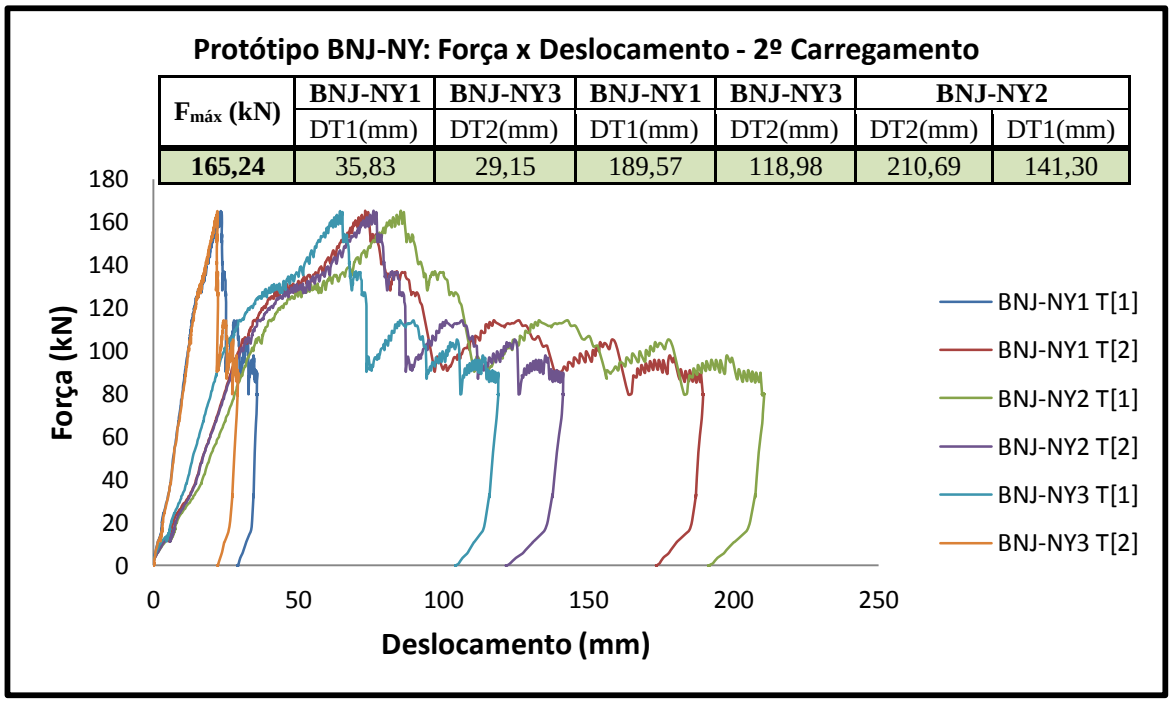


Figura 4.12 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-NY no 2.º Carregamento.

As deformações medidas pelos extensômetros S_1 e S_2, colocados na metade de cada barra longitudinal da armadura da barreira central (ver Figura 4.7(e), Figura 4.8(a) e Figura 4.9(a)), é mostrado na Figura 4.13. O primeiro carregamento, no valor de 114,47 kN, Figura 4.12 resultou em uma deformação máxima de 1,51‰ no extensômetro S_1 e 0,8‰ no extensômetro S_2. Para o segundo carregamento, no valor máximo de 165,24 kN, resultou em deformações da ordem de 1,77‰ no extensômetro S_1 e 1,02‰ no extensômetro S_2, Figura 4.13 e na Figura 4.14, respectivamente.

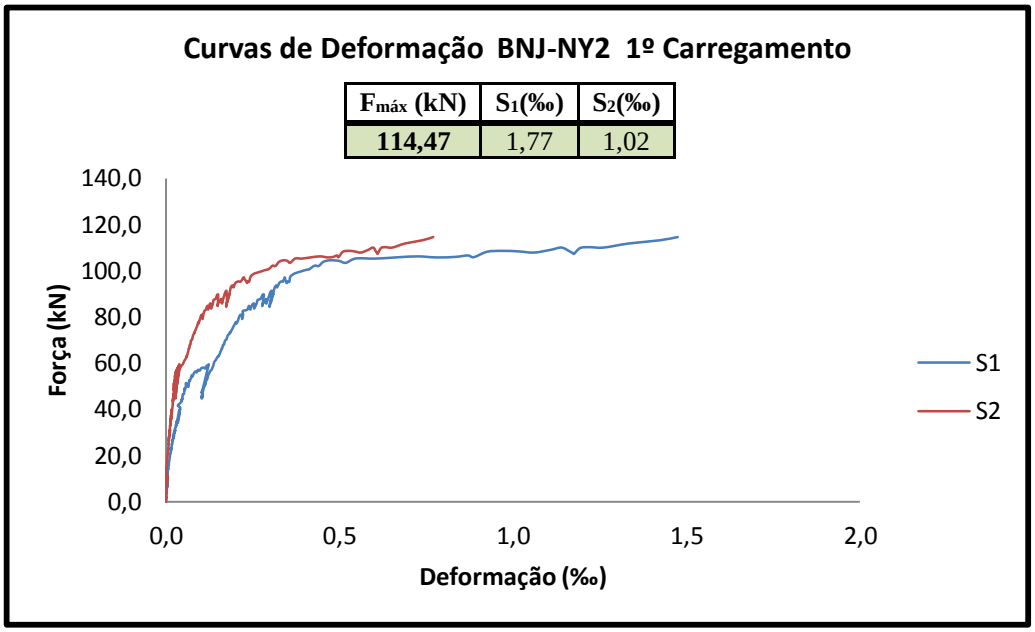


Figura 4.13 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-NY2 para o 1º carregamento.

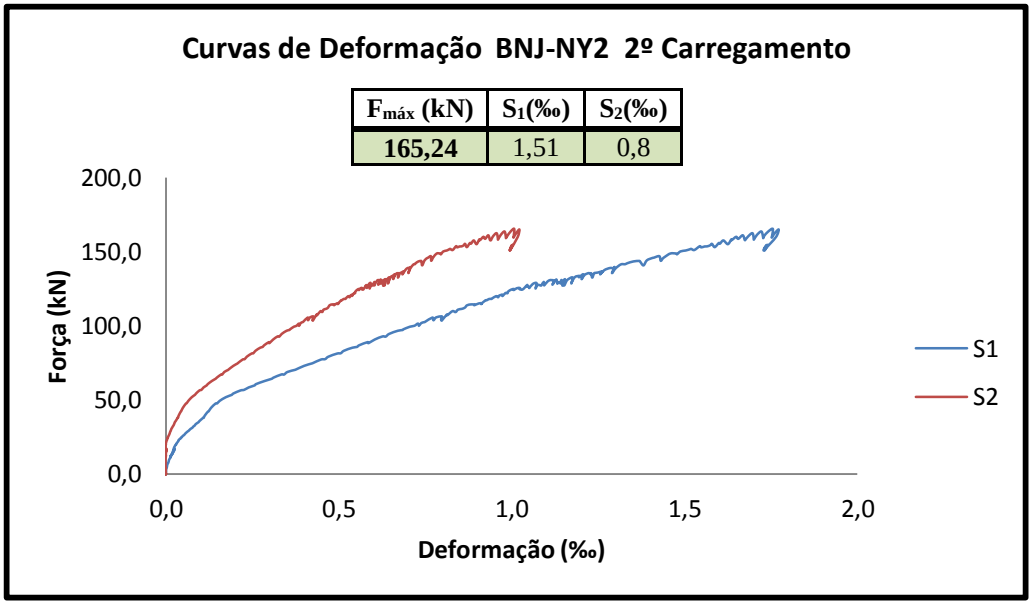


Figura 4.14 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-NY2 para o 2º carregamento.

Na Figura 2.15 são mostrados os danos sofridos pelas barreiras após o ensaio, em (a) e (g) é apresentado o deslocamento máximo do conjunto obtido no ensaio, em (b), (c) e (d) é mostrado a ruptura das extremidades inferiores ocasionado pelo contato entre as barreiras, em (e) o desprendimento do conector do concreto, em (f) a ruptura das soldas dos pinos e finalmente em (g), (h) e (i) as fissuras ocasionadas pelo ensaio.

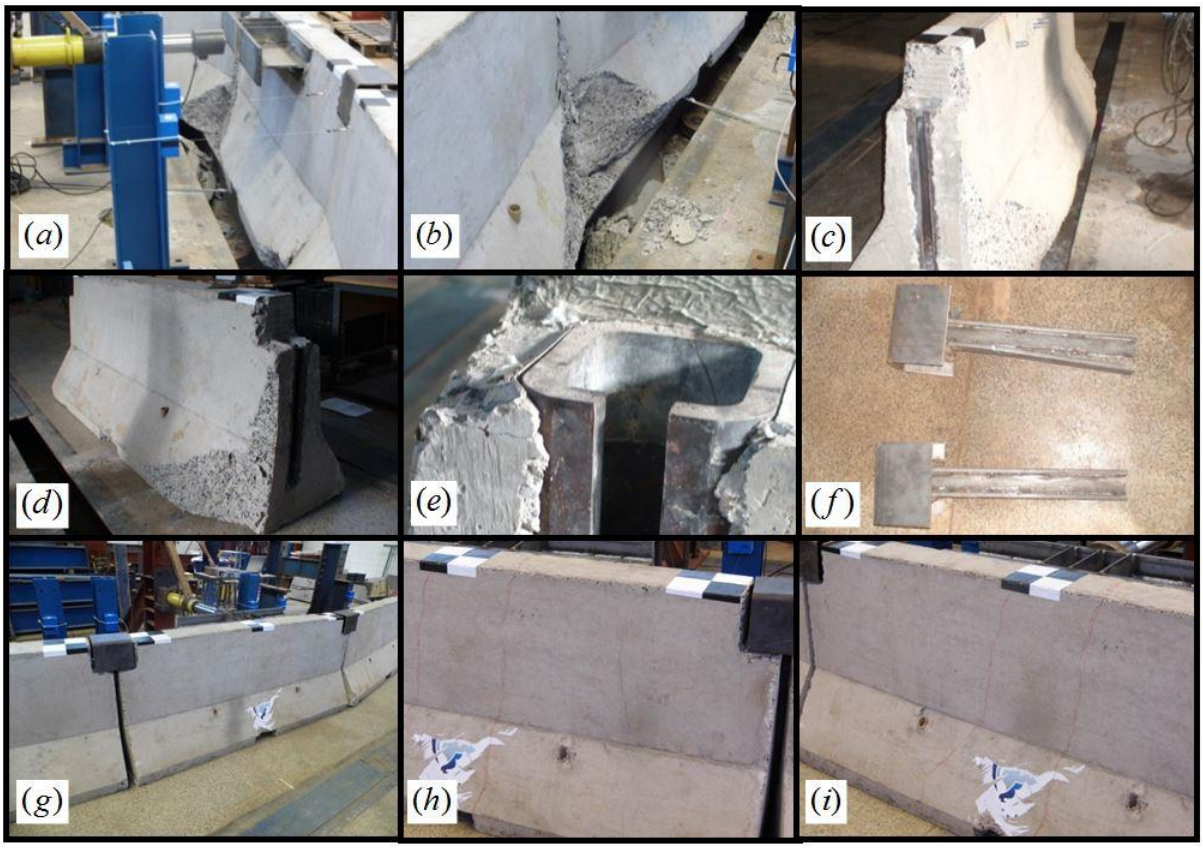


Figura 4.15 – Estado Final do Ensaio BNJ-NY: (a) Deslocamento máximo obtido no ensaio, (b) Dano ocasionado pelo contato entre as extremidades inferiores da barreiras, (c) e (d) Ruptura das extremidades inferiores, (e) Desprendimento do conector, (f) Ruptura das soldas dos pinos, (g), (h) e (i) fissuras ocasionadas pelo ensaio.

4.4.2. Protótipo BNJ-M

A sequência do ensaio estático BNJ-M é mostrada na Figura 4.16. Similarmente ao ensaio BNJ-NY, foi realizado em duas etapas, para melhor aproveitamento do curso do cilindro hidráulico, Figura 4.16(a) e Figura 4.16(b). A particularidade desse ensaio foi que devido ao engaste dos conectores laterais não ter sido realizado corretamente, acarretou em um deslocamento do sistema maior que a capacidade do cursor do cilindro hidráulico, não sendo possível obter tensões que pudessem causar danos significativos nas barreiras. Em decorrência disso, foi necessário proceder a um terceiro ensaio, com vistas a obtenção da tensão de ruptura de um bloco do conjunto.

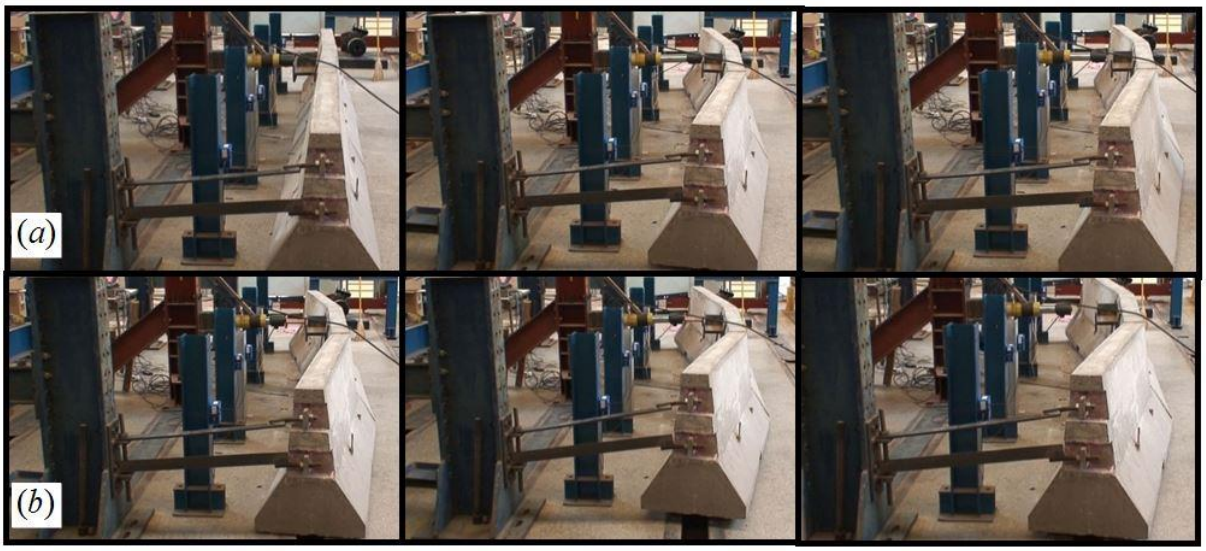


Figura 4.16 – Etapas do Ensaio BNJ-M: (a) Primeiro Carregamento, (b) Segundo Carregamento.

O gráfico de força *versus* deslocamento do conjunto BNJ-M está plotado na Figura 4.17. Para essa situação, chegou-se a um carregamento máximo de 44,68 kN e deslocamentos de 49,13 e 46,11 mm (para os transdutores mais próximos dos apoios - BNJ-M1 T[1] e BNJ-M3 T[2]); 213,25 e 212,71 mm para os transdutores das barreiras 1 e 3 (mais próximos da barreira central - BNJ-M1 T[2] e BNJ-M3 T[1]) e, finalmente, 253,3 e 245,34 mm (BNJ-M2 T[1] e BNJ-M2 T[2]) para os deslocamentos máximos da barreira central).

(*b*) **Protótipos BNJ-M: Força x Deslocamento - 1º Carregamento**

$F_{máx}$ (kN)	BNJ-NY1	BNJ-NY3	BNJ-NY1	BNJ-NY3	BNJ-NY2	
	DT1(mm)	DT2(mm)	DT1(mm)	DT2(mm)	DT2(mm)	DT1(mm)
44,68	49,13	46,11	213,25	212,71	253,30	245,34

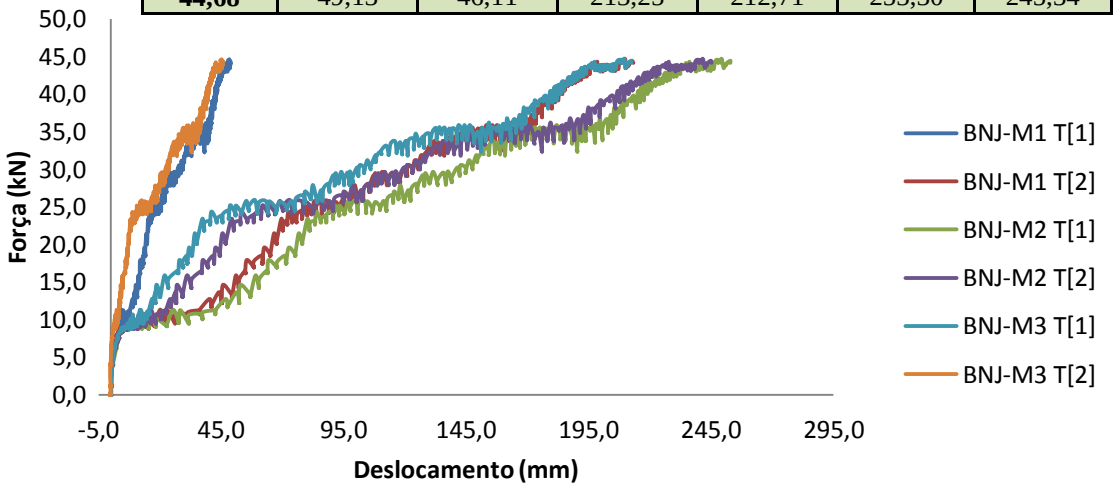


Figura 4.17 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-M no 1.º Carregamento.

No gráfico do segundo carregamento (Figura 4.18), os deslocamentos medidos foram acrescidos aos deslocamentos já obtidos no 1.º carregamento, devido ao fato de não ter sido

zerado o equipamento de aquisição de dados, por esse motivo aparece os deslocamentos residuais.

Para o carregamento máximo de 53,62 kN os deslocamentos foram de 68,12 e 68,40 mm, para os transdutores mais próximos dos apoios (BNJ-M1 T[1] e BNJ-M3 T[2]); 296,28 e 311,41 mm para os transdutores das barreiras 1 e 3 mais próximos da barreira central (BNJ-M1 T[2] e BNJ-M3 T[1]) e finalmente os deslocamentos máximos da barreira central de 352,56 e 354,41 mm (BNJ-M2 T[1] e BNJ-M2 T[2]).

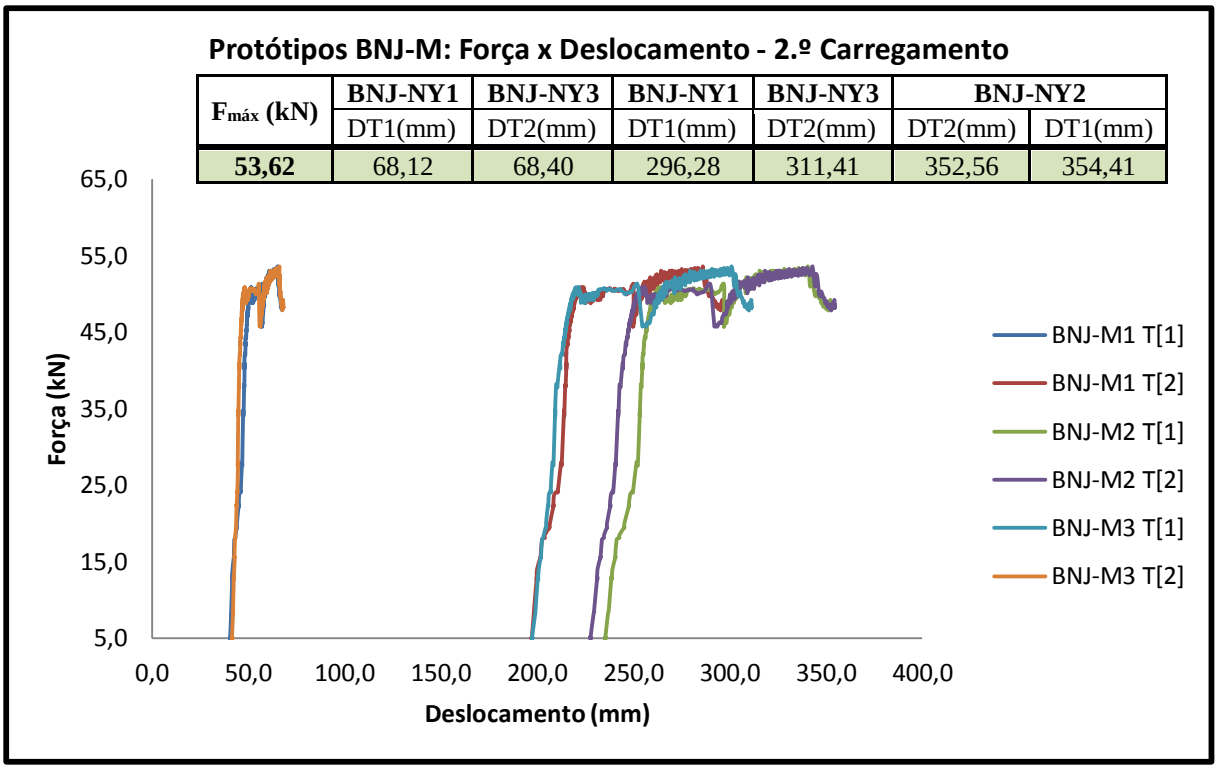


Figura 4.18 – Gráfico Força x Deslocamento do Protótipo BNJ-M no 2.º Carregamento.

As deformações medidas pelos extensômetros S_1 e S_2, nos dois carregamentos, foram plotadas na Figura 4.19 e na Figura 4.20. É possível observar que as deformações obtidas são praticamente desprezíveis, S_1 = 0,035‰ e S_2 = 0,023‰ para 44,68 kN no primeiro carregamento e S_1 = 0,045‰ e S_2 = 0,029‰ para 53,62 kN no segundo carregamento. Esses resultados foram motivados pelo fato de o sistema ter sofrido pouca resistência à força horizontal aplicada e também devido aos problemas de engastes, já comentados anteriormente.

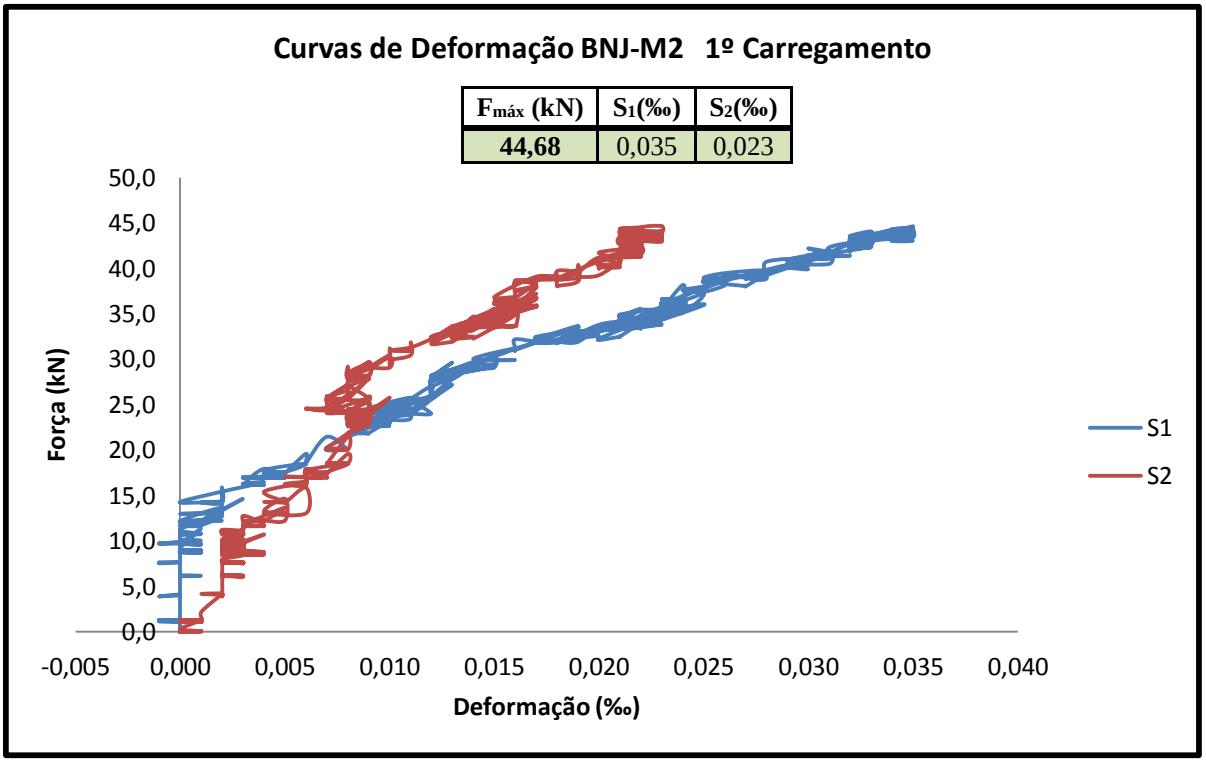


Figura 4.19 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-M2 para o 1º carregamento.

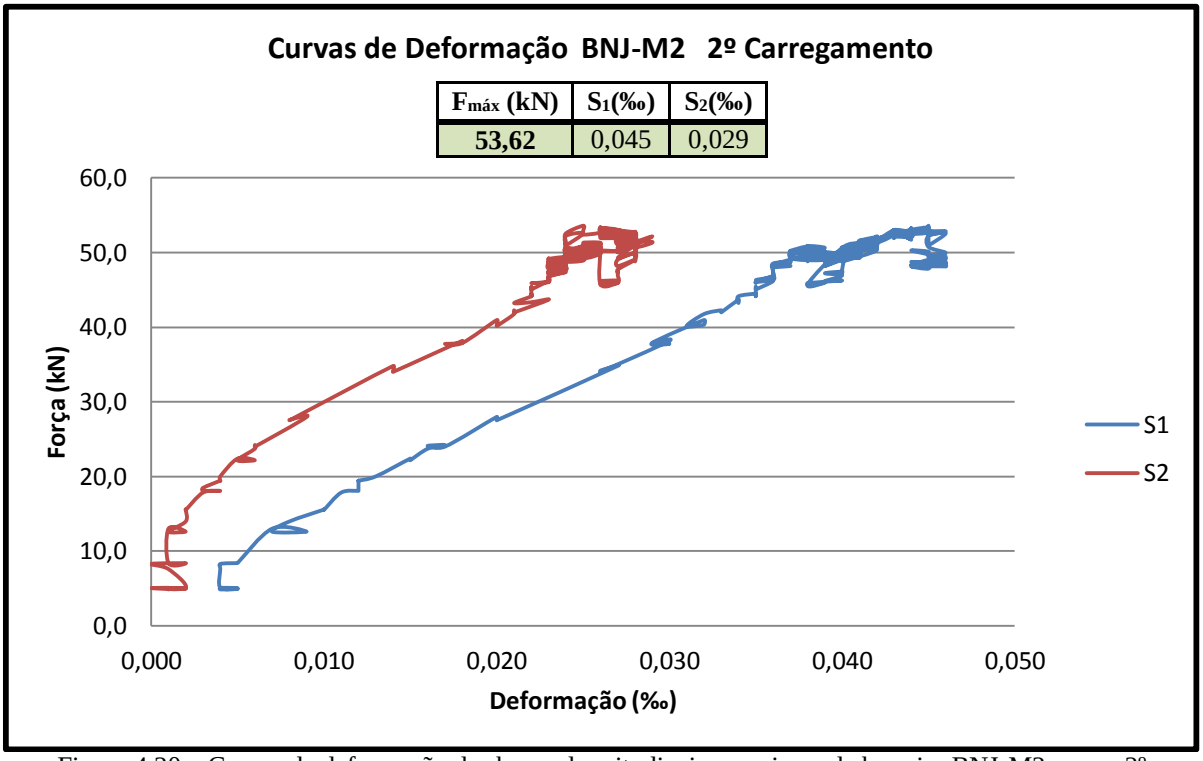


Figura 4.20 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores da barreira BNJ-M2 para o 2º carregamento.

Como mostrado na Figura 4.21, a danificação nas barreiras não foi significativa em virtude da grande flexibilidade do sistema, Figura 4.21(a). É possível notar alguns indícios de dano apenas nas extremidades inferiores e na parte de contanto entre as barreiras, conforme Figura 4.21(b) e Figura 4.21(c), respectivamente.

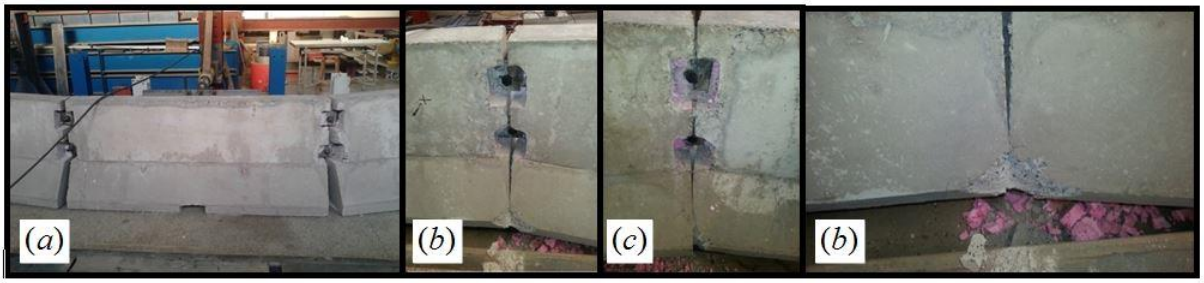


Figura 4.21 – Danos provocados pelo ensaio estático BNJ-M: (a) vista a jusante do carregamento, (b) contato entre a BNJ-M2 e a BNJ-M1, (c) contato entre a BNJ-M2 e a BNJ-M3.

4.4.3. Barreira Unitária BNJ-M

Na Figura 4.22 é apresentada a sequência resumida do último ensaio, cuja finalidade era levar a barreira ao estado limite último.

Nota-se que a partir do segundo quadro, começa a aparecer uma rachadura no concreto na parte do conector, todavia, a parte superior da barreira se rompe antes que a porção que envolve o conector se rompa.

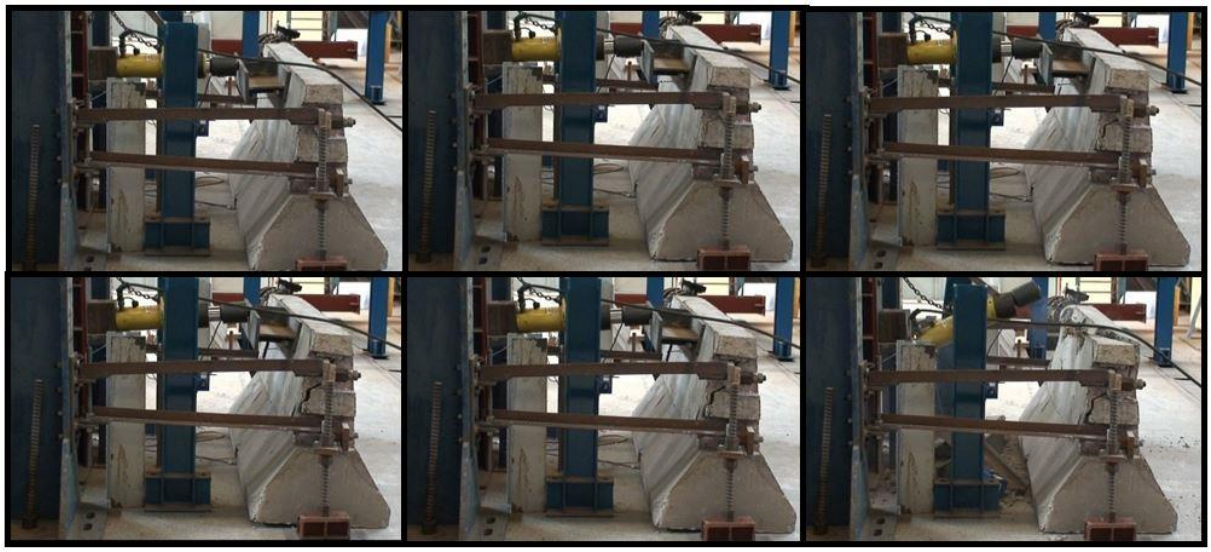


Figura 4.22 – Etapas do Ensaio BNJ-M Unitária.

O resultado força por deslocamento é mostrado na Figura 4.23, que indica a força máxima que levou a barreira à ruptura, 191,60 kN, e os respectivos deslocamentos registrados pelos

transdutores, sendo 15,51 mm, 23,61 mm e 30,85 mm. Suas respectivas deformações são mostradas na Figura 4.24, sendo de 1,37‰ e 1,05‰.

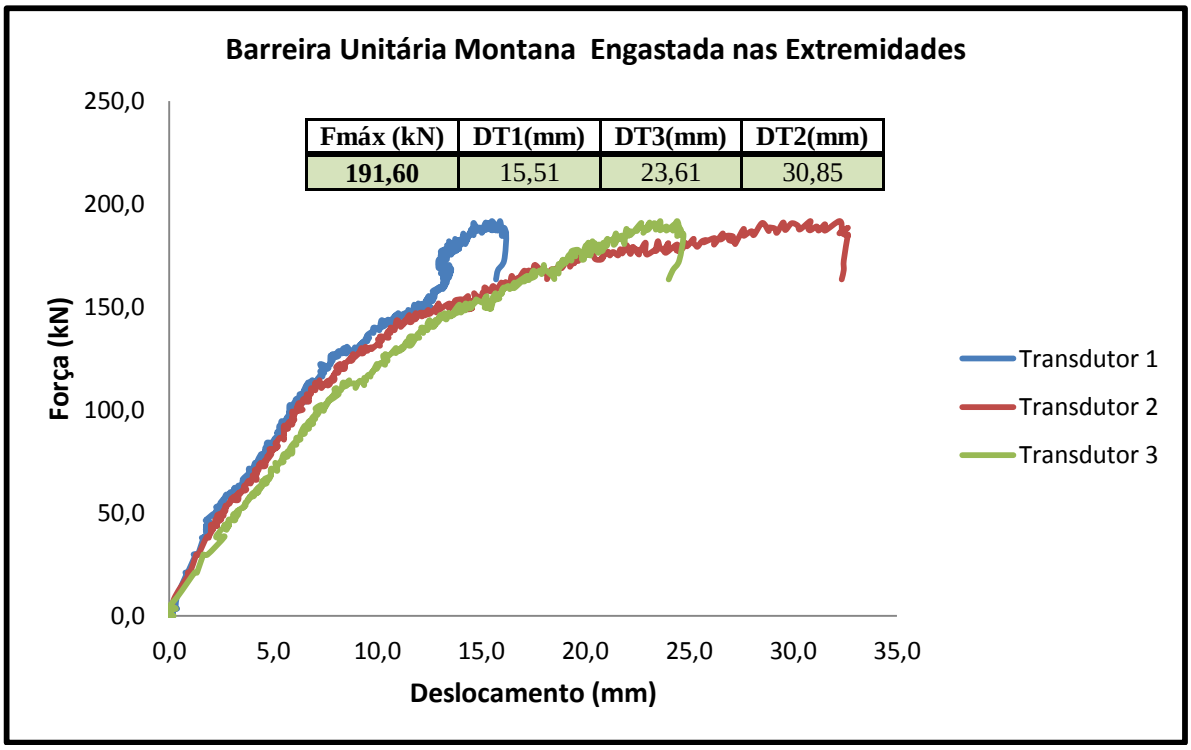


Figura 4.23 – Etapas do Ensaio BNJ-NY: (a) Primeiro Carregamento, (b) Segundo Carregamento.

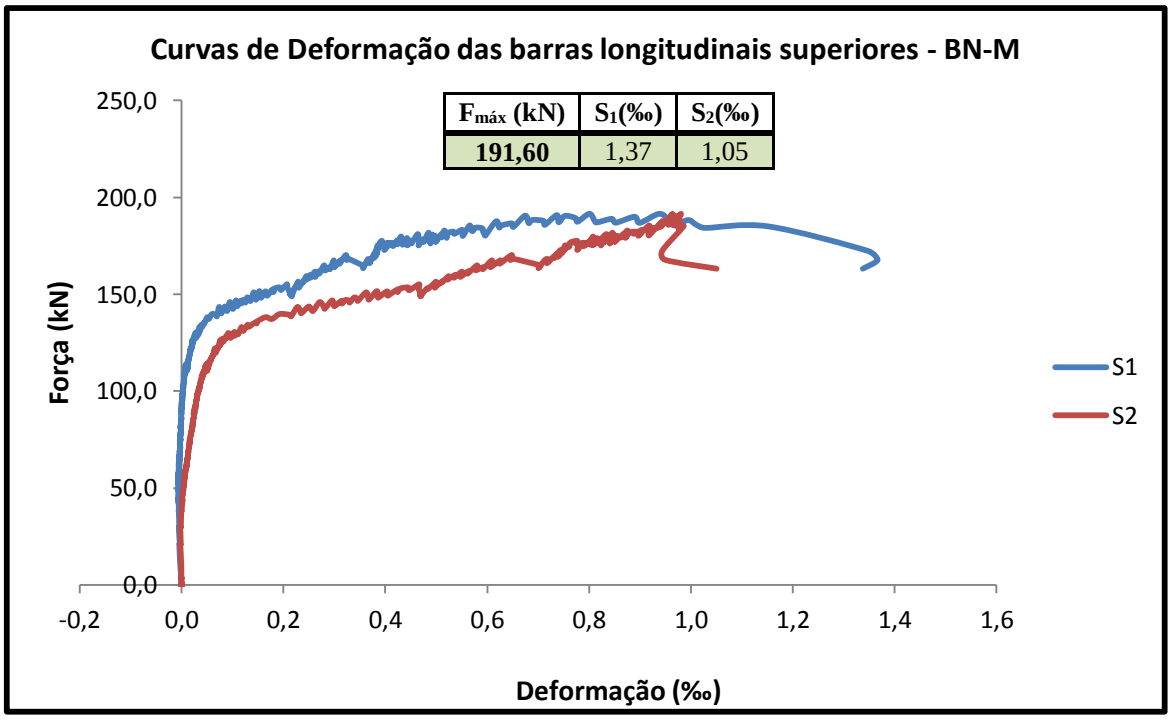


Figura 4.24 – Curvas de deformação das barras longitudinais superiores medidas pelo extensômetros (S_1 e S_2).

Os danos da barreira BNJ-M2 estão elencados na Figura 4.25. A forma do engaste na laje de reação e nos pórticos de reação é visto em (a); em (b) é possível perceber o dano na parte inferior devido ao esforço no topo da barreira; em (c) observa-se o desprendimento do concreto na poção superior do conector; em (d) ocorre a ruptura da parte superior da barreira; em (e) a barreira a jusante do esforço; em (f) e (h) a parte superior da barreira mostrando o desprendimento do concreto nas proximidades do conector e, por fim, em (g) e (i) são registradas fissuras ocasionadas pelo ensaio.

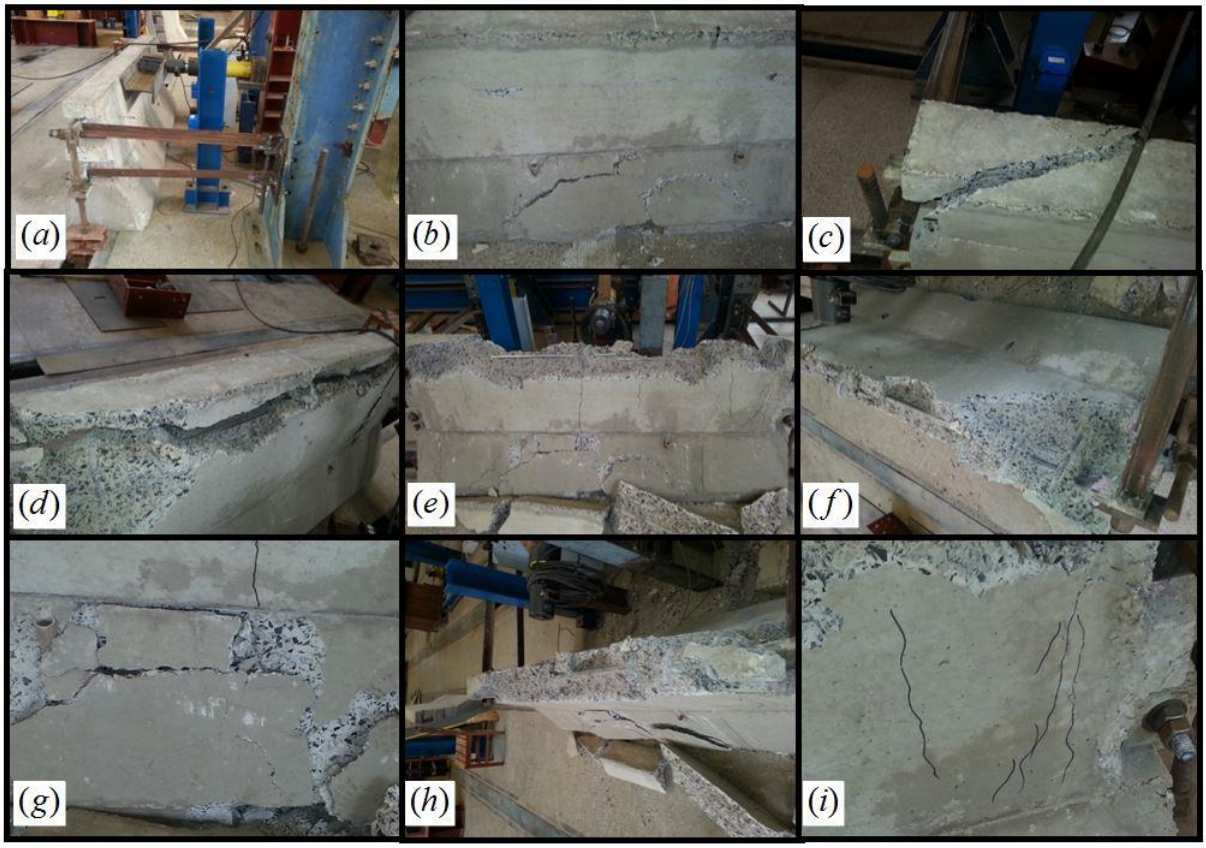


Figura 4.25 – Condições da barreira BNJ-M2: (a) Modo de engaste da barreira, (b) Dano na parte inferior devido ao esforço no topo da barreira, (c) desprendimento do concreto na poção superior do conector, (d) Ruptura da parte superior da barreira, (e) Vista da barreira a jusante do esforço, (f), (h) vista superior da barreira mostrando o desprendimento do concreto nas proximidades do conector, (g) e (i) fissuras ocasionadas pelo ensaio.

4.5. Considerações sobre os Ensaios

Conforme imaginado, as linhas de ruptura discutidas no Capítulo II, não foram verificadas para esses modelos de barreira, uma vez que calculada teoricamente foi baseada, considerando a base engastada. As barreiras pré-fabricadas, possuem um comportamento diferente, uma vez que o engaste delas se dão pelos conectores e sua base é totalmente livre para o movimento, uma vez que atua apenas o seu peso próprio.

Na Figura 4.26 são mostradas as linhas de ruptura para o modelo de barreira BNJ-NY. Apesar do modelo BNJ-NY não ter atingido o colapso, as suas linhas de rupturas ficaram evidentes, suas direções ficaram verticais e não inclinadas em forma de trapézio como propõe a norma LRFD Bridge (2011), pressupõem-se que além do fato da base não estar engastada os conectores parecem influenciar na direção das mesmas.

Figura 4.26 – Linhas de ruptura na barreira BNJ-NY

Para o modelo BNJ-M, que foi levado até a tensão de ruptura, observou-se também as linhas de ruptura foram verticais e nas proximidades do conector ficaram inclinadas (Figura 4.27), o rompimento se deu na base superior e nas proximidades do conector (Figura 4.28).

Figura 4.27 – Linhas de ruptura na barreira BNJ-NY

Figura 4.28 – Rompimento da parte superior próxima ao conector da barreira BNJ-M

Outra consideração importante sobre o módulo do modelo BNJ-M que foi levado à ruptura, com a força de 191,6 kN ficou abaixo do valor mínimo para um nível de retenção TL-3 e TL-4, que são de 240,3 kN (ver Tabela 2.2). Contudo, esse modelo não foi construído com a armadura do projeto original, então não é possível afirmar que o modelo original seja inadequado para níveis de retenção maiores que TL-2.

Embora as barreiras de concreto sejam consagradas pela sua durabilidade, as eventuais formações de fissuras não são desejáveis, sejam por condições ambientais, sejam por condições de serviços. Os ensaios mostraram que o modelo BNJ-M, quando em serviço é mais susceptível à abertura de fissuras que o modelo BNJ-NY, devido à forma como o conector trabalha, alavancando o concreto e portanto facilitando a abertura de fissuras. Nesse trabalho o estudo da durabilidade não será abordado, ficando com sugestão para futuros trabalhos.

CAPÍTULO V

MODELOS NUMÉRICOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os modelos numéricos das barreiras e veículos utilizados nas simulações. Para todas as simulações será utilizado um veículo direcionado de α graus (de acordo com a norma considerada) em direção à barreira, e com uma velocidade V, conforme mostra a Figura 5.1.

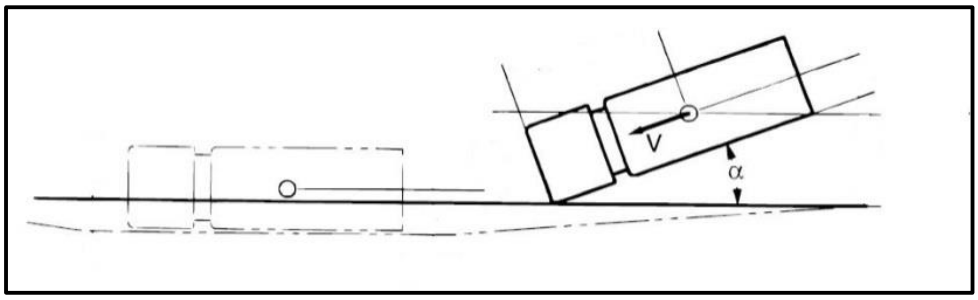


Figura 5.1 – Cenário de impacto entre veículo e barreira

Especificamente para as barreiras, os seguintes aspectos são discutidos: as partes componentes, os materiais e a discretização. Já para os veículos apenas algumas considerações das características dos modelos dos veículos são discutidas.

5.1.Barreiras de Contenção

Para este trabalho foram desenvolvidos sete modelos de barreiras de contenção, sendo quatro de material elástico linear e cinco de concreto armado.

As barreiras de material elástico linear, todas com 30 m de comprimento, foram modeladas com as seguintes geometrias: *New Jersey* com 810 mm de altura, *New Jersey* com 1400 mm de altura, *Single Slope* com 1074 mm de altura e uma barreira Plana com 1066 mm de altura, conforme são mostradas na Figura 5.2.

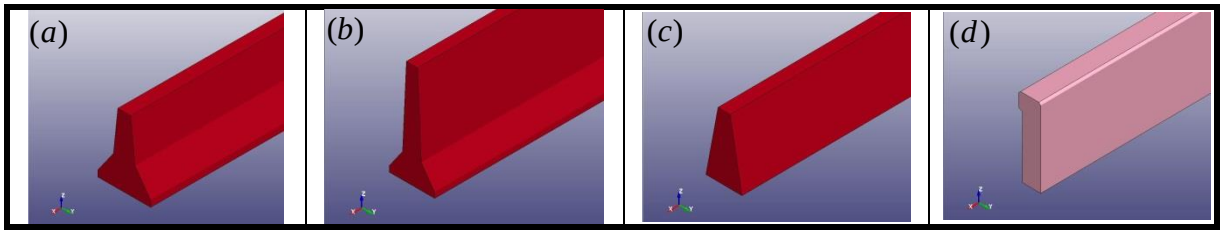


Figura 5.2 – Barreiras de contenção com material elástico linear: (a) *New Jersey* com 810 mm de altura, (b) *New Jersey* com 1400 mm de altura (c) *Single Slope* com 1074 mm de altura, (d) barreira Plana com 1066 mm de altura.

Já em relação às barreiras de concreto armado foram cinco modelos, sendo um *New Jersey* com 810 mm de altura e 30 m de comprimento, dez módulos, de 6,0 m cada, de barreiras *New Jersey* temporária com 810 mm de altura e conectores NY, com seis metros cada, dez módulos de barreiras *New Jersey* temporária com 810 mm de altura e conectores M com seis cada, três módulos de barreiras *New Jersey* temporária com 810 mm de altura e conectores NY, com dois metros cada e três módulos de barreira temporária perfil tipo F, ver Figura 5.3.

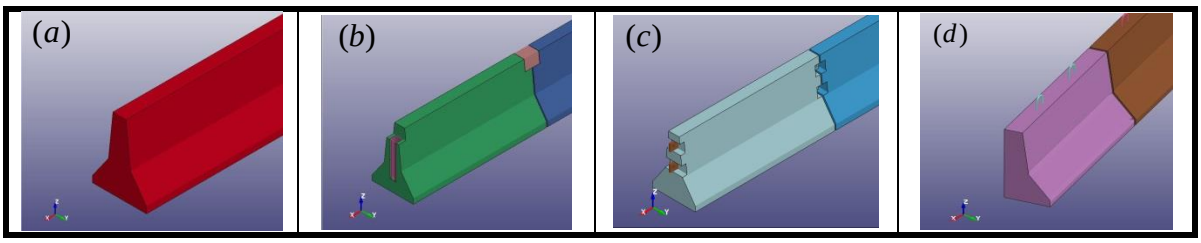


Figura 5.3 – Barreiras de concreto New Jersey com 810 mm de altura: (a) Engastada com 30 m de comprimento, (b) Temporária de 2 e 6 m com conectores NY, (c) Temporária de 6 m com conectores M, (d) Temporária com Perfil Tipo F de 2 m de comprimento e sem conectores.

5.1.1. Descrição da Malha

A formulação para elementos sólidos no LS-DYNA® é controlada pelo parâmetro *ELFORM*. A escolha do elemento interfere diretamente na precisão e no custo computacional da análise, conforme mostrado na Figura 5.4, para alguns dos elementos disponíveis no software. É possível perceber que o tempo de processamento teve um aumento de quase 1000% entre o ELFORM = 1 e o ELFORM = -2.

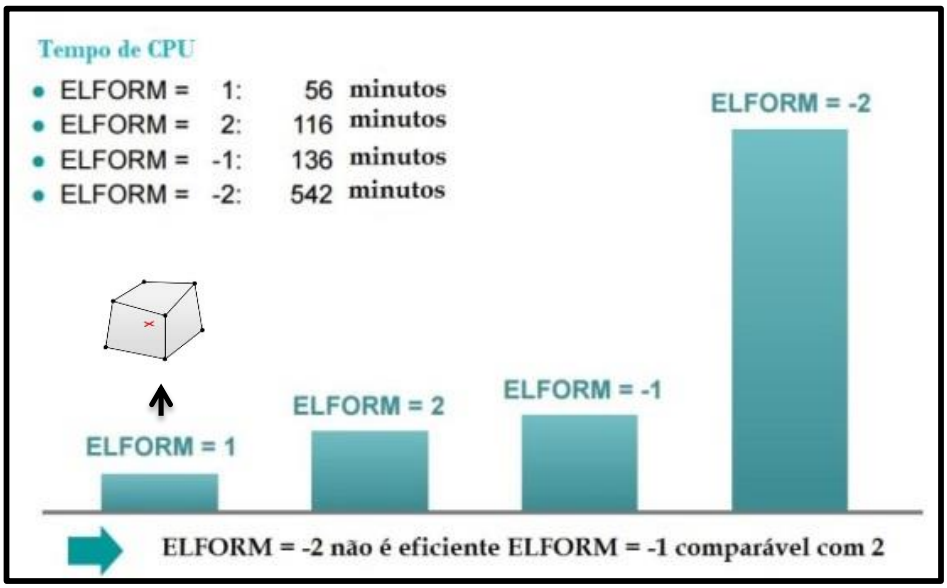


Figura 5.4 – Tempo de processamento em função do elemento sólido
Fonte: Dyna More (2013).

Devido ao alto custo computacional das simulações, optou-se pela escolha do *ELFORM* = 1 que é um elemento poliédrico de oito nós com um ponto de integração, conforme indicado pela seta na Figura 5.4.

Segundo Murray (2007), devido ao fato do concreto possuir um ramo de amolecimento (*softening*), cuja modelagem é dependente da malha, ou seja, que diferentes refinamentos da malha produzirão diferentes resultados computacionais, com uma possível concentração do dano à medida que se refina a malha. Esse comportamento é indesejável e é o resultado da modelagem da menor energia de fratura nos menores elementos, oriundo de uma deficiência matemática capaz de descrever o fenômeno com precisão, mais detalhes são discutidos no Anexo A.

As análises tem demonstrado que a convergência da solução não é obtida se a malha não for refinada a um tamanho de elemento razoável na faixa de 19 mm a 38 mm para o concreto. Baseado nisso, o tamanho adotado para as malhas ficou nesse intervalo de valor, sendo a maior parte do tamanho dos elementos em torno de 38 mm, para economia de processamento. Na Figura 5.5 são apresentadas as topologias das malhas para as barreiras modeladas com material concreto.

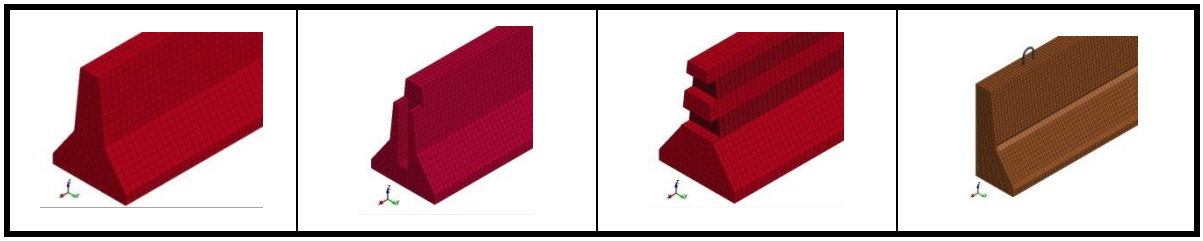


Figura 5.5 – Topologia das malhas utilizada nas barreiras modeladas com concreto.

Para os modelos elásticos lineares, optou-se pelo tamanho do elemento entre 50 mm a 100 mm. Na Figura 5.6 são mostradas as topologias das malhas para as barreiras modeladas com material elástico.

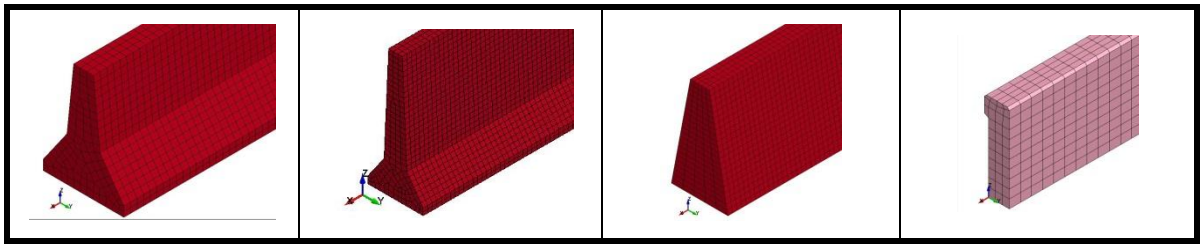


Figura 5.6 – Topologia das malhas utilizada nas barreiras com material elástico.

5.1.2. Descrição dos Elementos de Barra

As armaduras do modelo foram representadas por elementos de barras cilíndricas (o *software* também permite a escolha de geometria retangular e a definida pelo usuário), com a opção de formulação Hughes-Liu e integração da seção transversal (*ELFORM* = 1). Para os estribos (12,5 mm de diâmetro) foi utilizada a malha de 20 mm para cada elemento e formulação de treliça resultante (*ELFORM* = 3), para as barras longitudinais (19,0 mm de diâmetro) a malha foi de aproximadamente 40 mm para cada elemento.

O acoplamento entre barra e sólido foi realizado pela opção **CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID*, onde os elementos de barras são escravos do elemento sólido.

Foram utilizadas três tipos de armaduras, selecionadas de acordo com o tipo de barreira: barreiras com módulos de 6,0 mm ou comprimentos maiores (Figura 5.7(a)), com módulo de 2,0 m (Figura 5.7(b)) e a última para os modelos Perfil Tipo F (Figura 5.7(c)).

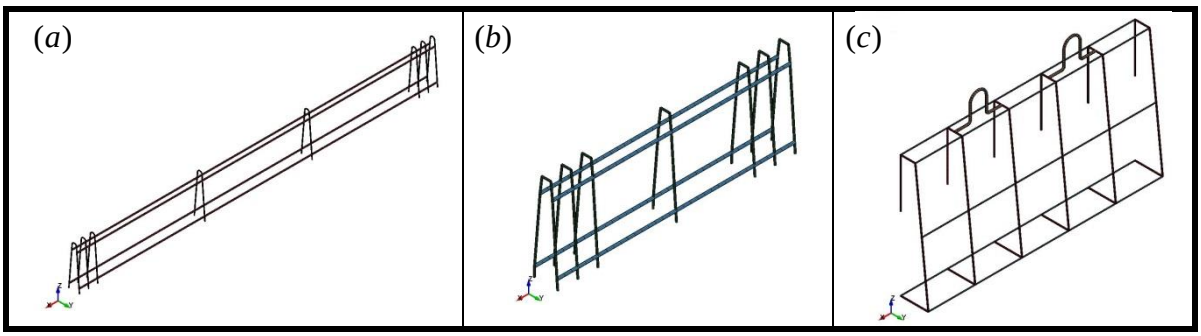


Figura 5.7 – Elementos de Barras: (a) Para barreiras de módulo de 6,0 m, (b) Para barreiras de módulo de 2,0 m, (c) Para barreiras perfil tipo F.

5.1.3. Descrição dos Elementos de Casca

Os conectores e os pinos das barreiras temporárias, ver Figura 5.8, foram modelados como elementos de casca de oito nós, com a opção de formulação padrão do programa (ELFORM = 2) adotando-se malha de aproximadamente 20 mm para cada elemento. Foi usando a mesma técnica de acoplamento com o concreto para acoplar o conector BNJ-NY (Figura 5.8(a)), utilizada para barras, o algoritmo **CONSTRAINED_LAGRANGE _IN_SOLID*. O pino (Figura 5.8 (b)) que conecta os conectores das barreiras, foi configurado para interagir com os mesmo através de contato.

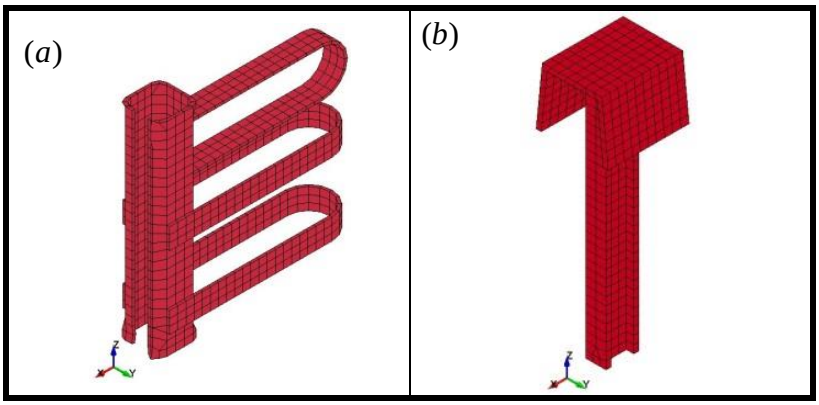


Figura 5.8 – Elementos de Casca: (a) Conector BNJ-NY, (b) Pino de conexão do Conector BNJ-NY.

5.1.4. Descrição dos Materiais

❖ **MAT_PLASTIC_KINEMATIC*

Este modelo de material foi utilizado para os elementos de barras (vergalhões da armadura) e para os elementos de casca (pinos e conectores das barreiras temporárias BNJ-NY e BNJ-M).

Este modelo é adequado para modelar modelos isotrópicos e plásticos cinemáticos com a opção de incluir os efeitos de visco plasticidade. Esse material possui um excelente comportamento em termos de custo computacional e, adicionalmente, pode ser aplicado a elementos de barra, casca e sólidos.

O comportamento cinemático, isotrópico ou uma combinação de endurecimento cinemático e isotrópico pode ser especificado variando o parâmetro de endurecimento β' entre zero e um, respectivamente. O endurecimento cinemático e isotrópico e são obtidos conforme mostrado na Figura 5.9

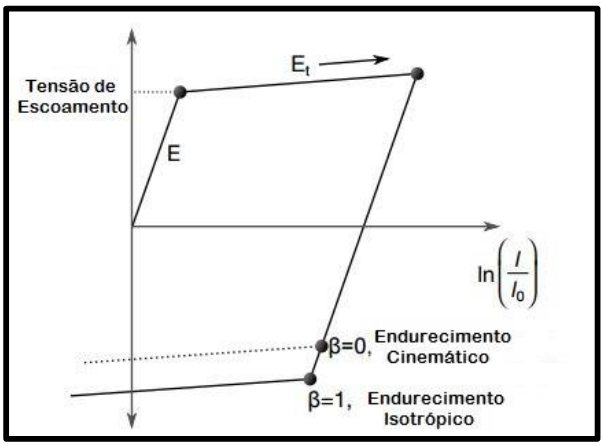


Figura 5.9 – Comportamento Elasto-plástico com endurecimento cinemático e isotrópico, onde l_0 e l são os comprimentos indeformados e deformados do corpo de prova sob tensão uniaxial. E_t é a inclinação da curva bilinear tensão *versus* deformação.

Na Figura 5.10 é apresentado um exemplo de um cartão de entrada para o *MAT_PLASTIC_KINEMATIC com todos os seus parâmetros.

```
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_TITLE
ASTM A-500
$#     mid        ro         e        pr      sigy      etan      beta
       27.83000E-9  210000.00.30000001     400.0       0.0       0.0
$#     src       srp        fs        vp
       0.0       0.0       0.0       0.0
```

Figura 5.10 – Cartão de entrada para o material **MAT_PLASTIC_KINEMATIC*.

Onde,

mid = identificação do material;

ro = densidade do material;

e = módulo de elasticidade;

pr = módulo de Poisson.

sigy = tensão de escoamento.

etan = módulo tangente.

beta = parâmetro de endurecimento, $0 < \beta' < 1$.

src = parâmetro C da taxa de deformação do modelo de Cowper Symonds (ver Eq. (5-1)). Se zero, os efeitos de visco plasticidade não são considerados.

srp = parâmetro P da taxa de deformação do modelo de Cowper Symonds (ver Eq. (5-1)). Se zero, os efeitos de visco plasticidade não são considerados.

fs = deformação plástica efetiva para erosão dos elementos.

vp = formulação para os efeitos de visco plasticidade.

EQ.0.0: tensão de escoamento (padrão)

EQ.1.0: formulação visco plástica

A taxa de deformação é contabilizada usando o modelo de Cowper e Symonds que dimensiona a tensão de escoamento com o fator da Eq. (5-1)

$$1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/P} \tag{5-1}$$

Onde,

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação

❖ **MAT_ELASTIC*

Devido à impossibilidade de avaliar todas as geometrias de barreiras propostas nesse trabalho com o uso do material concreto, em virtude do alto custo computacional evolvido, optou-se pelo uso do *MAT_ELASTIC para avaliar a influência da geometria da barreira, conforme mencionando anteriormente. Os parâmetros de entrada são apenas a densidade do material, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Conforme mostra o cartão do arquivo de entrada na Figura 5.11. Esse é um material elástico isótropo e pode ser utilizado para barras, cascas e elementos sólidos (LS-DYNA, 2006).

```
*MAT_ELASTIC_TITLE
Elástico
$#     mid         ro         e        pr        da        db  not used
         5 2.50000E-9   26072.0       0.2       0.0       0.0         0
```

Figura 5.11 – Cartão de entrada para o material **MAT_ELASTIC*.

Variáveis inicializadas no cartão de entrada:

mid = identificação do material;

ro = densidade do material;

e = módulo de elasticidade;

pr = módulo de Poisson.

❖ **MAT_CSCM_CONCRETE*

O concreto foi modelado com o **MAT_CSCM_CONCRETE -*MAT_159* (descrito com mais detalhes no Anexo A), por ter uma boa representatividade do comportamento do concreto para situações dinâmicas, caracteriza satisfatoriamente o efeito de dano e possuir um número reduzido de parâmetros de entrada. Não obstante, o referido modelo tem sido recomendado pela *Federal Highway Administration* dos Estados Unidos como uma referência para as análises relacionadas aos impactos de veículos em estruturas de concreto utilizadas nas rodovias.

O material **MAT_CSCM_CONCRETE* (**MAT_159*) foi desenvolvido a partir do material *MAT_CSCM (*Continuous Surface Cap Model*) com a finalidade de facilitar a modelagem numérica do analista, uma vez que o esse último possui, até o momento, trinta e sete parâmetros para calibração, o que pode exigir uma grande quantidade de ensaios de laboratório e elevar o custo das análises e possuir grande experiência com a modelagem de concreto.

Os dados utilizados para padronizar o **MAT_159_CONCRETE*, foram obtidos principalmente do CEB-FIP (1993). Essa norma é uma síntese dos resultados de várias pesquisas e contém uma seção completa de concreto e relações constitutivas. Várias propriedades dos materiais, tais como resistência à compressão e tração, rigidez e energia de fratura, são relatadas como uma função da qualidade e da dimensão do agregado. Na Figura 5.12 é mostrado o cartão de entrada do **MAT_CSCM_CONCRETE*.

```
*MAT_CSCM_CONCRETE_TITLE
Concreto 159
$#     mid        ro     nplot     incre     irate     erode     recov   itretrc
         3 2.5000E-9         1     0.000         0  1.050000     0.000         0
$#    pred
     0.000
$#     fpc      dagg     units
 30.000000 19.000000         2
```

Figura 5.12 – Cartão de entrada para o material **MAT_CSCM_CONCRETE*.

Onde,

mid = identificação do material;

ro = densidade do material;

nplot = opções para o tipo de dano;

EQ.0.1: Máximo para danos frágil e dúctil (padrão);

EQ.1.2: Máximo para danos frágil e dúctil, com recuperação do dano frágil;

EQ.1.3: Dano frágil;

EQ.1.4: Dano dúctil;

EQ.1.5: Interseção do "*cap*" com superfície cortante;

EQ.1.6: Interseção do "*cap*" com o eixo de pressão;

EQ.1.7: deformação plástica do volume;

incre = Máximo incremento de tensão para sub-incrementos;

irate = opções para os efeitos de visco plasticidade

EQ.0: os efeitos de visco plasticidade ativo no modelo (padrão);

EQ.1: os efeitos de visco plasticidade desativado no modelo;

erode = controla o efeito de erosão do elemento;

recov = O módulo é recuperado em compressão quando o *recov* é igual a 0 (padrão). O módulo permanece no nível danos frágil quando o *recov* é igual a 1;

itretcr = Opção de retração do "*cap*";

EQ.0: "*cap*" não retrai (padrão);

EQ.1: "*cap*" retrai;

pred = Dano pré-existente (0 < *pred* < 1), se deixado em branco o valor é zero (padrão);

fpc = Resistência do concreto à compressão, *f'*(c), se deixado em branco o valor é 30 MPa (padrão);

dagg = Tamanho máximo do agregado, se deixado em branco o valor é 19 mm (padrão);

units = Opções de unidade: é utilizado para a seleção correta dos valores dos parâmetros do **MAT_CSCM*, que devem ser compatíveis com as mesmas unidades adotas para os outros módulos (se houver);

EQ.0: GPa, mm, mseg, Kg/mm³, kN;

EQ.1: MPa, mm, mseg, g/mm³, N;

EQ.2: MPa, mm, seg, ton/mm³, N;

EQ.3: psi, pol, seg, lb-s²; lb;

EQ.5: Pa, m, seg, kg/m³; N;

Na Figura 5.13 é mostrado o cartão de entrada dos parâmetros do material **MAT_CSCM*, esse modelo, bem como sua relação com o **MAT_CSCM_CONCRETE* é discutido com mais detalhes no Anexo A.

```
*MAT_CSCM_TITLE
CSCM 30
$#     mid        ro     nplot     incre     irate     erode     recov   itretrc
      1592 2.500E-9         1     0.000         0  1.050000     0.000         0
$#    pred
     0.000
$#       g         k     alpha     theta     lamda      beta        nh        ch
 11400.000 12550.000 14.500000  0.296500 10.510000 1.9290E-2     0.000     0.000
$#  alpha1    theta1    lamda1     beta1    alpha2    theta2    lamda2     beta2
  0.747300 1.1510E-3  0.170000 7.0570E-2  0.660000 1.3870E-3  0.160000 7.0570E-2
$#       r        xd         w        d1        d2
  5.000000 90.540001 5.0000E-2 2.5000E-4 3.4920E-7
$#       b       gfc         d       gft       gfs      pwrc      pwrt      pmod
 100.00000  6.838000  0.100000 6.8380E-2 6.8380E-2  5.000000  1.000000     0.000
$#   eta0c        nc     etaot        nt     overc     overt     srate     rep0w
 3.1665E-4  0.780000 5.0719E-5  0.480000 21.400000 21.450001  1.000000     0.000
```

Figura 5.13 – Cartão de entrada para o material **MAT_CSCM*.

5.2.Veículos de Testes

5.2.1. Veículo 36000V

O veículo utilizado foi um caminhão *truck* americano, modelo GMC© WG65T. Ele foi desenvolvido pela *National Transportation Research Center Incorporated – NTRCI* (2013), sendo constituído de 461.954 nós, 851 barras, 291.702 elementos de cascas em 361 tipos diferentes de peças. O peso total do modelo numérico (cavalo mecânico, carroceria e contrapeso) é de 36,2 toneladas, vide Figura 5.14.

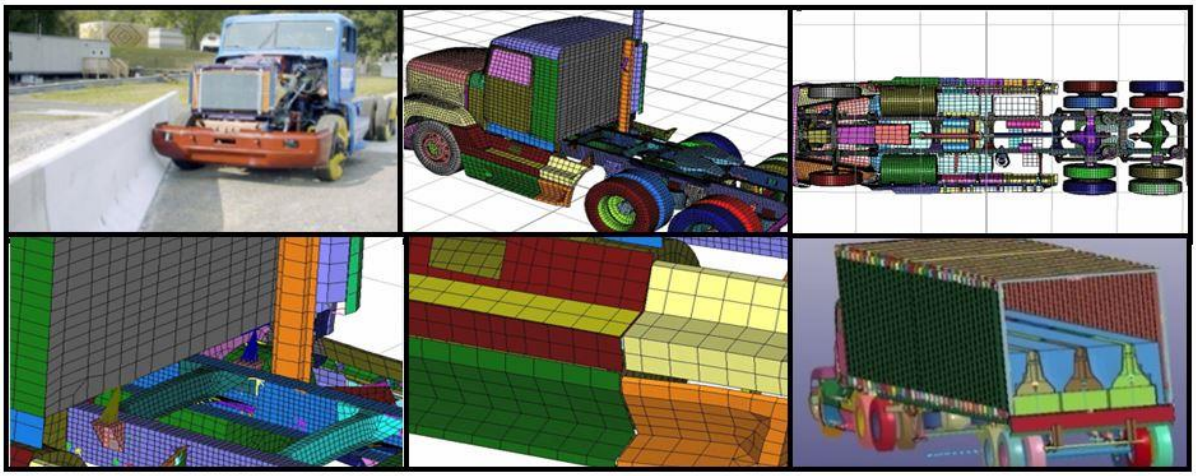


Figura 5.14 – Modelo real e detalhes do modelo numérico de "*crash test*" desenvolvido pela NTRCI.

O modelo de Elementos Finitos foi baseado em um cavalo mecânico com cabine e uma carroceria tipo baú. A cabine foi interligada ao chassi em quatro locais: dois em frente à cabine e dois atrás dos bancos, através de conexões modeladas por meio de restrições de corpo nodal rígidas. Como resultados dessas ligações, a rigidez da cabine (que é basicamente uma caixa de aço) aumenta significativamente a rigidez do cavalo mecânico e, consequentemente, sua resposta cinemática.

Esse modelo possui um total de 16 acelerômetros. No cavalo mecânico estão localizados a maioria deles (quinze no total) e o último está localizado no baú, conforme mostrado na Figura 5.15(a). Todos esses acelerômetros são orientados na direção local do eixo X (inicialmente). Na Figura 5.15(b) é ilustrado a posição dos centros de gravidade do modelo, bem como a posição do veículo em relação à origem do sistema em coordenadas globais.

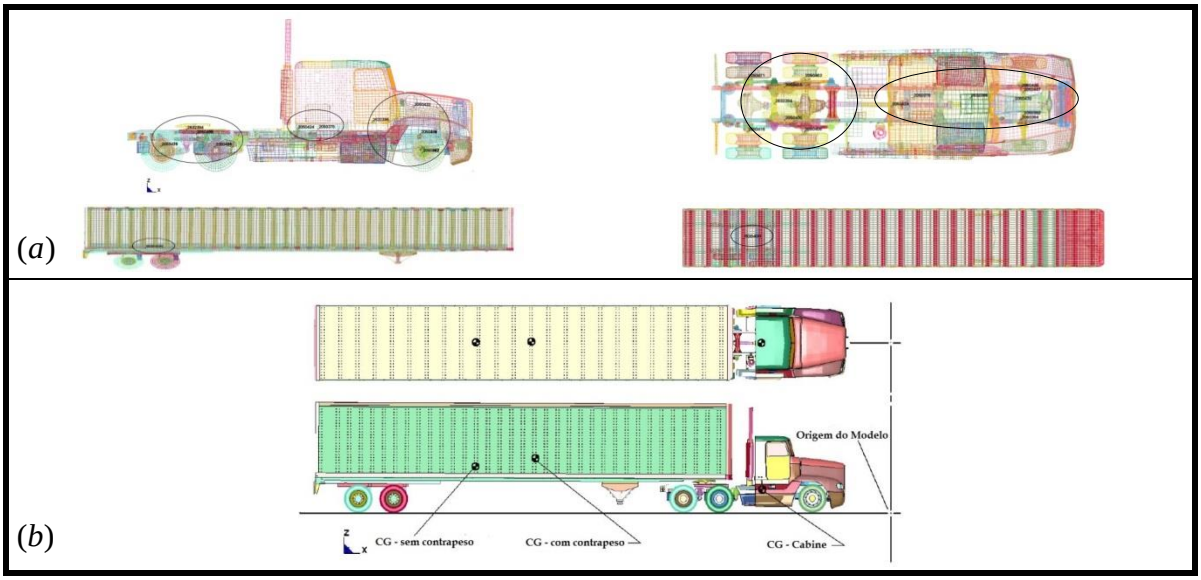


Figura 5.15 – (a) Localização dos acelerômetros no veículo, (b) Localização dos Centros de Gravidade (CG) do veículo e a origem do modelo em relação às coordenadas globais.

5.2.2. Veículo 2000P

Esse modelo é uma camionete Chevrolet© C2500 Pickup, modelo 1994. Foi desenvolvido pela *The National Crash Analysis Center* (NCAC) da Universidade de George Washington, sendo constituído de 66.585 nós, 163 barras, 54.5465 elementos de cascas em 251 partes. O peso total do modelo numérico é de 2,013 toneladas, vide Figura 5.14.

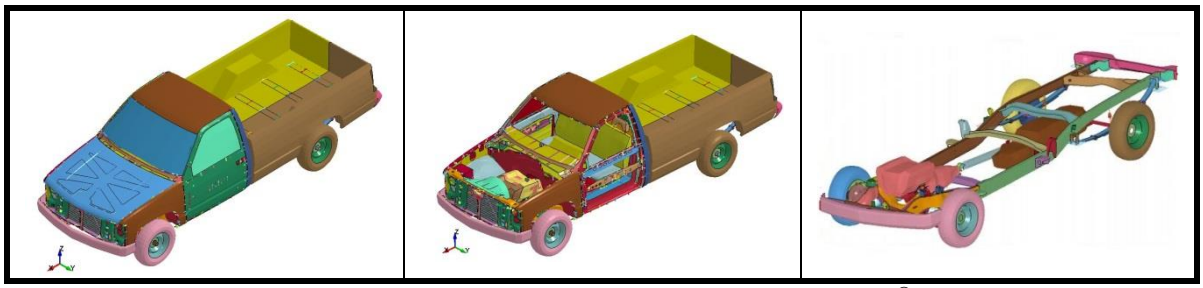


Figura 5.16 – Modelo de Elementos Finitos de uma Camionete Chevrolet© C2500 Pickup.

O veículo é composto de oito acelerômetros, nas seguintes posições: um atrás do assento esquerdo, um atrás do assento direito, um no topo do motor, um no fundo do motor e um em cada pinça dos freios dianteiros, um na parte mediana inferior do para-brisa e um no CG do veículo. Todos orientados na direção local do eixo X. Na Figura 5.17 são ilustradas as posições dos acelerômetros, o círculo indica o acelerômetro do CG.

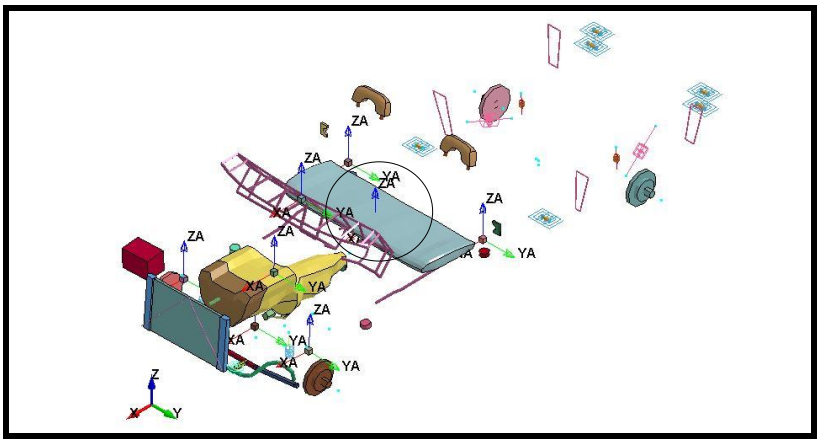


Figura 5.17 –Localização dos acelerômetros no veículo.

5.2.3. Veículo 1100C

Representado por um carro de passeio da Toyota©, Yaris modelo 2010. Também foi desenvolvido pela The National Crash Analysis Center (NCAC) da Universidade de George Washington, sendo constituído de 998.218 nós, 4.497 barras, 950.560 elementos de cascas em 771 partes. O peso total do modelo numérico é de 1,1 toneladas. Na Figura 5.18 é mostrado detalhes do modelo.

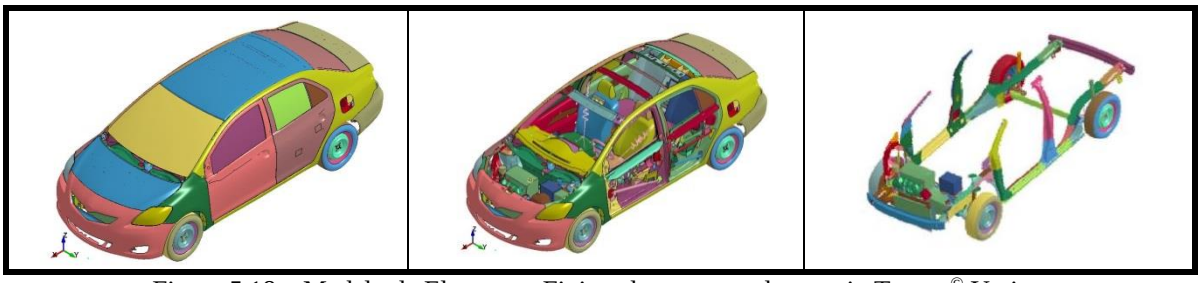


Figura 5.18 – Modelo de Elementos Finitos de um carro de passeio Toyota© Yaris.

O veículo é composto de onze acelerômetros, nas seguintes posições: um em cada acento da frente, dois no assento traseiro, um no topo do motor, um no fundo do motor e dois em lateral do veículo e um no CG. Todos orientados na direção local do eixo X. Na Figura 5.19 são ilustradas as posições dos acelerômetros, o círculo indica o acelerômetro do CG.

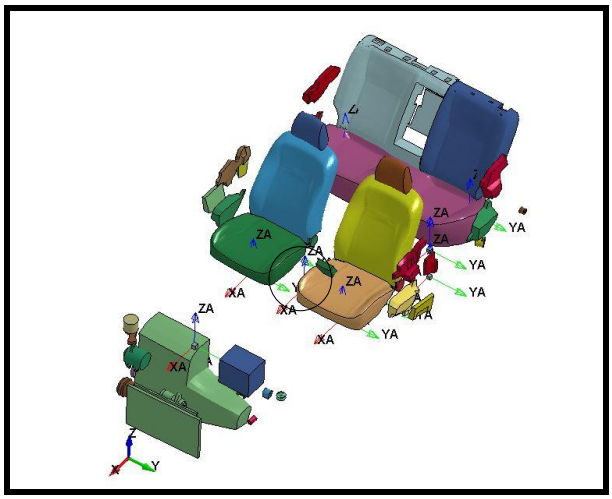


Figura 5.19 –Localização dos acelerômetros no veículo.

5.2.4. Veículo TB11

Representado por um carro de passeio GM© Corsa, foi desenvolvido pelo grupo da Politécnica de Milão na Itália, sendo constituído de 28.650 nós, 2 barras, 24.061 elementos de cascas em 265 partes. O peso total do modelo numérico é de 0,9 toneladas. Na Figura 5.20 é mostrado detalhes do modelo.

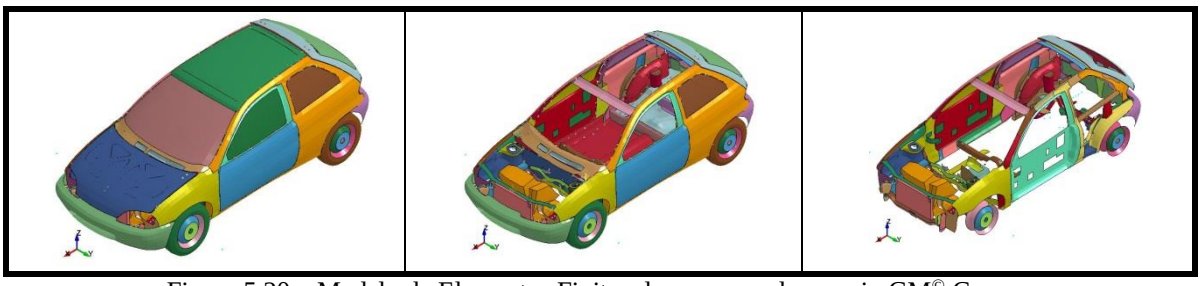


Figura 5.20 – Modelo de Elementos Finitos de um carro de passeio GM© Corsa.

O veículo possui apenas um acelerômetro localizado no centro de gravidade do veículo, conforme mostrado na Figura 5.21, indicado pelo círculo.

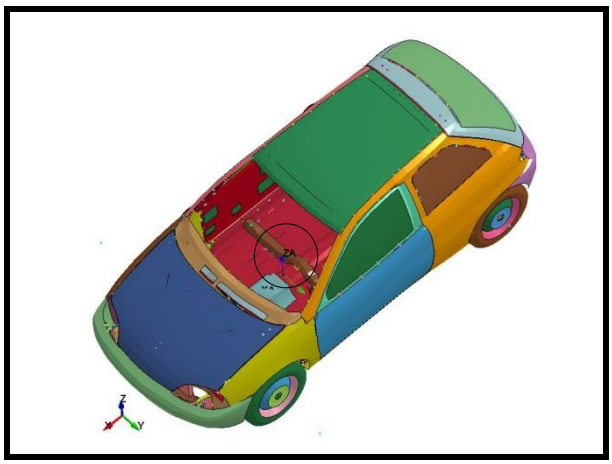


Figura 5.21 –Localização do acelerômetro no veículo.

5.3.Contato Veículo x Barreira

O LS-DYNA possui formulação para vários tipos de contato, o que torna possível tratar diversos tipos de interação entre partes disjuntas.

Os algoritmos de contato do LS-DYNA são baseados em três métodos: método da restrição cinemática (também chamado de multiplicador de Lagrange) é usado para interfaces vinculadas), método do parâmetro distribuído (somente para deslizamento) e método da penalidade (Tabiei, 2013). Basicamente os três métodos seguem as etapas do algoritmo de contato mostrado na Figura 5.22.

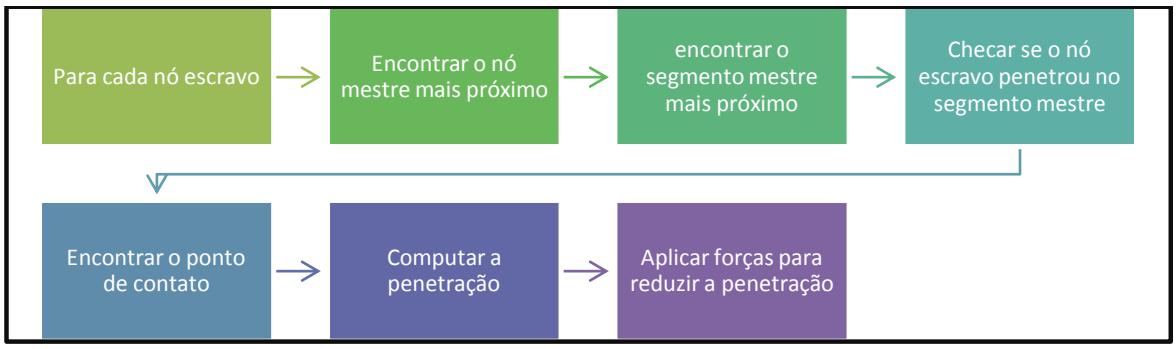


Figura 5.22 – Etapas do algoritmo de contato do LS-DYNA.

O modelo numérico do veículo é composto de vários tipos de contato entre seus componentes, como o **CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL*, **CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE*, **CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*, **CONTACT_INTERIOR*, **CONTACT_NODES_TO_SURFACE* e **CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE*. Porém apenas os tipos

CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE e *NODES_TO_SURFACE* serão discutidos, visto que são os contatos utilizados entre o veículo e a barreira.

O *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE* é usado para simular impactos entre duas superfícies e funciona corretamente se essas duas superfícies forem convexas. Nesse tipo de contato não é permitido colocar o mesmo nó nas duas superfícies de impacto.

Na Figura 5.23 é mostrado um cartão de entrada para contato *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*, indicando as variáveis de entrada: *ssid* (segmento escravo), *msid* (segmento mestre), *sstyp* (indica a correlação do segmento escravo com outros componentes do modelo), *mstyp* (indica a correlação do segmento mestre com outros componentes do modelo).

```
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$$$ Truck body to barrier
$#    ssid      msid     sstyp     mstyp    sboxid    mboxid       spr       mpr
   2000025    300001         2         3         0         0         0         0
$#      fs        fd        dc        vc       vdc    penchk        bt        dt
0.25000000 0.2500000      0.00 0.0000000      10.0         0 0.0000000 0.0000000
$#     sfs       sfm       sst       mst      sfst      sfmt       fsf       vsf
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
$#    soft    sofscl    lcidab    maxpar     sbopt     depth     bsort    frcfrq
         2       0.0         0       0.0       0.0         5        10
$#  penmax    thkopt    shlthk     snlog      isym     i2d3d    sldthk    sldstf
       0.0         0         0         0         0         0       0.0       0.0
*SET_PART_LIST_TITLE
Impact Side
$#     sid       da1       da2       da3       da4
   2000025
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
   2000002   2000003   2000004   2000050   2000060   2000118
   2000146   2000147   2000151   2000152   2000165   2000166   2000167
   2000168   2000169   2000170   2000171   2000172   2000173   2000177   2000180
   2000182   2000184   2000206   2000256   2000265   2000266
```

Figura 5.23 – Cartão com a opção de contato entre superfícies.

O Contato *NODES_TO_SURFACE* possui a mesma filosofia de funcionamento do *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*, porém o primeiro é restrito apenas a um conjunto de nós, que são previamente selecionados em cartões específicos (*SET_NODES/SET_PARTS*). O objetivo desse contato é ajudar na economia de custo computacional, uma vez que não é necessário verificar todas as partes do modelo, mas apenas uma específica.

Dependendo da quantidade de elementos do modelo é prudente selecionar apenas as partes do veículo que entrarão em contato com o obstáculo. Esse recurso evita que o algoritmo de contato faça cálculos desnecessários, otimizando assim o tempo de processamentos. Nos itens a seguir são apresentados as partes de cada modelo de veículo que foram utilizadas no contato.

5.3.1. Veículo 36000V

Na Figura 5.24 estão ilustradas as partes do veículo que foram utilizadas com o contato da barreira. O contato **CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE* foi empregado na lateral da cabine (Figura 5.24(a)), nos pneus e aros laterais do cavalo mecânico (Figura 5.24 e (b)Figura 5.24(c)), para o contato **NODES_TO_SURFACE* foram empregados no baú (Figura 5.24(d)), nos pneus e aros laterais do baú (Figura 5.24(e) e Figura 5.24(f)).

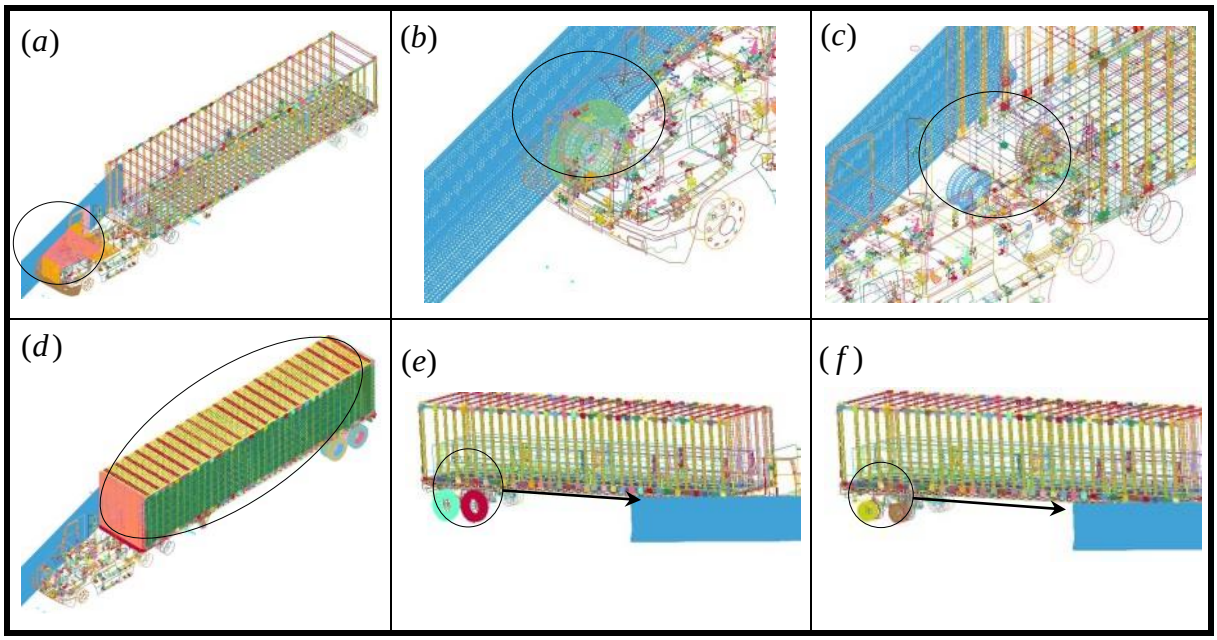


Figura 5.24 – Contatos entre as partes do veículo e a barreira: (a) lateral da cabine, (b) pneu lateral dianteiro do cavalo mecânico, (c) pneus laterais traseiros do cavalo mecânico, (d) baú, (e) pneus laterais traseiros do baú, (f) aros laterais dos pneus traseiros do baú.

5.3.2. Veículo 2000P

Na Figura 5.25 estão ilustradas as três partes do veículo utilizadas no contato com a barreira. O **CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE* foi utilizado para o contato com a parte externa do veículo (Figura 5.25 (a)), pneu lateral (Figura 5.25 (b)) e pneu traseiro (Figura 5.25 (c)).

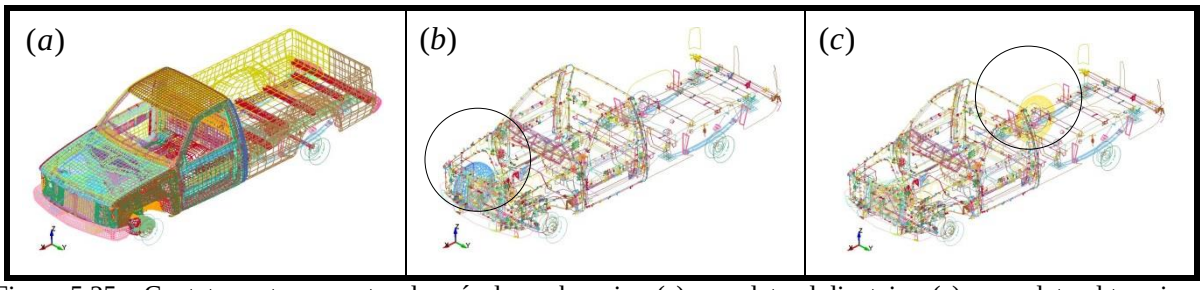


Figura 5.25 – Contatos entre as partes do veículo e a barreira: (a) pneu lateral dianteiro, (c) pneus lateral traseiro.

5.3.3. Veículo 1100C

Utiliza apenas **CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE* entre o veículo e a barreira similarmente ao veículo 2000P, com três partes de contato: parte externa do veículo, pneu lateral e pneu traseiro. Ver Figura 5.26.

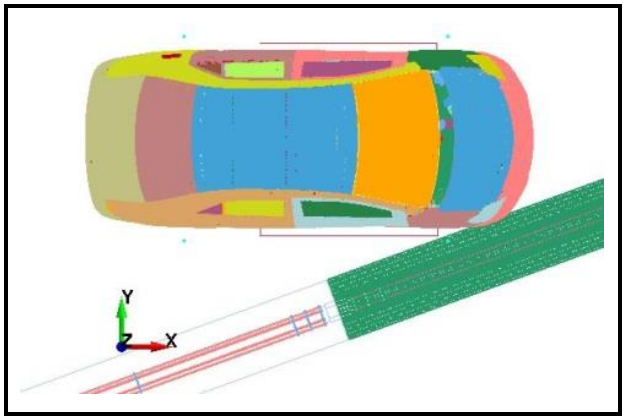


Figura 5.26 – Contato do veículo com a barreira.

5.3.4. Veículo TB11

Devido ao número reduzido de elementos desse modelo não foi necessário separá-lo em partes. Por essa razão, foi criado um único conjunto para o contato com a barreira, composto da fuselagem e pneus, com o uso do **CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*. Ver Figura 5.27.

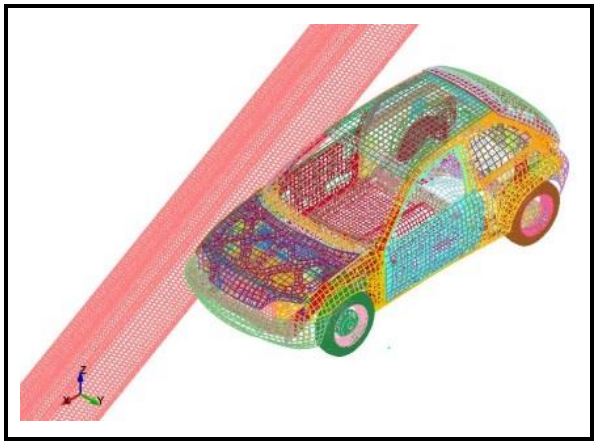


Figura 5.27 – Contato do veículo com a barreira.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações numéricas, que foram divididas conforme o plano de simulações da Figura 6.1. Na primeira etapa foi analisado o desempenho de uma barreira *New Jersey* de 810 mm de altura de concreto armado e engastada na base, utilizando diferentes veículos de diferentes normas, na segunda é abordado uma análise de barreiras temporárias, posteriormente é analisado o desempenho de algumas geometrias de barreiras com o uso de material elástico, para níveis de contenção elevado, de acordo com a classificação do MASH/NCHRP 350 com a utilização de um veículo 36000V e por fim é realizado uma comparação entre o material elástico e o concreto.

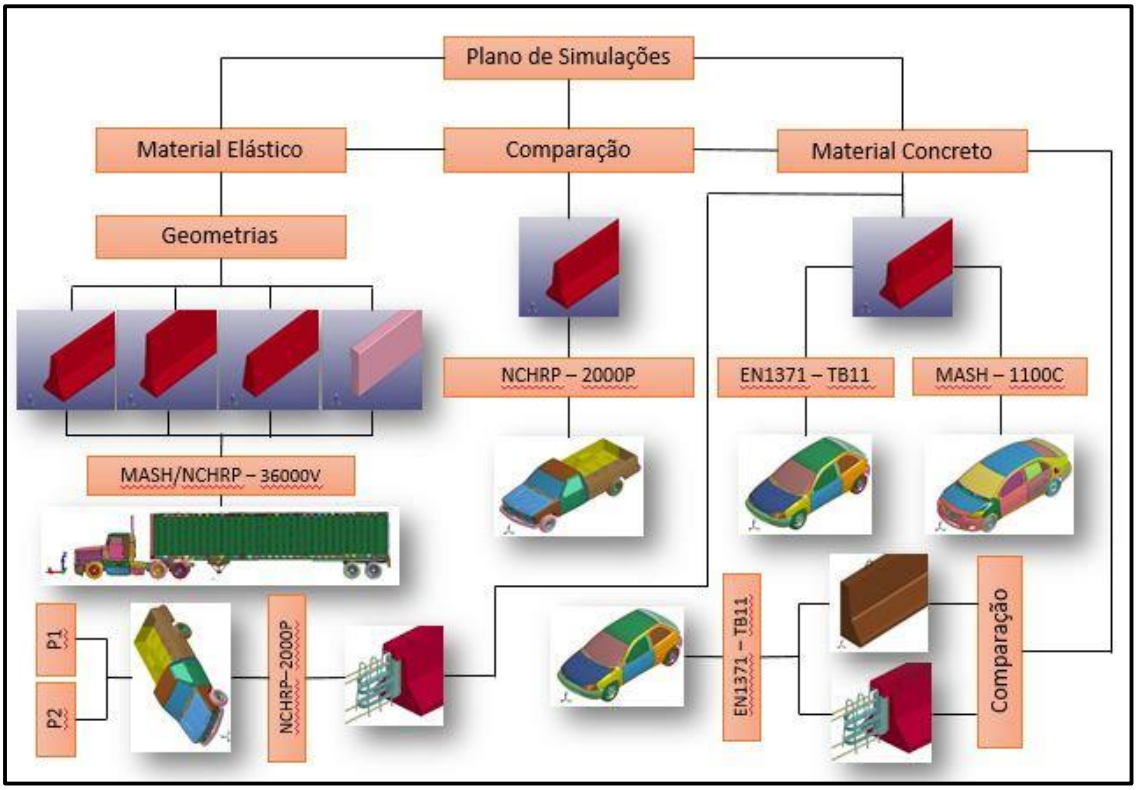


Figura 6.1 – Plano de simulações numéricas.

Para todas as simulações são adotados o sistema de unidades: tonelada (ton), milímetro (mm), segundos (s), Newton (N) e Mega Pascal (MPa), para massa, comprimento, tempo, força e tensão, respectivamente. São usados como valores constantes a densidade do concreto de 2,5E-09 ton/mm³ e gravidade de 9806 mm/s².

6.1. Análise de Desempenho de Barreiras de Concreto New Jersey 810 mm Engastada na Base.

Nessa seção serão mantidas as mesmas propriedades para as barreiras de concreto, variando apenas o tipo de veículo a ser ensaiado. Os parâmetros de entrada para o modelo do material de concreto (**MAT_CSCM_CONCRETE* (159)) e vergalhões (**MAT_PLASTIC_KINEMATIC* (003)) estão dispostos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros de Entrada para o material das barreiras e suas condições de contorno

**MAT_CSCM_CONCRETE* (159)			
Densidade	*f'*c	Tamanho do agregado	Unidades
2,5E-09	29,4	19	2
**MAT_PLASTIC_KINEMATIC* (003)			
Densidade	*Módulo de Elasticidade*	Poisson	Tensão de Escoamento
2,5E-09	2,1E+05	0,3	500

6.1.1. Simulação com Veículo TB 11

Essa simulação foi baseada nos critérios da norma europeia EN 1371 (2008), foi utilizado um veículo de passeio de 900 kg, com uma velocidade de impacto de 100 km/h e um ângulo de 20º entre o veículo e a barreira de concreto modelo *New Jersey* 810 mm engastada na base, por um tempo de 1,0 s. Na Figura 6.2 é mostrado o ambiente de simulação entre o veículo e a barreira.

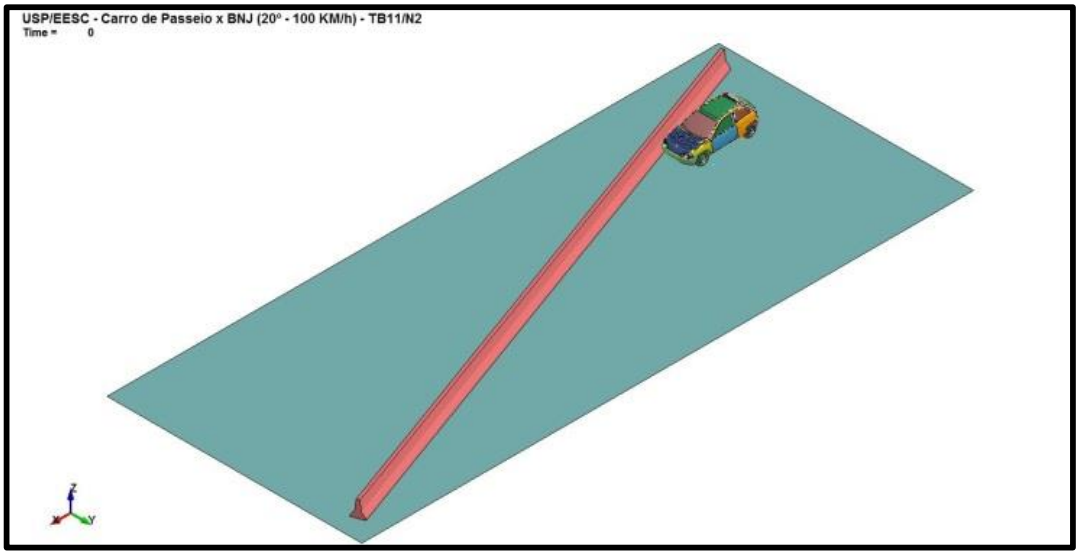


Figura 6.2 – Ambiente de simulação LS-PrePost/LS-DYNA de uma simulação de impacto: veículo TB11 *versus* barreira *New Jersey* 810 mm.

Os resultados referentes ao redirecionamento do veículo são apresentados na Figura 6.3. Na Figura 6.3(a) a linha em vermelho representa o deslocamento do CG do automóvel desde o ponto de partida até o ponto de tempo igual a um segundo. Pela vista lateral é possível verificar a elevação do veículo para os instantes de tempo 0,2 s, 0,355 s, 0,545 s, 0,69 s e 1,0 s.

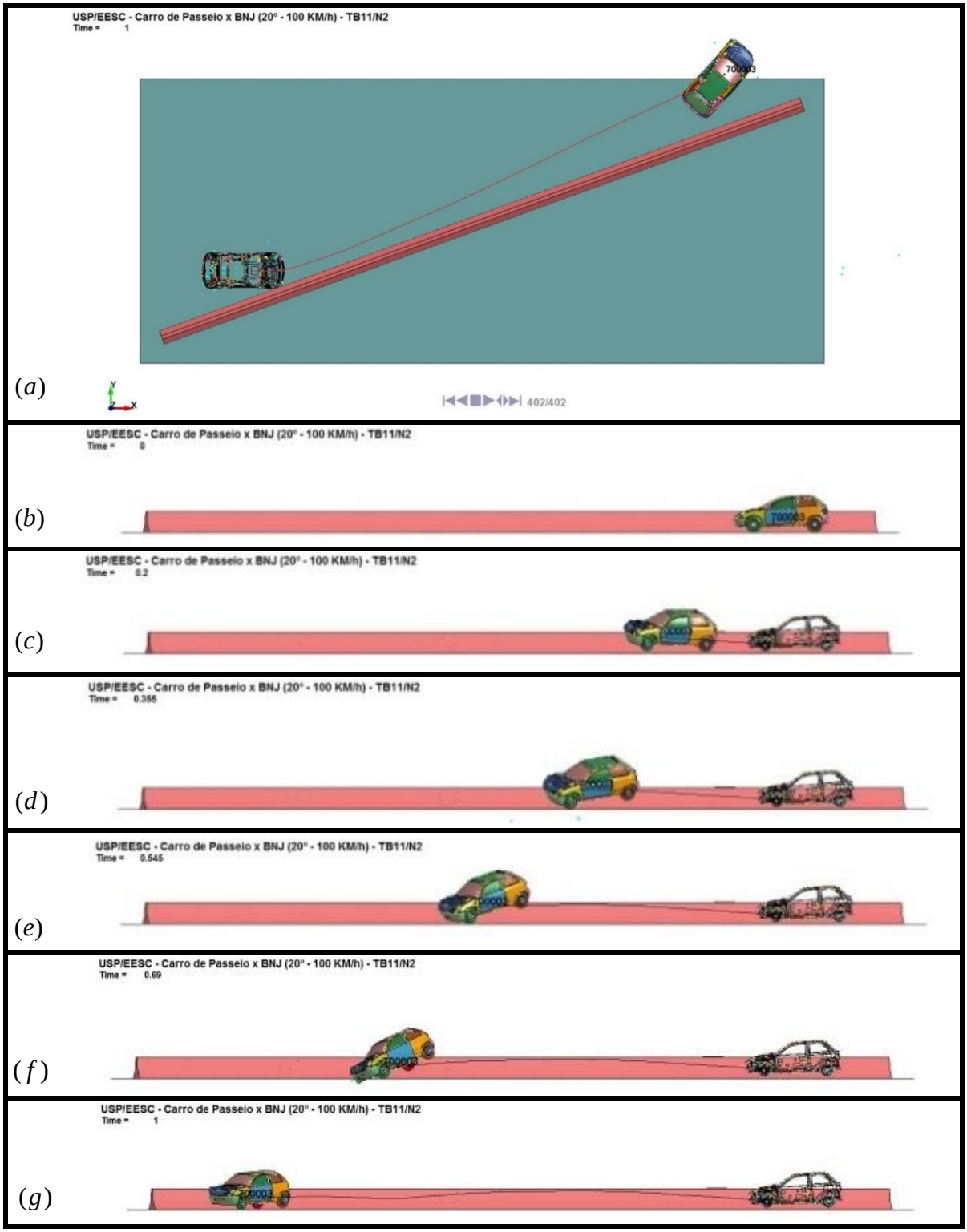


Figura 6.3 – Virtualização da simulação de impacto veículo TB11 *versus* barreira *New Jersey* 810 mm: (a) vista superior, (b) a (g) vista lateral.

O veículo percorreu uma distância de 20,7 m na direção longitudinal da barreira no tempo de zero a um segundo, Figura 6.4(a), na Figura 6.4(b) é mostrado o deslocamento transversal (em relação ao CG do veículo), nota-se que o veículo é redirecionado ao impactar com a barreira por volta de 0,05 segundo, percorrendo uma distância de 8,66 m. Quanto ao deslocamento escalar vertical, o CG do carro obteve uma altura máxima de 0,357 m, conforme é mostrado na Figura 6.4(c). O deslocamento total foi de 22,60 m e é plotado no gráfico da Figura 6.4(d).

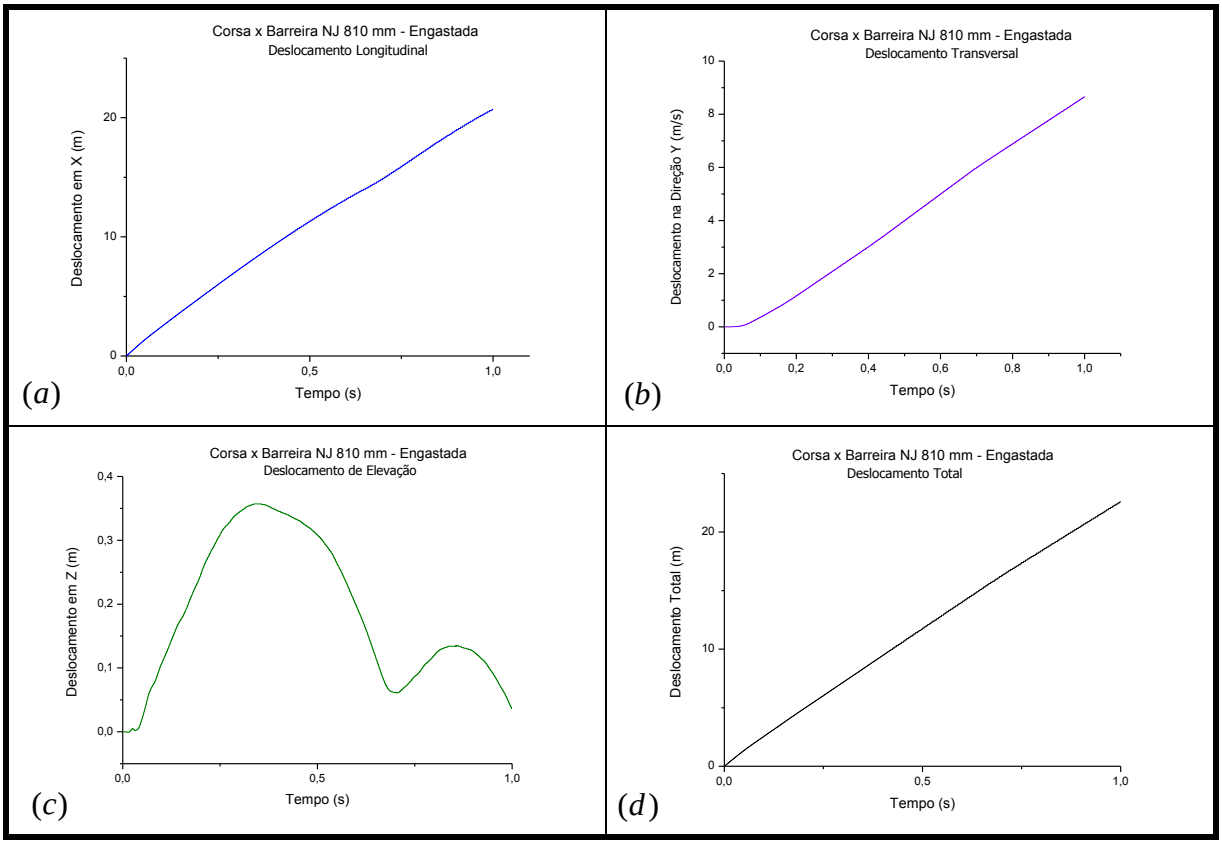


Figura 6.4 – Deslocamento do veículo: (a) direção longitudinal, (b) direção transversal, (c) direção de elevação e (d) deslocamento total.

A velocidade inicial do tempo de partida igual a zero até o tempo igual a 1,0 s estão plotadas por eixo de direção na Figura 6.5. Nota-se que a velocidade na direção de X, que é a velocidade do veículo antes de impactar com a barreira foi de 100 km/h (27,78 m/s) e esse vai perdendo velocidade nessa direção até obter a velocidade de 67,68 km/h (18,8 m/s) para o tempo de 1,0 segundo. Conforme mostrado no gráfico da Figura 6.5(a)

Em relação ao sentido transversal e horizontal da barreira, a velocidade inicial do veículo era zero nessas direções, no momento do impacto houve um redirecionamento brusco do veículo, iniciando as velocidades nessas direções. No sentido transversal a velocidade varia de zero a 32,65 km/h (9,07 m/s) no tempo de 1,0 s, obtendo o valor máximo nessa direção de 37,44 km/h (10,4 m/s). Ver Figura 6.5(b)

Quanto à velocidade horizontal o veículo alternou de velocidade à medida que se elevava e impactava sobre o solo, obtendo uma velocidade máxima de 9,54 km/h (2,65 m/s). Ver Figura 6.5(c).

No gráfico da Figura 6.5(d) é plotado a velocidade resultante nas três direções, onde a velocidade varia de 100 km/h (27,78 m/s) a um mínimo de 75,24 km/h (20,9 m/s) no tempo igual a 1,0 segundo.

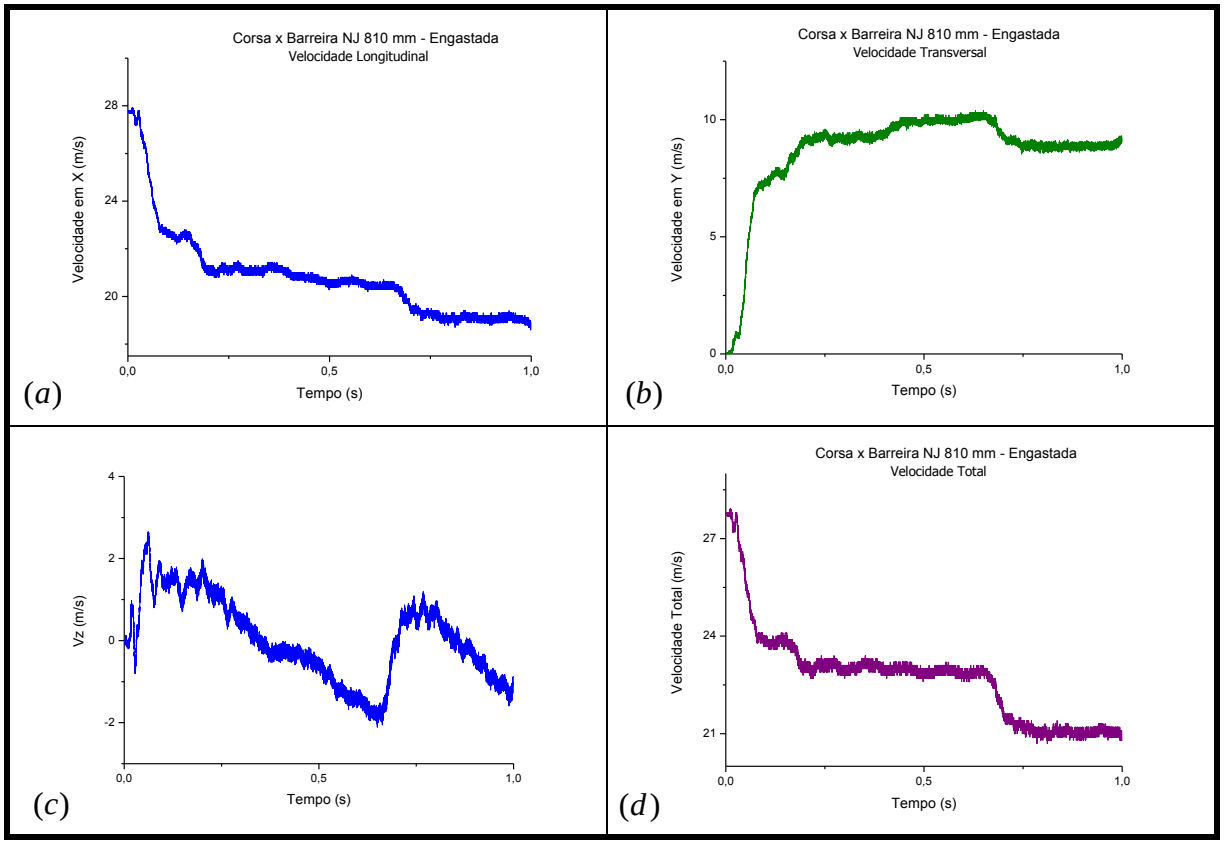


Figura 6.5 – Velocidade do veículo após o impacto: (a) velocidade longitudinal, (b) velocidade transversal, (c) velocidade horizontal e (d) velocidade total.

Semelhante às velocidades, as acelerações foram plotadas por direção, ver Figura 6.6. A aceleração longitudinal é mostrada na Figura 6.6(a), onde os picos de aceleração no início do impacto ficaram na faixa de -20g a 10g, estabilizando após o tempo de aproximadamente 0,25 segundos para uma faixa entre -5g a 5 g.

Na Figura 6.6(b) é mostrado o gráfico da aceleração transversal no tempo de zero a 1,0 s, onde os maiores picos de aceleração se deu entre 0 e 0,125 s, chegando próximo de 30g e se estabilizando entre -10g e 10g. Finalmente, a aceleração no sentido vertical, que oscilou no tempo de 0 a 0,125 s com picos de -32 a 28g, Figura 6.6(c).

O índice ASI é plotado na Figura 6.6(d), conforme já discutido no capítulo de sistemas de contenção veicular, obtendo-se um valor máximo de 0,7177 que corresponde um ASI ≤ 1 o que equivale a um nível de segurança elevado com mínimas lesões aos seus ocupantes.

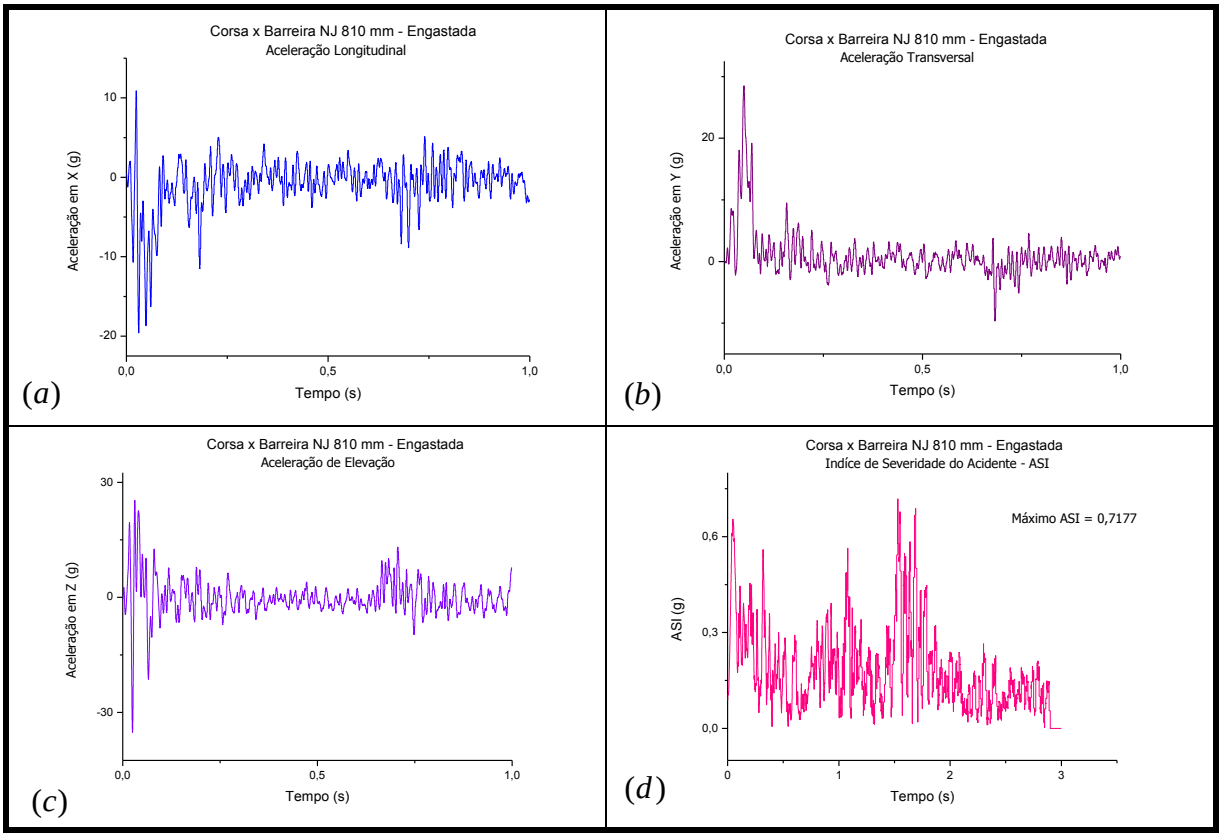


Figura 6.6 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI.

A Figura 6.7 mostra a deformação plástica da barreira ocasionada pelo impacto do veículo. O ponto de máxima força de contato entre o veículo e a barreira é mostrado na Figura 6.7(a). Na Figura 6.7(b) mostra que apesar do esforço de reação sofrido pela barreira, a mesma não nenhum dano aparente. O início do contato entre o veículo e a parte frontal do veículo no tempo 0,07 s é registrado na Figura 6.7(c). A força axial da armadura do concreto no momento do impacto é mostrada na Figura 6.7(d).

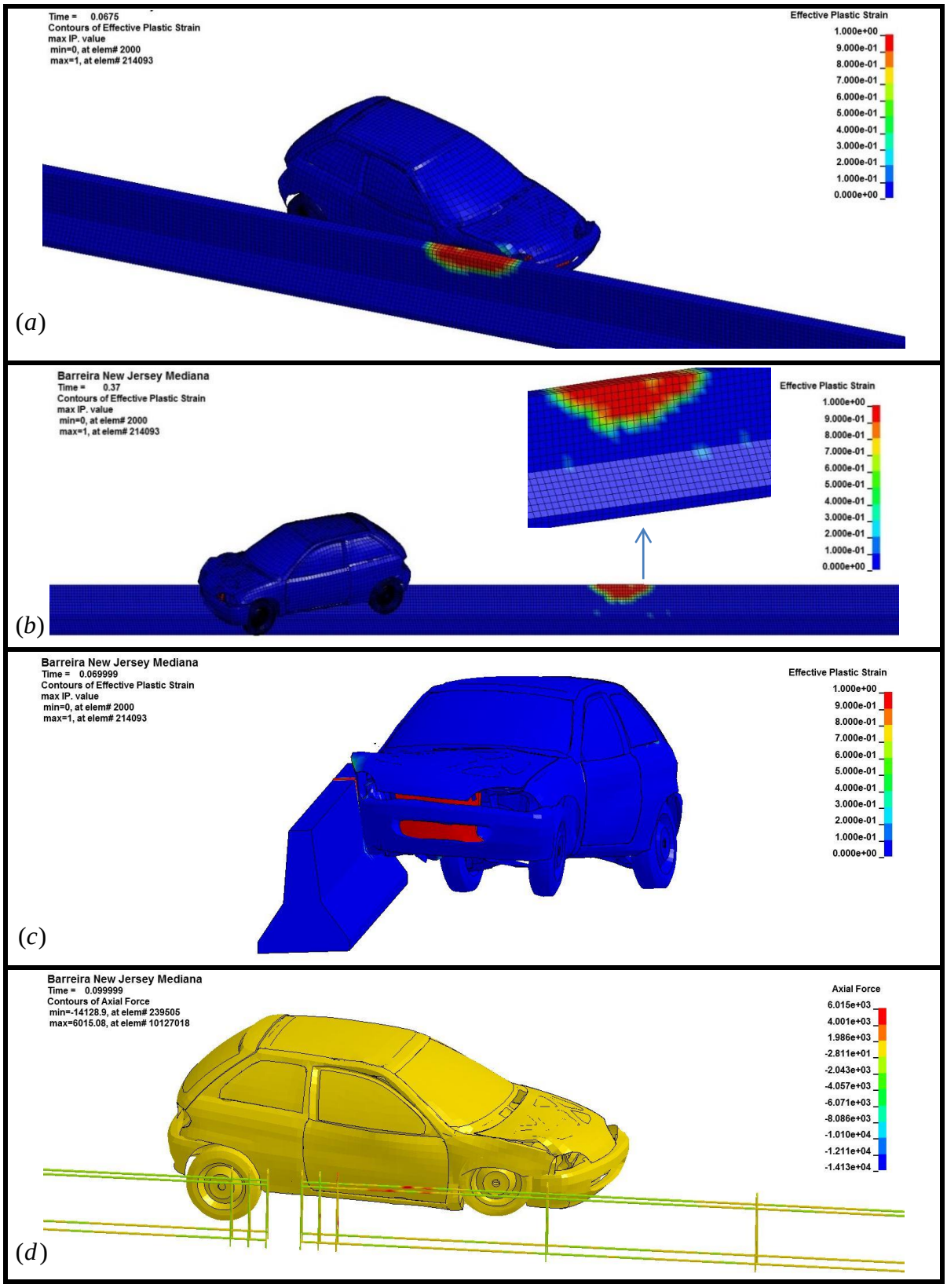


Figura 6.7 – Deformação plástica da barreira ocasionada pelo impacto do veículo: (a) ponto de máxima força de contato, (b) após o impacto e (c) inicio do contato entre veículo e barreira, (d) Força axial da armadura da barreira oriunda do impacto do veículo.

A força resultante de contato que acontece no intervalo de tempo entre zero e 0,2 segundos é plotado no gráfico da Figura 6.8, onde se observa que a houve picos máximo de

força resultante por volta de 276 kN no intervalo de 0,0476 s, acompanhado de um segundo pico, de menor severidade, no intervalo de 0,17 s de 79 kN.

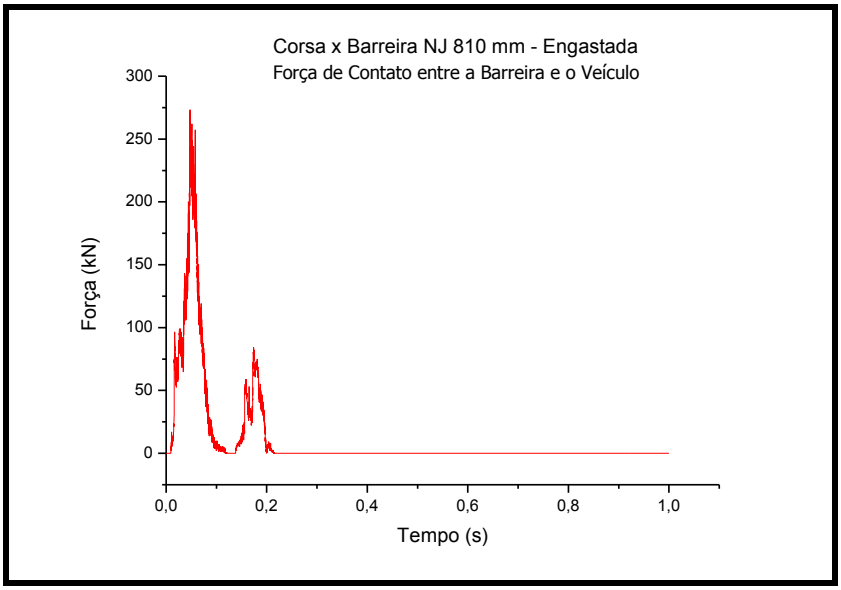


Figura 6.8 – Força Resultante de contato entre a barreira e o veículo.

Em relação ao índice de deformação da cabine do veículo previsto na EN-1317-1, o IDCV foi de RS0001010. Na Figura 6.9 as deformações sofridas pelo veículo, onde a coluna esquerda mostra as condições do veículo antes do impacto e a direita após o impacto no tempo de 1,0 s.

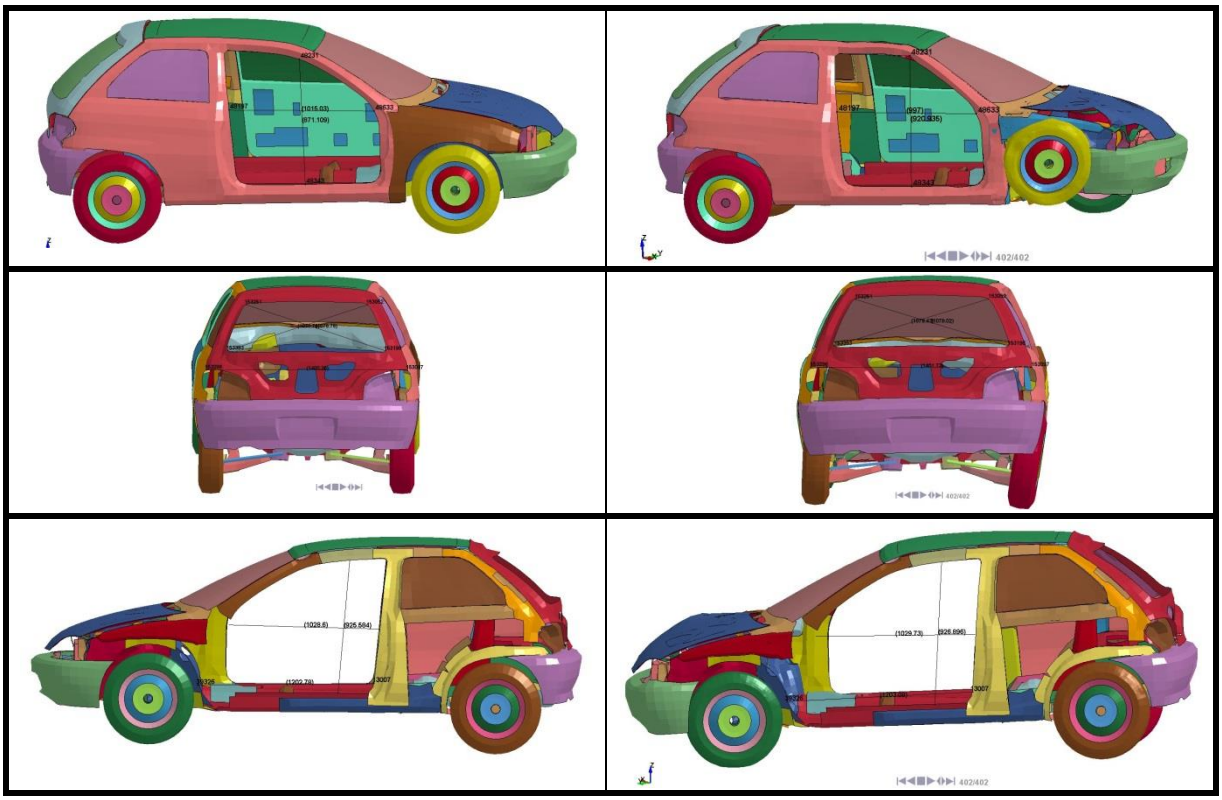


Figura 6.9 – Deformações sofridas pelo veículo, na coluna esquerda está o veículo sem deformações e na direita as deformações sofrida pelo veículo após o impacto.

6.1.2. Simulação com Veículo 1100 C

Essa simulação foi baseada nos critérios do MASH (2009), foi utilizado um veículo de passeio de 1100 kg, com uma velocidade de impacto de 100 km/h e um ângulo de 20º entre o veículo e a barreira de concreto modelo New Jersey 810 mm engastada na base, por um tempo de 1,0 s. Na Figura 6.10 é mostrado o ambiente de simulação entre o veículo e a barreira.

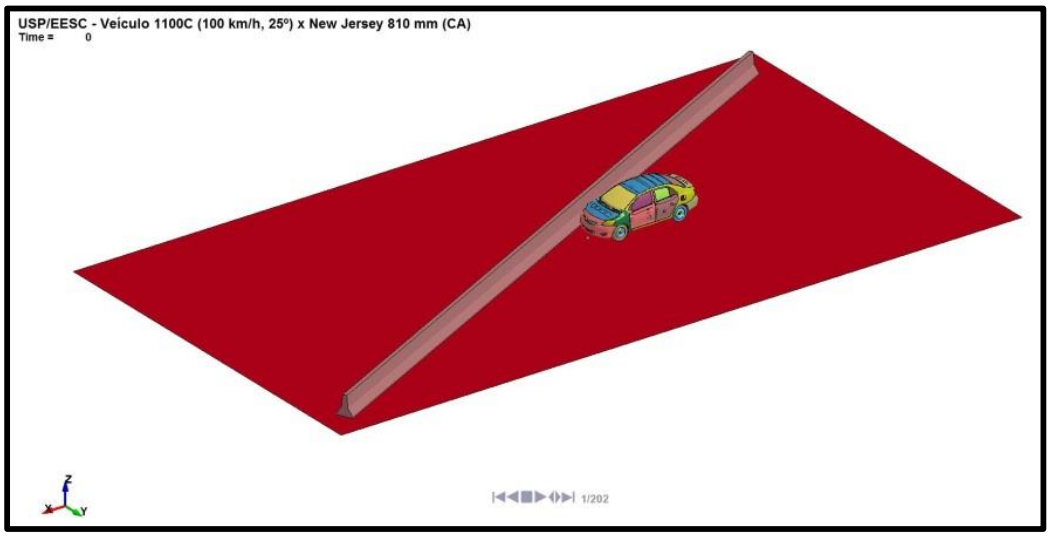


Figura 6.10 – Ambiente de simulação LS-PrePost/LS-DYNA de uma simulação de impacto: veículo 1100C *versus* barreira *New Jersey* 810 mm.

Os resultados referentes ao redirecionamento do veículo são apresentados na Figura 6.3. Na Figura 6.11(a) a linha em vermelho representa o deslocamento do CG do automóvel desde o ponto de partida até o ponto de tempo igual a um segundo. Pela vista lateral é possível verificar a elevação do veículo para os instantes de tempo 0,0 s, 0,155 s, 0,405 s, 0,565 s, 0,825 s e 1,0s.

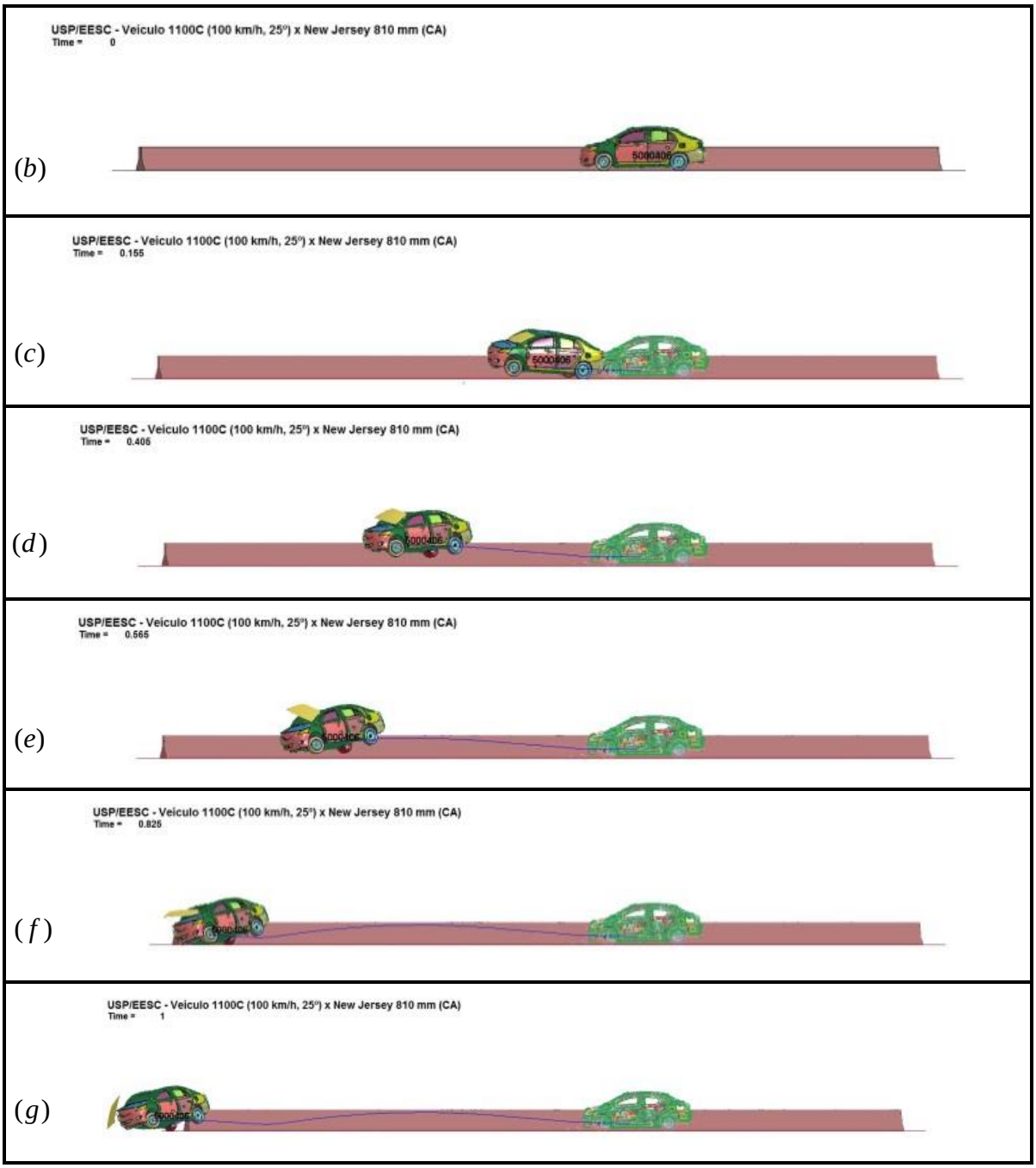


Figura 6.11 – Virtualização da simulação de impacto veículo 1100C *versus* barreira *New Jersey* 810 mm: (a) vista superior, (b) a (g) vista lateral.

O veículo percorreu uma distância de 19,9 m na direção longitudinal da barreira no tempo de zero a um segundo, Figura 6.12(a), e 5,6 m no deslocamento transversal (em relação à origem), ver Figura 6.12 (b). Quanto ao deslocamento horizontal, o CG do carro obteve uma altura máxima de 0,386 m (em relação ao CG), conforme é mostrado na Figura 6.12 (c). O deslocamento total foi de 20,90 m e é plotado no gráfico da Figura 6.12 (d).

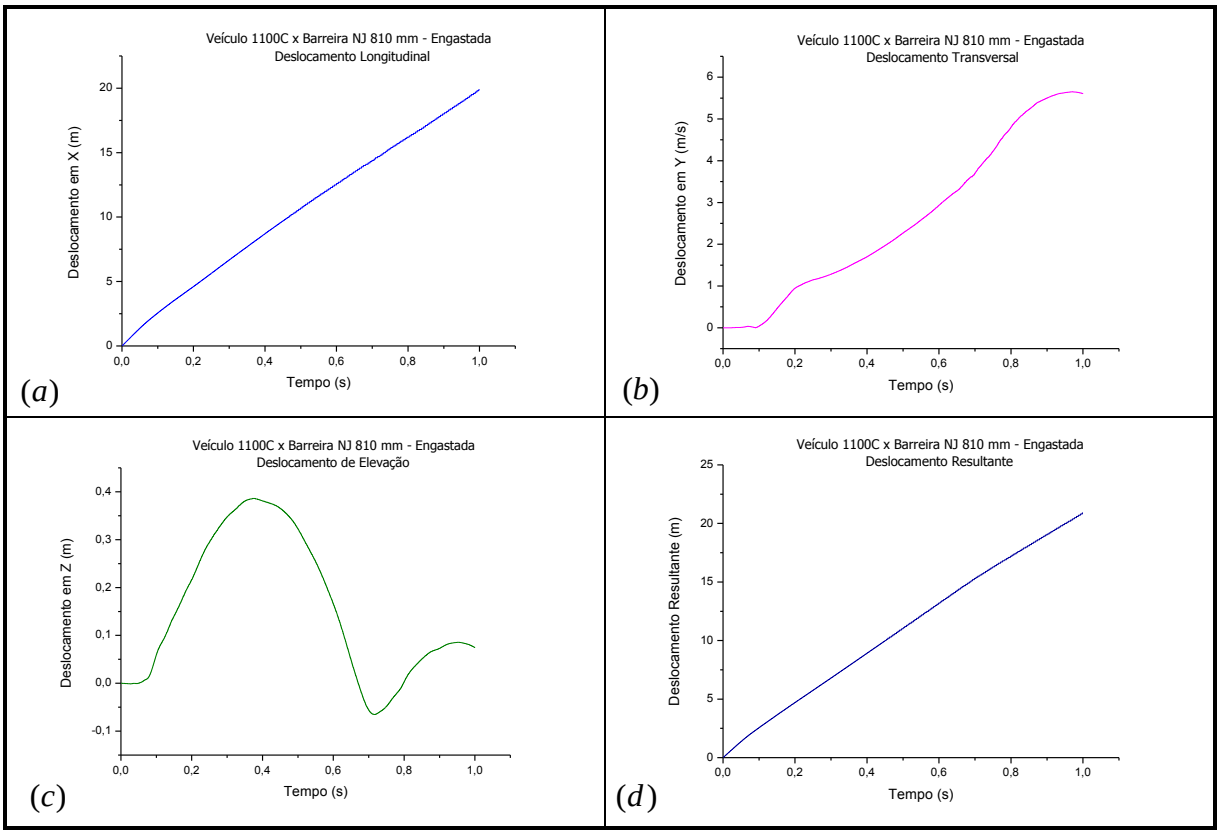


Figura 6.12 – Deslocamento do veículo: (a) direção longitudinal, (b) direção transversal, (c) direção de elevação e (d) deslocamento total.

A velocidade inicial do tempo de partida igual a zero até o tempo igual a 1,0 s estão plotadas por eixo de direção na Figura 6.13. Nota-se que a velocidade na direção de X, que é a velocidade do veículo antes de impactar com a barreira foi de 100 km/h (27,78 m/s) e esse vai perdendo velocidade nessa direção até obter a velocidade de 18,4 m/s para o tempo de 1,0 segundo. Conforme mostrado no gráfico da Figura 6.13 (a)

Em relação ao sentido transversal e horizontal da barreira, a velocidade inicial do veículo era zero nessas direções, no momento do impacto houve um redirecionamento brusco do veículo, iniciando as velocidades nessas direções. No sentido transversal a velocidade obteve um valor de pico de 5,7 m/s. Ver Figura 6.13 (b)

Quanto à velocidade horizontal o veículo alternou de velocidade à medida que se elevava e impactava sobre o solo, obtendo uma velocidade de pico de 4,85 m/s. Ver Figura 6.13 (c).

No gráfico da Figura 6.13 (d) é plotado a velocidade resultante nas três direções, onde a velocidade varia de 27,78 m/s a um mínimo de 18,6 m/s no tempo igual a 1,0 segundo.

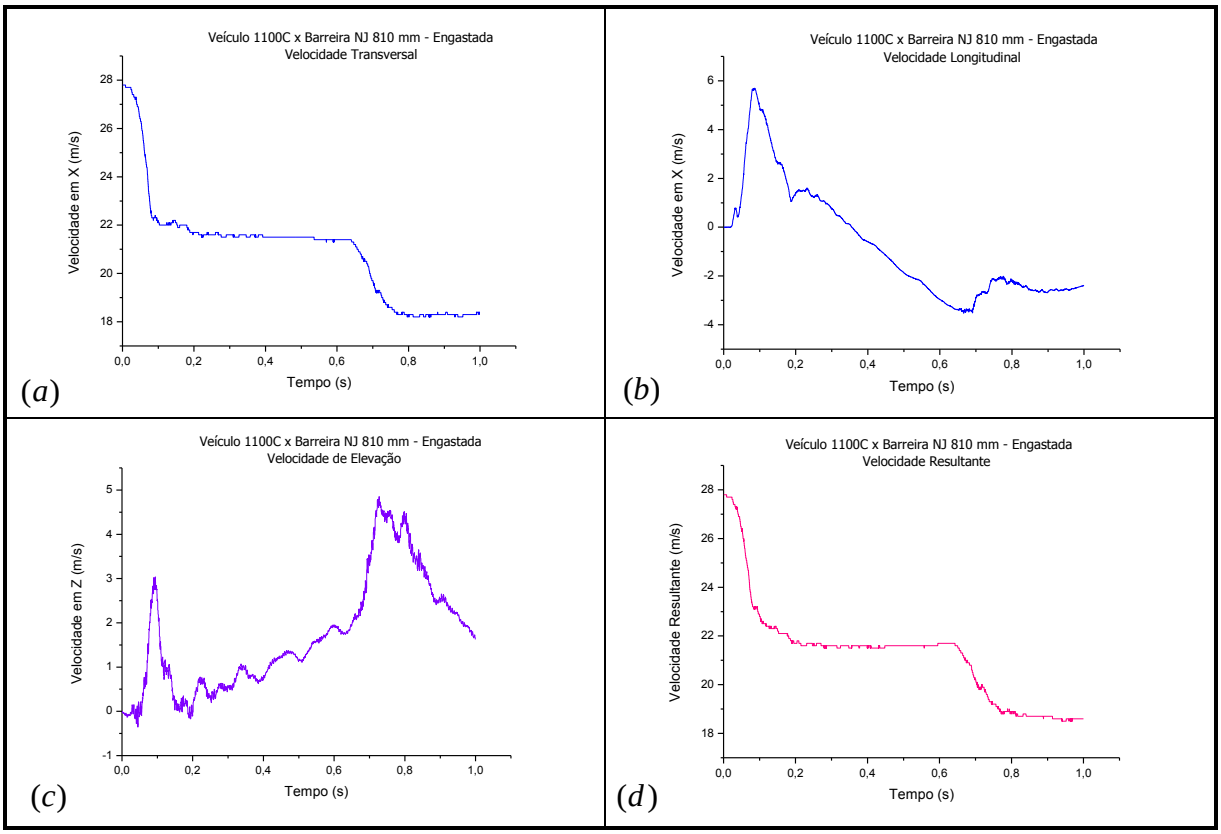


Figura 6.13 – Velocidade do veículo após o impacto: (a) velocidade longitudinal, (b) velocidade transversal, (c) velocidade horizontal e (d) velocidade total.

Semelhante às velocidades, as acelerações foram plotadas por direção, ver Figura 6.14. A aceleração longitudinal é mostrada na Figura 6.14(a), onde os picos de aceleração no início do impacto ficaram na faixa de -25g a 5g, estabilizando após o tempo de aproximadamente 0,1 segundos para uma faixa entre -5g a 5 g.

Na Figura 6.14 (b) é mostrado o gráfico da aceleração transversal no tempo de zero a 1,0 s, onde os maiores picos de aceleração se deu entre 0 e 0,125 s, chegando próximo de 25g e se estabilizando entre 10g e -5g. Finalmente, a aceleração no sentido vertical, que oscilou no tempo de 0 a 0,125 s com picos de -10 a 17,5 g, Figura 6.14 (c).

O índice ASI é plotado na Figura 6.14 (d), ficando na faixa de ASI ≤ 1,9, que corresponde a um nível de segurança reduzido com lesões aos seus ocupantes.

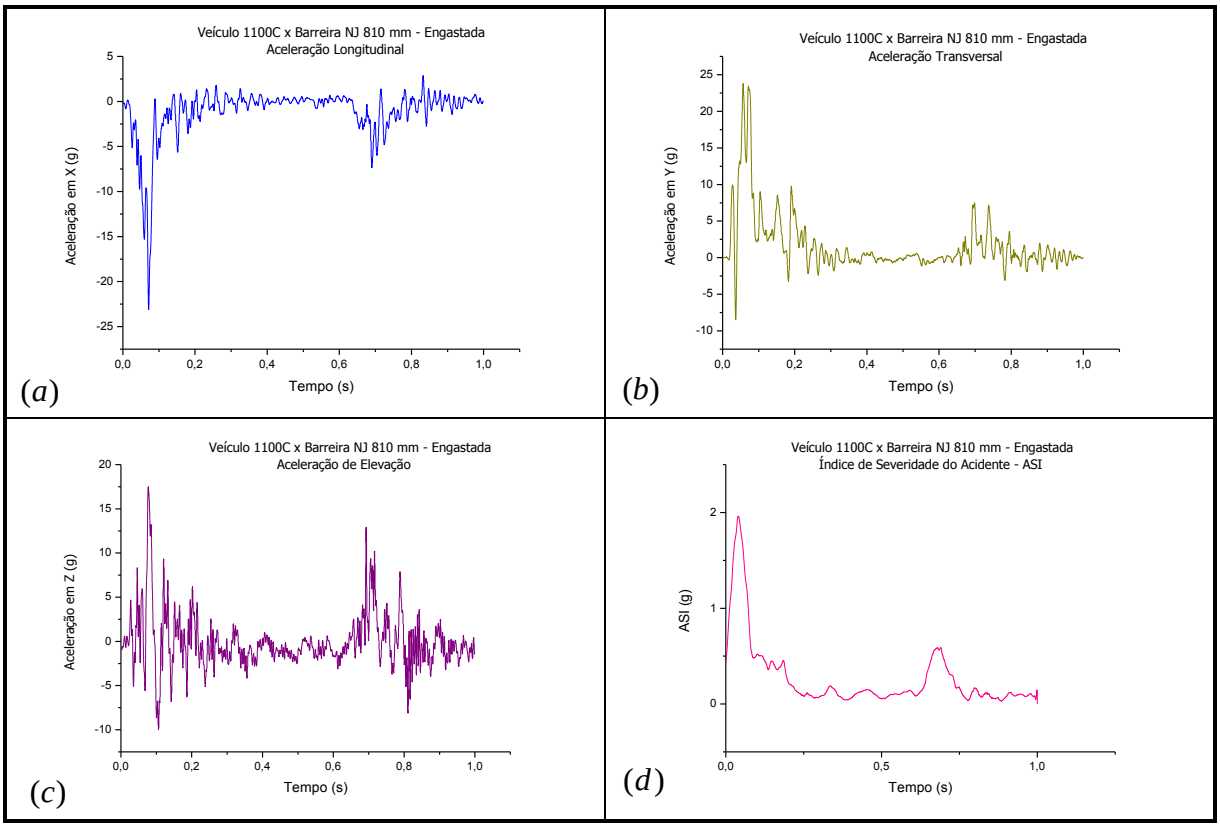
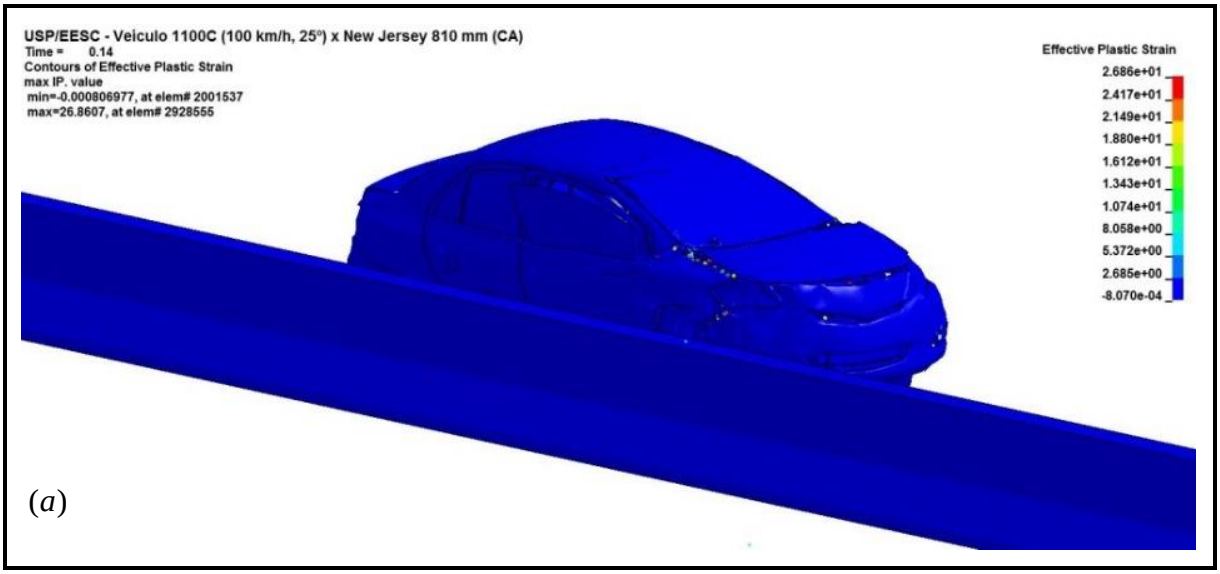


Figura 6.14 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI.

A Figura 6.15 mostra a deformação plástica da barreira ocasionada pelo impacto do veículo. O início do contato entre o veículo e a parte frontal do veículo no tempo 0,04 s é registrado na Figura 6.15 (b). A força axial da armadura do concreto no momento do impacto é mostrada na Figura 6.15 (c).



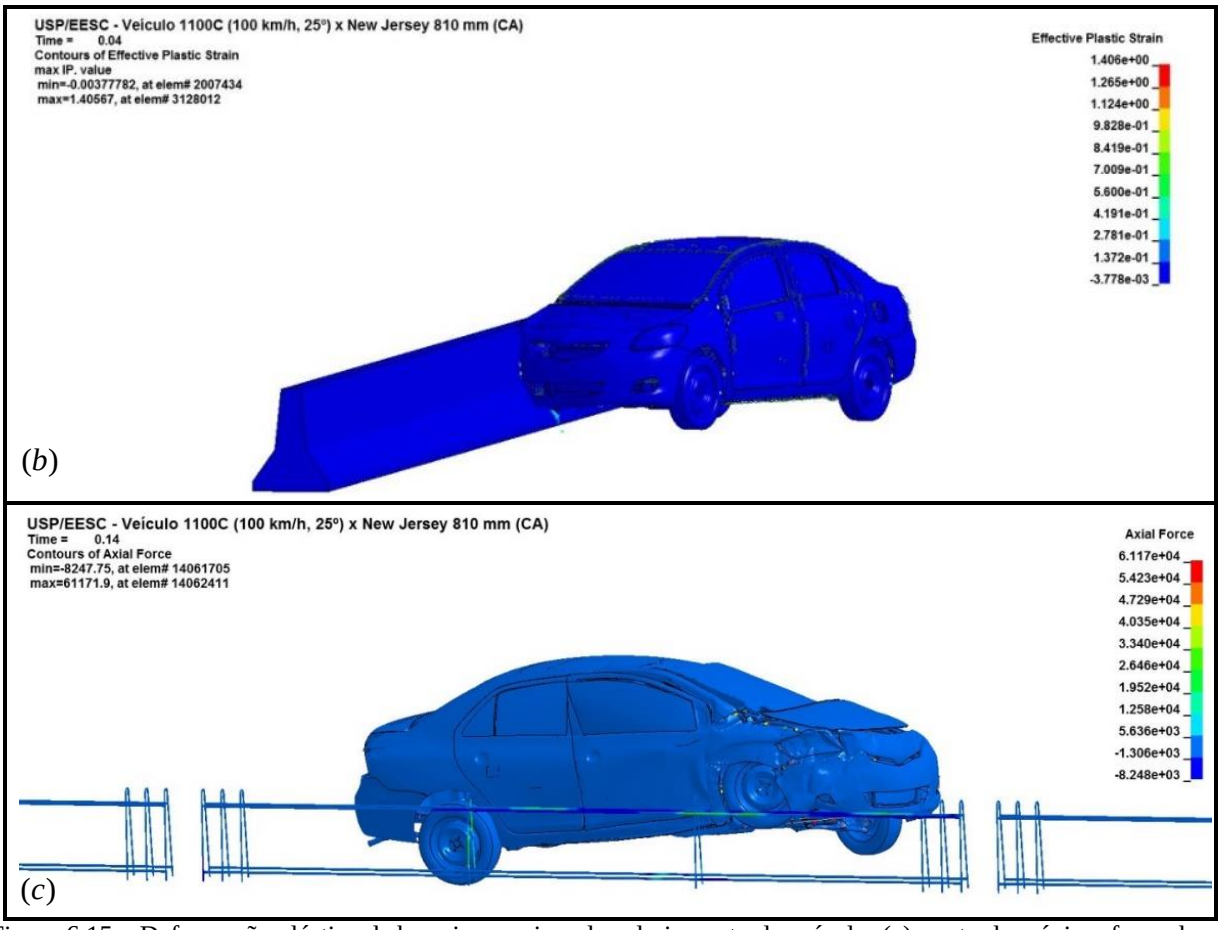


Figura 6.15 – Deformação plástica da barreira ocasionada pelo impacto do veículo: (a) ponto de máxima força de contato, (b) após o impacto e (c) inicio do contato entre veículo e barreira, (d) Força axial da armadura da barreira oriunda do impacto do veículo.

A força resultante de contato que acontece no intervalo de tempo entre zero e 0,3 segundos é plotado no gráfico da Figura 6.16, onde se observa que a houve picos máximo de força resultante por volta de 417 kN no tempo de 0,0642 s.

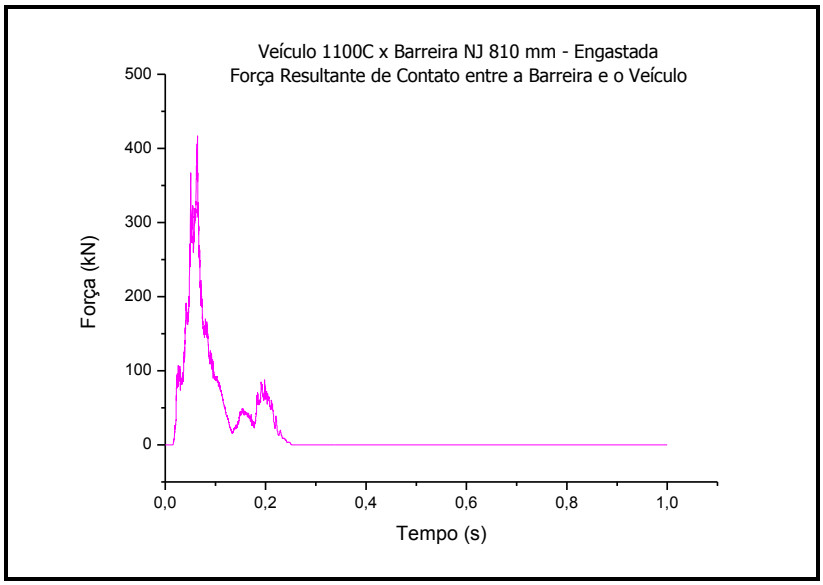


Figura 6.16 – Força Resultante de contato entre a barreira e o veículo.

Em relação ao índice de deformação da cabine do veículo previsto na EN-1317-1, o IDCV foi de RS0000010. Na Figura 6.9 as deformações sofridas pelo veículo, onde a coluna esquerda mostra as condições do veículo antes do impacto e a direita após o impacto no tempo de 1,0 s.

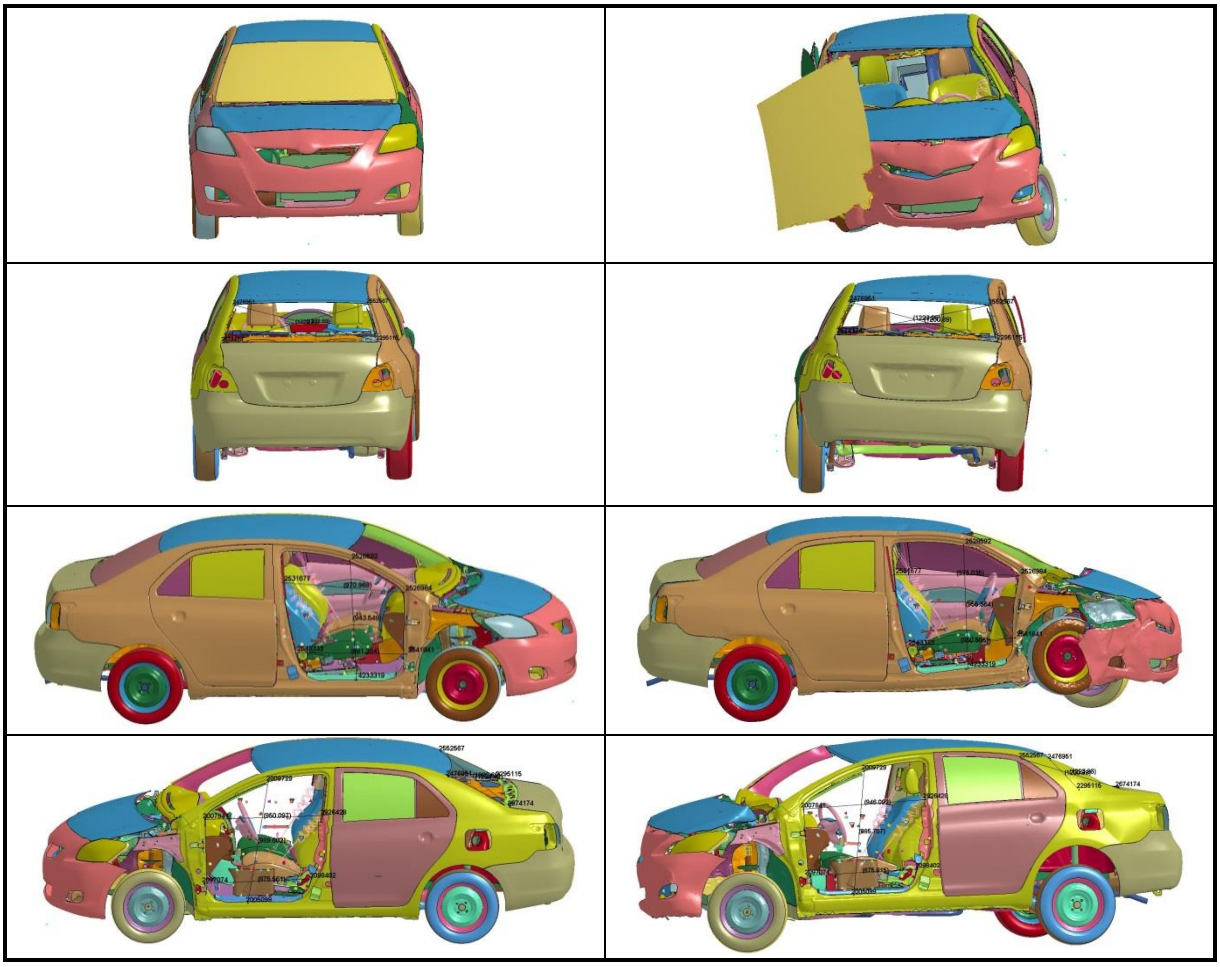


Figura 6.17 – Deformações sofridas pelo veículo, na coluna esquerda está o veículo sem deformações e na direita as deformações sofrida pelo veículo após o impacto.

6.2. Análise de Desempenho de um Modelo de Barreira Temporária de Concreto *New Jersey* 810 mm com conector *New York*.

6.2.1. Simulação com Veículo 2000 P

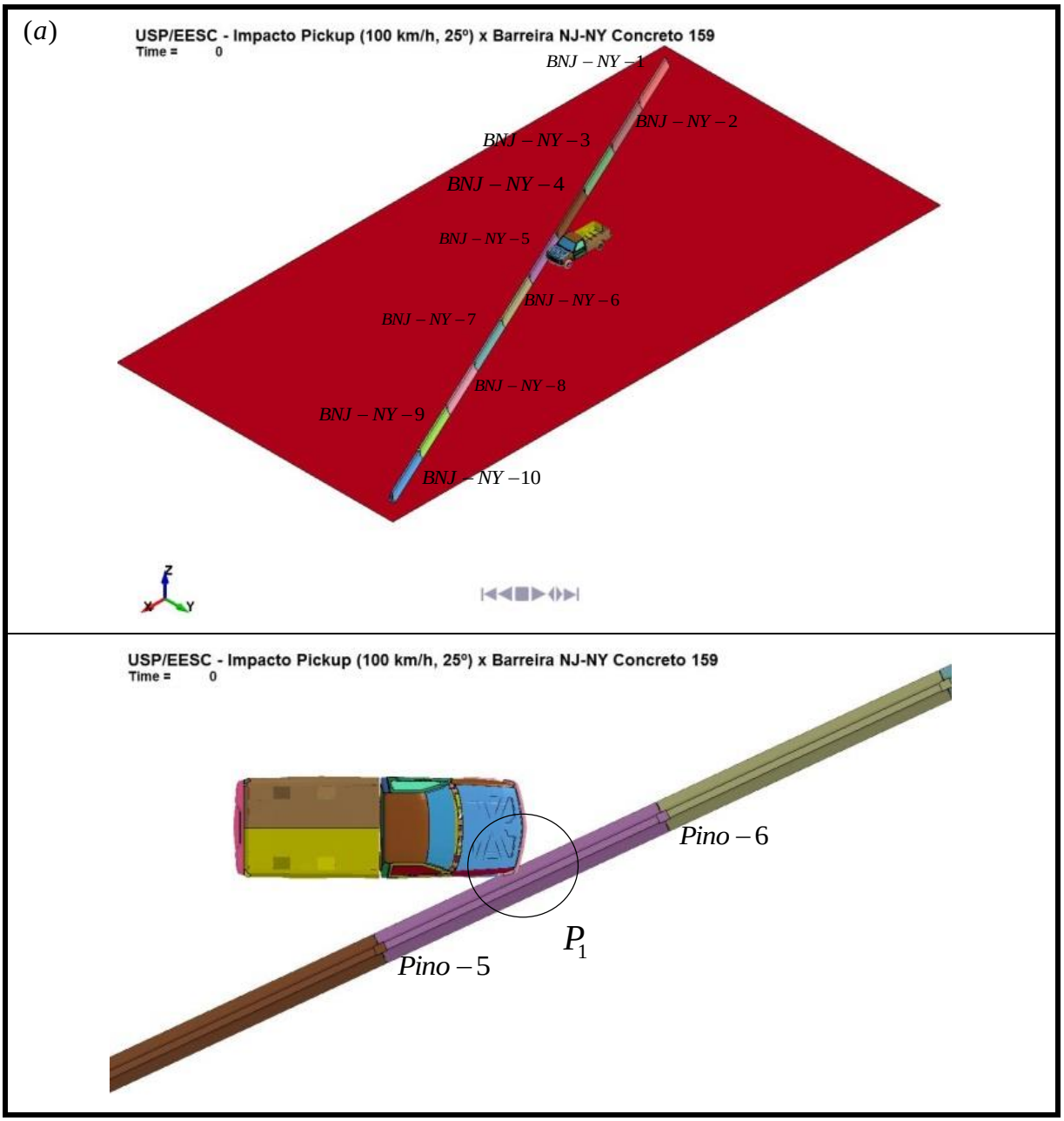
Essas simulações foram baseadas nos critérios do NCHRP R350 (1993), com a utilização de um veículo pick-up de 2000 kg, com uma velocidade de impacto de 100 km/h e um ângulo de 25º entre o veículo e a barreira, por um intervalo de tempo de 1,0 s.

O modelo utilizado de barreira foi o *New Jersey* 810 mm com conectores NY (BNJ-NY). Para a simulação foi escolhido dois pontos de impacto (P_1 e P_2) para a comparação de desempenho, ver Figura 6.18. O ponto P_1, na parte mediana da barreira, é a posição mais

favorável para a barreira, uma vez que os conectores serão menos solicitados devido ao peso próprio da barreira, Figura 6.18 (a).

O ponto P_2 foi escolhido por ser a parte mais desfavorável para a barreira, exatamente na parte de conexão entre as barreiras, nesse caso, praticamente todas as cargas de impacto serão repassadas aos conectores da área de impacto, ver Figura 6.18 (b).

O modelo foi semelhante ao ensaiado no laboratório, entretanto, com comprimentos de 6,0 m cada módulo, o conjunto completo é constituído de dez módulos, dando um comprimento longitudinal de 30,0 m para o conjunto, ver Figura 6.18 (a).



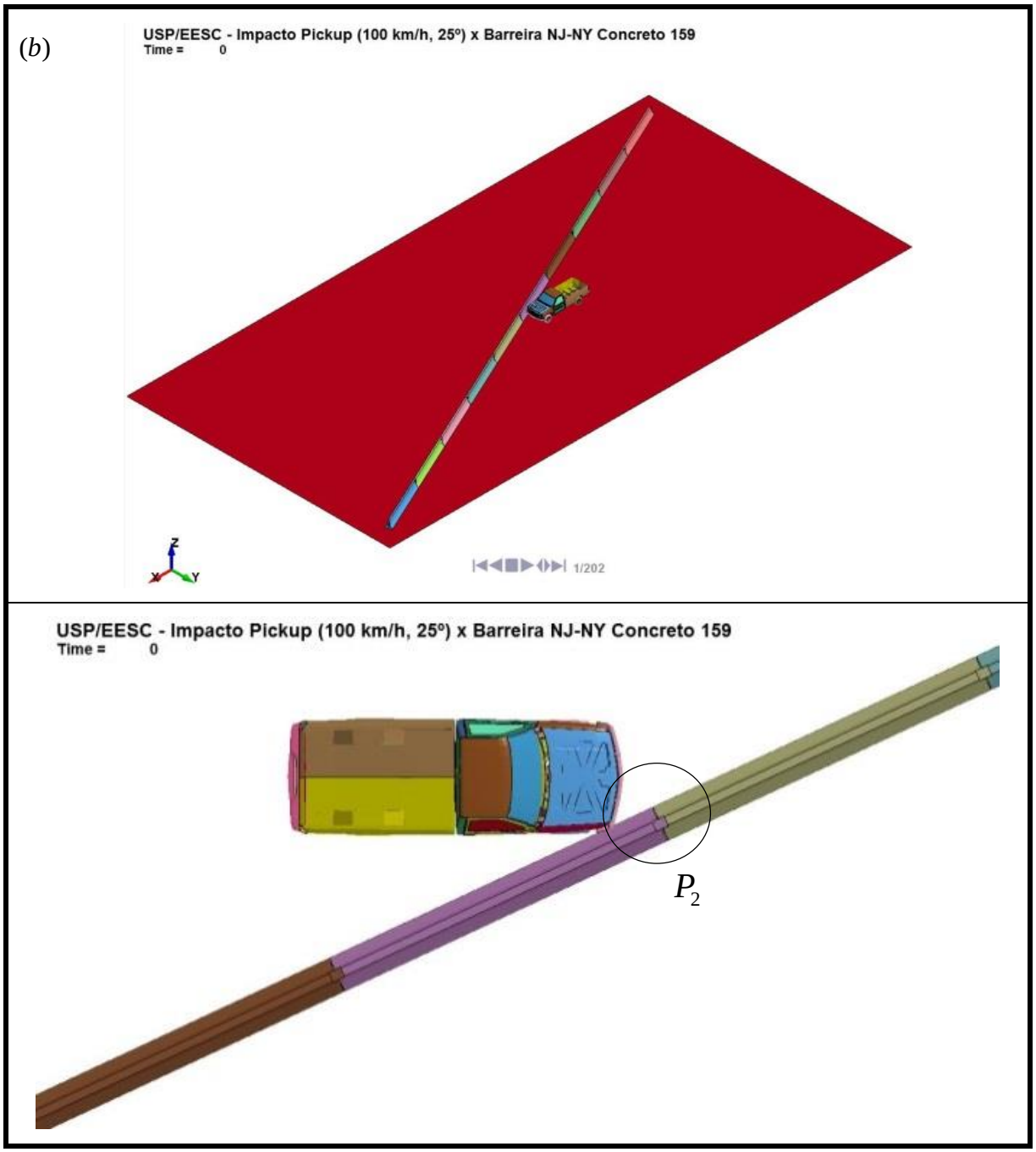


Figura 6.18 – Ambiente de Simulação Veículo P2000 x BNJ-NY: (a) Ponto de impacto P_1, (b) Ponto de impacto P_2.

A velocidade inicial do tempo de partida igual a zero até o tempo igual a 1,0 s estão plotadas por eixo de direção na Figura 6.19. Na direção X (Figura 6.19(a)), percebe-se que para o ponto de impacto P_2 a diminuição de velocidade é acentuada se comparada a P_1, para a direção Y, (Figura 6.19(b)), o ganho de velocidade após o impacto é mais acentuado para o ponto P1, e em relação à direção Z ((Figura 6.19(c)), a velocidade vertical também foi maior após o impacto. A velocidade resultante é mostrada na Figura 6.19(d).

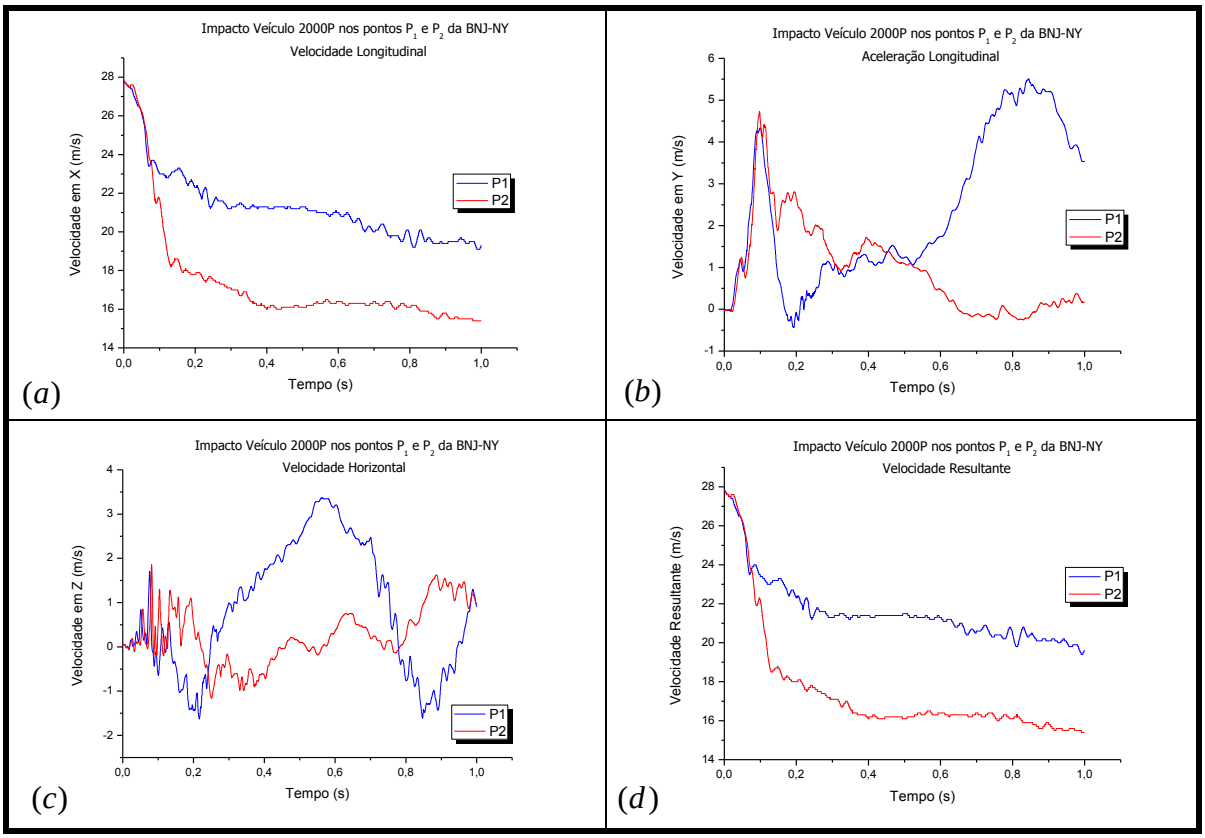


Figura 6.19 – Velocidade do veículo após o impacto: (a) velocidade longitudinal, (b) velocidade transversal, (c) velocidade horizontal e (d) velocidade resultante.

Os resultados dos deslocamentos longitudinais e transversais, em relação ao sistema global de referência, são mostrados no gráfico da Figura 6.20. Observa-se que o veículo ao impactar no ponto P_1 teve um maior deslocamento que ao impactar no ponto P_2, em ambas as direções.

Na direção longitudinal das barreiras e para o ponto de impacto P_1, o veículo se deslocou 19,6 m para um intervalo de 1,0 s, enquanto para P_2 o deslocamento foi de 15,6 m para o mesmo intervalo de tempo (ambos em relação ao sistema global de referência), ver Figura 6.20(a).

Na direção transversal, houve um deslocamento de 8,5 m para P_1 e 7,2 m para P_2, é fácil verificar visto que P_1 teve um maior deslocamento longitudinal, ver Figura 6.21 e Figura 6.20(a).

Sob o ponto de vista de deslocamento é desejável que o veículo se desloque menos, entretanto, reduções bruscas de deslocamentos são, geralmente, precedidos de desacelerações bruscas, que não é desejável, pois é prejudicial ao organismo, logo devem ser verificadas, o que será feito posteriormente.

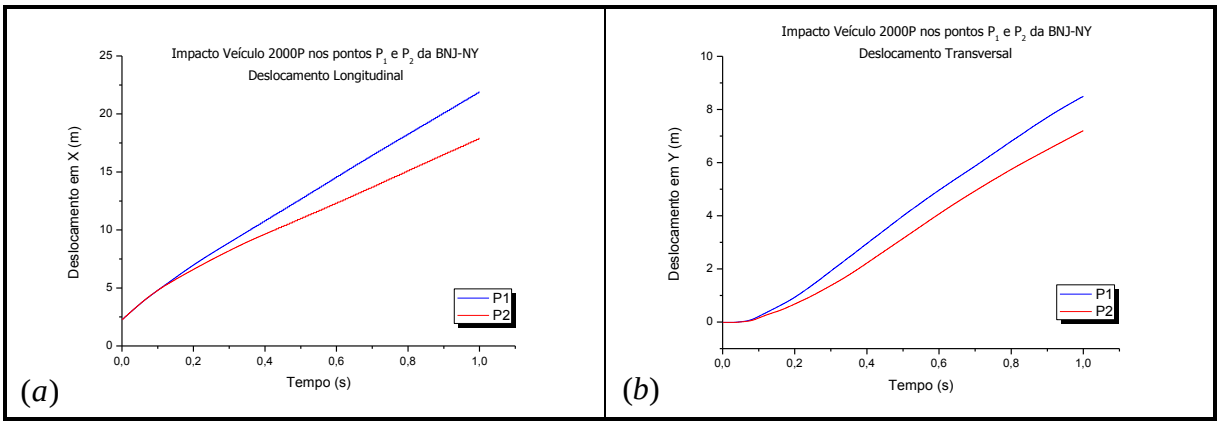


Figura 6.20 – Deslocamento do veículo após o impacto: (a) Deslocamento Longitudinal, (b) Deslocamento Transversal.

Na Figura 6.21, é mostrado o redirecionamento do veículo considerando os dois pontos de impacto. Observa-se que na Figura 6.21(a), que representa o redirecionamento do veículo para o ponto de impacto P_1, o conjunto de barreiras teve um deslocamento máximo de aproximadamente 30 cm em relação à sua posição inicial. Para o ponto de impacto P_2, o sistema se mostrou falho, devido ao fato do pino de conexão entre as barreiras ter sido arrancado pelo veículo, deixando uma das partes da barreira livre, ver Figura 6.21(b) e Figura 6.22.

Figura 6.21 – Redirecionamento do Veículo: (a) Ponto de impacto P_1, (b) Ponto de impacto P_2.

A Figura 6.22 mostra o momento em que o pino se prende à parte metálica do veículo e sendo arrancado pelo mesmo, deixando o sistema inseguro.

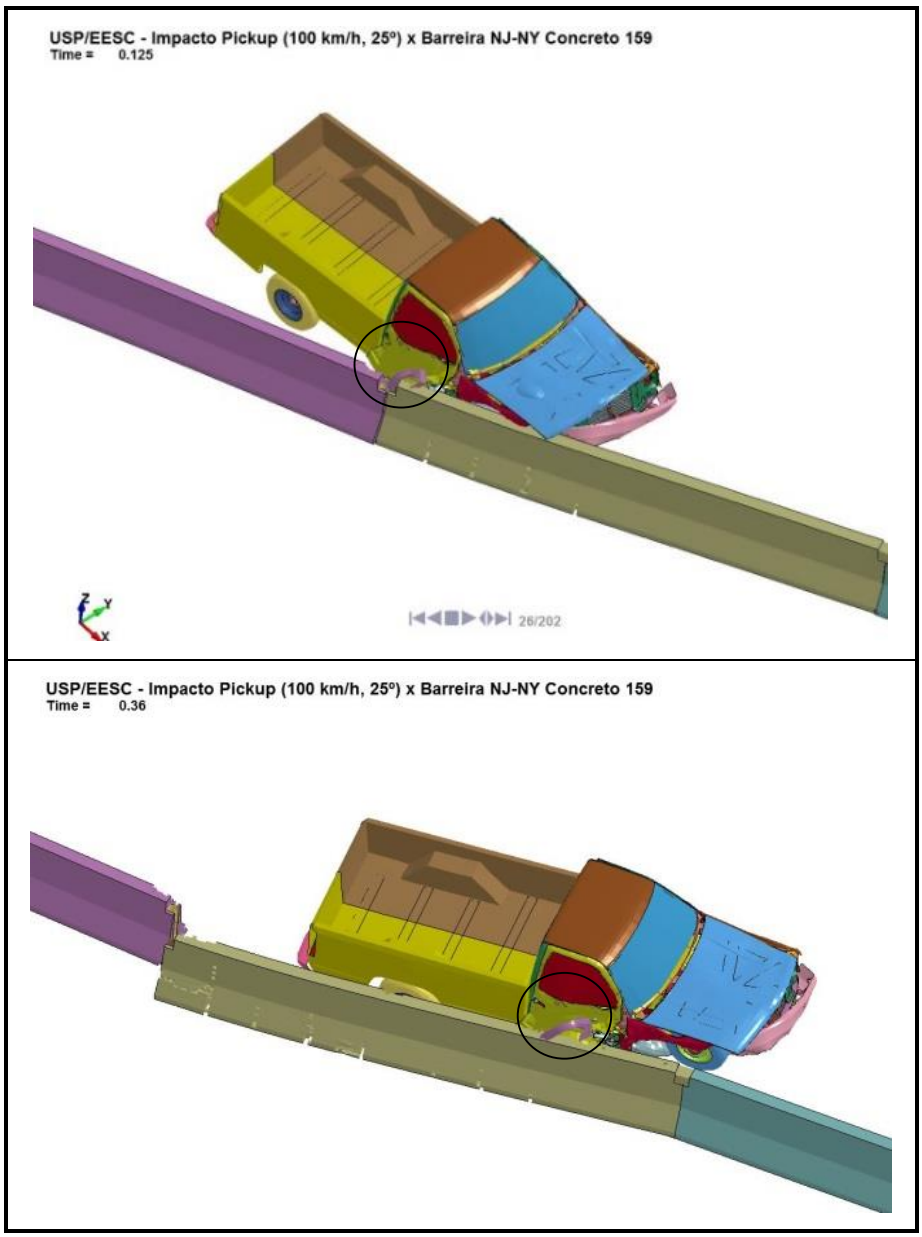


Figura 6.22 – Pino do conector arrancado pela contato entre veículo e barreira.

O deslocamento vertical do CG do veículo é plotado no gráfico da Figura 6.23 em relação ao sistema global de referência, onde a elevação inicial corresponde à altura onde está localizado o acelerômetro. Para P_1 a elevação máxima foi de 0,87 m e para P_2 a elevação foi de 0,81 m.

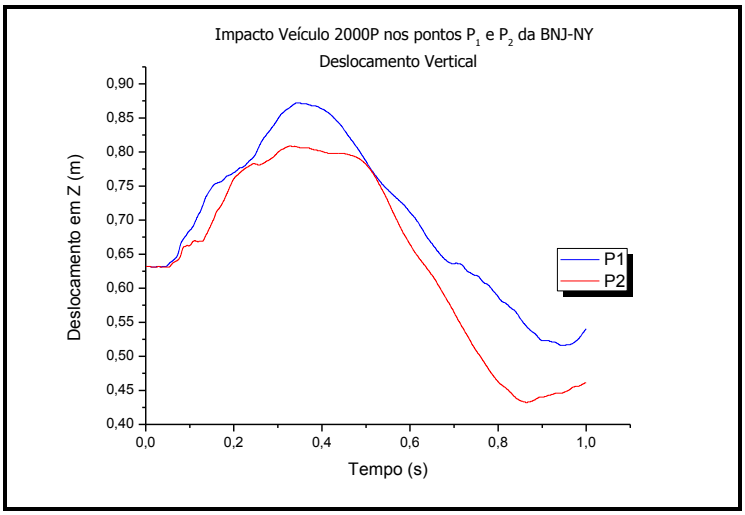
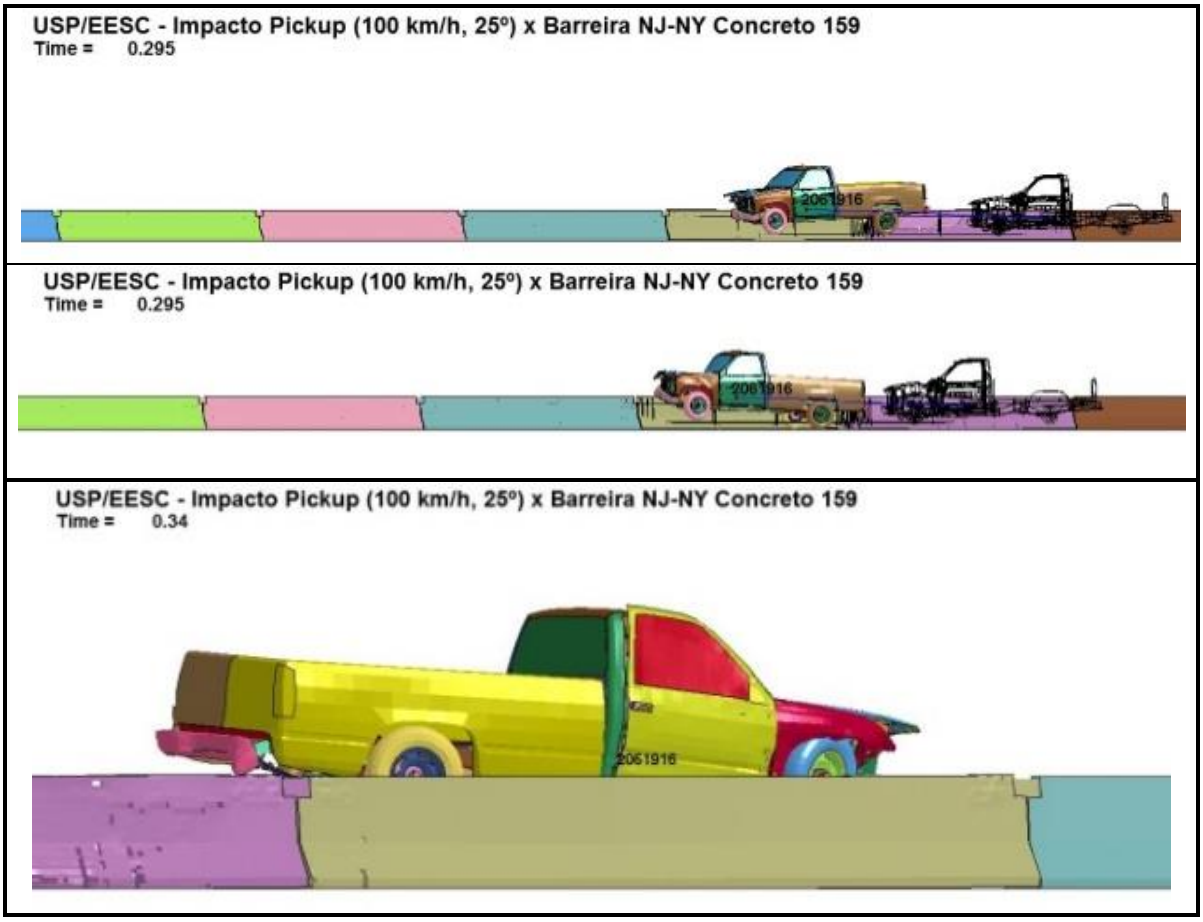


Figura 6.23 – Deslocamento vertical do CG do veículo.

Na Figura 6.24 é apresentada uma linha do tempo para visualização de alguns pontos de elevação do veículo, para os tempos de 0,295 s, 0,34 s, 0,455 s, 0,745 s e 1,0 s. O ponto de maior elevação do CG de ambos os veículo se verificou no tempo de 0,34 s.



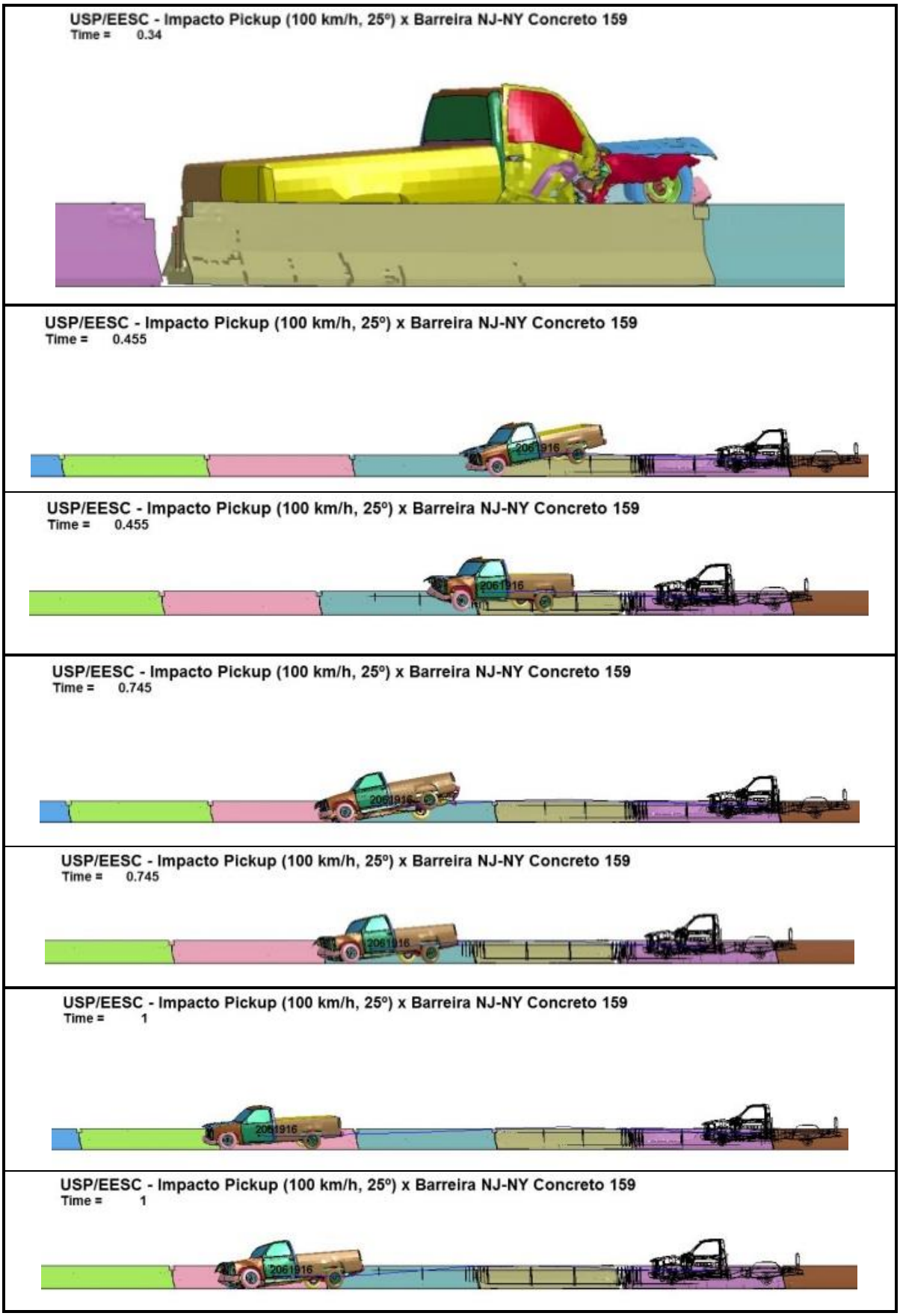


Figura 6.24 – Vista direita dos deslocamentos do veículo após o impacto, na primeira linha de cada quadro para o impacto no ponto P_1 e na segunda linha para ponto P_2.

Na Figura 6.25 são mostradas todas as acelerações coletadas no acelerômetro posicionado no CG do veículo. Para facilitar as comparações os dois casos foram plotado juntos por direção. Pelos gráficos é fácil perceber que P_2 teve maiores picos de aceleração inicial entre o intervalo de tempo de zero a 0,2 s, reduzindo gradualmente mais rápido que P_1. Isso sugere que P_2 teve uma desaceleração mais brusca que P_1, que é confirmado pelo Índice de Severidade do Acidente – ASI, mostrado Figura 6.25 (d), onde P_1 obteve ASI ≤ 1,0, que corresponde a um nível de segurança elevado, por outro lado P_2 obteve ASI ≤ 1,4, com nível de segurança inferior.

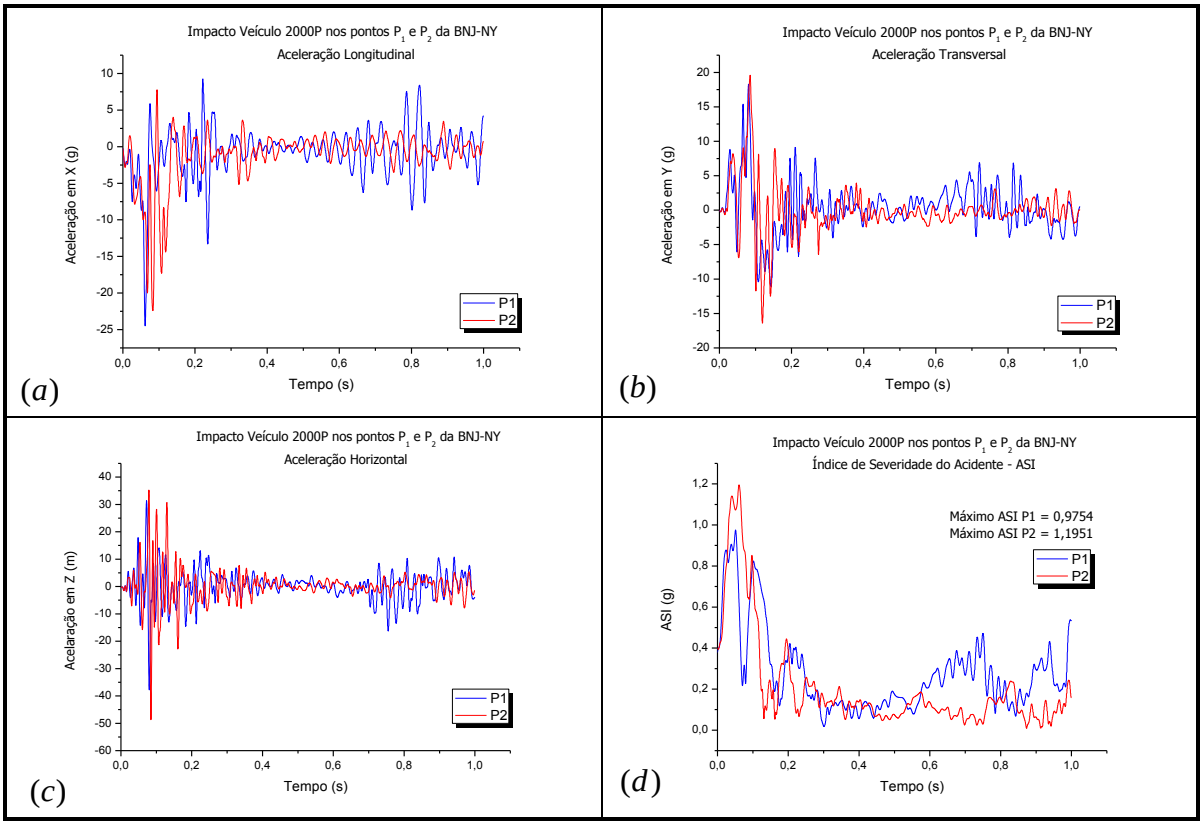


Figura 6.25 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI.

As forças de contato entre o veículo e a barreira impactada são mostradas no gráfico da Figura 6.5, sendo que as forças de contato entre os pneus e as barreiras não foram consideradas no gráfico. Nota-se, que P_1 e P_2 tiveram picos de força equivalente nos instantes de zero a 0,1 s, entretanto, como houve a remoção do pino 6 (ver Figura 6.18(a)) durante o impacto, houve uma alteração na configuração de semelhança entre os dois, após o instante 0,4 s, cessou o contato entre o veículo e a barreira e consequentemente as forças de contato.

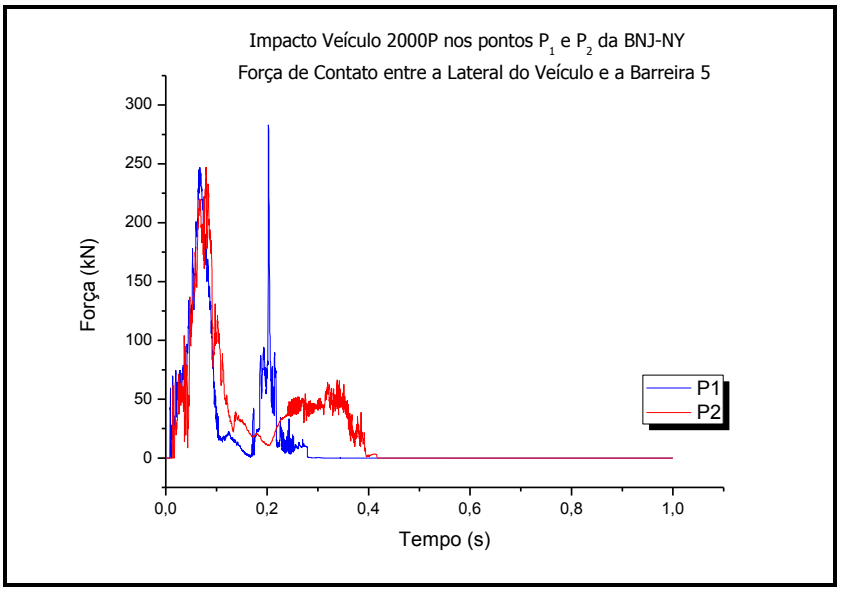
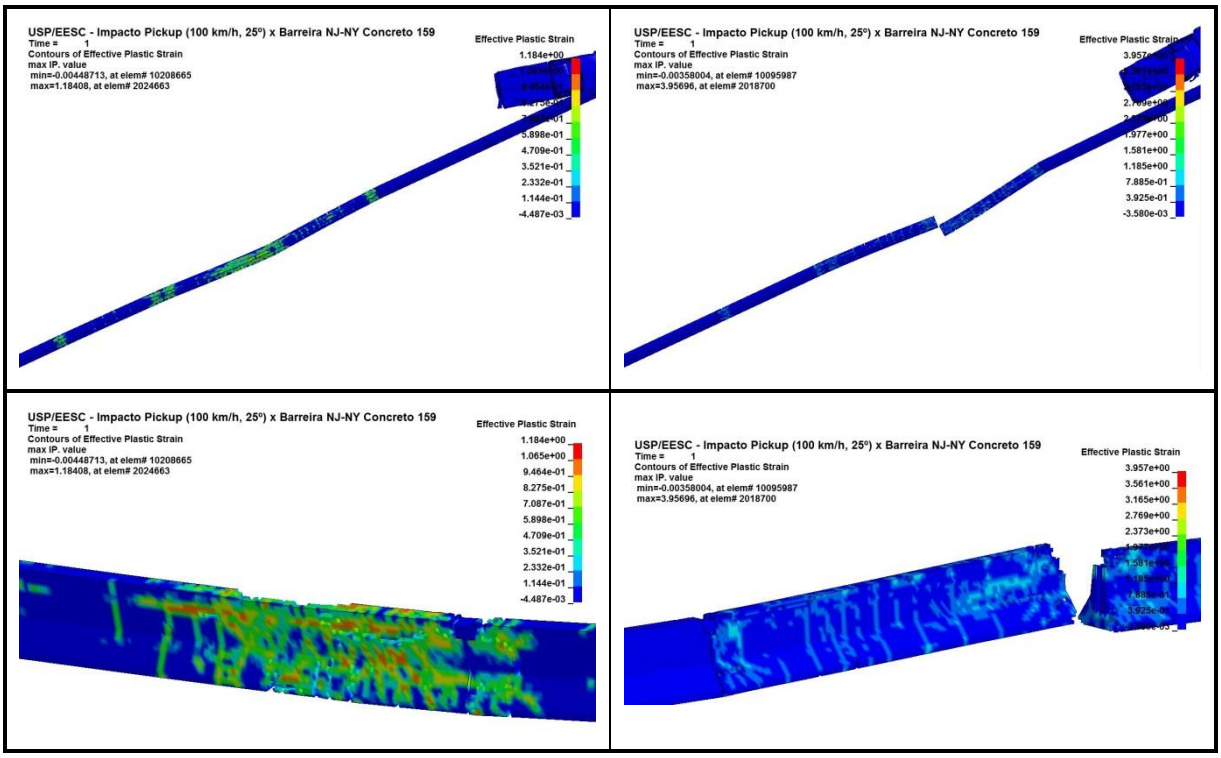


Figura 6.26 – Força de Contato entre o carro e a barreira.

As deformações e os danos da barreira ocasionados pelo impacto do veículo são mostrados na Figura 6.27, na coluna esquerda para o impacto no ponto P_1 e na direita para P_2. Nota-se que para P_1, a barreira obteve maior dano que para o segundo caso, pois devido ao desprendimento do pino, o conjunto de barreiras deixou de funcionar adequadamente.



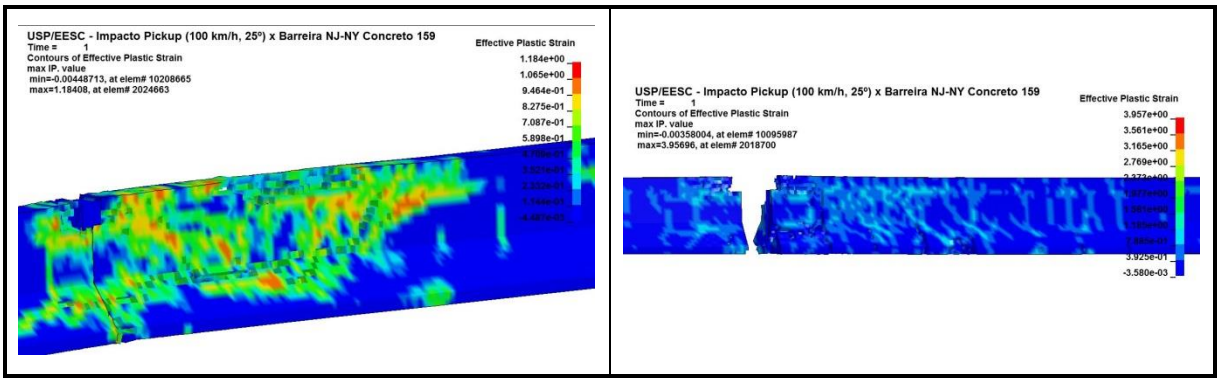


Figura 6.27 – Deformações e danos sofridos pela barreira após o impacto: coluna à direita para o impacto no ponto P_1 e à esquerda no ponto P_2.

As forças de contato entre o pino 6 e os conectores das barreiras 5 e 6, são mostrados nos gráficos da Figura 6.28. Devido à grande quantidade de pinos, apenas as forças de contato do pino 6 serão mostradas, visto que foi o ponto de impacto para o ponto P_2, ver Figura 6.18 (a) e Figura 6.29.

Na Figura 6.28(a) é mostrado é mostrado as forças de contato entre o pino 6 e a barreira 5, observa-se que para P_2 houve um pico de força, no instante 0,1 s, de aproximadamente 350 kN, pouco depois do instante 0,1 s, após perder o contato com o conector, as forças são nulas. Entre o contato entre o Pino 6 e a barreira 6, o comportamento foi semelhante para P_2, entretanto com a força de pico foram inferior a 250 kN, ver Figura 6.28(b). Para P_1, as forças de contato entre os conectores das barreiras 5 e 6, foram iguais, com pico máximo por volta de 225 kN no instante 0,3 s.

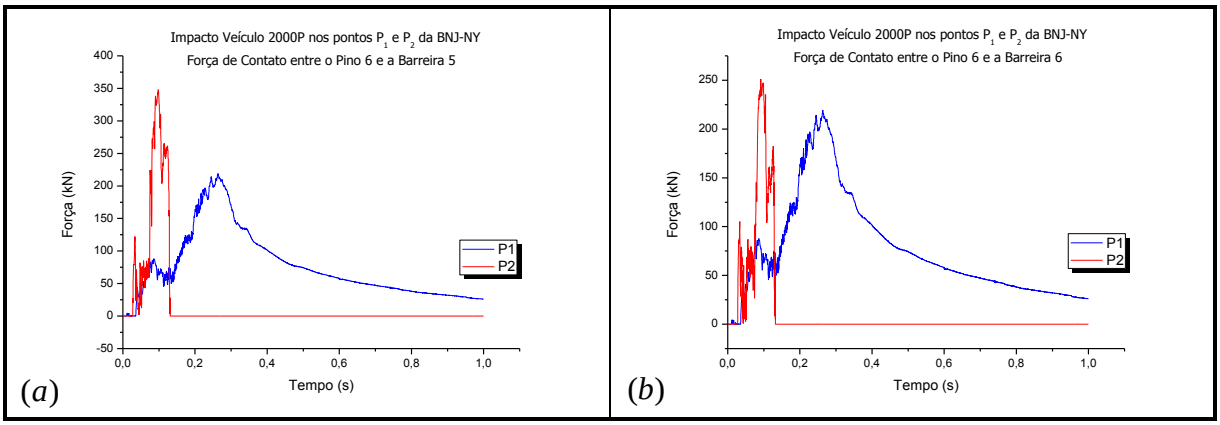


Figura 6.28 – Forças de contato entre o Pino 6 e os conectores das barreiras 5 e 6.

Os contornos das forças axiais nas barras das barreiras de 4 a 6 (ver Figura 6.18(a)) são mostrados na Figura 6.29(a), para o ponto de impacto P_1 e Figura 6.29(b) para o ponto de impacto P_2.

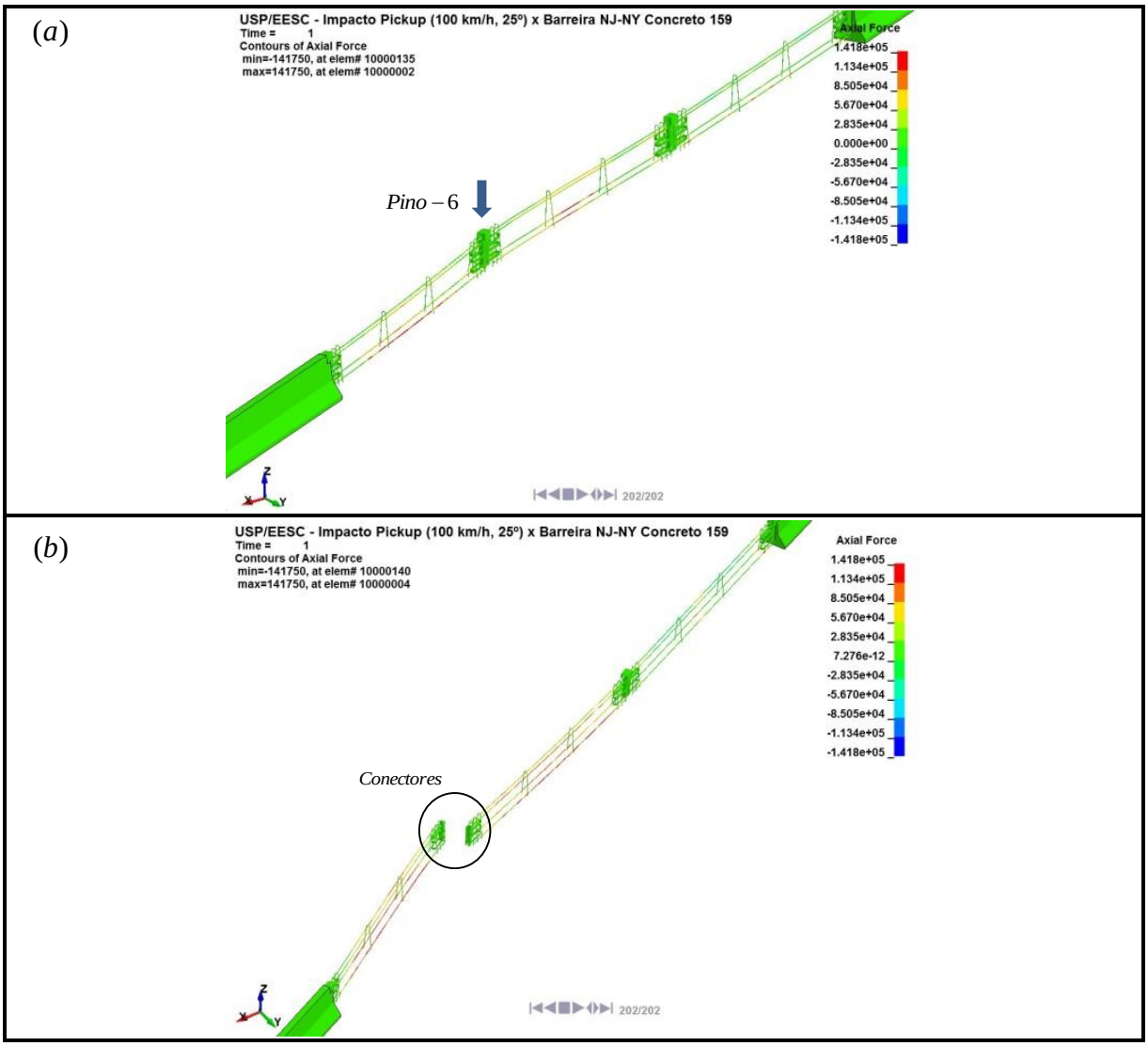
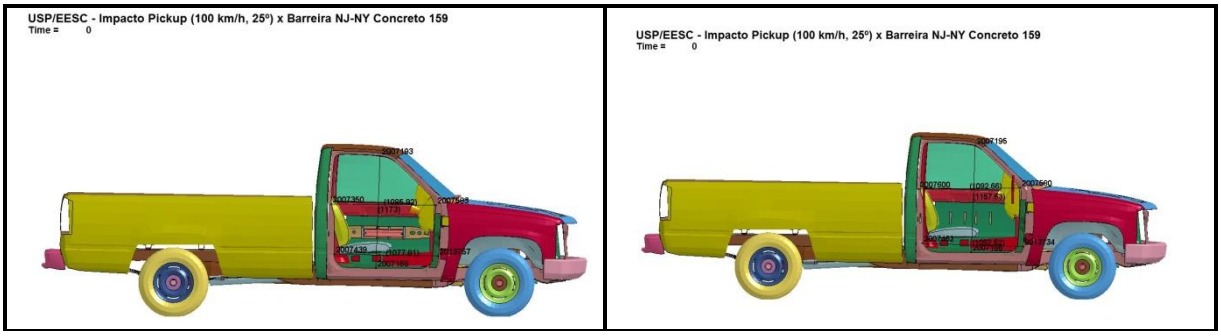


Figura 6.29 – Forças axiais nas barras devido ao impacto: (a) Para o ponto de impacto em P_1 e (b) para o ponto de impacto em P_2.

Quanto às deformações sofridas pelo veículo, são mostradas na Figura 6.30 as condições iniciais do veículo e as condições finais após o intervalo de tempo de 1,0 s durante o impacto, onde na primeira coluna está o veículo para o ponto de impacto P_1 e na segunda para P_2, na primeira e terceira linha o veículo antes do impacto e na segunda e quarta linha o veículo após o impacto no intervalo de tempo de 1,0 s.



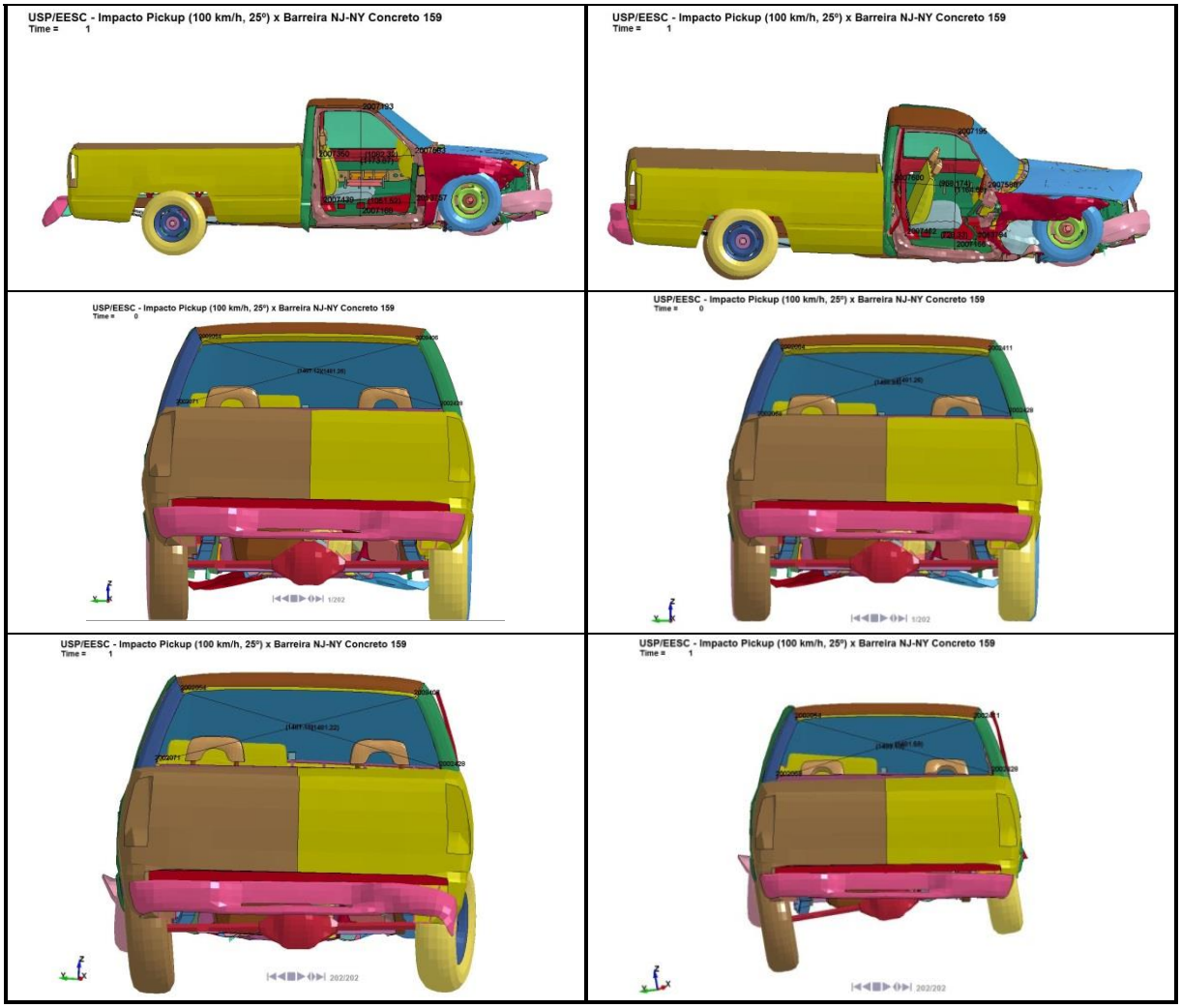


Figura 6.30 – Deformações sofridas pelo veículo, na coluna esquerda está o veículo impactado no ponto P_1 e à direita no ponto P_2, na primeira e terceira linha o veículo sem deformações e na segunda e quarta as deformações sofrida pelo veículo após o impacto.

Devido à impossibilidade de se realizar testes reais para aferir os resultados numéricos, optou-se em fazer um comparativo com resultados da literatura. Os comparativos foram realizados com os testes de impacto real realizado Howard et. al. (2009) por intermédio da *Midwest Roadside Safety Facility* da Universidade de Nebraska-Lincoln.

O teste de impacto real mostrou algumas similaridades com os resultados aqui obtidos, embora a simulação realizada nesse trabalho seja diferente do teste real em alguns pontos: no teste real a barreira não estava totalmente livre, estava ancoradas ao solo por pinos Figura 6.31(a); o pino do conector foi construído por chapas soldadas, na simulação numérica desse trabalho, por simplificação do modelo, não foi utilizado elemento de solda e o veículo utilizado para o impacto real foi um veículo 2270P (Figura 6.31(a)) e na simulação numérica um veículo 2000P. De qualquer forma os valores comparativos são uteis para se ter dimensões de valores e uma ideia de como o sistema se comportaria.

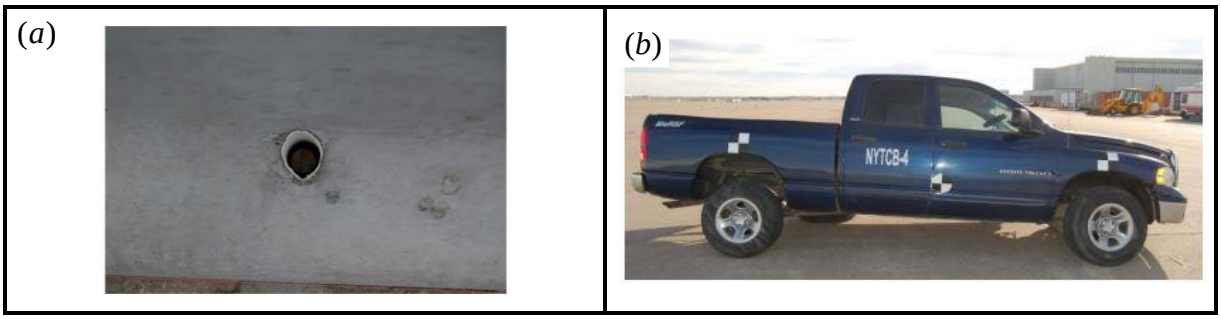


Figura 6.31 – Detalhes de componentes de teste de impacto: (a) pino de ancoragem da barreira, (b) veículo de testes 2270P usado no impacto real.

Na Figura 6.32 é feito um comparativo entre o teste de impacto real (coluna da esquerda) e o teste numérico (coluna da direta). Na Figura 6.32(a) é mostra o veículo impactando no tempo de 0,460 segundo para o teste de impacto e 0,465 para a simulação numérica, observa-se uma notável semelhança no movimento do veículo nas duas situações.

Já para o dano das barreiras no ponto de conexão, apesar da ruptura ter sido por motivos diferentes (no teste real o conector rompeu na solda e na simulação foi arrancado pela lataria do carro), os danos e a forma de ruptura se assemelham, com dano no contato entre as barreiras, tanto da base, como no topo, com exposição de parte do conector, Na Figura 6.32(b).

O dano do veículo é comparado na Figura 6.32(c), apesar de serem veículos da mesma categoria, são de normas diferentes o veículo da esquerda é utilizado pelo MASH (2009) e o da direita pelo NCHRP R350 (1993), de qualquer forma observa-se a semelhança entre as partes danificada do veículo.

Finalmente na Figura 6.32(d) é feito um comparativo entre as acelerações longitudinais do CG do veículo real e do numérico, no veículo real os picos de aceleração estão entre -20 g e 10 g, para o veículo numérico entre -25 g e 7,5 g.

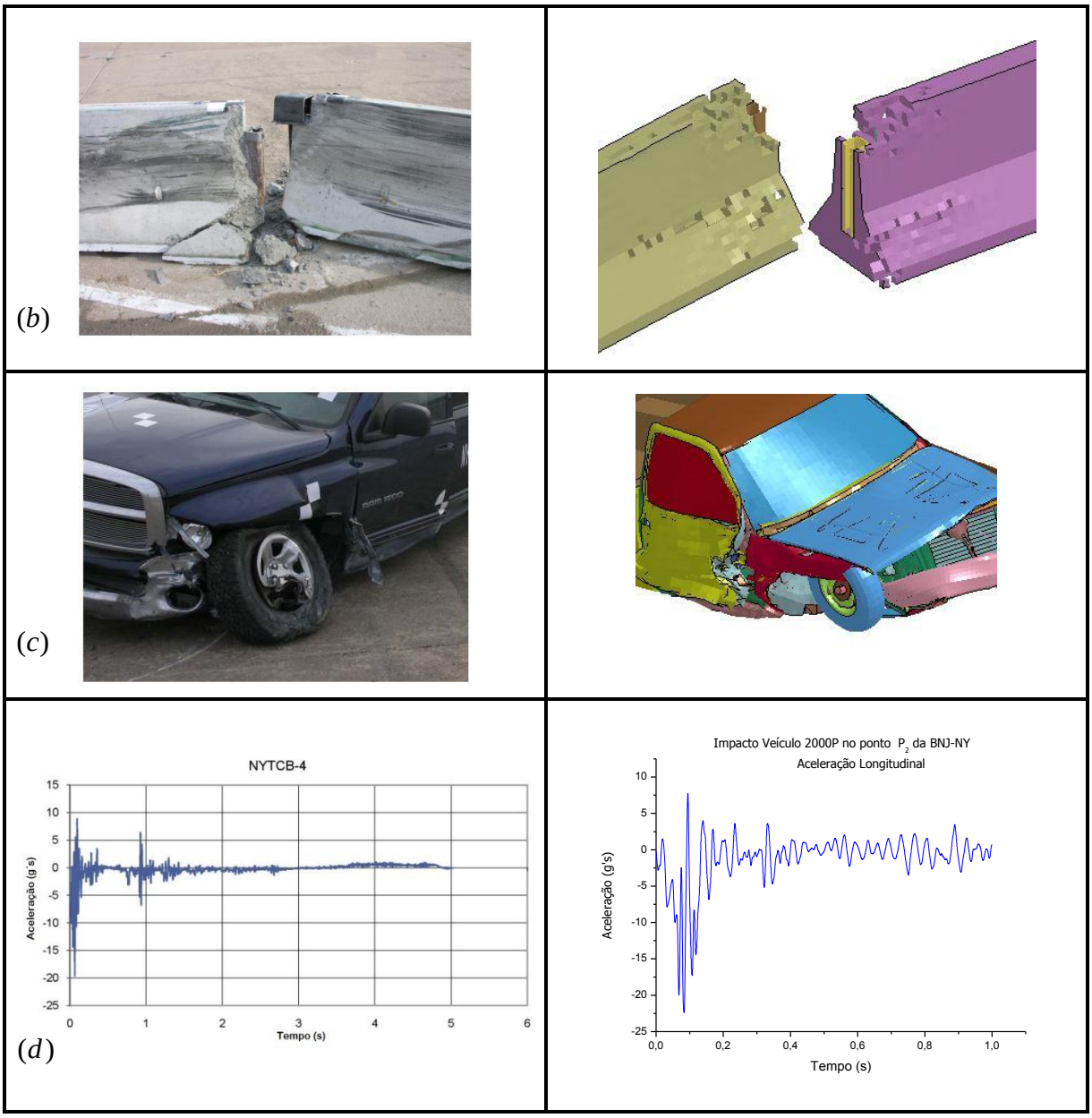


Figura 6.32 – Comparação teste de impacto real *versus* simulação: (a) impacto do veículo na barreira, (b) dano na barreira, (c) dano no veículo e (d) aceleração longitudinal do CG do veículo.

6.2.2. Comparação de dois Sistemas de Barreiras Temporárias: Barreira Tipo F 810 mm livres e Barreira New Jersey 810 mm com conectores utilizando um veículo TB11

Nas rodovias de São Paulo é bastante comum a utilização de barreiras Tipo F em módulo de 1,5 m a 2,0 m de comprimento, sem nenhum engaste ou conexão entre elas, como barreira temporária. Essas simulações visam fazer uma breve análise comparando esse tipo de utilização com a utilização de barreiras BNJ-NY, para isso adotou-se módulos com o comprimento de dois metros para as duas análises, de forma que fosse possível a comparação.

Essa simulação foi baseada nos critérios da norma europeia EN 1371 (2008), foi utilizado um veículo de passeio de 900 kg, com uma velocidade de impacto de 100 km/h e um ângulo de

20º entre o veículo e a barreira, por um tempo de 1,0 s. Na Figura 6.33 é mostrado os dois ambientes de simulação entre o veículo e o conjunto de barreiras. Na Figura 6.33(a) é apresentado o sistema utilizando barreiras Tipo F, sem engaste e sem conexão entre as mesmas e na Figura 6.33(b) o sistema utilizando barreiras BNJ-NY utilizando pinos de conexão entre as mesmas.

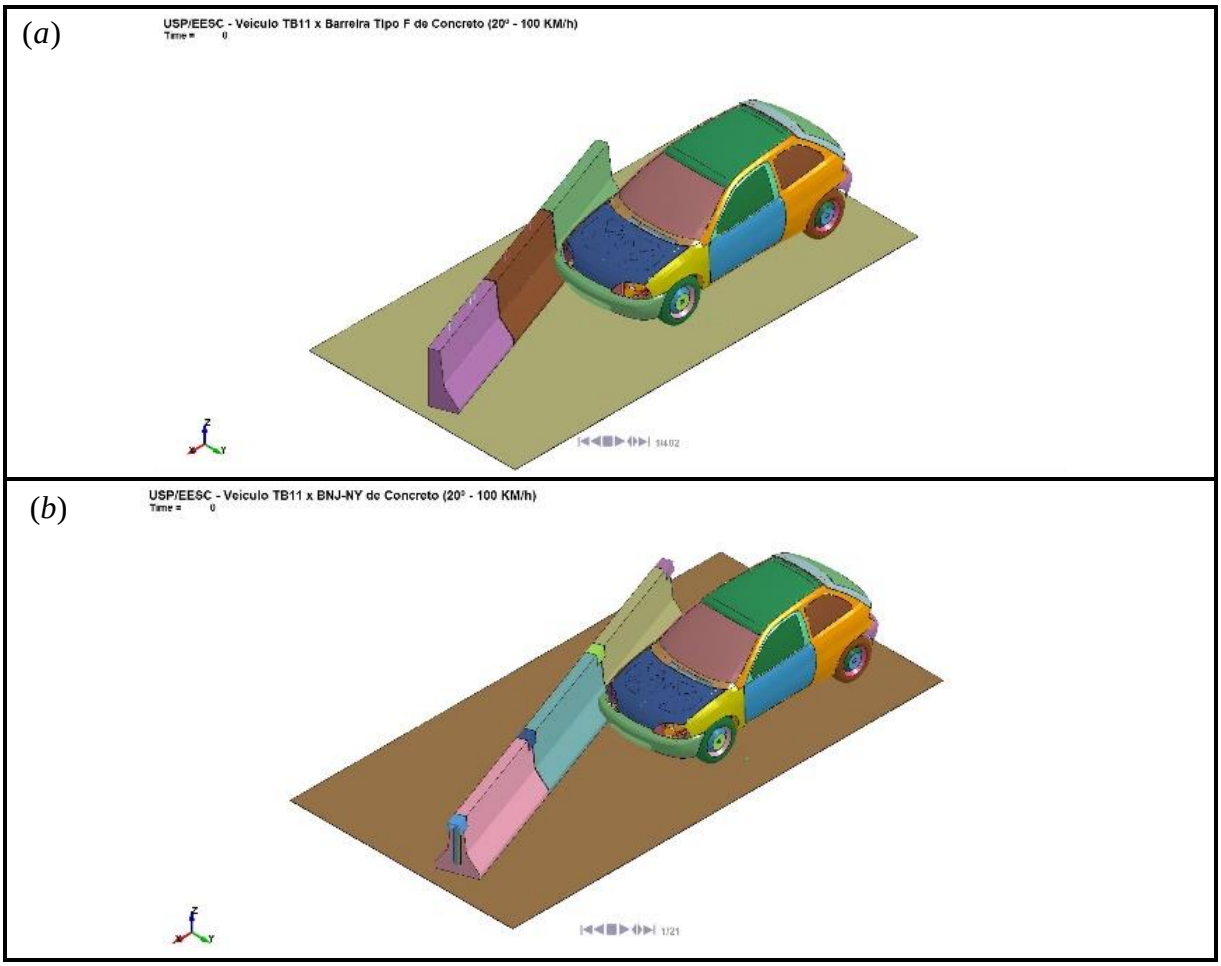


Figura 6.33 – Simulação utilizando dois sistemas de barreiras temporárias: (a) Barreiras Tipo F 810 mm sem engaste e sem conexão entre as mesmas, (b) Barreiras BNJ-NY 810 mm.

Na Figura 6.34, é mostrado o redirecionamento do veículo considerando os dois sistemas. Observa-se que o veículo que impactou o sistema Tipo F capotou instantes após o contato com as barreiras (Figura 6.34(a)), já para o sistema BNJ-NY o carro seguiu a trajetória sem capotamento (Figura 6.34(b)).

Observa-se também que além do capotamento do veículo no sistema Tipo F, observou-se também um arremesso das barreiras 2 e 3, após o impacto, uma vez que esse tipo de sistema não utiliza apenas as restrições de movimento o seu peso próprio individual, ao contrário, no

sistema BNJ-NY como estão vinculados por conectores, o peso próprio de todo o conjunto é considerado, o que impossibilitou o arremesso de algum módulo do sistema.

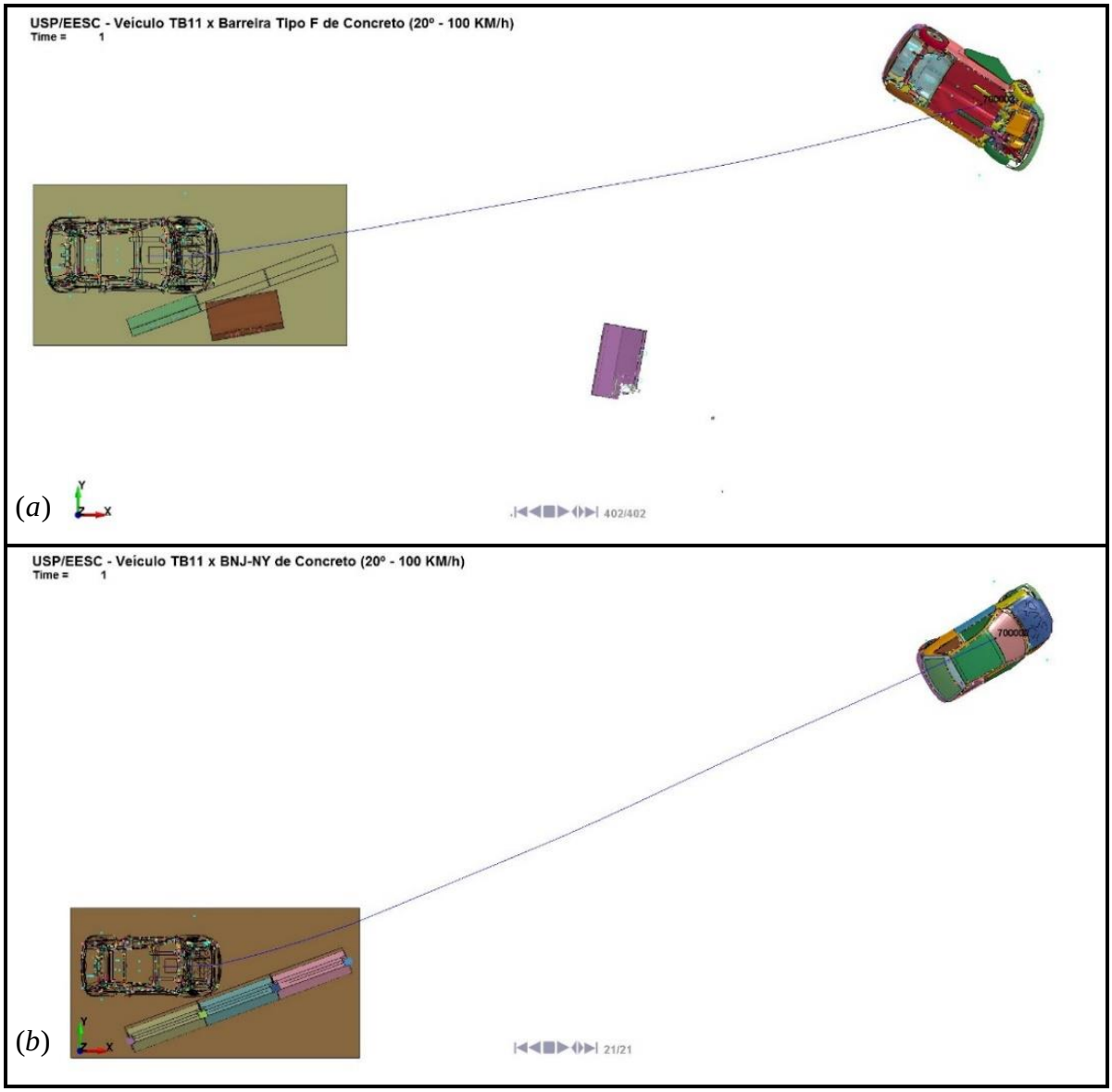


Figura 6.34 – Redirecionamento do Veículo: (a) Sistema Tipo F, (b) Sistema BNJ-NY.

Os resultados dos deslocamentos longitudinais e transversais, em relação ao sistema global de referência, são mostrados no gráfico da Figura 6.35. Observa-se que o veículo que impactou o sistema Tipo F teve um deslocamento transversal inferior ao veículo que impactou o sistema BNJ-NY, sendo 15,7 m para o primeiro e 19,80 m para o segundo, ver Figura 6.35(a).

Na direção transversal, para o sistema Tipo F o carro se deslocou 3,11 m, enquanto que para o sistema BNJ-NY o deslocamento foi bem maior, 8,4 m, ver Figura 6.35(b).

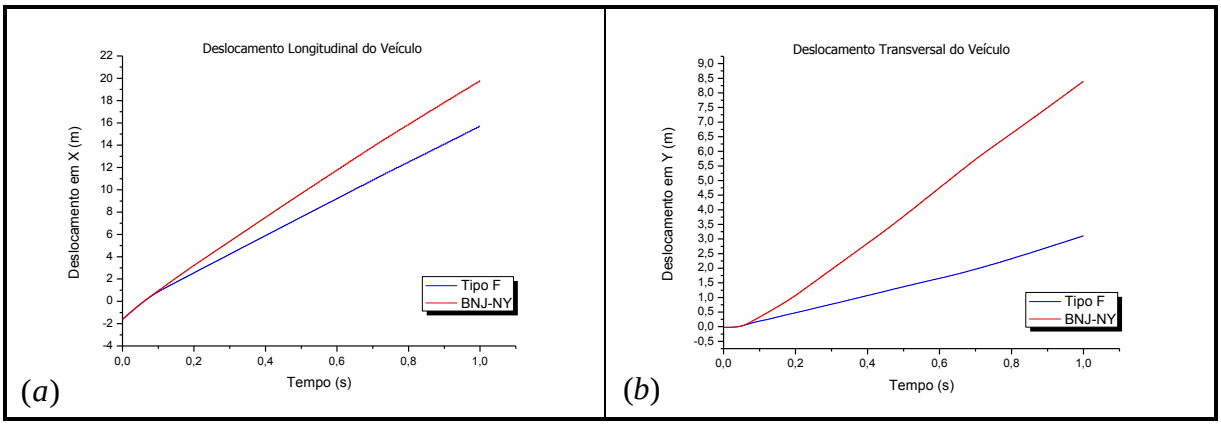


Figura 6.35 – Deslocamento do veículo após o impacto: (a) Deslocamento Longitudinal, (b) Deslocamento Transversal.

Para comparar o movimento das barreiras, foi plotado nos gráficos da Figura 6.36, os deslocamentos das barreiras que entraram em contato com o veículo, observa-se que no sistema tipo F, a barreira TF3 foi lançada a uma distância transversal de aproximadamente 3 metros (Figura 6.36(a)), já para o sistema BNJ-NY o deslocamento foi de aproximadamente 0,28 m (Figura 6.36(b)).

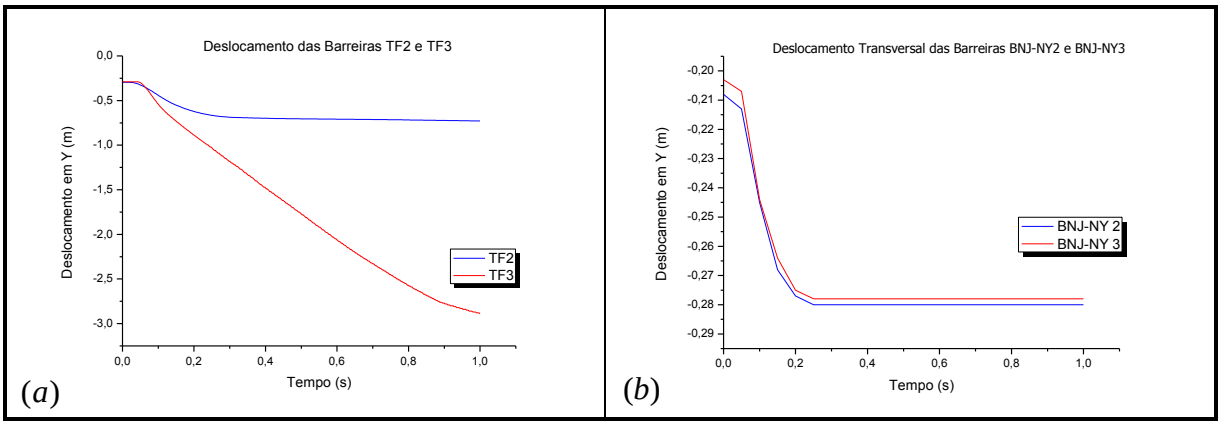


Figura 6.36 – Deslocamentos transversal: (a) Barreiras Sistema Tipo F, (b) Barreiras Sistema BNJ-NY.

O deslocamento vertical do CG do veículo é plotado no gráfico da Figura 6.37 em relação ao sistema global de referência, onde a elevação inicial corresponde à altura onde está localizado o acelerômetro. Nota-se que o sistema Tipo F obteve maior deslocamento vertical que o sistema BNJ-NY, com elevação máxima de 0,91 m e 0,74 m, respectivamente.

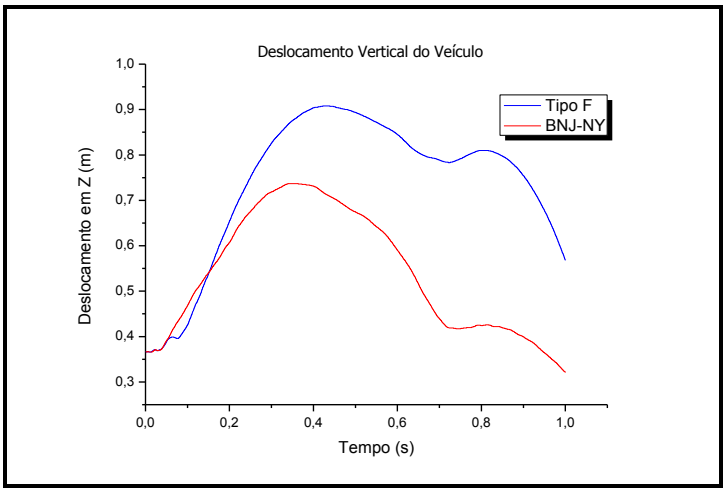
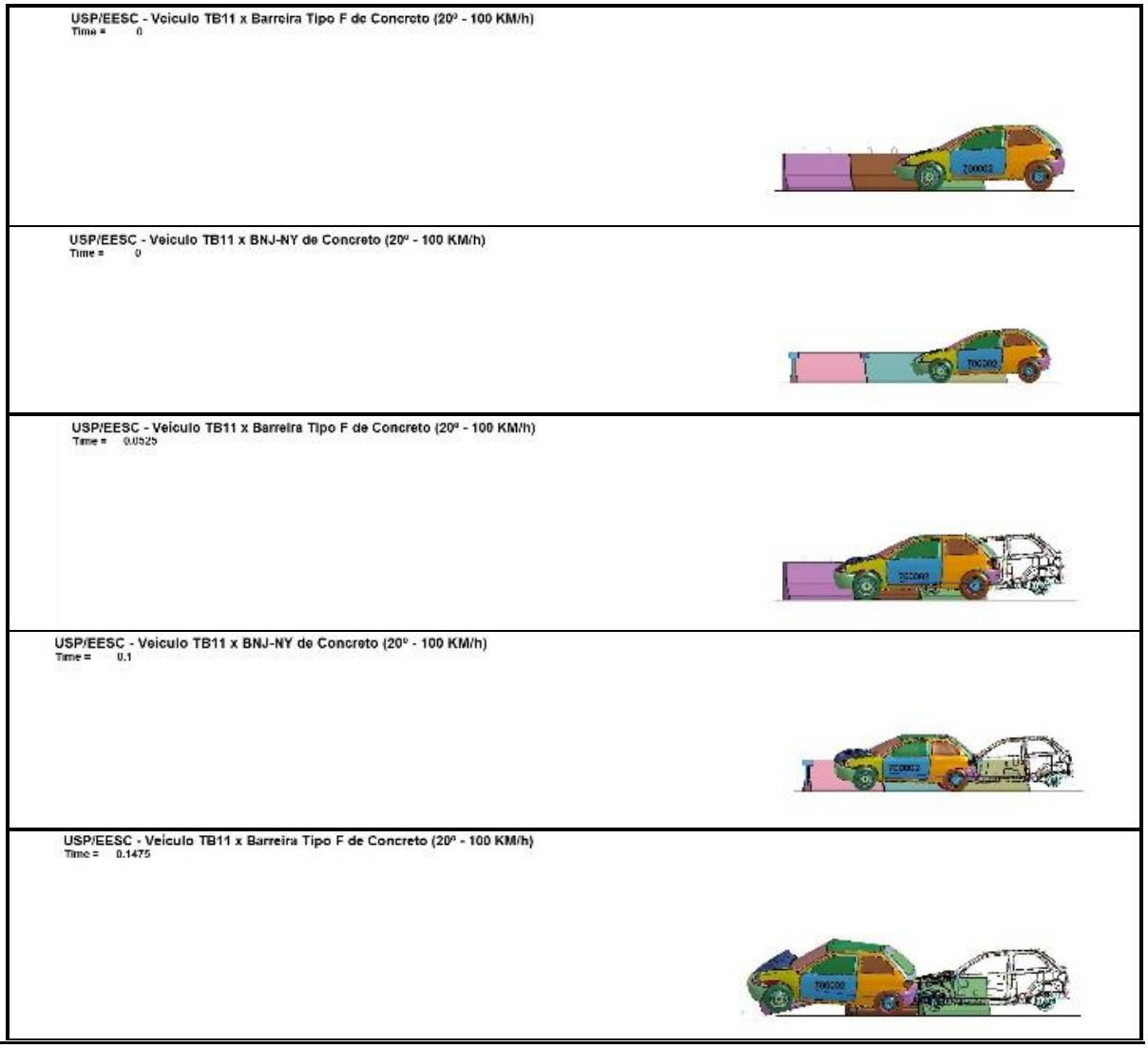


Figura 6.37 – Deslocamento vertical do CG do veículo.

Na Figura 6.38 é apresentada uma linha do tempo para visualização de alguns pontos de deslocamento vertical do veículo, para os tempos de 0,0 s, 0,0525 s, 0,1475 s, 0,4323 s e 1,0 s, para o sistema Tipo F e 0,0 s, 0,1 s, 0,2 s, 0,35 s e 0,95 s.



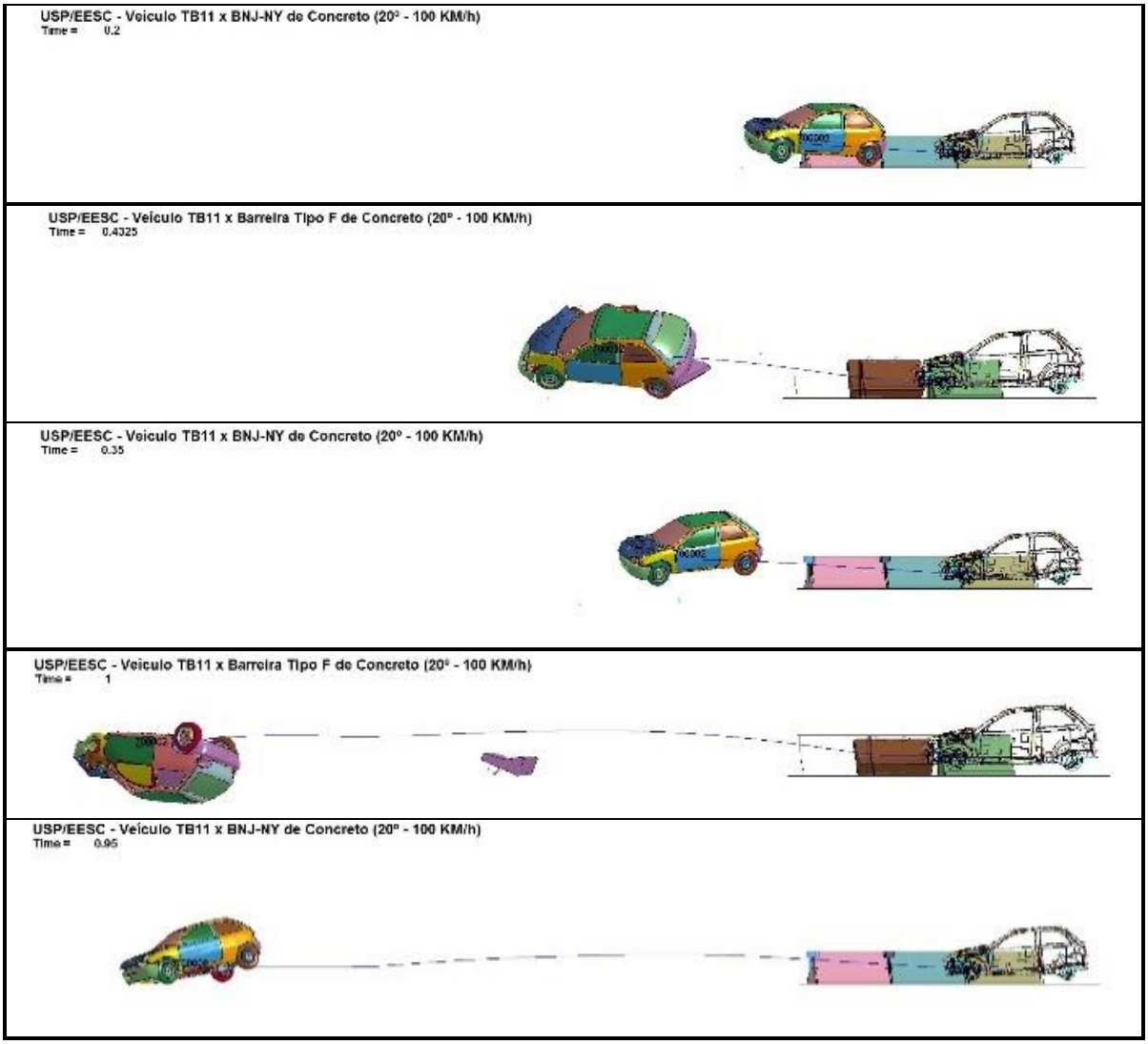


Figura 6.38 – Vista direita dos deslocamentos do veículo após o impacto, na primeira linha de cada quadro para o impacto no sistema Tipo F e na segunda no sistema BNJ-NY.

Na Figura 6.39 é plotado o gráfico o índice de Severidade de Impacto do veículo, observa-se que para os dois casos houve um índice de severidade elevado, entretanto, para o caso do sistema TF o nível de segurança foi inferior ao sistema BNJ-NY.

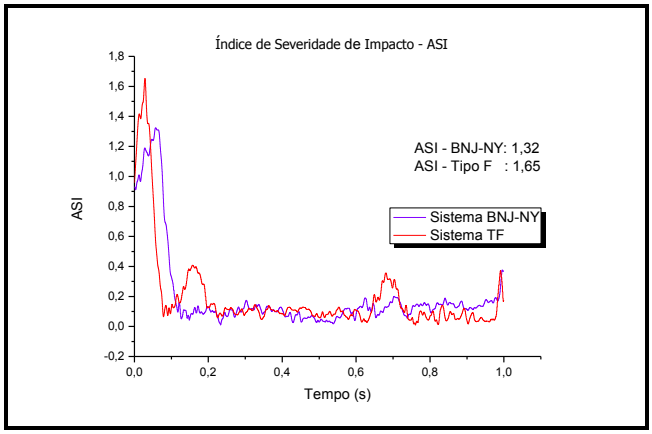


Figura 6.39 – ASI do veículo para os dois sistemas.

A representação do dano para os dois sistemas é apresentado na Figura 6.40. Onde se observa que o sistema Tipo F (Figura 6.40(a)) teve uma avaria bastante acentuada em comparação ao sistema BNJ-NY (Figura 6.40(b)), ficando o dano basicamente concentrado na área dos conectores.

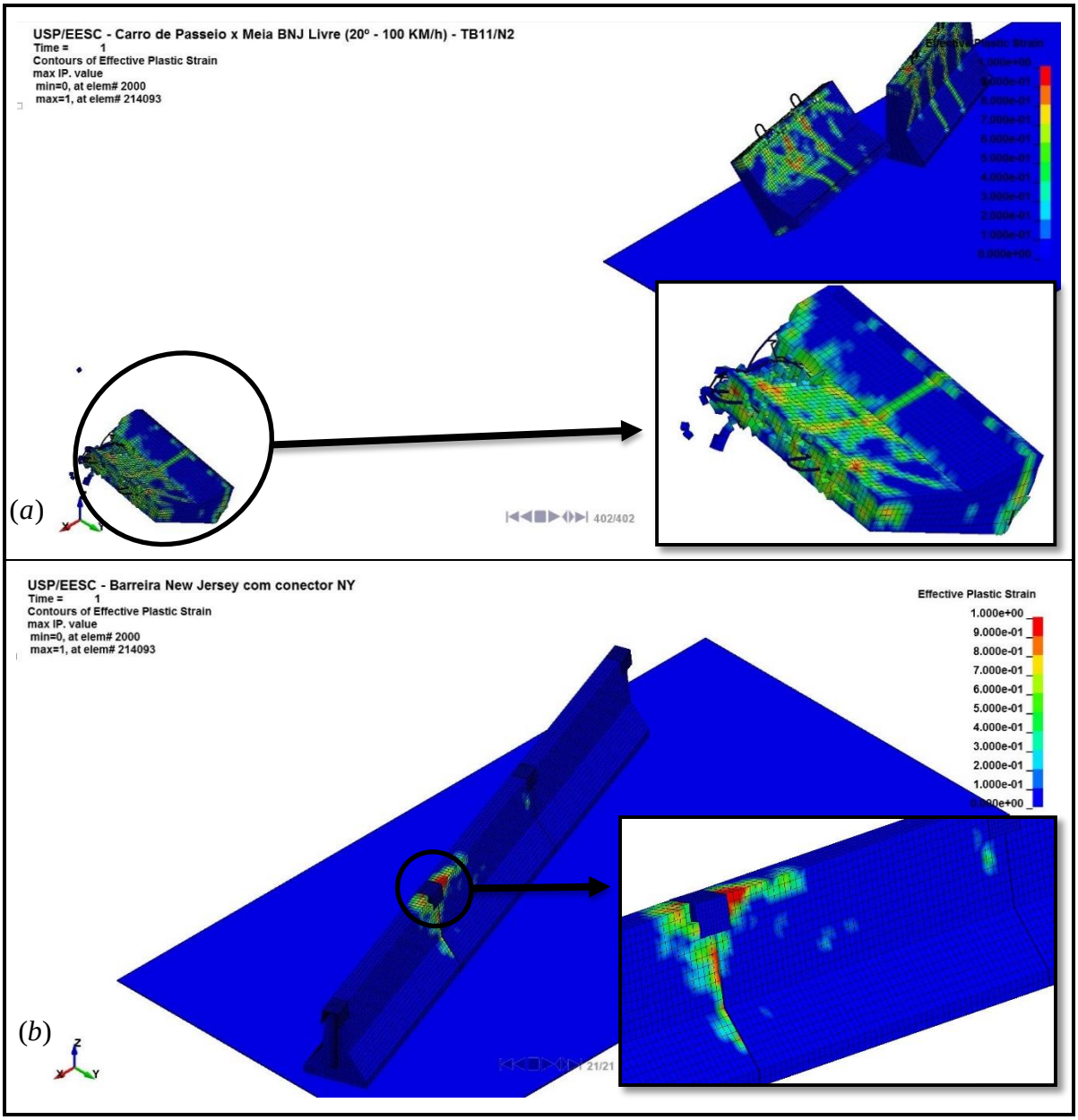


Figura 6.40 – Dano oriundo do impacto: (a) Sistema Tipo F, (b) Sistema BNJ-NY.

Na Figura 6.41 é apresentada as deformações do veículo após o impacto, na coluna à esquerda para o sistema BNJ-NY e à direita para o sistema Tipo F. O veículo que impactou no sistema Tipo F foi o que houve mais deformações, tanto na lateral quanto na parte superior devido ao capotamento.

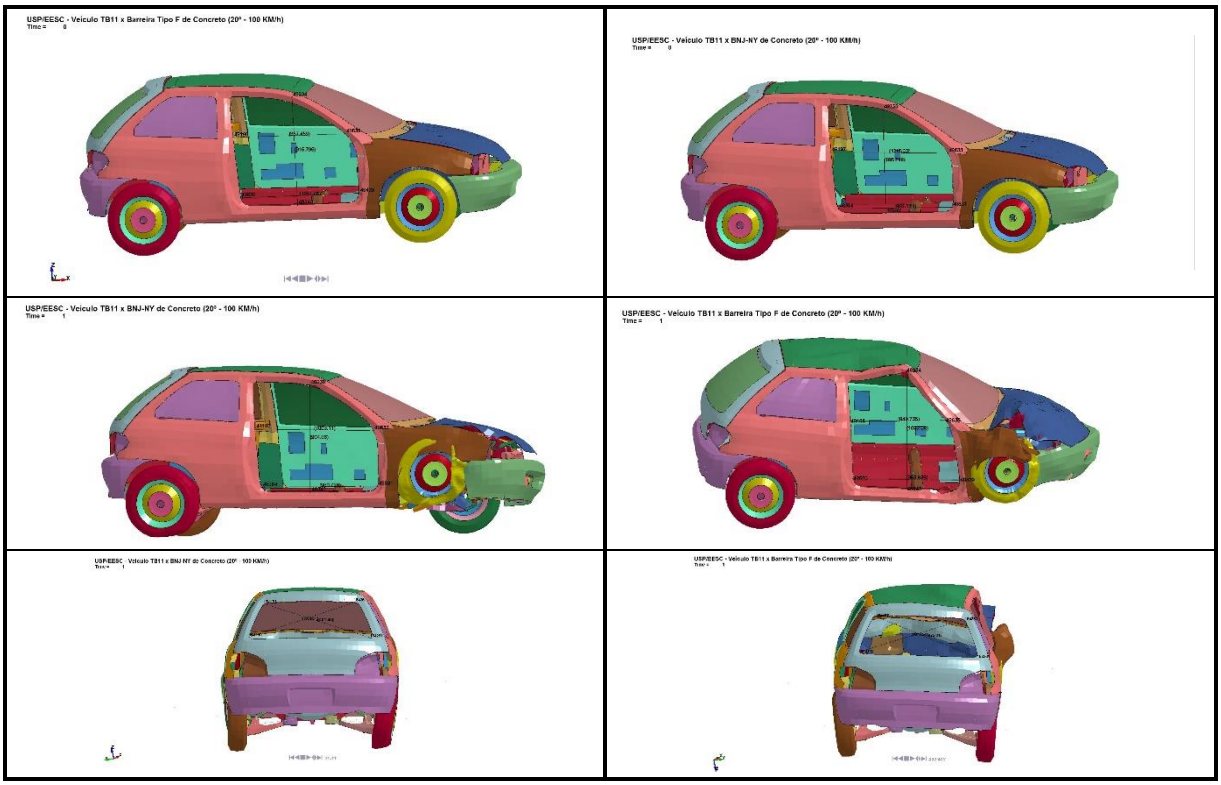


Figura 6.41 – Deformações sofridas pelo veículo: na coluna esquerda está o veículo impactado no sistema e à BNJ-NY direita no sistema Tipo F.

Pelos resultados apresentados, para o sistema Tipo F o veículo além do capotamento, arremessou a barreira de proteção a alguns metros de distância, concluindo-se que é inseguro, pois não é capaz de proteger trabalhadores na zona de proteção e quanto aos requisitos do veículo também não teve resultados satisfatórios.

Quanto ao sistema BNJ-MY seu desempenho foi bastante superior ao Tipo F, pois redirecionou o carro sem capotamento e não houve arremesso de nenhum módulo de barreira, entretanto, com apenas uma simulação o resultado é insuficiente para os ensaios de aceitação, que devem ser realizados com outras categorias de veículos.

6.3. Análise de Desempenho de Algumas Geometrias de Barreiras

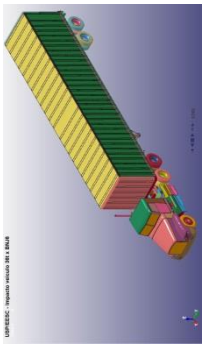
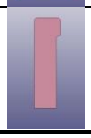
Esse grupo de simulações teve por objetivo analisar o desempenho de quatro geometrias de barreiras em relação ao redirecionamento do veículo, à sua desaceleração/aceleração e as forças de contato entre o veículo e a barreira. Devido ao alto custo computacional para a simulação com concreto, o modelo foi simplificado com o uso de material elástico, com a base engastada, sendo assim, não será levado em consideração a influência do dano sofrido pela barreira. Os parâmetros de entrada do material elástico estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros de Entrada para o material das barreiras e suas condições de contorno

Material Elástico		
Densidade (ton/mm³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Módulo de Poisson
2,5E-09	2,0E+04	0,20

Na Tabela 6.3 são apresentados os modelos e as condições de teste de cada simulação.

Tabela 6.3 – Quadro de Simulações para análise do desempenho da geometria das barreiras

Veículo	Barreira		Velocidade (km/h)	Ângulo Impacto	Norma
36000V 	New Jersey 810 mm		80	15º	NCHRP R350 (1993) /MASH (2009)
	New Jersey 1400 mm		80	15º	NCHRP R350 (1993) /MASH (2009)
	Single-slope 1074 mm		80	15º	NCHRP R350 (1993) /MASH (2009)
	Plana 1066 mm		80	15º	NCHRP R350 (1993) /MASH (2009)

O ambiente de simulações foi configurado conforme mostrado na Figura 6.42, as mesmas condições foram mantidas para todos os testes, apenas a geometria de barreira foi alternada.

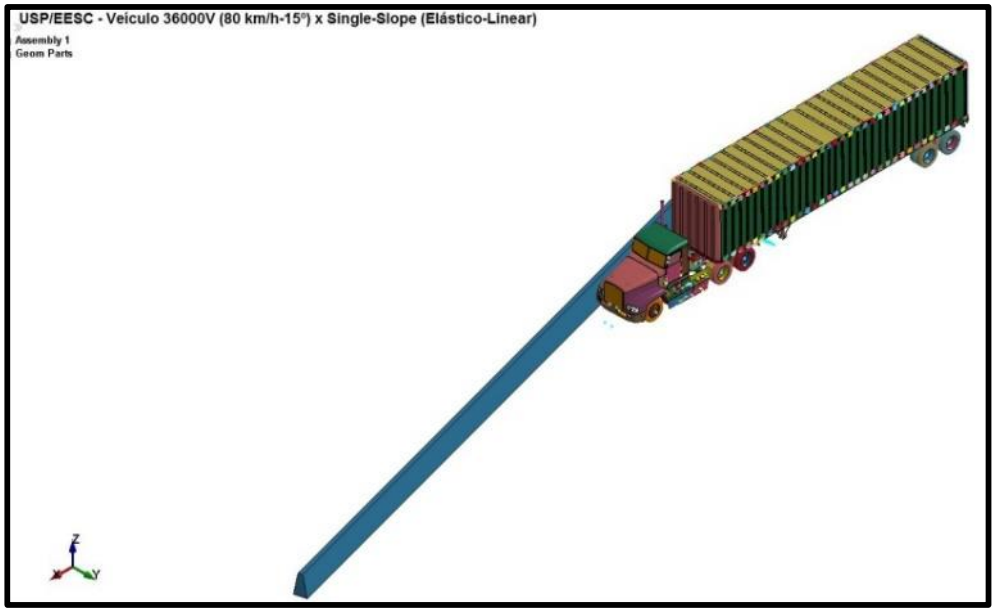
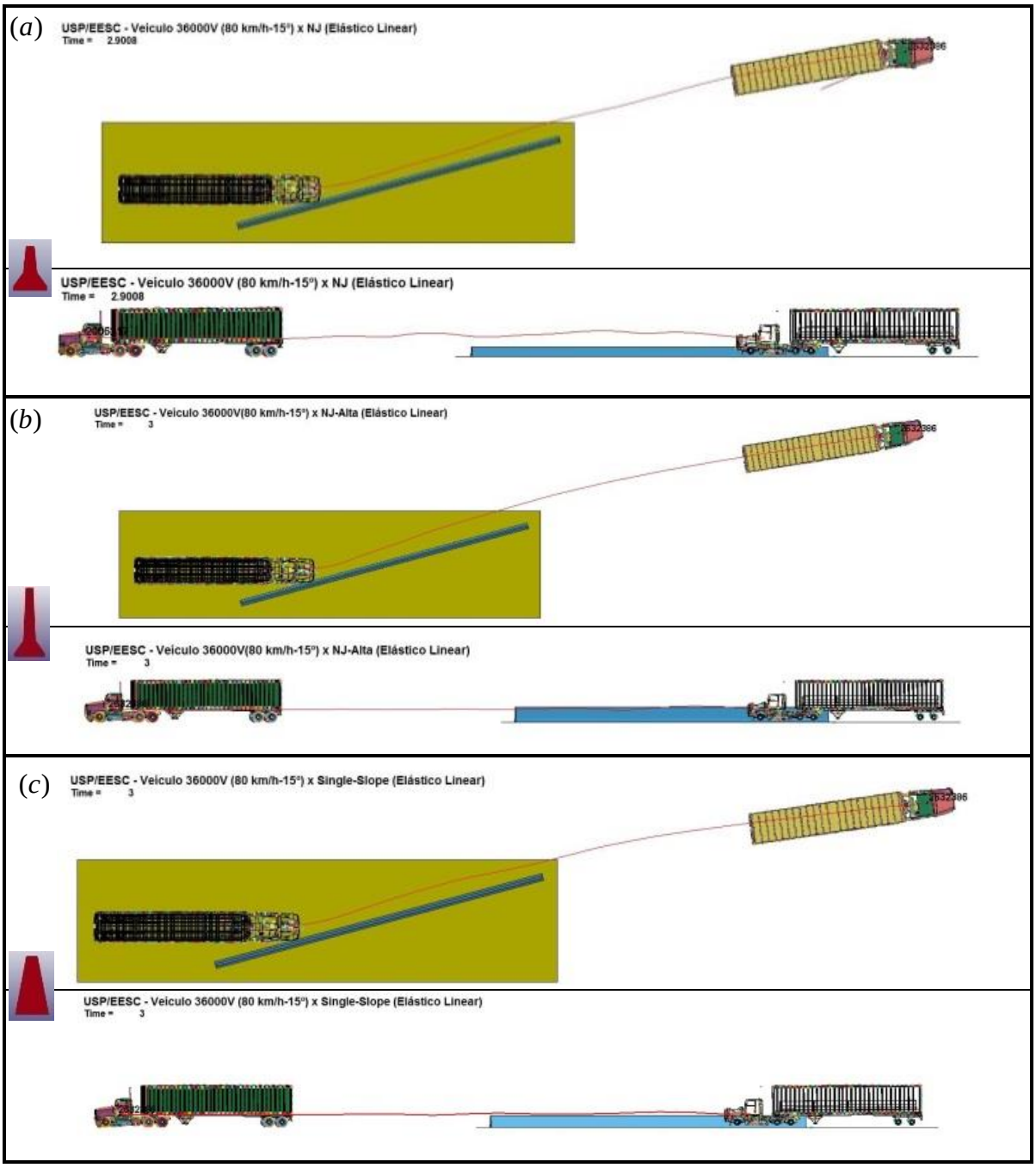


Figura 6.42 – Ambiente de simulação LS-PrePost/LS-DYNA de um veículo 36000V *versus* barreira *Single Slope*.

Na Figura 6.43 é apresentado o redirecionamento do veículo para cada tipo de barreira, nota-se que a barreira Plana 1066 mm, foi a que teve o pior desempenho de redirecionamento do veículo, lançando-o na direção das faixas perpendiculares, o CG de gravidade da cabine, deslocou-se na direção perpendicular à barreira de 4,45 m, o maior entre os três modelos, o modelo que teve o melhor desempenho nesse quesito foram as barreiras *New Jersey* 810 mm e a 1040 mm, com um deslocamento máximo de 70 cm e 1,70 m, respectivamente, seguida da *Single-Slope* com 1,98 m, praticamente equivalentes.



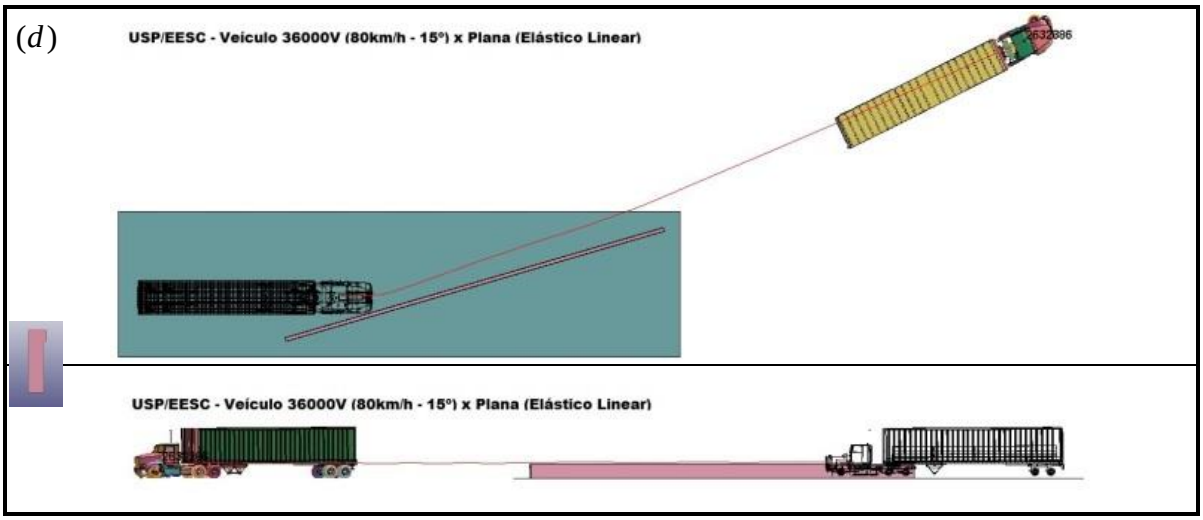


Figura 6.43 – Resultado do redirecionamento do veículo para cada geometria (vista superior/vista lateral): (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm.

Apesar da *New Jersey* 810 mm ter reconduzido o veículo com mais eficiência, foi a que teve o pior desempenho no quesito de elevação do veículo e também que causou mais danos ao mesmo, deslocando o acelerômetro do CG da cabine, o que comprometeu a leitura de alguns dados para esse modelo. Na Figura 6.45 é possível comparar o ápice da maior elevação para cada um dos modelos, notadamente a barreira New Jersey de 810 mm se sobressai sobre as demais (Figura 6.44(a)). Devido ao modelo elástico não contemplar o dano, não é possível aferir se a falha no material poderia comprometer ainda mais o desempenho da mesma.

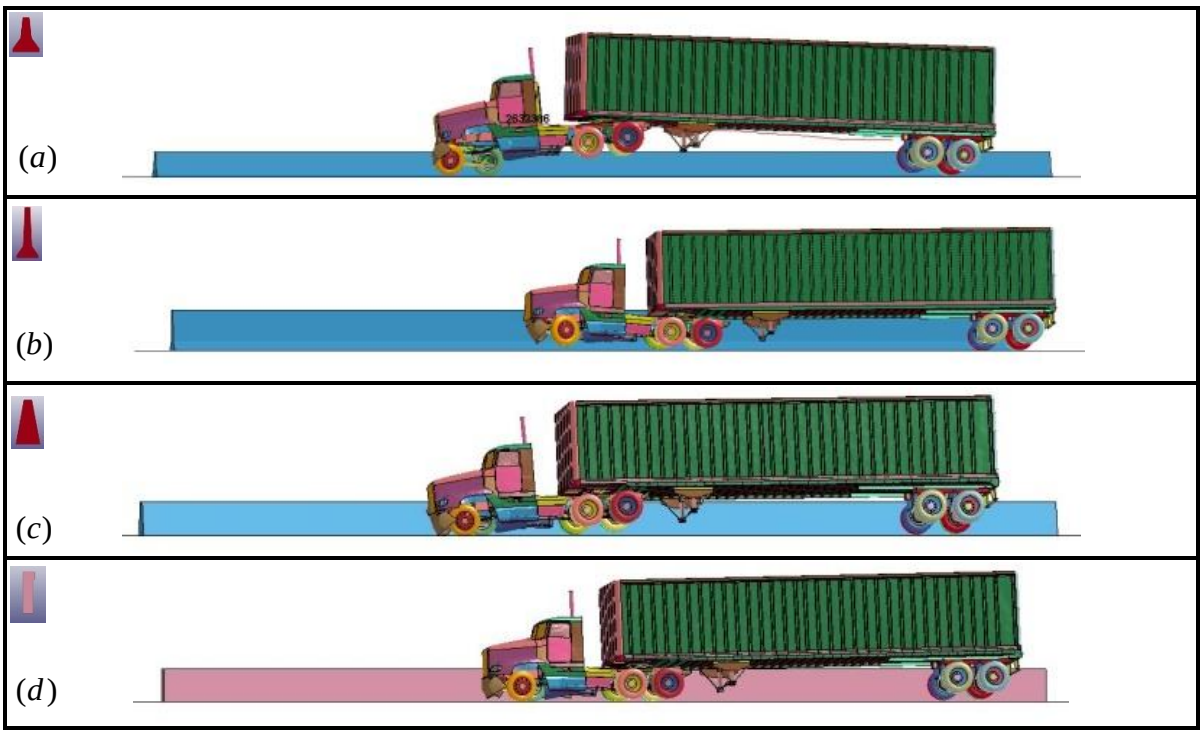


Figura 6.44 – Registro de maior elevação do veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm.

Na Figura 6.45 é plotado o gráfico dos deslocamentos do veículo por eixo de coordenadas e o deslocamento total. Nota-se que o deslocamento no sentido longitudinal da barreira (sentido da via) o modelo que mais se deslocou foi o modelo *New Jersey* 1400 mm, percorrendo uma distância de 62,6 m até o tempo de 3,0 segundos, para esse mesmo tempo os modelos *Single-Slope*, Plana e *New Jersey* 810 mm, deslocaram 58,8 m, 5,63 m e 5,59 m, respectivamente, Figura 6.45(a).

Quanto ao deslocamento transversal mostrado na Figura 6.45(b), que é no sentido perpendicular à barreira e, portanto, o sentido que irá redirecionar o veículo à via, observou-se que a barreira Plana teve o pior desempenho, conduzindo o veículo na direção da faixa paralela em até 4,45 m, o que representa um grande risco de envolver outros veículos no acidente. Para as barreiras *New Jersey* 1400 mm, *New Jersey* 810 mm e *Single-Slope* esses deslocamentos foram 1,7 m, 0,60 m e 0,2 m, respectivamente, Figura 6.45(b).

Para o deslocamento vertical do veículo, o modelo New Jersey 810 mm registrou uma altura máxima de aproximadamente 50 cm em relação ao CG do veículo. O modelo que resultou em menor elevação do veículo foi o modelo com barreira Plana (1066 mm), conforme mostrado no gráfico da Figura 6.45.

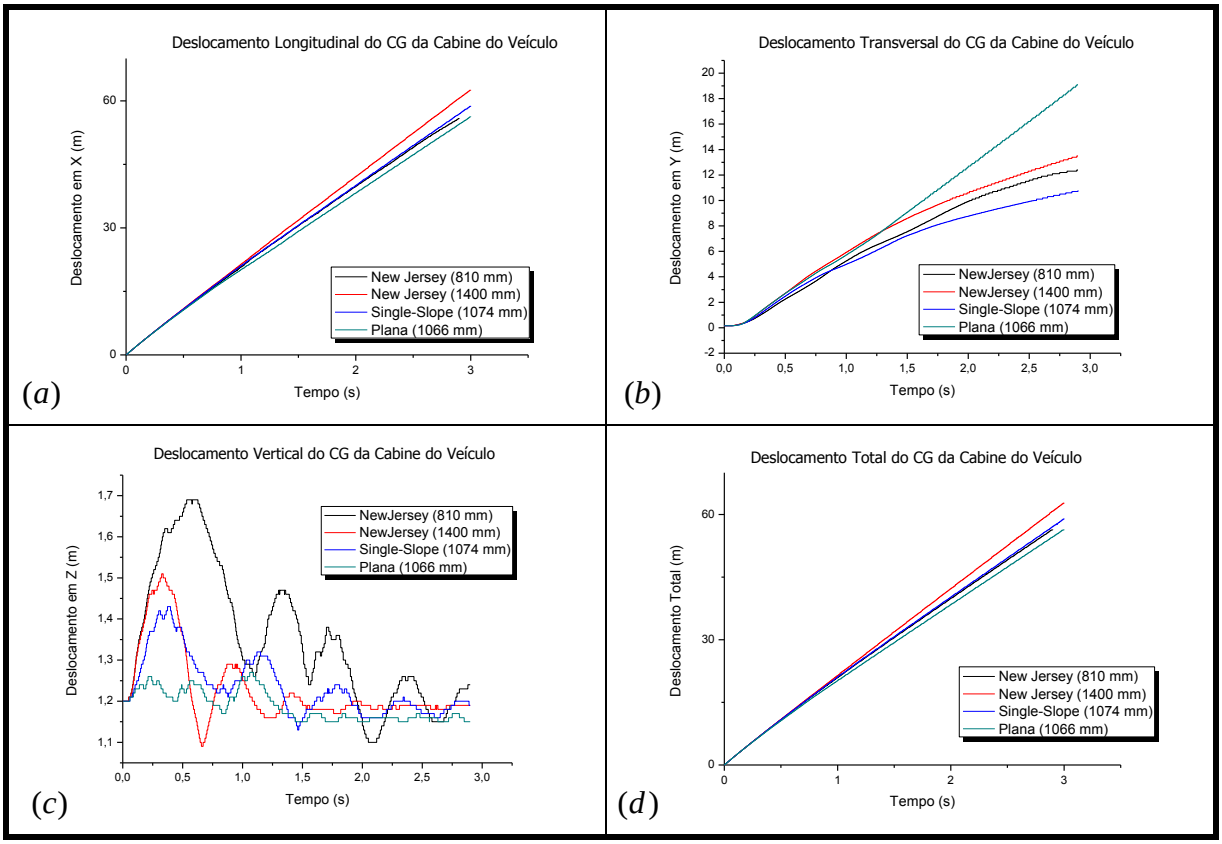


Figura 6.45 – Deslocamentos do veículo: (a)Longitudinal, (b)Transversal, (c)Vertical e (d) Total.

As velocidades do veículo imediatamente após o impacto para cada direção é plotado na Figura 6.46, nota-se que a velocidade no momento do impacto era de 22,2 m/s (80 km/h) na direção longitudinal da barreira (Figura 6.46(a)). No tempo de 3,0 s após o impacto a barreira New Jersey 1400 mm foi a que permanceu com maior velocidade, aproximadamente 20,6 m/s, motivo pelo qual percorreu maior distância nessa direção. As demais ficaram com velocidades aproximadas, sendo a Single-Slope 1074 mm com 18,8 m/s, a New Jersey 810 mm com 18,3 m/s e a Plana 1066 mm com 18 m/s.

Na direção perpendicular à barreira, após o impacto, o veículo que obteve velocidade máxima de 1,86 m/s foi o modelo com barreira *New Jersey* 1400 mm, seguido com 1,48 m/s com a barreira Plana 1066 mm, 1,12 m/s com a *New Jersey* 810 mm e 0,56 m/s com a Single-Slope.

Na direção horizontal os dois modelos que obtiveram velocidades máximas foram os modelos New Jersey 810 mm e 1400 mm, com 4,21 m/s e 3,80 m/s respectivamente. Para os modelos com Plana 1066 mm e Single-Slope 1074 mm as velocidades foram semelhantes, sendo 1,98 m/s e 1,96 m/se respectivamente.

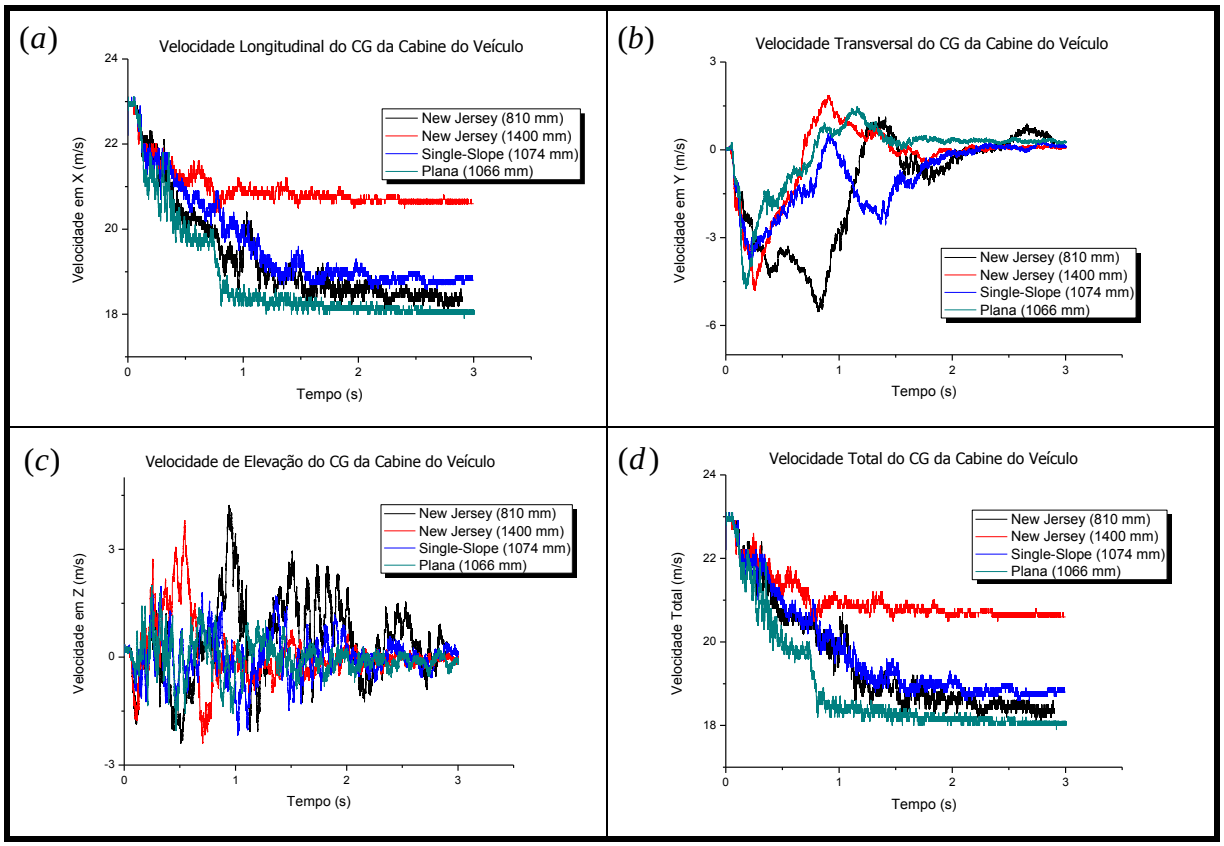


Figura 6.46 – Velocidade do veículo para cada geometria após o impacto: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm.

As desacelerações promovidas pelo impacto na direção longitudinal do veículo estão plotadas na Figura 6.47, devido à grande quantidade de pontos, optou-se apresentar por modelo de barreira para melhor leitura. Foi utilizando um filtro *sae* com a frequência de 60 Hz para filtrar todo o ruído do sinal processado pelo acelerômetro.

Nota-se que todos os modelos sofreram uma desaceleração brusca de até 20 *g* nos primeiros 2,5 ms. O modelo com New Jersey 810 mm foi a que mais obteve picos de desaceleração ao longo do intervalo de tempo com intensidades entre -15 a 12,5 *g* (Figura 6.47(a)) após o primeiro pico ocasionado pelo contato, já para o modelo com barreira plana houve uma intensidade mais elevada de desaceleração súbita nos primeiros 0,5 s, após o pico de contato, com picos entre -17,5 a 17,5 g. Para o *Single-Slope* os picos de desaceleração ficaram entre -10 a 15 g e a *New Jersey* 1400 mm foi que obteve menor intensidade de picos de desaceleração, entre -12,5 a 7,5 g.

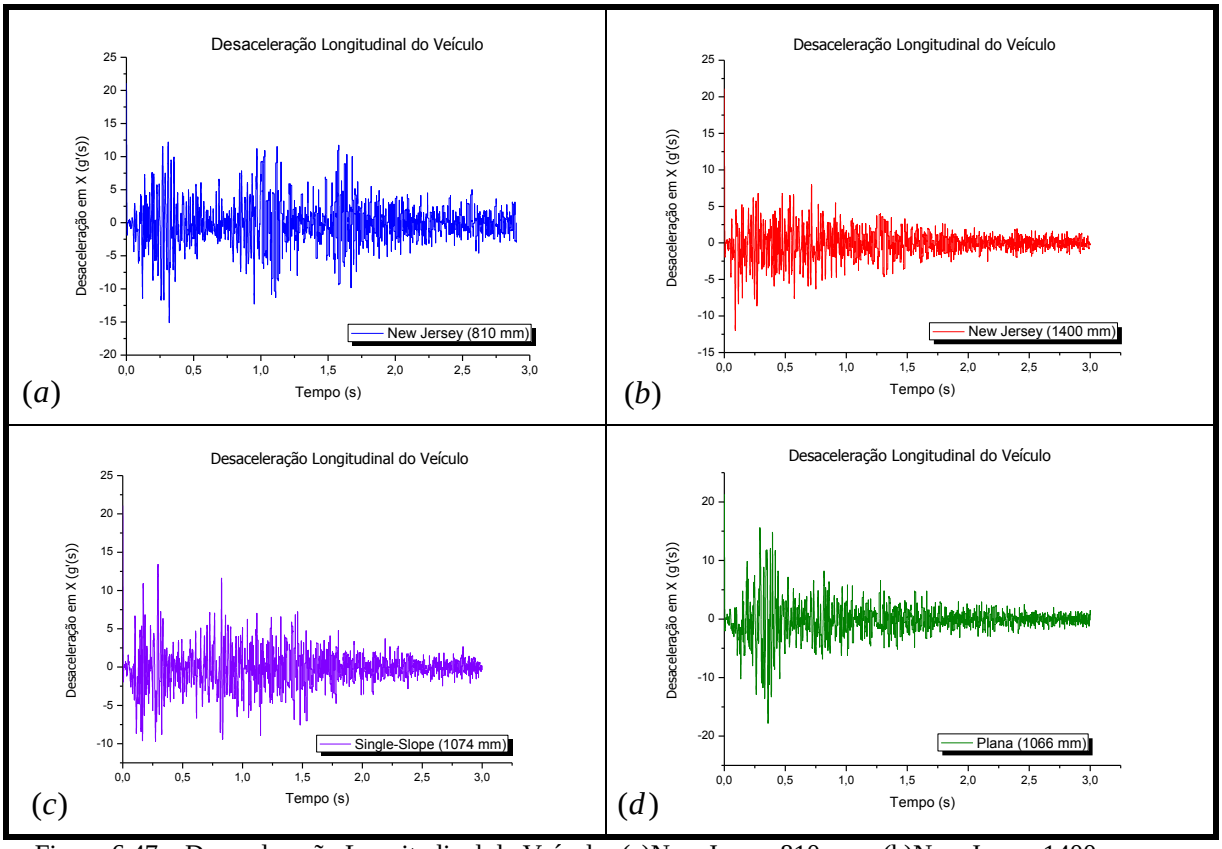


Figura 6.47 – Desaceleração Longitudinal do Veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm.

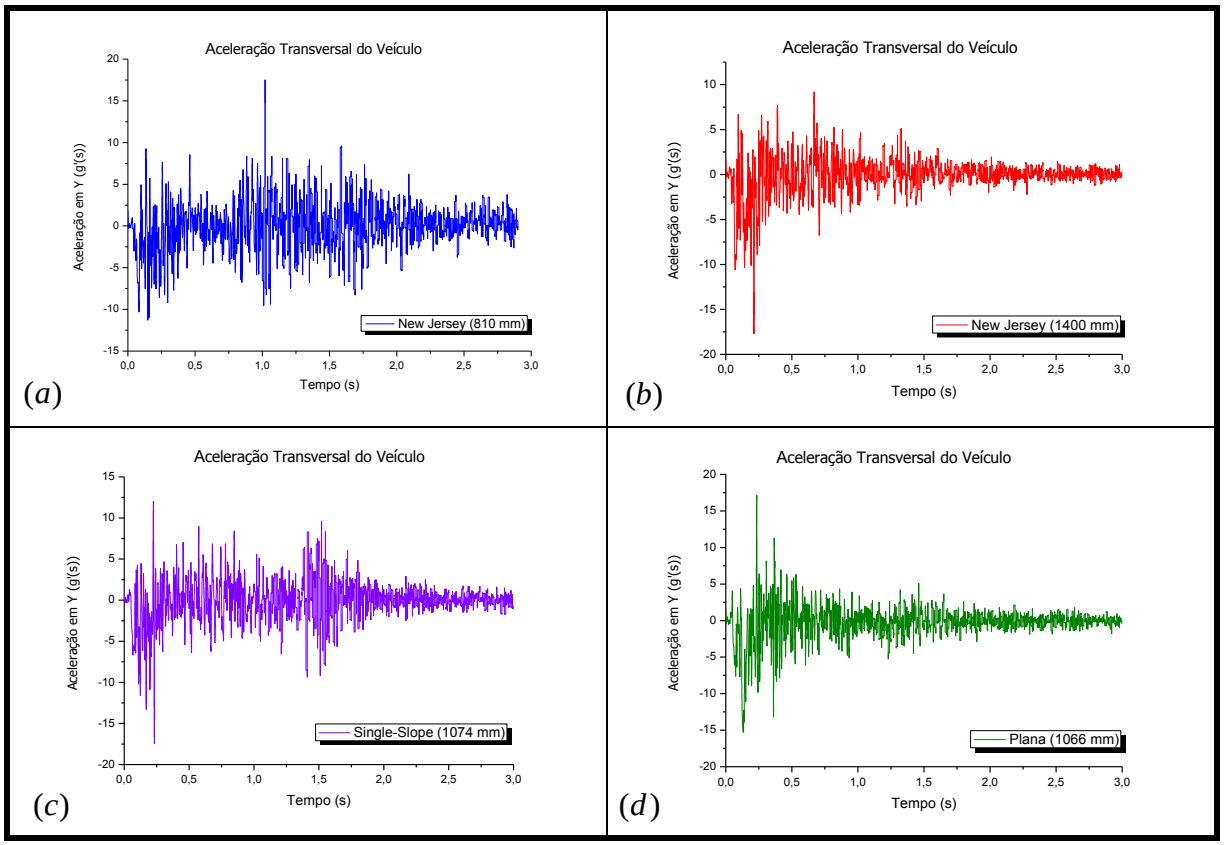


Figura 6.48 – Aceleração Transversal do Veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm.

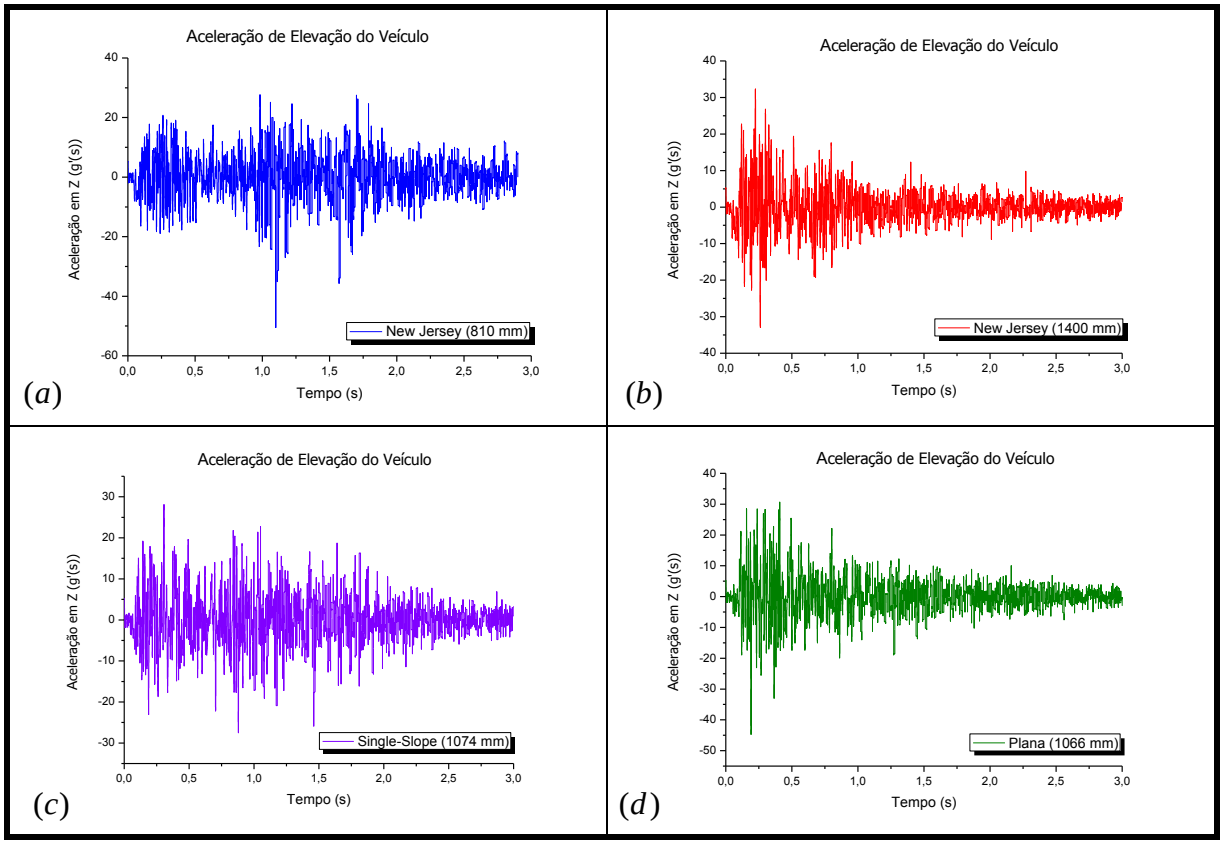


Figura 6.49 – Aceleração vertical do veículo: (a)New Jersey 810 mm, (b)New Jersey 1400 mm, (c)*Single-Slope* 1074 mm e (d) Plana 1066 mm.

O ASI máximo de cada geometria é mostrado no gráfico da Figura 6.50, onde se observa que o menor índice de severidade impacto para o ocupante foi para a geometria *Single-Slope* 1074 e o pior desempenho para a geometria Plana-1066, os modelos New Jersey ficaram com valores intermediários.

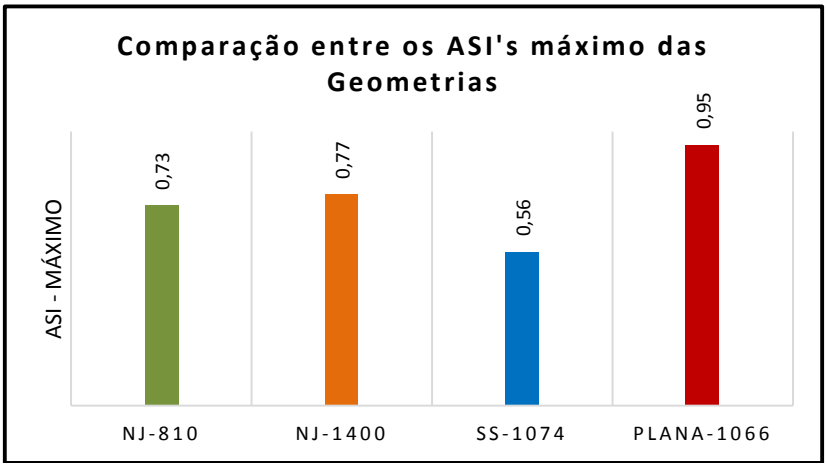
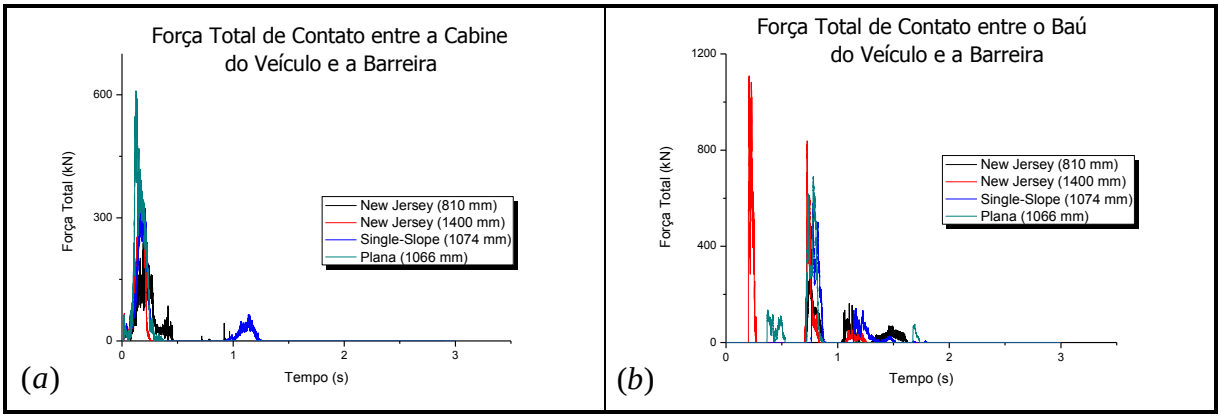


Figura 6.50 – Comparação entre os ASI's máximo das geometrias

Na Figura 6.51 são mostradas as forças de contato entre o veículo e a barreira, observa-se diferentes níveis de força para cada parte do veículo em comparação com modelo de barreira, isso se deve à sua geometria e altura, pois alguns modelos permitem mais contato com algumas partes que outro, é o que se ver na força resultante da cabine do veículo com o modelo New Jersey 810 mm, pois devido à sua pouca altura para o tamanho do veículo, basicamente as partes que mais entram em contato com a mesma são os pneus, ver Figura 6.51(a) e (b).

Na Figura 6.51 é plotado a força resultante do veículo completo com os modelos de barreiras. Nota-se que a geometria plana teve pico de forças resultante de aproximadamente 1400 kN No modelo New Jersey, sendo a que mais recebeu carga de impacto, seguida da *Single-Slope* e a New Jersey.



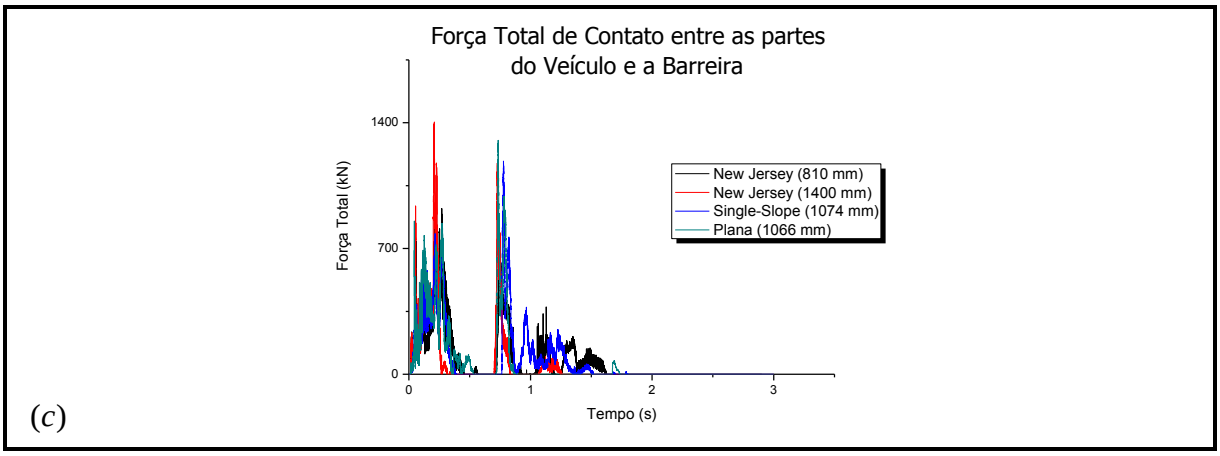


Figura 6.51 – Forças de contato entre o veículo e a barreira: (a) Entre a cabine e a barreira, (b)Entre o baú do veículo e a barreira, (c)Entre o veículo completo e a barreira.

6.4.Comparação entre os modelos constitutivos *MAT_ELASTIC (*MAT_001) e MAT_CSCM_CONCRETE (*MAT_159)

Nessa seção é realizada uma comparação entre duas barreiras New Jersey modeladas com os modelos constitutivos elástico e concreto, respectivamente. O intuito dessa comparação é observar até que ponto o dano do concreto influencia na simulação de impacto, para veículos de até duas toneladas. Com esse intuito, foi montado um ambiente de simulação utilizando um veículo 2000P da norma americana NCHRP Report 350, para um nível de contenção 3, conforme é mostrado na Figura 6.52.

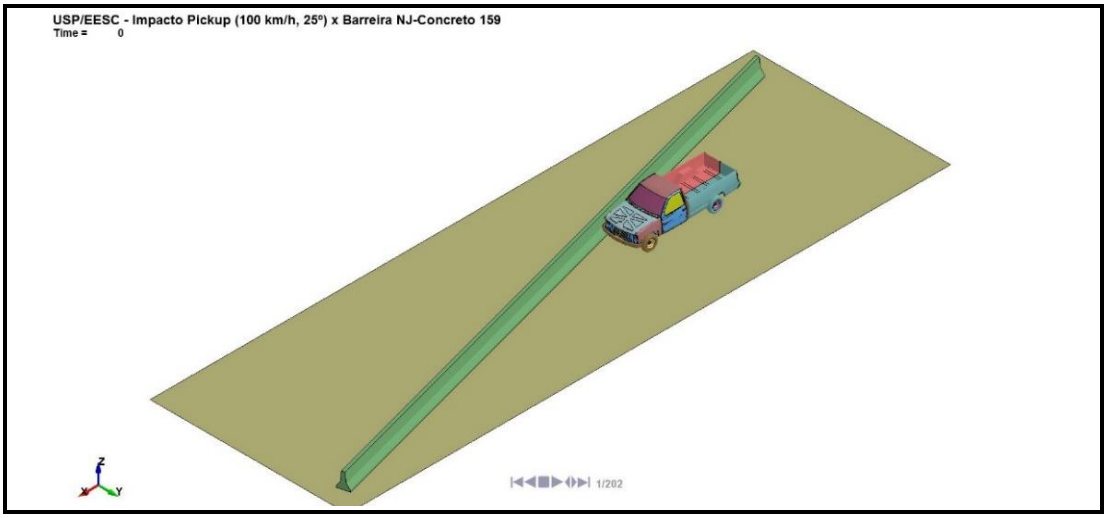


Figura 6.52 – Redirecionamento do Veículo: (a) Ponto de impacto P_1, (b) Ponto de impacto P_2.

Na Figura 6.53 é apresentado a comparação do direcionamento do veículo entre os dois materiais, onde se observa que a linha que faz o rastreamento do percurso para ambos os modelos é praticamente a mesma, tanto na vista superior (Figura 6.53(a)), quanto na vista lateral (Figura 6.53(b)).

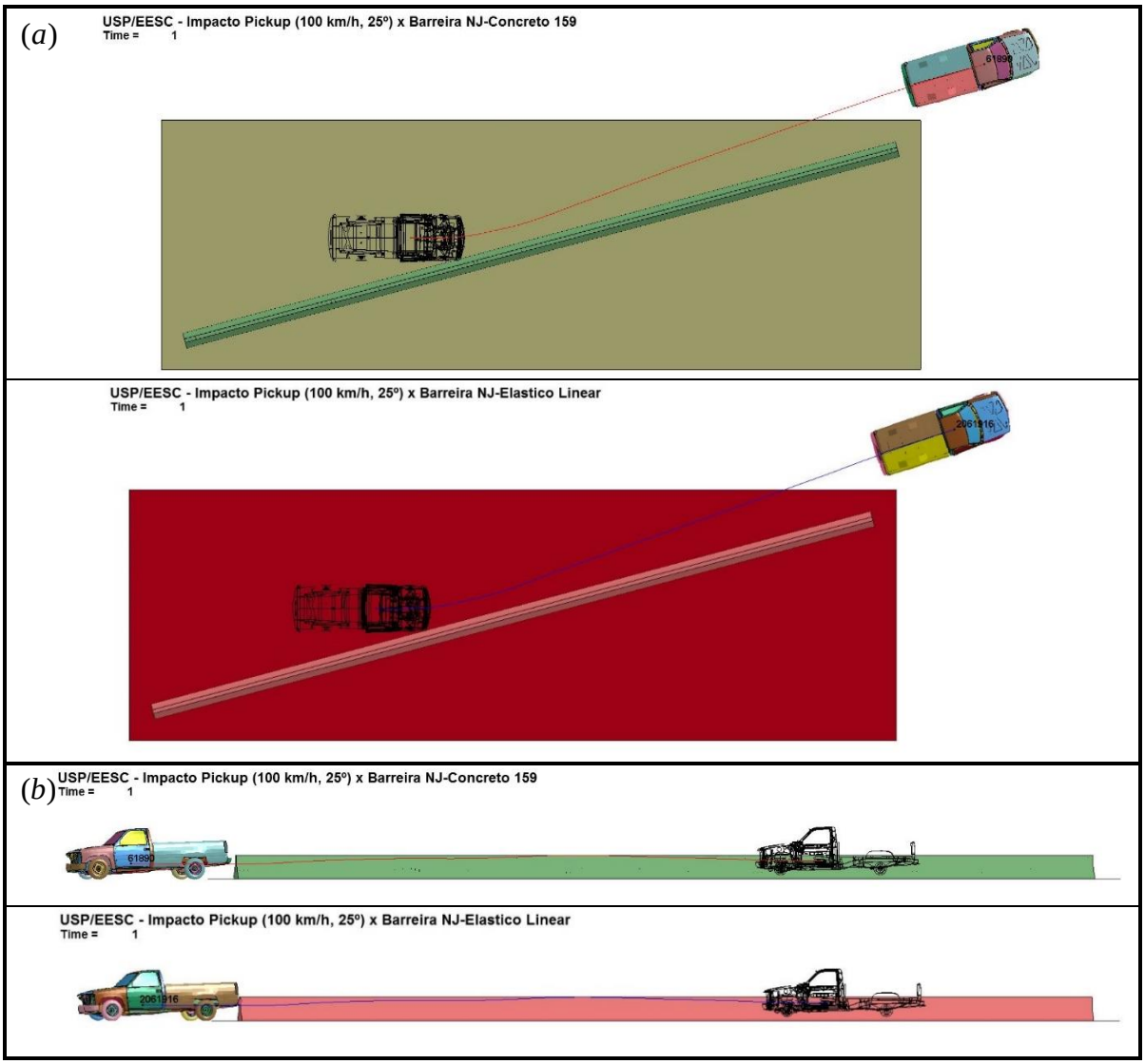
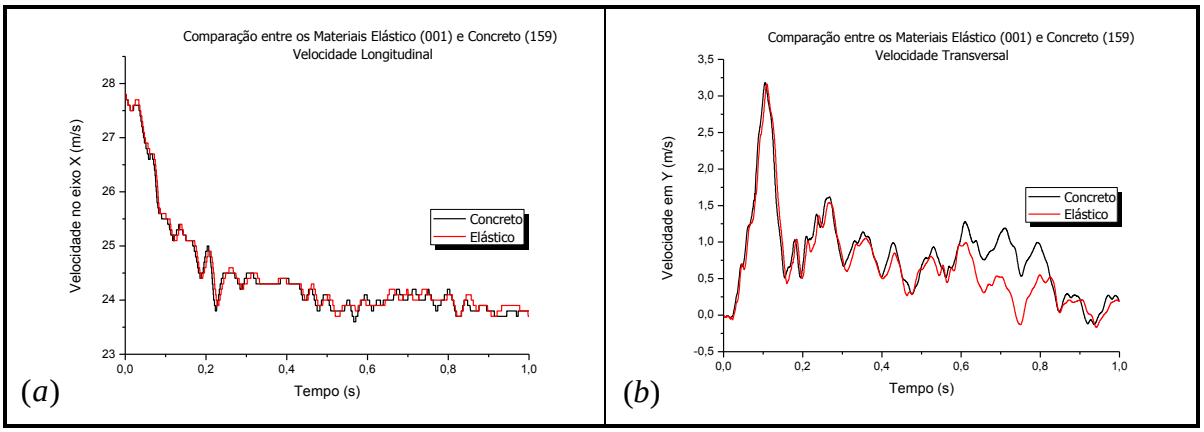


Figura 6.53 – Comparação do redirecionamento do veículo entre os modelos elástico e concreto: (a) Vista superior, (b) Vista lateral.

As velocidades para os dois modelos, por eixo de direção, são mostradas na Figura 6.54, onde se observa que a variação para ambos os casos se mantiveram muito próximas, com uma leve variação para o sentido transversal entre os tempos de 0,6 a 0,8 s (Figura 6.54(b)).



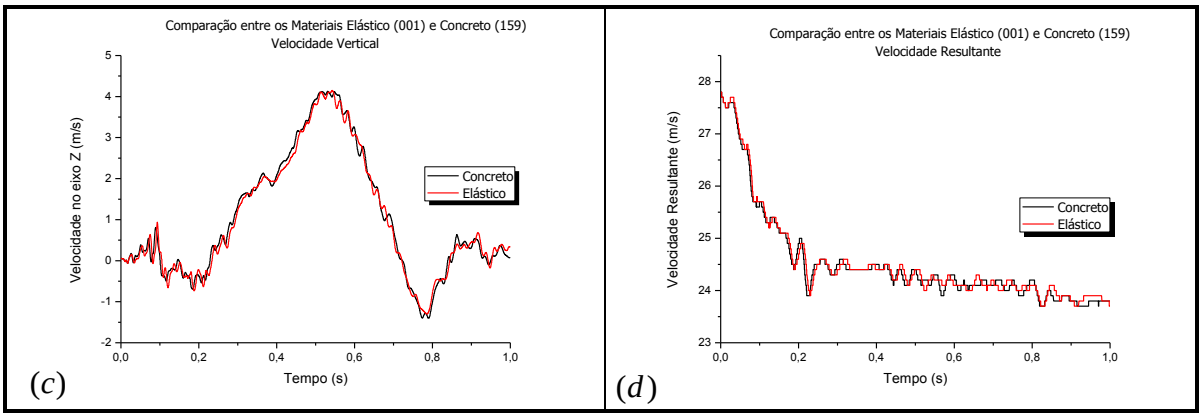


Figura 6.54 – Velocidade do veículo: (a)Longitudinal, (b)Transversal, (c)Vertical e (d) Resultante.

Em relação ao deslocamento, conforme mostrado na Figura 6.55, percebe-se que a influência do material no deslocamento do veículo foi irrisória, mantendo-se praticamente igual em todas as direções.

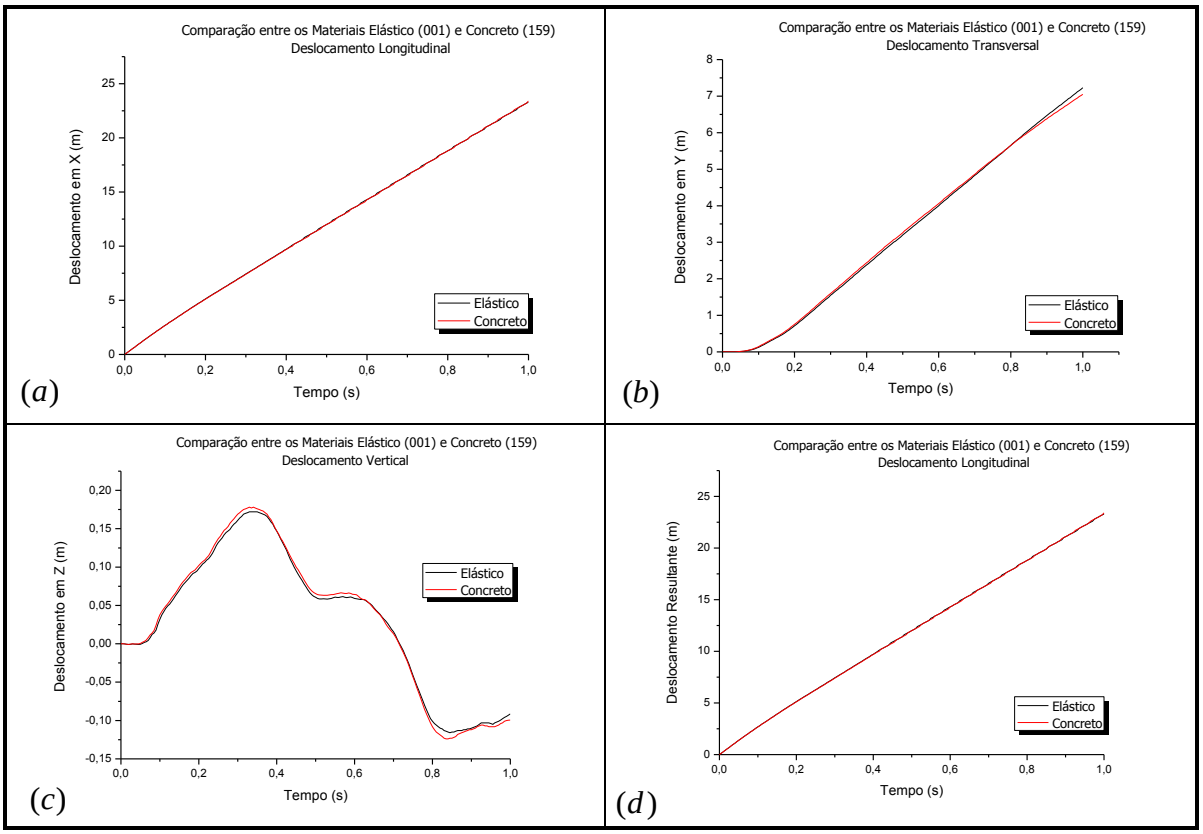


Figura 6.55 – Deslocamentos do veículo: (a)Longitudinal, (b)Transversal, (c)Vertical e (d) Total.

O deslocamento longitudinal para os dois modelos é mostrado na Figura 6.56, comparando a trajetória do veículo para os mesmos intervalos de tempo, onde nenhuma diferença perceptível é notada.

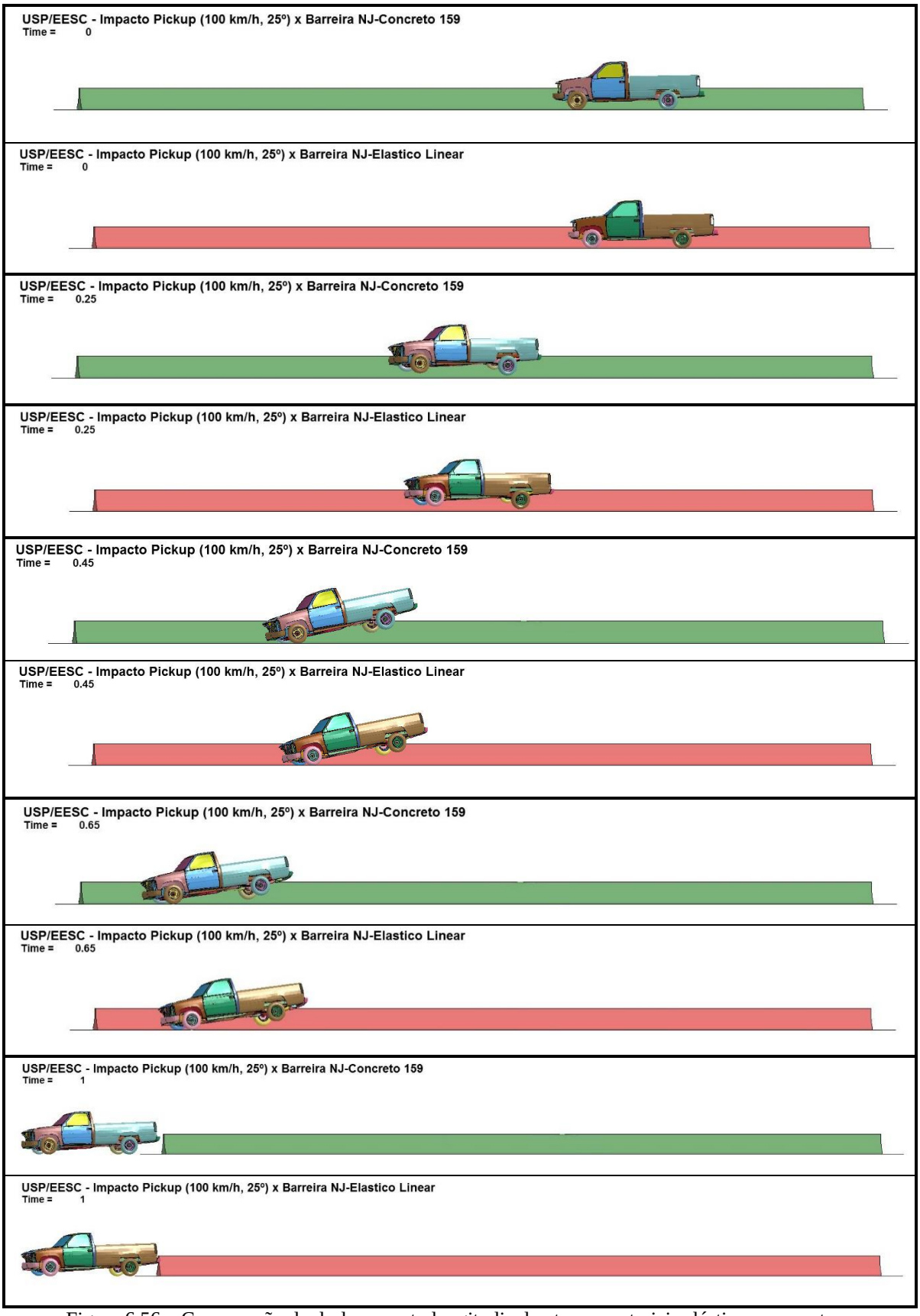


Figura 6.56 – Comparação do deslocamento longitudinal entre os materiais elástico e concreto.

A comparação entre as acelerações dos dois materiais é mostrada na Figura 6.57. Nota-se que em todas as direções as acelerações se mantiveram muito próximas, não havendo uma divergência significativa.

O índice ASI é plotado na Figura 6.57 (d), foi ligeiramente menor para o material concreto, visto que esse material possui a formulação de visco-plasticidade e funciona como certo teor de amortecimento, obtendo um valor de 0,609 contra 0,618 do material elástico.

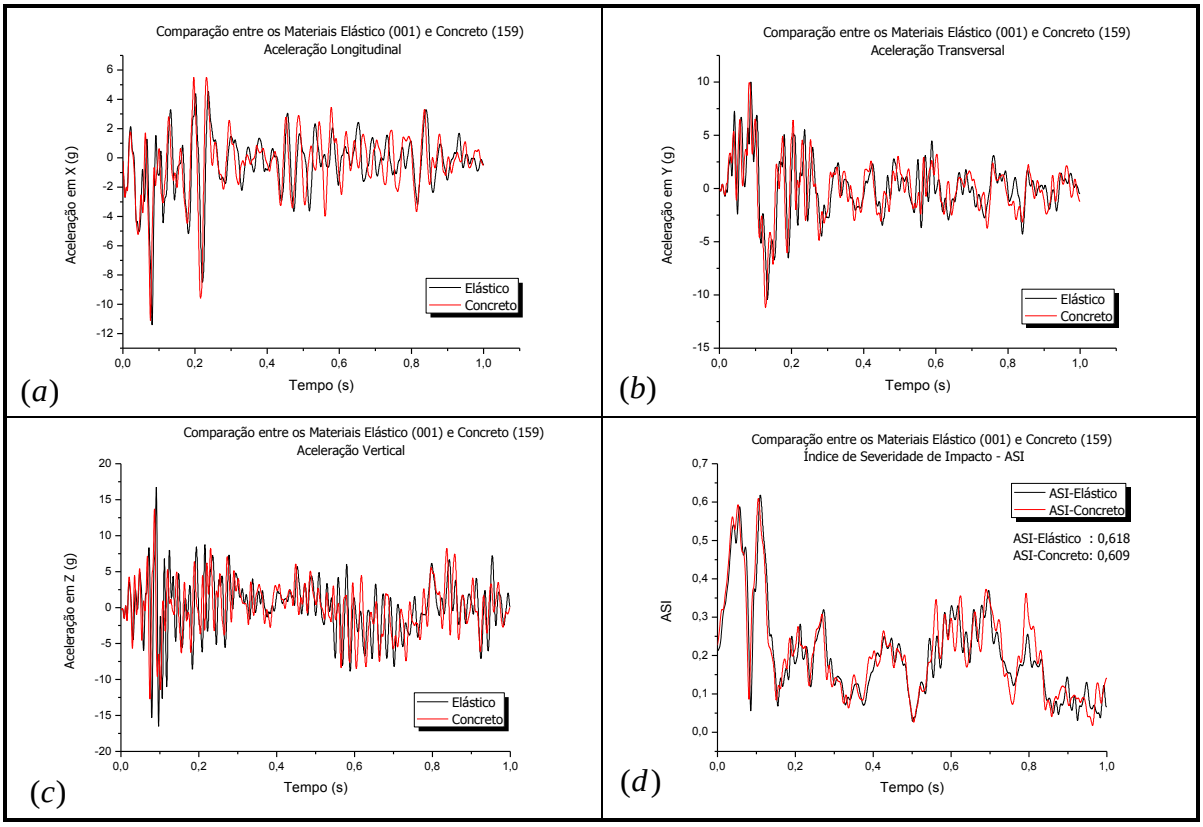


Figura 6.57 – Aceleração do veículo após o impacto: (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração transversal, (c) aceleração horizontal e (d) ASI.

O material Concreto (MAT_159), como já mencionado, possui formulação para o dano, o que implica que para impactos de alta intensidade observa-se o efeito do amolecimento do concreto, o que não ocorre para o material elástico, uma vez que não possui formulação para dano.

Na Figura 6.58(a) é mostrado a parte da barreira que entrou em contato com o veículo, evidenciando a área do dano. Na mesma área da Figura 6.58(b) que corresponde o material elástico, observa-se a integridade da barreira. Até um certo limite de intensidade de impacto, observa-se que o efeito do dano no concreto tem pouca influência no resultado final da simulação, dessa forma, a substituição do material concreto por elástico é plausível até certos limites, nesse trabalho, limitou-se a comparar esse efeito até o limite de nível de contenção três

da norma americana. Sendo necessário simulações para níveis de contenção mais elevados para se observar até que ponto essa substituição é aceitável.

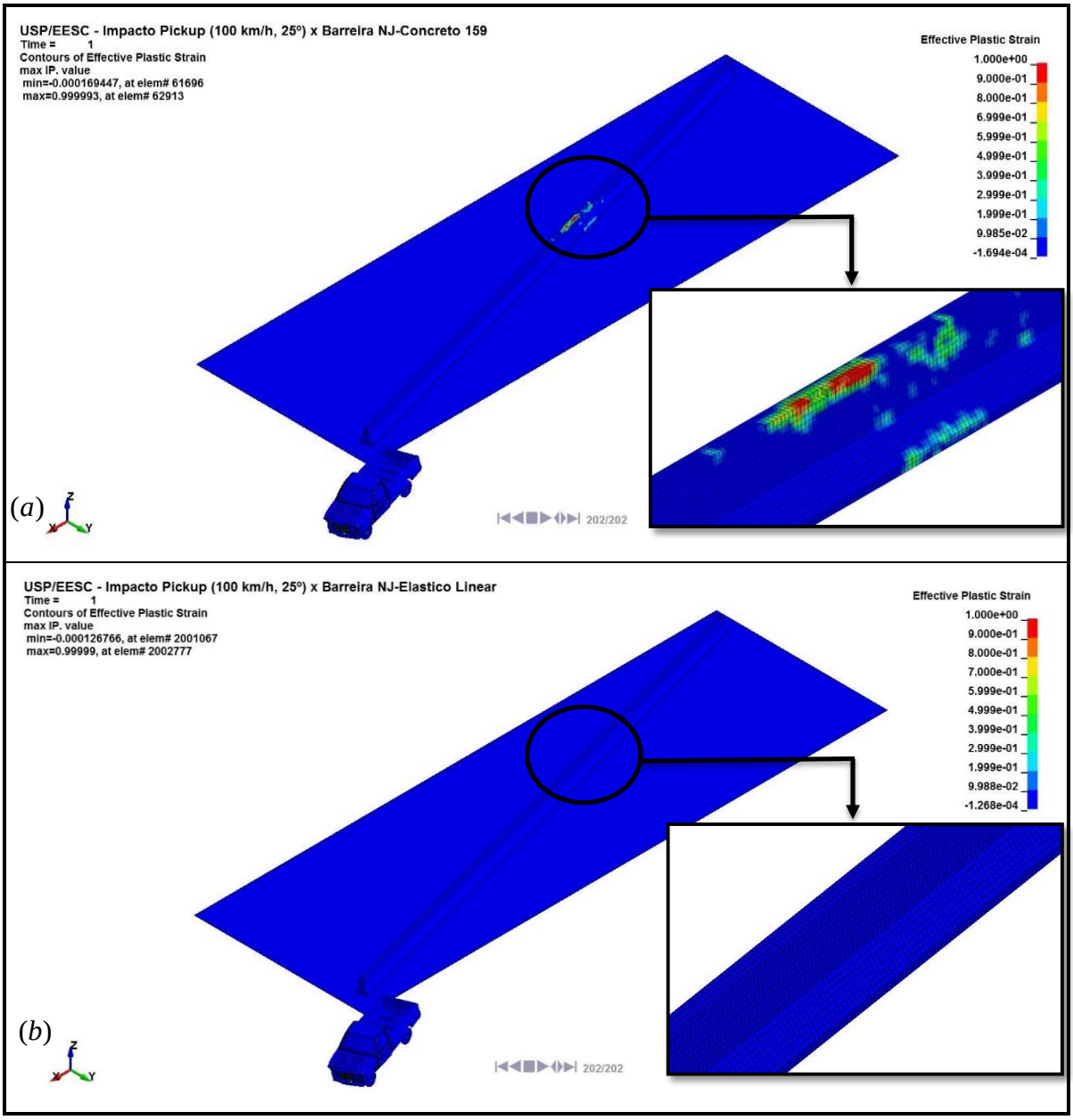


Figura 6.58 – Comparação dos materiais concreto e elástico: (a) concreto com dano, (b) elástico sem dano.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

7.1.Conclusões Finais

O Estudo de sistemas de contenção veicular ainda é muito incipiente no Brasil, isso é facilmente notado na revisão bibliográfica, onde poucos autores brasileiros abordam o tema, entretanto, é um tema bastante difundido internacionalmente, com uma expressiva quantidade de pesquisas nessa área.

É irrefutável a importância dessa linha de pesquisa para a sociedade brasileira, que hoje ocupa o mais alto índice de acidentes de trânsito no Continente Americano, ocasionado por diversos fatores, que vão desde veículos com baixo nível de segurança, até as más condições da maior parte das vias de transito no país. O país há décadas sustenta uma cultura rodoviária, onde quase toda a produção do país é transportada por rodovias. As más condições de tráfego, além de aumentar o custo dos bens produzidos, é responsável pela perda de milhares de vidas todos os anos.

O estudo de segurança nas rodovias deve ser um processo dinâmico e constante, o dispositivos de segurança, quando não estão conservados, estão obsoletos, e o que poderia ser uma ferramenta para prevenir acidentes acaba sendo uma ferramenta para piorá-lo.

Nesse trabalho, foi analisada a eficiência estrutural de barreiras de concreto, item imprescindível para a segurança nas rodovias. A proposta do trabalho se deu sobre três vertentes principais: a revisão bibliográfica, os experimentos de laboratório e as análises numéricas.

A revisão bibliográfica foi essencial para o entendimento do problema e para direcionar os rumos da pesquisa. Por ser um assunto bastante amplo, inicialmente foi bastante difícil decidir que parte do tema abordar, visto que não foi encontrado na literatura brasileira, até o presente momento, nenhuma pesquisa científica envolvendo barreiras de concreto, a nível de estrutura, na comunidade científica brasileira, logo, esse trabalho acabou sendo um estudo piloto nessa área.

A pesquisa envolvendo barreiras de concreto é complexa, especializada e ao mesmo tempo de elevado custo, como visto na revisão bibliográfica é um estudo que necessita de laboratórios de impacto com veículos, necessita também de um amplo conhecimento numérico

de pacotes de elementos finitos e principalmente um grande conhecimento de modelagem numérica com concreto, que por si só, devido à sua propriedade não linear e em muitos casos não existir um modelo numérico que seja capaz de representa-lo em toda a sua complexidade torna esse tipo de pesquisa um desafio.

Os ensaios estáticos de laboratório analisaram o comportamento estrutural de dois modelos de barreiras adaptados da literatura internacional. Não foram de fácil execução, uma vez que foram utilizadas barreiras pré-fabricadas e não engastadas na base, que é o convencional para esse tipo de análise. O objetivo do ensaio foi a analisar o comportamento das linhas de ruptura para barreiras com a base livre e, também, estudar o funcionamento e a resistência de conectores utilizadas em barreiras temporárias.

O primeiro ensaio utilizando barreiras BNJ-NY, foi baseado na Norma Americana *Load-and-Resistance Factor Design* (LRFD Bridge, 2011), obteve-se um deslocamento expressivo das barreiras, devido ao sistema de engaste, no ensaio foi obtido uma força máxima de 114,47 kN, a força não foi o suficiente para romper nem as barreiras nem os conectores, entretanto, foi possível observar o início da formação das linhas de ruptura nas mesmas, bem como o início da ruptura dos conectores pelas soldas.

Os resultados do primeiro ensaio veio a comprovar a suspeita de que as linhas de ruptura não seguiriam as previstas pela LRFD Bridge (2011), uma vez que ela representa as barreiras engastadas na base, que por sinal são a grande maioria. Também foi possível observar que os conectores influenciam na orientação da formação dessas linhas, seja porque trabalham como pontos de reação da estrutura, seja pelo tamanho e forma como estão acoplados à estrutura.

A importância do estudos das linhas de ruptura reside na forma de compreender como se dá a falha na estrutura e com isso fazer importantes alterações na concepção de projeto para a melhoria da eficiência da estrutura.

O segundo experimento utilizando as barreiras BNJ-M não foi bem sucedido, pois o sistema tornou-se muito flexível, o que impossibilitou sua execução, não houve deformação significativa em nenhuma das barreiras ou de seus componentes, devido a isso, optou-se adaptar um módulo para que ficasse engastado pelos conectores e então ensaiado até o limite de ruptura.

Igualmente como observado para as barreiras BNJ-NY, as linhas de rupturas não seguiram a prevista pela norma americana, também se observou que os conectores acoplados ao concreto influenciaram a orientação das fissuras, a ruptura se deu na parte superior da barreira e não de forma trapezoidal como se dá nas barreiras engastadas, as forças de reações

do conectores também foram responsável por grandes rachaduras nas extremidades da barreira, que só não foi a colapso pelas extremidades porque a parte superior cedeu primeiro.

Vale salientar, que a formação de fissuras está relacionada com a durabilidade da peça, quanto a esse aspecto, os ensaios mostraram que a formação de fissuras tiveram contribuição pelo tipo de conector, no caso do conector BNJ-M, as fissuras foram maiores, entretanto mais concentradas na nas proximidades do conector, enquanto a BNJ-NY ficaram melhor distribuídas. O estudo de fissuração é importante para a consideração de manutenção das barreiras, principalmente após sofrerem testes de colisões, onde devem ser avaliadas se deverão ser substituídas ou apenas serem reparadas. Nesse trabalho essas ponderações não foram abordadas e seguirão como sugestão para futuros trabalhos.

A força máxima obtida para a ruptura da barreira foi de 191,6 kN, bem abaixo para os níveis de contenção TL-3 e TL-4, que são de 240,3 kN. Entretanto, o protótipo construído para o ensaio não acompanhou o projeto original, sofrendo várias modificações decorridas de adaptações por dificuldades na construção.

Para as análises numéricas, foram realizadas várias sequencias de simulações, a primeira para barreiras de concreto engastada na base, foi realizada utilizando um veículo TB 11 da norma europeia EN 1371 (2008) e um veículo 1100C da norma americana MASH (2009). Infelizmente não foram encontrados resultados na literatura com características semelhantes para fazer comparações.

Nos dois casos, a barreira conteve e redirecionou a barreira, entretanto, para o veículo 1100C foi obtido uma alto valor para o ASI, que indica um acidente mais severo. Entretanto, o índice ASI não é obrigatório no MASH, ele é apenas indicado como referência à norma europeia, onde a leitura desse índice é obrigatória, o MASH utiliza outros parâmetros para medir o índice do acidente, como a deformação do veículo, também adotado na norma europeia.

O segundo conjunto de simulações foi realizado com o sistema de barreiras temporárias BNJ-NY, com dez módulos, sendo 6,0 m cada. Para esse caso foi realizado com o mesmo sistema de barreiras e o mesmo veículo, diferindo apenas o ponto de aplicação do impacto.

Para a primeira simulação, com o ponto de impacto no centro da barreira, o veículo foi direcionado corretamente e as deformações do veículo foram aceitáveis. Para o segundo caso, com o ponto de impacto no ponto mais delicado do sistema, que é na conexão, observou-se um comportamento inesperado, onde o pino dos conectores se prendeu ao veículo sendo arrancado, o que tornou o sistema falhou e agravando o acidente, os gráficos das acelerações e ASI comprovam isso, além do mais os veículo sofreu mais danos que no segundo caso.

Para essa segunda simulação foi possível correlacionar com resultados experimentais, embora não tendo as mesmas condições de ensaio, foi possível observar que os valores da simulações numéricas estão condizentes com os resultado obtidos experimentalmente.

O penúltimo caso, avalia o desempenho das barreiras pela sua geometria, uma vez que com o novo projeto da norma NBR-14885, que deverá entrar em vigor, prevê a adoção de novas geometrias, uma vez que a de 2004 só aceitava a Tipo e a New Jersey.

Para esse conjunto de simulações foram adotadas apenas barreiras com material elástico, uma vez que o custo computacional para simular com concreto é alto, como não havia tempo hábil, optou-se por essa simplificação.

Para essas simulações foi adotado um veículo 36000V, que é um veículo utilizado no MASH e no NCHRP R350 (1993), para níveis de contenção TL-5. As geometrias analisadas foram a New Jersey 810 mm, New Jersey 1400 mm, Single-slope 1074 mm e a Plana 1066 mm.

As simulações mostraram que a geometria da barreira tem um papel fundamental do desempenho da mesma. As geometrias que tiveram melhor desempenho para o porte do veículo citado foram as New Jersey 1400 mm e Single-Slope 1074 mm, a Plana teve um desempenho inadequado e a New Jersey 810 mm foi insatisfatório com maior elevação do veículo e também a que mais causou danos.

Geralmente acidentes graves com veículos pesados, ocasionado pelo contato com barreiras são ocasionados pela adoção de modelos inadequados para determinado tipo de via, ou seja, no Brasil o uso de barreiras New Jersey de 810 mm é quase que constante para todos os tipos de vias, não importando se são vias de grande fluxo de veículos pesados ou não. Logo isso aumenta a probabilidade de acidentes graves pela adoção do modelo errado de barreiras.

O último caso faz uma comparação entre os materiais elástico (001) e o concreto (159), com o intuito de mostrar até que ponto o efeito do dano do concreto influência no resultado se comparado com o material elástico. As simulações mostraram que até um nível de contenção três da norma americana, a influência do dano é pouco perceptível, podendo o uso do material elástico ser utilizado em substituição do concreto, para simplificação das simulações, porém, para níveis de contenção mais elevado, essa comparação não foi realizada.

Por fim, vale reforçar a importância desse estudo tanto nos meios acadêmicos, quantos nos centros de pesquisas, pois é um estudo de vital importância para a melhoria da segurança nas rodovias brasileiras, o que ajudará a diminuir o número de acidentes fatais, que vem tirando a vida de milhares de brasileiros, todos os anos.

7.2.Sugestões para Futuras Pesquisas

Como já mencionado anteriormente, as pesquisas com sistemas de contenção de veículos são dinâmicas e necessitam de estudos constantes. Como pesquisa nacional, muito pouco foi feito, embora já tenha tido grandes avanços em outros países, ainda tem muito por ser feito. Sendo algumas sugestões elencadas a seguir.

O grande potencial do concreto é seu baixo custo de manutenção e sua longa vida útil, entretanto, a sua rigidez não é muito apreciada como amortecedor de impacto, daí a necessidade de muitas pesquisas tanto na área de materiais com adição de elementos para melhorar sua propriedade de amortecimento, como o uso de borracha reciclada oriunda de pneus, como o estudo de novos tipos de conectores que visam melhorar as propriedades de amortecimento do sistema de barreiras temporárias.

Quanto aos experimentos de laboratórios, pode ser feito um exaustivo estudo de propriedades do concreto para calibração das várias possibilidade de modelos para uso nas simulações numéricas.

Como já mencionado, estudos de durabilidade e estados de fissuração da barreira em serviço como componente de segurança e manutenção.

Quanto ao nível de simulações numéricas, pode-se testar outros modelos de materiais disponíveis no software e fazer comparativos com testes de laboratório.

Com a aprovação da nova norma NBR 15486:2016 as simulações de impacto tornam-se obrigatórias para homologação de novos modelos de barreiras, no país, ainda não existe nenhum laboratório para realizar esses tipos de testes, como também carecem de mão de obra habilitada para esse tipo de serviço, então haverá cada vez mais uma necessidade crescente nesse ramo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/CB-06. Projeto de Revisão ABNT NBR 14885 – Segurança no Tráfego – Barreiras de Concreto. Set, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Brasília. Disponível em:<http://www.antt.gov.br/passageiro/apresentacaopas.asp>. Acesso em 23 de set. de 2012.

ALBIN, Richard B., et al. Washington State Precast Concrete Barrier. *Washington State Department of Transportation*. Disponível em: <http://www.wsdot.wa.gov/publications/fulltext/design/roadsidesafety/trb_report.pdf>Acesso em 20 de janeiro de 2014.

AMATO, G., FIONN, O., Ciaran, K., BIDISHA, G. *Development of roadside safety barriers using natural building materials*. Paper presented at the ITRN Conference Cork. 2011

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *Manual for Assessing Safety Hardware*, 1st ed. Publication 1-56051-416-9; 2009.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Roadside Design Guide*. 4ª ed. Washington, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14885:2004. *Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário - Projeto de barreiras de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2004.

ANDRADE, CÂNDIDO MOREIRA. Modelo QRSP para quantificação do Risco na Saída de Veículos da Pista em Rodovias. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15486:2007. *Segurança no tráfego - Dispositivo de contenção viária - Diretrizes*. Rio de Janeiro, 2007.

ATAHAN, A.O., (2009). Effect of permanent jersey-shaped concrete barrier height on heavy vehicle post-impact stability. International Journal of Heavy Vehicle Systems 16(1): 243-57.

ATAHAN, A.O., Sevim, U., (2008). *Testing and comparison of concrete barriers containing shredded waste tire chips*. Materials Letters 62(21-22): 3754-7. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2008.04.068.

ATAHAN, Ali O. *Finite-Element Crash Test Simulation of New York Portable Concrete Barrier with I-Shaped Connector*. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 132, n.3, p. 430-440, mar. 2006.

ATAHAN, Ali O. *Vehicle crash test simulation of roadside hardware using LS-DYNA: a literature review*. Int. J. Heavy Vehicle Systems, Vol. 17, No. 1, 2010

BANDNEWS FM. ACIDENTE - Um caminhão bateu na mureta da rodovia Ayrton Senna. Disponível em: <https://www.facebook.com/radiobandnewsfm?filter=1>. Acesso em 10 de março de 2014.

BIELENBERG, R. W. ROSENBAUGH, S. K. et al. *Termination and Transition of Temporary Concrete Barrier*. Transportation Research Board - TRB 2010 Annual Meeting, Washington DC, 2010.

BINA, P.; PETER, R. *Barreiras rodoviárias em concreto que absorve energia de impacto: prevenção aos traumatismos em acidente é exemplo de desenvolvimento sustentável*. Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2006.

BIN-SHAFIQUE, S., BARRETT, M., SHARIF, H., CHARBENEAU, R., ALI, K., HUDSON, C., (2011). Mitigation methods for tempo-rary concrete traffic barrier effects on flood water flows. Technical Report FHWA/TX-11/0-6094-1.

BONIN, G., RANZO, A. *Dynamic Actions on Bridge Slabs Due to Heavy Vehicle Impact on Roadside Barriers*, Transportation Research Board, 83rd Annual Meeting, Paper No. 04-3501, Washington DC, 2004.

BULLARD, D., NAUMAN, M.S., ROGER, P.B., REBECCA, R.H., JAMES, R.S., BEVERLY, J.S., (2006). Aesthetic concrete barrier design. Transportation Research Board, Washington, DC.

BUTH, C. E., SHEIKH, N., BLIGH, R. P., MENGES, W. L., and HAUG, R. R. *NCHRP Report 350 Testing of the Montana Portable Concrete Safety Shaped Barriers*. Texas Transportation Institute – The Texas A&M University System. College Station, Texas, USA, 2003.

CAMERA REC. *Motorista Morre Após Bater Carro em Mureta do Contorno Norte*. Disponível em: <http://cameranorec.blogspot.com.br/2014/08/motorista-morre-apos-bater-carro-em.html#.V0zWXfkrJpg>. Acesso em 20 de agosto de 2014.

CAMERA REC. *Operário de Manutenção de Rodovia morre atropelado*. Disponível em: <http://cameranorec.blogspot.com.br/2013/07/operario-de-manutencao-de-rodovia-morre.html#.V0zhC_krJpg>. Acesso em 10 de agosto de 2013.

CARROS.IG. Os itens de segurança que todos os carros deveriam ter. Disponível em: http://carros.ig.com.br/especiais/os+itens+de+seguranca+que+todos+os+carros+deveriam+ter/7625.html. Acesso em 31 de maio de 2016.

CEB-FIP MODEL CODE 1990. Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford House, 1993.

CHARLES F. MCDEVITT. *Basics of concrete barriers*. Public Roads. 63.5 p10. Word Count: 2557, 2000.

CHARRON, J.-P.; NIAMBA, E. & MASSICOTTE, B. *Static and Dynamic Behavior of High- and Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Precast Bridge Parapets*. American Society of Civil Engineers, Journal of Bridge Engineering, DOI: 0.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000159 2011.

CLAUDE, J-F., AHMED, E., CUSSON, D., BENMOKRANE, B., (2011). Early-age cracking of steel and GFRP-reinforced con-crete bridge barriers. 2011 CSCE Annual Conference, 1-12, Ottawa, Canada.

CÓDIGO DE TRANSITO BRASILEIRO. Brasília, jul. 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Pesquisa CNT de Rodovias 2013*: relatório gerencial, Brasília, 2013.

CONNOLLY, CHRISTINE. *Instrumentation used in vehicle safety testing at Millbrook Proving Ground Ltd. Emerald Group Publishing Limited*, ISSN 0260-2288, DOI 10.1108/02602280710731641. Millbrook Proving Ground Ltd, Bedford, UK, 2007

CONSOLAZIO, G.R., CHUNG, J., GURLEY, K., (2003). Impact simulation and full scale crash testing of a low profile concrete work zone barrier. Computers & Structures 81(13): 1359-74. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00058-0.

CONSOLAZIO, G.R., CHUNG, J.H. and GURLEY, K.R. *Development of a Low Profile Work Zone Barrier using Impact Finite Element Simulation*, Transportation Research Board, 81st Annual Meeting, Paper No. 02-4312, TRB, Washington DC. 2002.

COUGHLIN, A.M., MUSSELMAN, E.S., SCHOKKER, A.J., LINZELL, D.G., (2010). Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges. International Journal of Impact Engineering 37(5): 521-9. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.11.004.

DELTABLOC INTERNATIONAL, *High Performance Concrete Barriers for Work Zones*. Disponível em: <http://www.deltabloc.com/> Acesso em 09 de março de 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO - DER/SP. *Normas Técnicas – Projeto Padrão: Dispositivos de Segurança L03*. Disponível em <http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas_tecnicas.aspx> Acesso em 11 de março de 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE SÃO PAULO (DER/SP). *Projeto de Dispositivos de Segurança*. Disponível em: http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas_tecnicas.aspx. Acesso em 01 de setembro de 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. *Estatística: Frota*. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/frota.htm> Acesso em 11 de fevereiro de 2014.

DHAFER, M., BUYUK, M., KAN, S., (2007). Performance evaluation of portable concrete barriers. National Crash Analysis Center, The George Washington University

DHAFER, M., BUYUK, M., KAN, S., (2007). Performance evaluation of portable concrete barriers. National Crash Analysis Center, The George Washington University,http://www.ncac.gwu.edu/research/reports.html.

DRUCKER, D.C., GIBSON, R.E. e HENKEL, D.J. (1957), Soil mechanics and work hardening theories of plasticity, Trans. ASCE, 122, p. 338-346.

DYNA MORE. Einführung in LS_DYNA. Stuttgart, Germany, 2013.

EASI-SET INDUSTRIES, *J-J Hooks Barrier Connection System*. Easi-Set Industries. Disponível em: <http://www.jjhooks.com/connection.shtml> Acesso em 09 de março de 2014.

ELMER VII, W. TACIROGLU, E. McMICHAEL L. D. Dynamic Strenght Icrease of Plain Concrete from High Strain Rate Plasticity with Shear Dilation. Lawrence Livermore National Laboratory. International Journal od Impact Engineering. LLNL-JRNL-464571. 2010.

ESFAHANI, E., DHAFER, M., KENNETH, S.O., (2008). Safety performance of concrete median barriers under updated crash-worthiness criteria, 1-12, The National Crash Analysis Center.

EUROPEAN STANDARD. EN 1317-1, *Road restraint systems - Part 1: Terminology and general criteria for test methods*, 1998.

EUROPEAN STANDARD. EN 1317-2, *Road restraint systems - Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers*, 1998.

EUROPEAN STANDARD. EN 1317-3, *Road restraint systems - Part 3: Crash cushions: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for crash cushions*, 2000.

EUROPEAN STANDARD. EN 1317-4, Road restraint systems - Part 4: *Impact tests acceptance criteria and test methods for terminals and transitions of safety barriers*, 2001.

EUROPEAN STANDARD. EN 1317-5, *Road restraint systems - Part 5: Durability criteria and evaluation of conformity*, 2001.

EUROPEAN STANDARD. EN 1317-6, *Road restraint systems - Part 6: Pedestrian road restraint system*, 1998.

FEMA, *Final Report of the Motorcyclists & Crash Barriers Project*, The Federation of European Motorcyclists Associations, Brussels, Belgium, 2000.

G1. Caminhão do Corpo de Bombeiros quase cai de pontilhão após batida. Disponível em: < http://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2015/11/caminhao-do-corpo-de-bombeiros-quase-cai-de-pontilhao-apos-batida.html>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.

G1. Carro colide em defensa metálica na BR 101 e passageira morre em SE. Disponível em: <http://g1.globo.com/se/sergipe/noticia/2014/02/carro-colide-em-defensa-metalica-e-passageira-morre-na-br-101-em-se.html >. Acesso em 30 de fevereiro de 2014.

GREEN, S. J. and PERKINS, R. D., *'Uniaxial compression tests at varying strain rates on three geological materials', in 'Basic and Applied Rock Mechanics'*, edited by K.E. Gray (Society of Mining Engineers of AIME, New York, 1972) pp. 35-45.

GRZEBIETA, R. H., Zou R., Jiang T., and Carey A., *Roadside Hazard and Barrier Crashworthiness Issues Confronting Vehicle and Barrier Manufactures and Government Regulators*, Proc. 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, USA, June 2005.

HIRSCH, T. J., "*Analytical Evaluation of Texas Bridge Rails to Contain Buses and Trucks*," Research Report 230-2, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX, 1978, 52 pp.

HOWARD, C. H., STOLLE, C. J., LECHTENBERG, K.A., FALLER, R. K., REID, J. D., and Sicking, D.L. *Dynamic Evaluation of a Pinned Anchoring System for New York State's Temporary Concrete Barriers – TRP-03-216-09*. University of Nebraska-Lincoln, USA, 2009.

ITOH, Y., CHUNLU, L., RYUICHI, K., (2007a). *Dynamic simulation of collisions of heavy high-speed trucks with concrete barriers*. Chaos, Solitons & Fractals 34(4): 1239-44. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2006.05.059.

JEON, Se-Jin; CHOI, Myoung-Sung; KIM, Young-Jin. *Failure Mode and Ultimate Strength of Precast Concrete Barrier*. ACI Structural Journal, v. 108, Nº. 1, Jan. 2011.

JIAN, Z., ZHENGBAO, L., SUJUAN, W., YONGHAN, L., MUXI, L., (2011). Optimization of the level of SS crash barrier overpass bridge on highway. IEEE Computer Society.

JIANG, H. & ZHAO, J. Calibration of the continuos surface cap model for concrete. Finite Elements in Analysis and Desing. Elsevier. Vol. 97, pp. 1-19, 2015.

JIANG, T. & GRZEBIETA, R. H. & ZHAO, X. L. *Predicting impact loads of a car crashing into a concrete roadside safety barrier*, Woodhead Publishing Ltd IJCrash Vol. 9 No. 1 pp. 45–63, 2004

JOY, S. and R. MOXLEY, *White Sands Missile Range 5¾-inch Concrete Properties, United States Army Engineers Waterways Experiment Station Briefing Prepared for Defense Special Weapons Agency*, August 1993. Distribution limited to U.S. Government agencies and their contractors: critical technology.

KUEBLER, J., (2008). Improvement of safety barriers on German bridges - results of impact test with heavy Lorries. 10 th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 1-21. HV, May 19-22, 2008, Paris

LAUNAY, P., and H. GACHON, "*Strain and Ultimate Strength of Concrete Under Triaxial Stress*". Special Publication, SP-34, ACI 1, 1972, pp. 269–282.

L'ATTUALITÀ. *Acidente na BR 116, com ônibus que trazia trabalhadores do Piauí*. Disponível em: < http://www.lattualita.com.br/noticia.php?Id=1074>. Acesso em 24 de maio de 2016.

LECHTENBERG, K.A., FALLER, R. K., REID, J. D., and Sicking, D.L. *Dynamic Evaluation of a Pinned Anchoring System for New York State's Temporary Concrete Barriers – Phase II* – TRP-03-224-10. University of Nebraska-Lincoln, USA, 2010.

LIMA, H. M. P. *Comportamento funcional e estrutural das Barreiras de segurança*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2006.

LOURENÇO, P. B. *Avanços Recentes na Modeleção de Estruturas de Alvenaria*. Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2006.

LS-DYNA. LS-DYNA® *Theory Manual*. Livermore Software Technology Corporation, California, USA, 2006.

MALVERN, L., TANG, T., JENKINS, D. and GONG, J. C. *Dynamic Compressive Testing of Concrete*. 2'nd Symposium on the Interaction of Non Nuclear Munitions with Structures. Florida, US Department of Defence: 194-199, 1985.

MARZOUGUI, D.; BUYUK, M. & Kan, S. *Performance Evaluation of Portable Concrete Barriers*. NCAC Report 2007-R-004, The George Washington University, Washington DC, 2007.

MARZOUGUI, D.; BUYUK, M. CING-DAO & OPIELA K. K. S. *Safety Performance Evaluation for Combinations of Portable Concrete Barrier Elements*. Work paper NCAC 2007-W-004, The George Washington University, Washington DC, 2007.

MATOS, ÉRICA SANTOS. *Estudo da Influência do Posicionamento de Barreiras Rígidas Centrais na Visibilidade de Projeto em Rodovias de Pista Dupla*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

MCDEVITT, C.F., (2000). Basics of concrete barriers. Public Roads Journal 63(5): 10-4

MCGINNIS, R. "*Synthesis of Crash Tested Precast Concrete Median Barrier Designs and Anchoring Systems*." NCHRP Project 20-07/Task 257, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (2010) 96 pp.

MENGES, R., Bligh, P., Wanda, L., (2007). Initial assessment of compliance of Texas roadside safety hardware with proposed update to NCHRP Report 350. 1-136, Texas Department of Transportation Research and Technology Im-plementation, Austin.

MICHIE, J. D. (1971), NCHRP Report 115: Guardrail Performance and Design, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

MISSATO, MARCELO MONTEIRO. *Análise das Recomendações para uso de dispositivos de Proteção Lateral e a Segurança Viária em Rodovias*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

MIDWEST ROADSIDE SAFETY FACILITY (MRSF), (2006). Temporary Concrete Barrier System: 1-6, University of Nebraska-Lincoln.

MITCHELL, G. et. al. Design of Retrofit Vehicular Barriers Using Mechanical Anchors, Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin, USA, 2006.

MODERN. W-Beam Guard Rail. Disponível em <http://www.modern-infrastructure.com/highway-construction/products/w-beam-guard-rail/>. Acesso em 19 de março de 2014.

NATIONAL CRASH ANALYSIS CENTER – NCAC. Finite Element Model Archive. Disponível em <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>. Acesso em 13 de março de 2014.

NATIONAL TRANSPORTATION RESEARCH CENTER INC. (NTRCI). *Finite Element Analysis Crash Model of Tractor-Trailers*. Washington DC, 2009.

NATIONAL TRANSPORTATION RESEARCH CENTER INCORPORATED – NTRCI. Disponível em <http://thyme.ornl.gov> Acesso em 20 de maio de 2013.

NAUMAN, S., Bligh, R., MENGES, W., (2009). Development and testing of a concrete barrier design for use in front of slope or on MSE wall. Texas Transportation Institute Proving Ground.

NDOLINE. *Acidente na SC-401 mata duas mulheres e deixa dois feridos na manhã deste sábado em Florianópolis*. Disponível em: <http://ndonline.com.br/florianopolis/noticias/143601-acidente-na-sc-401-mata-duas-pessoas-e-deixa-dois-feridos-na-manha-deste-sabado-em-florianopolis.html>. Acesso em 30 de maio de 2016.

NEVES, RENATO RAMIREZ VIANA. *Desempenho de Defensas Rodoviárias Sujeitas ao Impacto de Automóveis*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

NCAP LATINA. Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e o Caribe. Disponível em < http://www.latinncap.com/> Acesso em 02 de fevereiro de 2016.

O DIÁRIO. Homem morre após caminhão colidir em mureta. Disponível em <http://www.diarionf.com/noticia-910/homem-morre-apos-caminhao-colidir-em-mureta#lightbox[materia]/0/> Acesso em 02 de fevereiro de 2016.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. Global Health Observatory (GHO): Road safety. Disponível em: <http://gamapserver.who.int/gho/interactive_charts/road_safety/road_traffic_deaths2/atlas.html> Acesso em 01 de novembro de 2013.

PHTLS. Atendimento Pré-Hospitalar ao Traumatizado. Elsevier, 2012.

POLIVKA, K.A., Faller, R., Sicking, D., Rohde, J., Bielenberg, R., Reid, J., Coon, B., (2006). Performance evaluation of the permanent New Jersey safety shape barrier-update to

NCHRP 350 Test No. 4-12 (2214NJ-2). MwRSF Research Report No. TRP-03-178-06 October 13.

PORTAL G1. Sem mureta, caminhão cai na Tamoios no dia de entrega da obra. Disponível em: <http://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2014/01/sem-mureta-caminhao-cai-na-tamoios-no-dia-de-entrega-da-obra.html>. Acesso em 10 de março de 2014.

RAY, M. H. and MCGINNIS, R. G. (1997), NCHRP Synthesis 244: Guardrail and Median Barrier Crashworthiness - A Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board / National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

REINHARDT, H. W. and CORNELISSEN, H.A.W.; "*Post-Peak Cyclic Behavior of Concrete in Uniaxial and Alternating Tensile and Compressive Loading*", Cement and Concrete Research, vol. 14, 1984, pp. 263-270.

REGIÃO EM DESTAQUE. *Tragédia: Motociclista morre em acidente na Washington Luís*. Disponível em: <http://www.regiaoemdestake.com.br/news/tragedia-motociclista-morre-em-acidente-na-washington-luis/>. Acesso em 30 de maio de 2016.

RICHARD, B.A., BULLARD, D., ABU-ODEH, A., MENGES, W., (2002). Washington State precast concrete barrier. 1-23, Washington State Department of Transportation. P.O. Box 47329, Olympia, Washington.

ROADS BRIDGES. High tension cable barrier. Disponível em <http://www.roadsbridges.com/safence-high-tension-cable-barrier>. Acesso em 19 de março de 2014.

ROGER, P.B., NAUMAN, S., MENGES, W., Rebecca, R.H., (2005a). Portable concrete traffic barrier for maintenance oper-ations. Technical Report No.FHWA/TX-05/0-4692-1.

ROSENBAUGH, S.K., SICKING, D., FALLER, R., (2007). Development of a TL-5 Vertical Faced Concrete Median Barrier Incorporating Head Ejection Criteria. Midwest Roadside Safety Facility (MwRSF), University of Nebraska-Lincoln.

ROSENBAUGH, S.K., SICKING, D., FALLER, R., (2007). Development of a TL-5 Vertical Faced Concrete Median Barrier Incorporating Head Ejection Criteria. Midwest Roadside Safety Facility (MwRSF), University of Nebraska-Lincoln.

SAFEROADS, "T-Lok Barrier." Saferoads. Disponível em: <http://www.saferoads.com.au/products-services/portable-safety-barriers/t-lok-barrier> Acesso em 09 de março de 2014.

SAFESITE FACILITIES. Temporary Vertical Concrete Barriers (TVCB). Disponível em: <http://www.safesitefacilities.co.uk/products/barriers-traffic-management/concrete-barriers/temporary-vertical-concrete-barriers-tvcb>. Acesso em 19 de março de 2014.

SCARLET. Guardrail design earns award. Disponível em: <http://scarlet.unl.edu/?p=5149>. Acesso em 19 de março de 2014

SE-JIN, J., MYOUNG-SUNG, C., YOUNG-JIN, K., (2008). Ultimate strength of concrete barrier by the yield line theory. International Journal of Concrete Structures and Materials 2(1): 57-62. DOI:http://www.ce-ric.net/wonmun2/kci/KCI_3_2008_2_1_57(C).pdf.

SERGUVIA. Barreiras de Segurança Pré-Moldadas. 15º Encontro Técnico DER/PR. Disponível em: <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/15encontro_tecnico/BARREIRASDESEGURANCAPREMOLDADAS.pdf>. Acesso em 05 de abril de 2012.

SHKLYAN; R. Enhancing concrete barrier reflectivity with a focus on recycled glass aggregate replacement, Dissertação de Mestrado. University of Massachusetts, USA, 2009.

SIC/DNIT. Sistema de Acesso à Informação, pedido n.º 50650.002348/2013-88 [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por pc.ufpb@gmail.com em 18 de set. 2013.

SIMO, J.C., J.G. KENNEDY, and S. GOVINDJEE, "*Non-Smooth Multisurface Plasticity and Viscoplasticity. Loading/Unloading Conditions and Numerical Algorithms*," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 26, 1988, pp. 2161–2185.

SIMO, J.C., JU, J.W., "*Strain and Stress Based Continuum Damage Model*", Int. J. of Solids and Structures, Vol. 23, nº 7, 1987

SNIDER, H. P. Vehicle Instrumentation for Crash Testing, IEEE Transactions on IECI, Dearborn, Michigan, USA, 1964.

SUJUAN, W., ZHENGBAO, L., JIAN, Z., YONGHAN, L., MUXI, L., YIHENG, L., (2011). A research of similarity design of collision guardrails under the overpass. IEEE Computer Society: 1903-6.

TABIEI, (AL) ALA. Contact in LS-DYNA, short course. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA, USA, 2013

TEXAS A&M TRANSPORTATION INSTITUTE. *Single Slope Barrier Study*. Disponível em: <http://tti.tamu.edu/enhanced-project/single-slope-barrier-study/>. Acesso em 19 de março de 2014.

THE FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Good Practices: Incorporating Safety into Resurfacing and Restoration Projects. Washington – DC. 2006.

UTTIPEC, (2010). Guidelines and design specifications for crash barriers, pedestrian railings and dividers. 20th UTTIPEC Governing Body meeting held on 15.01.2010 under the chairmanship of Hon'ble Lt, Governor, Delhi.

VIACERTANATAL. *Acidentes na BR-101*. Disponível em <http://www.viacertanatal.com/2012/09/br-101-quatro-acidentes-entre-noite-de.html> Acesso em 25 de setembro de 2012.

VIAS SEGURAS. *Barreiras como funcionam*. Disponível em <http://www.vias-seguras.com/infra_estrutura/engenharia_rodoviaria/manual_de_seguranca_rodoviaria/barreiras_como_funcionam>. Acesso em 25 de abril de 2013.

VRUM. *BR-040 apresenta aberrações de segurança que provocam acidentes graves*. Disponível em: <http://es.vrum.com.br/app/301,19/2011/12/08/interna_noticias,44956/br-040-apresenta-aberracoes-de-seguranca-que-provocam-acidentes-graves.shtml>. Acesso em 20 de fevereiro de 2014.

WIKIPEDIA. Cable Barrier. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Cable_barrier>. Acesso em 19 de março de 2014.

WSDOT – Washington State Department of Transportation. High Performance Concrete Barrier (F-Shape) (TB-11, TB-12 & TB-13). Disponível em: <http://www.wsdot.wa.gov/Design/Standards/PlanSheet/TB-11.htm>. Acesso em 19 de março de 2014.

YONEDA, A. Y. *Avaliação do desempenho da defensa metálica maleável simples utilizada nas vias brasileiras, em diversas condições de instalações*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013

YOSHITO ITOH, M.; CHUNLU LIU, M; RYUICHI KUSAMA. *Modeling and Simulation of Collisions of Heavy Trucks with Concrete Barriers*. Journal of Transportation Engineering, ASCE, v. 133, n. 8, p.462-468, ago. 2007.

ZADEH, R.R. *Pressure-impulse Diagrams Using Finite Element Analysis for Reinforced Concrete Columns Subjected to Blast Loading*. Thesis in Civil Engineering: Master of Science. University of Missouri-Kansas City, 2011.

ZAINA. M. F. B. M. MOHAMMED, H. J. Concrete road barriers subjected to impact loads: An overview. Latin American Journal of Solids and Structures. Vol. 12. nº 10. Rio de Janeiro, 2015.

ZHAO, L., KARBHARI, V.M., HEGEMIER, G.A., SEIBLE, F., (2004). Connection of concrete barrier rails to FRP bridge decks. Composites Part B: Engineering 35(4): 269-78. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.02.006.

ZHONG, W., FENGRU, Y., Li, Y., (2009). Safety design of median barriers impacted on elevated road. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 586-9. Zhangjiajie, Hunan IEEE Computer Society.

APÊNDICE A

O MODELO MAT_CSCM (*MAT_159)

O LS-DYNA tem implementados, até o momento, 15 modelos constitutivos de materiais capazes de representar o comportamento do concreto. Alguns mais apropriados para análises de pequena escala e outros para análises de grande escala. Portanto, a escolha de um em detrimento do outro dependerá do tipo de aplicação a que será submetido.

O comportamento do concreto tem características particulares, tanto para baixas velocidades e/ou comportamento estático, quanto para aplicações dinâmicas e de altas velocidades. Em virtude disso a escolha adequada do material vai depender do tipo de análise que se queira fazer.

Nesse Trabalho, foi utilizado apenas o modelo CSCM_Concrete (*MAT_159), por ter uma boa representatividade do comportamento do concreto para situações dinâmicas, caracterizar o efeito de dano e possuir um número reduzidos de parâmetros de entrada.

O modelo MAT_CSCM (*Continuous Surface Cap Model*) foi desenvolvido para simular o comportamento dinâmico do concreto, tanto para deformações elásticas quanto para o dano proveniente de impacto de veículos em estruturas de concreto, utilizadas como componentes de segurança rodoviários.

Segundo Lourenço (2006) o nome "*cap model*" é originário da mecânica dos solos. O "*cap*" esférico para o critério de Drucker-Prager foi inicialmente proposto por Drucker *et al*. (1957) para descrever a compactação plástica e melhorar o comportamento sob compressão hidrostática. Desde então, o termo "*cap model*" foi adotado para uma grande quantidade de modelos que incluem um limitador no eixo de compressão hidrostática. Estes modelos geralmente se limitam a considerar uma lei de escoamento associada ao endurecimento do "*cap*" enquanto que as outras superfícies se mantêm em regime ideal plástico.

1.1. Generalidades do Concreto

O concreto é um material heterogêneo que é composto basicamente de agregados e argamassa. Segundo Mehta e Monteiro (1994), apesar da aparente simplicidade do concreto, ele tem uma estrutura muito heterogênea e complexa, consequentemente, é muito difícil estabelecer modelos exatos. Métodos analíticos da ciência dos materiais e da mecânica dos

sólidos que funcionam bem com materiais manufaturados relativamente homogêneos e muito menos complexos, tais como o aço e os plásticos, não se mostram muito efetivos com o concreto.

Segundo Crespo (2011), o comportamento do concreto armado tem características particulares, tanto para cargas estáticas, como para cargas dinâmicas, o que deve ser levado em consideração na modelagem numérica.

Murray (2007) elenca algumas propriedades do concreto de interesse para a análise de segurança rodoviária, apresentadas a seguir.

1.1.1. Rigidez

O comportamento do concreto é isotrópico antes de ocorrer a fissuração, desde que o concreto tenha sido bem misturado, vibrado e não segregado.

1.1.2. Tensão Uniaxial

O concreto convencional possui baixa resistência à tração. A resistência à tração é tipicamente em torno de 8 a 15% da resistência à compressão simples.

1.1.3. Tensão Multiaxial

A tensão última do concreto depende tanto das tensões hidrostáticas quanto das tensões de cisalhamento, Murray (2007). Os ensaios utilizados para a esse tipo caracterização do concreto são a compressão triaxial (CTX) e a tração triaxial (TTX), que são realizados utilizando corpos de prova cilíndricos submetidos a uma pressão hidrostática e constante, com incremento da tensão no eixo vertical para o primeiro caso e diminuição para o segundo. A resistência do concreto é tipicamente representada como a diferença entre a pressão principal *versus* pressão.

A Figura A.1(a) representa alguns resultados experimentais (Mills & Zimmerman, 1970, apud Murray, 2007). Representados no plano meridiano, indica que o concreto falha a valores inferiores do segundo invariante do tensor desviador de tensão de tração em relação à compressão. A Figura A.1(b) é uma ajuste dos dados experimentais no plano desviador de Launay & Ganchon (1972, apud Murray, 2007).

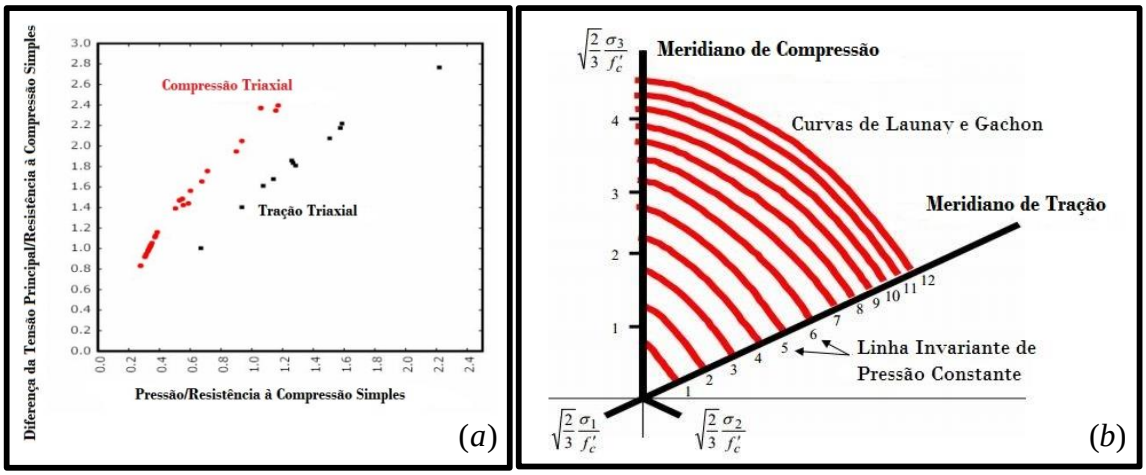


Figura A.1 – (a) (Mills & Zimmerman, 1970, apud Murray, 2007), (b) Exemplo de concreto plotado em um plano desviador (Launay & Ganchon, 1972, apud Murray, 2007)

As curvas completas do plano desviador de tensões são mostradas na Figura A.2, onde se observa que as linhas de compressão formam um triângulo para baixas pressões de confinamento e círculos para pressão de confinamento mais elevadas. O que significa que a resistência do concreto depende do terceiro invariante do tensor desviador de tensão.

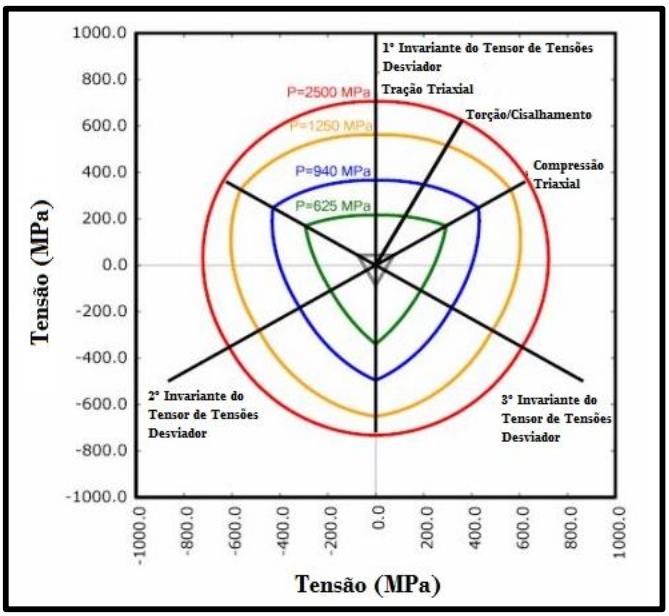


Figura A.2 – Representação gráfica das superfícies de falhas do plano desviador para o modelo *MAT_159 do LS-DYNA (Murray, 2007)

1.1.4. Perda de Resistência

Após passar a tensão de pico, o concreto perde resistência rapidamente, tendendo a zero, conforme mostrado no gráfico da Figura A.3(a). Também há um amolecimento sob tensões

moderadas, porém, o concreto irá exibir uma resistência residual, este comportamento é mostrado no gráfico da Figura A.3(b).

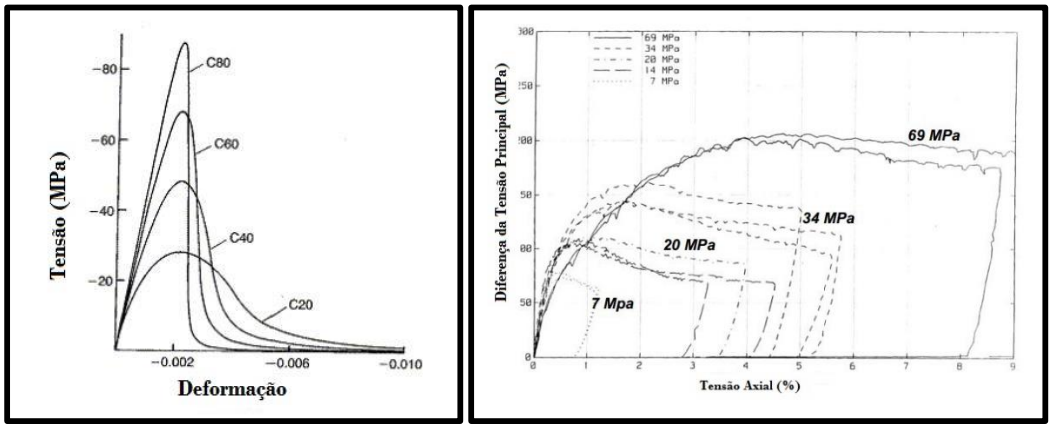


Figura A.3 – (a)Resposta do Amolecimento do Concreto em Compressão Uniaxial (CEB-FIP, 1993); (b)Resposta da Variação do Amolecimento do Concreto com Confinamento (Joy & Moxley, 1993 , apud Murray, 2007).

1.1.5. Perda de Rigidez

O amolecimento do concreto é também acompanho pela perda de rigidez, fenômeno que pode ser observado nos ensaios cíclicos de carga e descarga, conforme se observa no gráfico da Figura A.4.

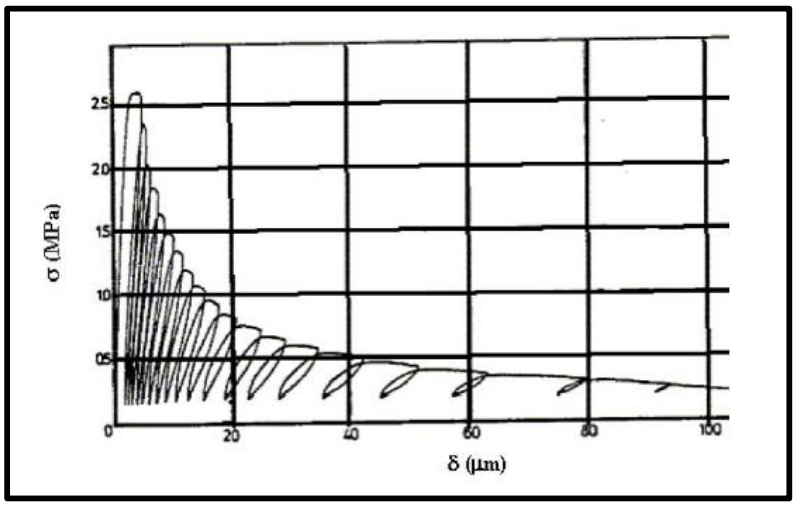


Figura A.4 – Perda de rigidez do concreto através de ciclos de carga e descarga (Reinhardt, 1984).

1.1.6. O Efeito Visco-Plástico do Concreto

As propriedades do concreto, quando estes são considerados os efeitos visco-plásticos têm sido abordadas por vários trabalhos experimentais, tais como Bischoff (1991), Gopalaratnam (1996), Cotsovos (2005) e outros. Em alguns desses trabalhos foram realizados

ensaios de compressão e de tração simples, com a utilização de equipamentos apropriados para a velocidade de carregamento, como por exemplo, uso de máquinas hidráulicas para ensaios para carga quase estática até a ordem de 10^{-1} s^{-1} (Bischoff, 1991). Para valores maiores que 1 s^{-1}, o uso do ensaio Charpy (Gopalaratnam, 1996); para valores de até 10^{1} s^{-1} o uso de pêndulos de impacto (Bentur, 1986), para valores de até 10^{2} s^{-1} o ensaio tipo "*Split Hopkinson Pressure Bar*" (Hopkinson, 1914), acima desses valores o uso de explosivos. Bischoff (1991) apresenta uma relação de vários eventos com a efeito viscoplásticidade, conforme mostrado na Figura A.5.

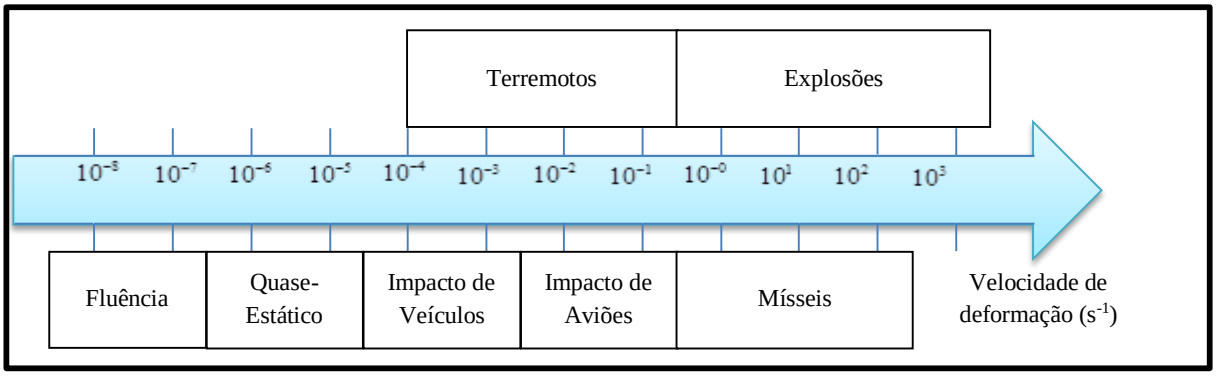


Figura A.5 – Velocidade de deformação para diferentes casos de carregamentos, adaptado de Bischoff (1991) e Crespo (2011).

Segundo Bischoff (1995), o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a capacidade de absorção de energia e a deformação uniaxial são influenciados pelos efeitos visco-plástico. Na Figura A.6(a) Bischoff (1991) compilou em um único gráfico, vários resultados de diversos autores da relação ao efeito visco-plástico e a resistência à compressão É facilmente perceptível que o comportamento, para uma dada tensão, é influenciado pelo efeito visco-plástico, onde uma carga de impacto (com valor de 10 s^{-1}) pode chegar de 85% a 100% da resistência estática.

Parece ocorrer um aumento acentuado na resistência à compressão, além de um determinado nível de taxa de carregamento, indicando uma possível mudança no comportamento físico (Bischoff, 1991). A localização desse forte aumento, que também tem sido observado para as rochas (Green e Perkins, 1972, p. 35-45, apud Bischoff, 1991), não possui valores definidos. Recomendações provisórias do CEB são vistas na Figura A.6(b), sugerindo um valor de 30 s^{-1} para a mudança no comportamento.

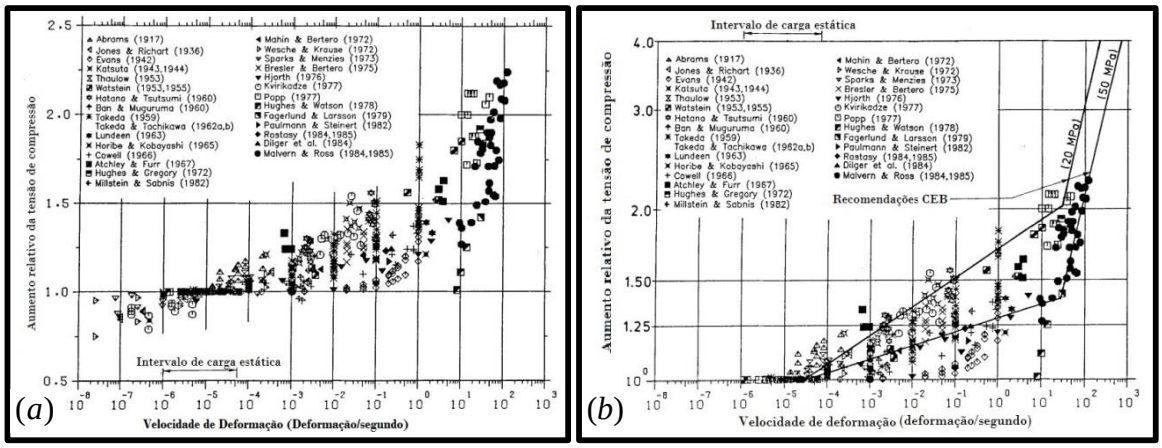


Figura A.6 – (a)Relação entre a velocidade de deformação e a resistência à compressão, (b) o mesmo gráfico com as recomendações da CEB, adaptado de Bischoff(1991).

A inercia do confinamento lateral é uma função tanto do efeito viscoplástico quanto do tamanho da estrutura. O limite a partir do qual o efeito da inércia de confinamento lateral afeta significativamente a resposta do material são cargas com velocidades de 100 s^{-1} (Malvern et. al. 1985, apud Zadeh, 2011).

1.1.7. Superfície de Escoamento:

A teoria de superfície de escoamento é utilizada no modelo constitutivo do CSCM_CONCRETE, que segundo Murray (2007). Trata-se de uma superfície fechada com interseção suave entre a superfície de falha ao cortante e a superfície de endurecimento, conforme mostrado na Figura A.7.

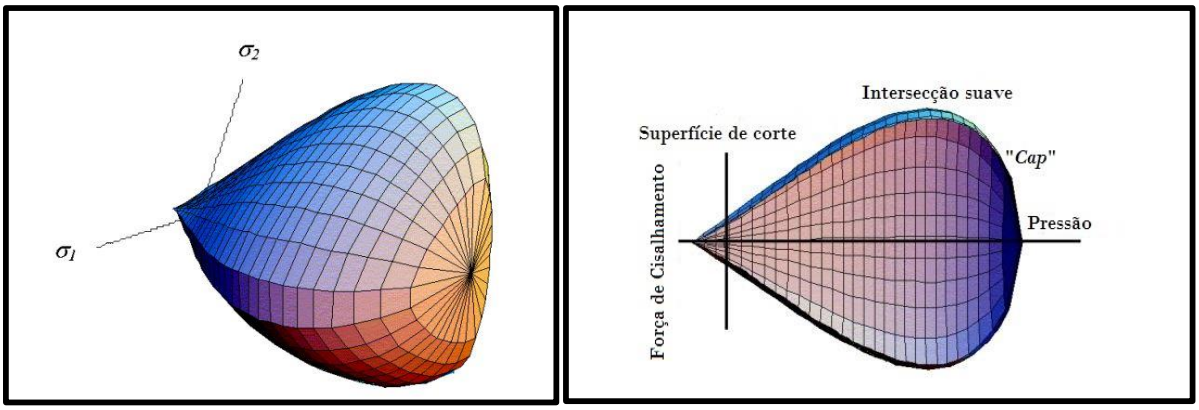


Figura A.7 – Superfície de Escoamento adaptado de Murray(2007): (a) Vista tridimensional da superfície de plastificação no eixo das tensões principais, (b) Forma geral da superfície de escoamento do concreto em duas dimensões no plano meridional.

Pelo fato de ser um material isotrópico, a superfície de escoamento é formulada em termos de três invariantes de tensão independentes. O modelo usa J_1, J_2 e J_3 como o primeiro, segundo e terceiro invariante do tensor de tensões desviador, respectivamente. As invariantes são

definidas em termos do tensor de tensões desviador, S_{ij} e a pressão, P, como mostrado nas Eqs. (A-1) a (A-3).

$$J_1 = 3P \tag{A-1}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \tag{A-2}$$

$$J_3 = \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{ki} \tag{A-3}$$

As três funções invariantes se relaciona através de um parâmetro de endurecimento da superfície (κ), formando a equação descrita na Eq. (A-4).

$$f\left(J_1, J_2^{'}, J_3^{'}, \kappa\right) = J_2^{'} - \Re^2 F_f^2 F_c \tag{A-4}$$

Onde,

F_f - função de falha ao cortante;

F_c - função de endurecimento "*cap*";

$\Re$ - função de escala Rubin.

Na Figura A.8 é mostrado um fluxograma de cálculo do tensor de tensões, nota-se que para $f(J_1^T, J_2^{'T}, J_3^{'T}, k^T) > 0$, tem-se um estado elastoplástico e se inicia o algoritmo de plasticidade, que leva ao novo estado tensional da superfície de escoamento.

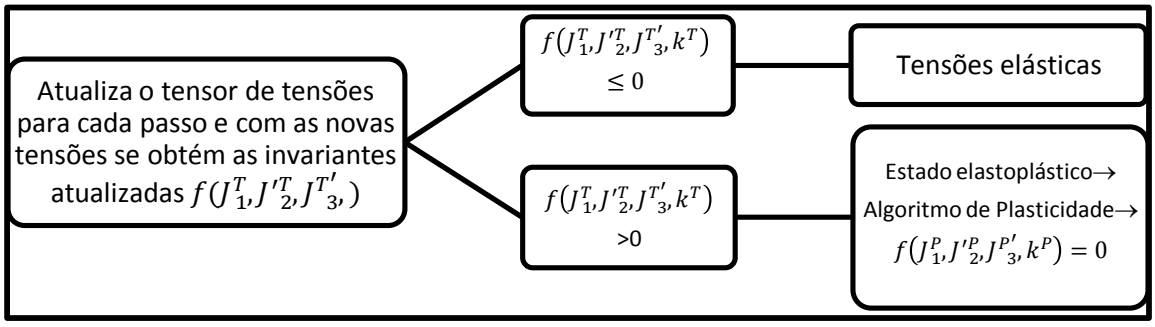


Figura A.8 – Fluxograma de cálculo do tensor de tensões.

1.1.8. Superfície de Ruptura ao Cisalhamento

A resistência do concreto é modelada pela superfície de corte nos regimes de tração e compressão. A superfície de corte F_f é definida ao longo do eixo de compressão como mostrado na Eq. (5-1).

$$F_f\left(J_1\right) = \alpha - \lambda \exp^{-\beta J_1^{'}} + \theta J_1 \tag{A-5}$$

Onde,

α e λ são parâmetros de entrada para o usuário e são invariáveis, já β e θ são obtidos a partir da tensão uniaxial de compressão através da função de interpolação com os coeficientes dados na Eq. (A-6) e interpolados a partir dos dados da

Tabela A-1.

$$P = A_p\left(f_c^{'}\right)^2 + B_p\left(f_c^{'}\right) + C_p \tag{A-6}$$

Tabela A-1 – Coeficientes para o ajuste da superfície de ruptura ao cisalhamento em função da resistência à compressão simples, Crespo (2011).

P	***A_p***	***B_p***	***C_p***
$\beta\left(MPa^{-1}\right)$	$0\left(MPa^{-3}\right)$	$0\left(MPa^{-2}\right)$	$1{,}929E-02\left(MPa^{-1}\right)$
$\theta\left(MPa^{-1}\right)$	$1{,}3216E-02\left(MPa^{-2}\right)$	$2{,}3548E-02\left(MPa^{-1}\right)$	$0{,}2140058\left(MPa^{-1}\right)$

1.1.9. Superfície de Endurecimento do "Cap"

Esta superfície define a compactação e endurecimento do concreto devido ao colapso dos poros. Para estados de tensões situados na zona de tração ou para baixas pressões de confinamento, a função que define a superfície de fechamento é unitária e por tanto a superfície completa de escoamento resulta em:

$$f\left(J_1, J_2^{'}, J_3^{'}, k\right) = J_2^{'} - \Re^2 F_f^2 F_c = J_2^{'} - \Re^2 F_f^2 \tag{A-7}$$

Quando o estado de tensão se situa entre as zonas de baixa pressão e as de alta, a função de fechamento é uma elipse, definida pela Eq.

$$f_c\left(J_1, k\right) = 1 - \frac{\left[J_1 - L(k)\right]\left[\left|J_1 - L(k)\right| + J_1 - L(k)\right]}{2\left[X(k) - L(k)\right]^2} \tag{A-8}$$

Onde L(k) é definido como:

$$L(k) = \begin{cases} k \ se \ k > k_0 \\ k_0 \ \ para \ demais \ casos \end{cases} \tag{A-9}$$

A interseção da superfície de fechamento com o eixo J_1 se situa em $J_1 = X(k)$. Essa interseção depende da relação entre os eixos maior e menor da elipse (R), de forma que:

$$X(k) = L(k) + RF_f(L(k)) \tag{A-10}$$

Onde o parâmetro R que relaciona os eixos da elipse, é um dos parâmetros definidos pelo usuário.

Por outro lado, o movimento da superfície de fechamento está baseado na regra do endurecimento, dado por:

$$\varepsilon_v^p = W\left(1 - \exp^{-D_1(X-X_0)-D_2(X-X_0)^2}\right) \tag{A-11}$$

Onde,

ε_v^p – É a deformação volumétrica plástica

W – É a máxima deformação volumétrica plástica

X_0 – É a posição inicial da superfície quando $k = k_0$

D_1 – Parâmetro de endurecimento linear

D_2 – Parâmetro de endurecimento quadrático

Os parâmetros que definem a superfície de fechamento (R, W, D_1, X_0 e D_2) são obtidos por meio do ajuste das curvas de pressão-deformação volumétrica para compressão isótropa uniaxial e deformação uniaxial. O parâmetro X_0 pode ser obtido a partir da resistência a compressão simples do concreto, utilizando a equação de interpolação da Eq. (A-12).

$$X_0 = 8{,}769178e-3\left(f_c^{'}\right)^2 - 7{,}3302306e-2\left(f_c^{'}\right) + 84{,}85\,(MPa) \tag{A-12}$$

A Figura A.9 mostra um exemplo de uma curva deformação volumétrica-pressão para uma compressão isótropa, em que é possível observar como se afeta cada parâmetro na curva.

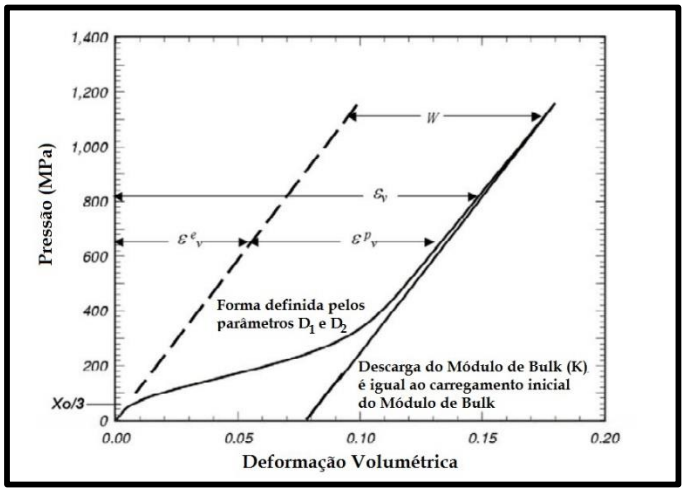


Figura A.9 – Curva da pressão-deformação volumétrica para uma compressão isótropa para os parâmetros W, D_1, e D_2 (adaptado de Murray, 2007).

1.1.10. Função de Escala Rubin ($\Re$)

Segundo Crespo (2011), a interseção de uma superfície de escoamento, que depende apenas dos invariantes, com o plano desviador é um círculo. Não obstante, os dados experimentais indicam que a superfície de escoamento depende de três invariantes e que essas curvas não são círculos para baixas tensões de confinamento. A função de escala Rubin modifica os círculos que definem uma superfície de escoamento dos invariantes para convertê-los em hexágonos irregulares, em função de um ângulo β no plano desviador, conforme é mostrado na Figura A.10. As formulações da Escala Rubin não serão discutidas aqui. Maiores detalhes poderão ser consultadas em Murray (2007).

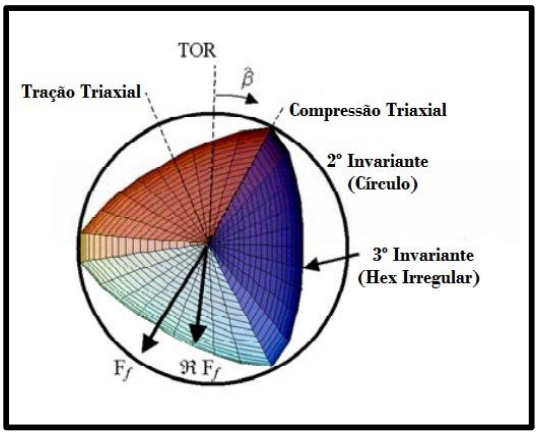


Figura A.10 – Vista de uma superfície de escoamento no plano desviador e comparado com o círculo obtido em um modelo baseado em duas invariantes (Murray, 2007).

1.1.11. Formulação do Dano:

O amolecimento do concreto é modelado por meio de uma formulação de dano. Sem a formulação de dano, o modelo "cap" prediz o comportamento perfeitamente plástico para simulações de teste de laboratório, tais como: tração direta, compressão simples, compressão triaxial e tração triaxial. Este comportamento não é realístico, embora o comportamento plástico seja típico do concreto em altas tensões de confinamento, não o representa bem sob baixas tensões.

A formulação do dano é baseada no trabalho de Simo e Ju (1987), apresentada na Eq. (A-13)

$$\sigma_{ij}^{d} = (1-d)\sigma_{ij}^{vp} \qquad \text{(A-13)}$$

Onde,

σ_{ij}^{d} – Tensão com o componente de dano;

d – Fator de dano (varia de 0 a 1, quando 1 corresponde ao material completamente danificado e 0 ao material íntegro);

σ_{ij}^{vp} – Tensão sem dano;

A função do fator de dano é reduzir os módulos de rigidez e compressibilidade de forma simultânea e proporcional (isótropa). A acumulação do dano é através do parâmetro d e se baseia em formulações distintas, chamadas de dano frágil e dano dúctil, que serão discutidas nas próximas subseções. Na Figura A.11 pode se verificar a perda de resistência do material e o módulo de elasticidade com o fator de dano e o comportamento sem o fator de dano.

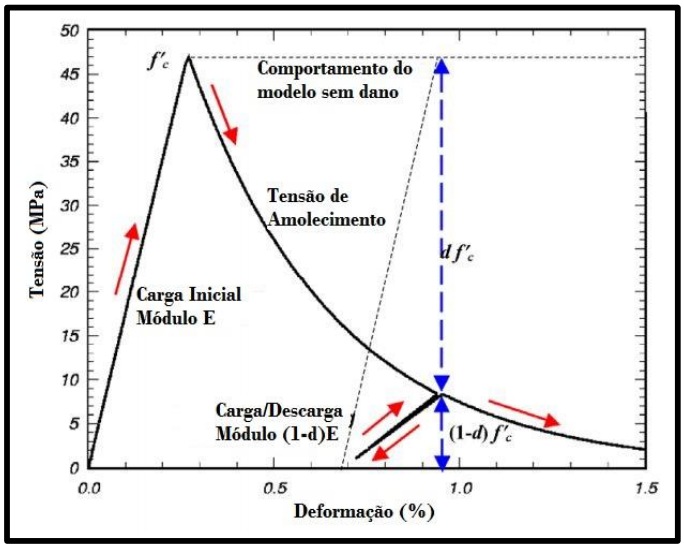


Figura A.11 – Gráfico da Perda de resistência e o módulo de elasticidade com o fator de dano (Murray, 2007).

1.1.12. Dano Frágil

O acúmulo do dano frágil depende da máxima deformação principal, como mostrado na Eq. (A-14).

$$\tau_b = \sqrt{E\varepsilon_{\max}^2} \tag{A-14}$$

Onde,

τ_b – É um termo de energia que depende da acumulação da deformação total através de $\varepsilon_{\max}$. O dano frágil se inicia quando τ_b supera um limite inicial r_{0b}.

1.1.13. Dano Dúctil

A acumulação do dano dúctil depende das componentes da deformação total, como mostrado na Eq. (A-15).

$$\tau_d = \sqrt{\frac{1}{2}\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}} \tag{A-15}$$

Onde,

τ_d – É um termo de energia;

σ_{ij} – São as tensões elasto-plásticas (com endurecimento cinemático) calculadas antes da aplicação do dano e dos efeitos da velocidade de carga. O dano dúctil se inicia quando τ_d supera um limite inicial r_{0b}.

1.1.14. Limites do Dano

O limite do dano inicial se encontra sobre a superfície de escoamento. Isso significa que a superfície inicial de danos é coincidente com a superfície de corte plástico. Portanto, uma superfície de danos distinta não é definida pelo usuário.

Uma exceção do início do dano com o início da plasticidade se dá quando os efeitos devidos à velocidade de carga são modelados através da visco-plasticidade. Com a visco-plasticidade, o limite do dano inicial é deslocado, conforme mostra a Eq. (A-16).

$$r_0 = \left(1 + \frac{E\dot{\varepsilon}\eta}{r^5\sqrt{E}}\right)r^5 \tag{A-16}$$

Onde,

r^s – É o dano limite antes da aplicação da visco-plasticidade;

r_0 – É o limite deslocado pela visco-plasticidade.

Quando os efeitos da velocidade de carga são considerados, η é maior que zero e o limite do dano resultante é maior que o inicial. Devido a isso há o atraso no aparecimento de danos durante o acumulo de plasticidade. Essas características não requerem parâmetros de entrada e é configurado para o modelo visco-plástico baseado na teoria da visco-plasticidade.

1.1.15. Função de Amolecimento

A função do amolecimento define a forma em que o dano se acumula. O parâmetro de dano *d* aumenta de um valor inicial zero a um valor máximo igual a 1, de acordo com a Eq. (A-17) para dano frágil e (A-18) para dano dúctil.

$$d(\tau_b) = \frac{0{,}999}{D}\left[\frac{1+D}{1+D\exp^{-C(\tau_b - r_{0b})}} - 1\right] \tag{A-17}$$

$$d(\tau_b) = \frac{d_{\max}}{B}\left[\frac{1+B}{1+B\exp^{-A(\tau_d - r_{0d})}} - 1\right] \tag{A-18}$$

Onde,

$d_{\max}$ – É o máximo nível de dano que pode ser obtido.

A, B, C e *D* – Definem a forma da curva de amolecimento representada como tensão de deslocamento ou de tensão de deformação. Uma função de suavização alternativa é sugerida em Murray (2007).

Para tensões de tração e regimes de baixa pressão de confinamento, o dano frágil é definido como 0,999 com o intuito de evitar as dificuldades computacionais associadas ao valor da rigidez nula, correspondendo ao valor de 1. Com pressões de confinamento moderadas, o valor é menor que 0,999, de acordo com os resultados obtidos das tensões de compressão triaxiais, para que o valor seja menor que 0,999 é utilizada a expressão da Eq. (A-19).

$$Se\ \frac{\sqrt{3J_2^{'}}}{J_1} < 1,\ então\ d_{\max} = \left(\frac{\sqrt{3J_2^{'}}}{J_1}\right)^{1,5} \tag{A-19}$$

Por outro lado, o valor máximo do ano também varia com os efeitos da velocidade de carga, de acordo com a Eq. (A-20).

$$d_{\max} = d_{\max} * \max\left[1{,}0; \left(1 + \frac{E\dot{\varepsilon}\eta}{r^5\sqrt{E}}\right)^{1,5}\right] \tag{A-20}$$

Para pressões de confinamento moderadas é conveniente reduzir o parâmetro de A, de acordo com a Eq. (A-21).

$$A = A\left(d_{\max} + 0{,}001\right)^{p\,\mathrm{mod}} \tag{A-21}$$

Onde,

pmod – parâmetro de entrada especificado pelo usuário, cujo valor padrão é 0,0.

O valor positivo de *pmod* reduz o parâmetro "A" apenas quando o dano máximo é menor que 0,999. Assim, ele só estará ativo em níveis de confinamentos moderados.

1.1.16. Sensibilidade do tamanho da malha

Para regular a sensibilidade do tamanho da malha, o modelo de energia de fratura do concreto se mantem constante, independentemente do tamanho do elemento. Isso é feito através da inclusão do comprimento do elemento, L (raiz cubica do volume do elemento) e a energia de fratura G_f no parâmetro de amolecimento A da Eq. (A-18) ou C da Eq. (A-17). A forma mais geral, para manter a energia de fratura constante é derivar uma expressão para a energia de fratura através da integração da curva analítica tensão *versus* deslocamento, como mostrada na Eq.(A-22).

$$G_f = \int_{x_0}^{\infty} (1-d)\, f'\, dx \qquad \text{(A-22)}$$

Onde,

x – é o deslocamento; x_0 – é o deslocamento da tensão de pico f' e a energia da fratura é definida em termos do parâmetro de amolecimento, com $d_{max} = 1$.

A energia de fratura é a área abaixo da zona de amolecimento em uma curva tensão x deformação, desde o pico até o amolecimento completo, é intrínseca ao material e cuidados especiais dever ser tomados. Várias abordagens possíveis estão disponíveis para regular a dependência do tamanho da malha. Outra opção é ajustar manualmente os parâmetros de dano como uma função do tamanho do elemento para que se mantenha constante a energia de fratura, contudo essa abordagem não é prática.

O CEB relaciona a energia de fratura de tração com a resistência à compressão simples e o tamanho máximo do agregado através da Eq. (A-23).

$$G_{F_T} = G_{F0}\left(\frac{f_c'}{10}\right)^{0,7} \qquad \text{(A-23)}$$

Onde,

G_{F0} – É a energia de fratura de um concreto massa de resistência de 10 MPa em função do tamanho máximo do agregado (*As*), correlacionado de acordo com a Eq. (A-24).

$$G_{F0} = 0{,}000520833xAs^2 + 0{,}75xAs + 1{,}9334 \quad \text{(A-24)}$$

O modelo necessita dos valores da energia de fratura para a tração simples - G_{F_T}, para compressão simples - G_{F_C} e cortante - G_{F_S}.

Os valores padrões para a energia de fratura à tração simples são dados pela Eq. (A-23) e para a energia de fratura à compressão simples, se estabelece um valor de 100 vezes ao da tração simples e para a energia de fratura a cortante o mesmo valor da tração simples, conforme é indicado nas Eqs. (A-25) e (A-26).

$$G_{F_C} = 100xG_{F_T} \quad \text{(A-25)}$$

$$G_{F_S} = G_{F_T} \quad \text{(A-26)}$$

1.1.17. Energia de Fratura com Efeitos da Velocidade de Carga

Quando os efeitos da velocidade de carga são modelados com visco-plasticidade, o usuário tem a opção de incrementar a energia de fratura em função dos efeitos dinâmicos da velocidade de carga, realizada através da função apresenta na Eq. (A-27).

$$G_f^{vp} = G_f\left(1 + \frac{E\dot{\varepsilon}\eta}{r^5}\right)^{repow} \quad \text{(A-27)}$$

Onde,

G_f – É a energia de fratura (à tração ou à compressão);

G_f^{vp} – É o valor ampliado com o efeito viscoplástico.

Quando *repow* é igual a 1 a energia de fratura com os efeitos dinâmicos fica aproximadamente proporcional ao incremento na resistência devida aos efeitos dinâmicos. Caso contrário, com *repow* igual a zero, a energia de fratura se mantem constante independentemente dos efeitos dinâmicos, tendendo a dar uma reposta mais frágil do que os medidos em ensaios de impacto. O intervalo recomendado é entre 0,5 e 1.

1.1.18. Formulação dos Efeitos da Velocidade de Carregamento:

Como discutido na seção 1.1.6 os dados experimentais mostram que a tensão máxima é sensível à velocidade do carregamento. As formulações do efeito da velocidade do carregamento são aplicadas à superfície de plasticidade, a superfície de danos e a energia de fratura. Nos itens seguintes serão discutidos como esses efeitos se aplicam à superfície de plasticidade.

1.1.19. Formulação Viscoplástica

Este modelo utiliza um algoritmo baseado na formulação viscoplástica. A implementação é baseada em Simo *et al*. (1988). Essa formulação requer um parâmetro de velocidade de carregamento denotado por η, conhecido como coeficiente de fluidez e é um parâmetro de entrada especificada pelo usuário.

O algoritmo básico de atualização da viscoplasticidade é fácil de implementar, uma vez que a cada passo de tempo o algoritmo interpola entre tensão elástica inicial (σ_{ij}^{T}) e a tensão viscosa (σ_{ij}^{P} - sem efeito da velocidade de carregamento) para estabelecer a tensão viscoplástica (σ_{ij}^{vp} - com efeito da velocidade de carregamento) seja estabelecida, de acordo com a Eqs. (A-28) e (A-29).

$$\sigma_{ij}^{vp} = (1-\gamma)\sigma_{ij}^{T} + \gamma\sigma_{ij}^{P} \qquad \text{(A-28)}$$

Sendo,

$$\gamma = \frac{\Delta t / \eta}{1 + \Delta t / \eta} \qquad \text{(A-29)}$$

Esta interpolação depende do coeficiente de fluidez e do passo de tempo. Quando o coeficiente de fluidez é igual a 0, a tensão final alcançada é a tensão viscosa e, portanto, a solução é independente da velocidade do carregamento. Em caso contrário, se o valor tende ao infinito, a tensão final alcançada será elástica para todos os passos de tempo, obtendo-se, em contrapartida, um modelo sem fluxo plástico. Logo, o fluxo plástico diminui à medida que aumenta o efeito da velocidade de carga.

No caso de grandes deformações é utilizando um algoritmo baseado em dois parâmetros, η_0 e η, segundo a Eq. (A-30).

$$\eta = \frac{\eta_0}{\dot{\varepsilon}^N} \tag{A-30}$$

O comportamento modelado pela visco-plasticidade para tração direta e compressão simples é atualizado pelas Eqs. (A-31) e (A-32).

$$f_T^{'dynamic} = f_T^{'} + E\dot{\varepsilon}\eta \tag{A-31}$$

$$f_C^{'dynamic} = f_C^{'} + E\dot{\varepsilon}\eta \tag{A-32}$$

A força dinâmica (visco-plástica) é igual a força estática (não viscosa) mais uma sobre tensão dinâmica igual a $E\dot{\varepsilon}\eta$, onde E é o módulo de elasticidade e $\dot{\varepsilon}$ é a velocidade de carregamento efetiva. A velocidade de carregamento efetiva depende de todos os seis componentes de tensão, conforme mostrado na Eq. (A-33).

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}\left\{\left(\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_v\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}_v\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_y\right)^2 + \dot{\varepsilon}_{xy}^2 + \dot{\varepsilon}_{xz}^2 + \dot{\varepsilon}_{yz}^2\right\}} \tag{A-33}$$

1.1.20. Dados de Entrada da Formulação Visco-plástica

A velocidade de deformação é modelada de forma diferente para tração e compressão. São utilizados quatro parâmetros de entrada: η_{0t} e η_t para ajustar os dados de tração simples e η_{0c} e η_c para ajustar os dados da compressão simples.

Para os dados de tensão situados entre tração e compressão simples, o parâmetro de fluidez é interpolado como função da reação entre os invariantes de tensão. Para trações ($J_1 < 0$), tem-se que:

$$\eta = \eta_s + trans\left(\eta_t - \eta_s\right) \tag{A-34}$$

Onde,

$$trans = \left(\frac{-J_1}{\sqrt{3J_2^{'}}}\right)^{pwrt};\ trans = \min\left(1, trans\right);\ trans = \max\left(1, trans\right) \tag{A-35}$$

Para compressões ($J_1 \geq 0$), tem-se:

$$\eta = \eta_s + trans\left(\eta_c - \eta_s\right) \tag{A-36}$$

Onde,

$$trans = \left(\frac{J_1}{\sqrt{3J_2^{'}}}\right)^{pwrt};\ trans = \min\left(1, trans\right);\ trans = \max\left(1, trans\right) \tag{A-37}$$

Os parâmetros η, η_s e η_c são paramentos de fluidez em tração simples, cortante puro e compressão simples, respectivamente e são determinados pela Eq. (A-38).

$$\eta_t = \frac{\eta_{0t}}{\dot{\varepsilon}^{N_t}} \; ; \; \eta_c = \frac{\eta_{0c}}{\dot{\varepsilon}^{Nc}} \; ; \; \eta_s = Strate \; x \; \eta_t \qquad \text{(A-38)}$$

Onde os valores η_t ; η_c ; η_{0t} ; η_{0c} e $Strate$, são valores de entrada do modelo.

Por outro lado, o modelo visco-plástico pode prever o efeito de velocidade de carga bastante elevado para grandes velocidades de cargas ($\dot{\varepsilon} > 100$). Para limitar esses efeitos em grandes velocidades de cargas, o usuário pode introduzir um limite de carga de tensão (*overt*) e outro em compressão (*overc*). Esses parâmetros limitam o cálculo do parâmetro de fluidez, de forma que:

$$Se \; E\dot{\varepsilon}\eta > over \quad então \; \eta = \frac{over}{E\dot{\varepsilon}} \qquad \text{(A-39)}$$

1.1.21. Confinamento Inercial

Segundo Elmer VII *et. al.* (2010), o confinamento inercial se refere ao processo pelo qual a expansão elástica radial se dá de forma rápida, que devido ao efeito de Poisson é aplicado uma força para dentro do núcleo do material comprimido. O efeito também proporciona um aumento na tensão axial relacionadas exclusivamente com as propriedades elásticas e à geometria do modelo.

O fenômeno de confinamento inercial é avaliado quantitativamente na solução de elasticidade exata, entretanto, ao contrário de amostras de concreto reais, a solução de elasticidade não tem uma limitação de resistência do material.

Jiang & Zhao (2015) também noticiaram que o modelo 3D de elementos finitos é capaz de calcular o aumento de forças devido às tensões de confinamento geradas pela inércia da estrutura. Todavia, existe um risco de superestimar a força se o elemento finito calcular a ruptura do concreto com a consideração da velocidade do carregamento e o confinamento de tensões devido à inércia.

Zadeh (2011) estudou a resposta de confinamento do concreto utilizando o *MAT_159 com diferentes velocidades de carregamento e dimensões estruturais. Três corpos de prova cilíndricos foram modelados por ele com as seguintes dimensões: 101,60 x 203,20 mm, 203,20 x 406,40 mm e 406,40 x 812,80 mm. As condições de contorno de deslocamento podem são

mostradas na Figura A.12(a). Para as velocidades de carregamento foram adotados os seguintes valores: 1, 10, 100 e 200 s-1, respectivamente.

Os resultados estão plotados nas Figura A.12(b), (c) e (d), onde se observa que, nos três casos, há sempre um aumento nas resistências máximas com o aumento da velocidade de deformação e do tamanho do cilindro concomitantemente. Nota-se que para as velocidades de 1 e 10 s-1, não há uma elevação de força significativa pelo fato de o concreto não ter atingido as forças de confinamento.

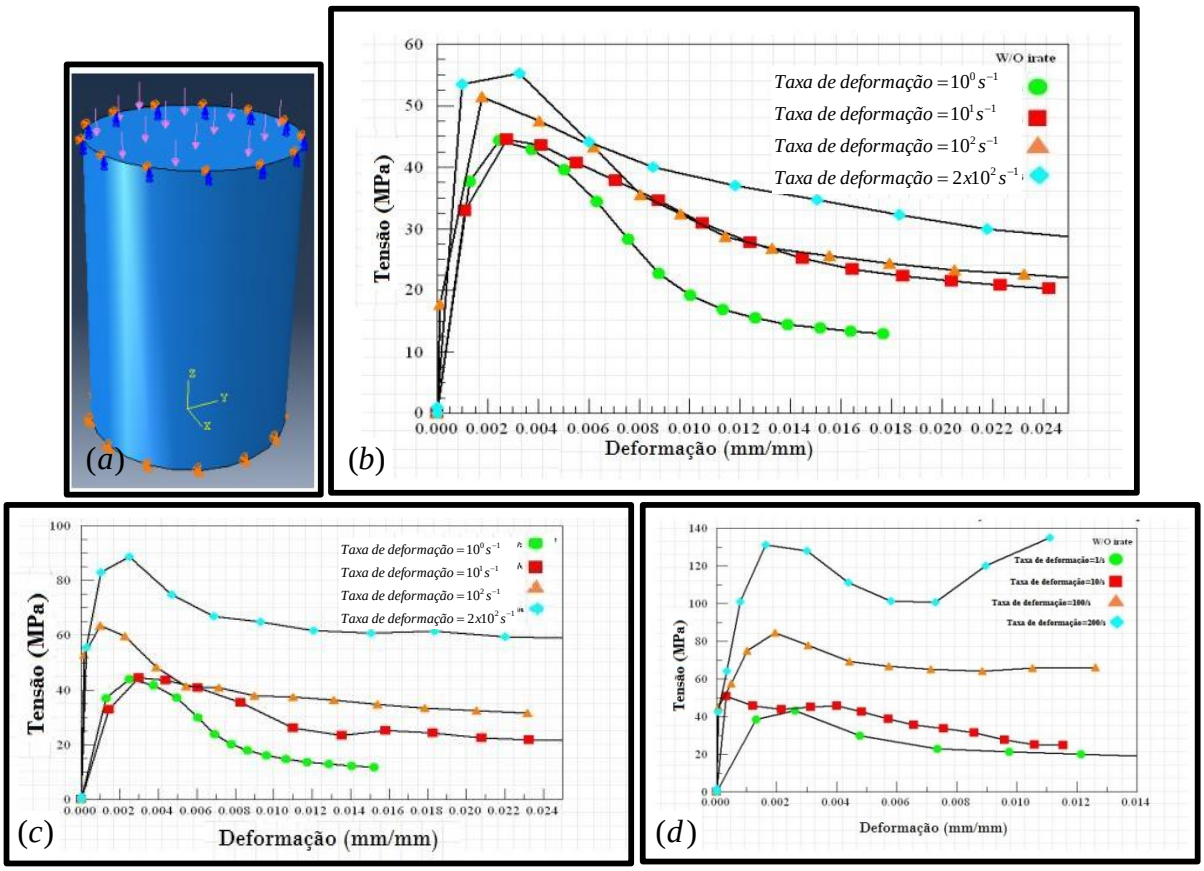


Figura A.12 –Adaptado de Zadeh (2011): (a)Modelo cilíndrico CSCM_CONCRETE com as condições de contorno, (b) Resultado Tensão x Deformação cilindro (101,60 x 203,20 mm), (c) Resultado Tensão x Deformação cilindro (203,20 x 406,40 mm), (c) Resultado Tensão x Deformação cilindro (406,40 x 812,80 mm).

1.1.22. Endurecimento Cinemático

Na compressão simples, o comportamento tensão-deformação do concreto comumente exibe não linearidade e dilatação antes do pico de tensão. Esse tipo de comportamento é modelado com uma superfície de escoamento de cisalhamento inicial, $N_H F_f$, que endurece até que coincida com a superfície de escoamento ao cisalhamento último, F_f. Dois parâmetros de entrada são requeridos: um parâmetro N_H (endurecimento isótropo) inicia o endurecimento, de forma que a superfície de escoamento inicial é uma fração da superfície final. Os valores

razoáveis para esse paramento são 0,7 < N_H < 1; o outro é o parâmetro C_H (endurecimento cinemático) que determina a velocidade do endurecimento.

O estado variável que define a translação da superfície de escoamento é denotado como α_{ij}. O valor de cada componente desta tensão é nulo sobre a superfície de escoamento inicial e alcança um valor máximo na superfície de fratura. A tensão total é atualizada através da soma da tensão de escoamento inicial (σ_{ij}^{KH}) com a tensão α_{ij}. No instante n + 1, α_{ij} será dado pela Eq. (A-40).

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^{n} + \Delta\sigma_{ij} \tag{A-40}$$

A tensão total atualizada no instante n + 1 será dada pela Eq. (A-41).

$$\sigma_{ij}^{P\,n+1} = \sigma_{ij}^{KH\,n+1} + \sigma_{ij}^{n+1} \tag{A-41}$$

A regra do endurecimento define o crescimento de α_{ij}. Este modelo baseado na tensão de endurecimento garante que as falhas da superfície coincidam com a superfície de ruptura ao cisalhamento. Com isso, evita-se o problema comum dos modelos baseados no endurecimento e na deformação plástica que, em suma, não são tão precisos. O crescimento de α_{ij} é definido como:

$$\Delta\sigma_{ij} = C_H G_\alpha \left(\sigma_{ij}^{P} - \alpha_{ij}\right)\Delta\dot{\varepsilon}\Delta t \tag{A-42}$$

Onde,

C_H – É a velocidade de translação em compressão simples (parâmetro de entrada pelo usuário);

G_α – É uma função que limita os incrementos;

$\left(\sigma_{ij}^{P} - \alpha_{ij}\right)$ – São as componentes da tensão elastoplástica que determinam a direção de translação para cada componente;

$\Delta\dot{\varepsilon}$ e Δt – São calculados internamente pelo programa e incluem em uma expressão para manter o endurecimento independente do passo de tempo, do fator de escala do tempo de passo e do incremento da velocidade de deformação.

Em tração simples (e em cisalhamento puro) a velocidade de translação é incrementada internamente por 10. Para estados de tensão com baixo confinamento, a velocidade de translação está situada entre o valor em tração e o valor em compressão, de acordo com as Eqs. (A-43) e (A-44).

$$Se\ tração\ (J_1 < 0) \quad então \quad C_H^{Fragil} = 10C_H \tag{A-43}$$

$$Se\ compressão\ (J_1 \geq 0) \quad então \quad C_H^{Ductil} = C_H^{Fragil} + trans\left(C_H - C_H^{Fragil}\right) \tag{A-44}$$

Onde,

$$trans = \left(\frac{J_1}{\sqrt{3J_2^{'}}}\right) pwrc \tag{A-45}$$

A função G_α restringe o movimento da superfície de escoamento para que a mesma não possa ir além da superfície de ruptura. A forma da função G_α é determinada pela forma da superfície de escoamento, de acordo com a Eqs. (A-46) e (A-47).

$$G_\alpha = 1 - \left[\frac{\overline{\alpha}_{ij}\left(S_{ij} + \frac{\overline{\alpha}_{ij}}{2}\right)}{\Re^2 F_f^2 F_c \left|J_1^P - N_H^2 \Re^2 F_f^2 F_c \right| \left(J_1^F - \alpha_F\right)}\right]^2 \tag{A-46}$$

$$\overline{\alpha}_{ij} = \alpha_{ij} - \frac{\sum \overline{\alpha}_{ii}}{3} \tag{A-47}$$

O endurecimento isótropo modifica a definição de superfície de cisalhamento de forma que:

$$F_f\left(J_1\right) = N_H\left(\alpha - \lambda \exp^{-\beta J_1} + \theta J_1\right) \tag{A-48}$$

Se o endurecimento não é utilizado $\left(N_H = 0\ e\ C_H = 0\right)$ então o valor de N_H é modificado inicialmente para 1 e a última superfície de escoamento é recuperada.

2.1.Parâmetros de Entrada:

A capacidade do modelo constitutivo para simular o comportamento real do material depende não só de sua formulação matemática como também e, principalmente, da correta obtenção dos parâmetros nos ensaios de laboratório. Mesmo que, de modo geral, os analistas conheçam profundamente os conceitos de elementos finitos e o próprio *software*, poucos possuem experiência na modelagem do concreto e, muitas vezes, os mesmos não dispõem de tempo, dados e/ou experiência para ajustar com precisão o conjunto de parâmetros necessários para a calibragem do modelo.

Atualmente, o modelo *MAT_159 possui 37 parâmetros de entrada, Tabela A-2, com um mínimo de 19 parâmetros. Entretanto, para que se tornasse de fácil utilização, foi implementado

o modelo *MAT_159_CONCRETE, que é muito popular para aplicações de impacto com barreiras.

Tabela A-2 – Parâmetros de entrada para calibração *MAT_159

Var	Descrição	Var	Descrição
G	Módulo de cisalhamento	D_1	Parâmetro de forma linear
K	Módulo de Bulk	D_2	Parâmetro de forma quadrática
α	CTX superfície constante	B	Parâmetro de forma de amolecimento dúctil
θ	CTX superfície linear	G_{fc}	Energia de fratura de compressão uniaxial
λ	CTX superfície não-linear	D	Parâmetro de forma de amolecimento frágil
β	CTX superfície exponencial	G_{ft}	Energia de fratura de tração uniaxial
α_1	TOR superfície constante	G_{fs}	Energia de fratura de cisalhamento puro
θ_1	TOR superfície linear	$pwrc$	Parâmetro transição cisalhamento-compressão
λ_1	TOR superfície não-linear	$pwrt$	Parâmetro transição cisalhamento-tensão
β_1	TOR superfície exponencial	$pmod$	Parâmetro de amolecimento tensão moderada
α_2	TTX superfície constante	η_{0c}	Parâmetro de ajuste de compressão simples
θ_2	TTX superfície linear	η_c	Parâmetro de ajuste de compressão simples
λ_2	TTX superfície não-linear	η_{0t}	Parâmetro de ajuste de tração simples
β_2	TTX superfície exponencial	η_t	Parâmetro de ajuste de tração simples
N_H	Inciação do Endurecimento	$overc$	Máximo para sobre tensão de compressão
C_H	Velocidade de Endurecimento	$overt$	Máximo para sobre tensão de tração
R	Proporção do CAP	$Srate$	Parâmetro de fluidez
X_0	Localização inicial do CAP	W	Compactação do máximo volume plástico
$repow$	Incremento da energia da fratura com efeito da velocidade		

A resistência à compressão do concreto do modelo são compatíveis para resistências de 20 a 58 MPa. Esses valores afetam todos os aspectos de ajuste, incluindo a rigidez, a resistência à deformação tridimensional, o endurecimento e o dano. A energia de fratura afeta apenas o comportamento do amolecimento da formulação do dano. O amolecimento é compatível para o tamanho do agregado de 8 a 32 mm. Algumas dessas propriedades serão discutidas a seguir.

2.1.1. Módulo de Bulk, Cisalhamento e Elasticidade

O módulo elasticidade varia de acordo com a resistência do concreto, como pode ser verificado na Tabela A-3. Estes valores são obtidos a partir de uma equação do CEB, mostrado na da Eq. (A-49).

$$E = E_c \left(\frac{f'c}{10} \right)^{1/3} \tag{A-49}$$

Onde,

E – o modulo de Elasticidade;

E_c – módulo de Elasticidade quando $f'c$ = 10 MPa.

O coeficiente de Poisson é geralmente tomado no intervalo entre 0,1 e 0,2. O valor de $\nu = 0{,}15$ será adotado aqui como constante para a obtenção do módulo de Bulk e módulo de cisalhamento (K e G) para a dedução dos valores da Tabela A-3, com o auxílio das relações clássicas entre as constantes de rigidez, mostradas nas Eqs. (A-50) e (A-51).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{A-50}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \tag{A-51}$$

Tabela A-3 – Valores padrões para o módulo de Bulk e módulo de cisalhamentos derivados do módulo de elasticidade através das equações relacionadas no CEB – Murray (2007).

Tensão de compressão	**Módulo de Elasticidade**	**Módulo de Poisson**	**Módulo de Bulk (*K*)**	**Módulo de Cisalhamento (*G*)**
(MPa)	(GPa)	-	(GPa)	(GPa)
20,00	23,00	0,15	11,00	10,00
28,00	25,80	0,15	12,30	12,20
38,00	28,50	0,15	13,60	12,40
48,00	30,80	0,15	14,70	13,40
58,00	32,80	0,15	15,60	14,30

Alternativamente, o *ACI Committee 318* sugere a fórmula para o cálculo do módulo de elasticidade, como mostrado na Eq. (A-52).

$$E_c = 0{,}043 w_c^{1,5} \sqrt{f'c} MPa \tag{A-52}$$

Onde,

w_c – é a densidade do concreto em quilogramas por m³ (kg/m³);

Para um concreto convencional com w_c = 2286 kg/m³, a Eq. (A-52) é reduzida para a fórmula mostrada na Eq. (A-53).

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c} MPa \tag{A-53}$$

Os valores fornecidos pela fórmula da Eq. (A-53), são em torno de ± 9 dos encontrados pela Eq. (A-49), como mostrado na Tabela A-4.

Tabela A-4 – Valores padrões para o módulo de Bulk e módulo de cisalhamentos derivados do módulo de elasticidade através das equações relacionadas no ACI – Murray (2007).

Tensão de compressão	**Módulo de Elasticidade**	**Módulo de Poisson**	**Módulo de Bulk (*K*)**	**Módulo de Cisalhamento (*G*)**
(MPa)	(GPa)	-	(GPa)	(GPa)
20,00	21,00	0,15	10,00	9,10
28,00	24,90	0,15	11,90	10,80
38,00	28,90	0,15	13,80	12,60
48,00	32,60	0,15	15,50	14,20
58,00	35,80	0,15	17,00	15,60

2.1.2. Unidades

O modelo CSM_Concrete possui um sistema de cinco unidades, que auxilia na escolha de dimensões consistentes, conforme mostrado na Tabela A-5.

Tabela A-5 – Sistemas de unidades *MAT_159_Concrete

ID	**Unidades**
EQ. 0	GPa, mm, milissegundos, kg/mm³, kN
EQ. 1	MPa, mm, milissegundos, g/mm³, N
EQ. 2	MPa, mm, segundos, Mg/mm³, N
EQ. 3	Psi, polegadas, segundos, lb-s²/pol.⁴, lb
EQ. 4	Pa, m, segundos, kg/m³, N

2.1.3. Efeito da Viscoplasticidade

A literatura é conflitante quando aborda a relação da dependência de energia de fratura e o efeito da viscoplasticidade. Uma possibilidade é modelar a energia e fratura independente da taxa de deformação fazendo *repow* igual a zero. Outra alternativa é o aumento da energia com o efeito da viscoplasticidade, o que é feito multiplicando a energia de fratura estática pelo fator de incremento dinâmico, fazendo *repow* igual a um.

O CEB fornece especificações para o fator de incremento dinâmico, porém, mesmas especificações não possuem um bom ajuste aos dados de tração. Murray (2007), a partir de dados compilados, apresenta o gráfico da Figura A.13, que possui uma melhor correlação, principalmente para concretos com resistência em torno de $f'c$ = 45 MPa.

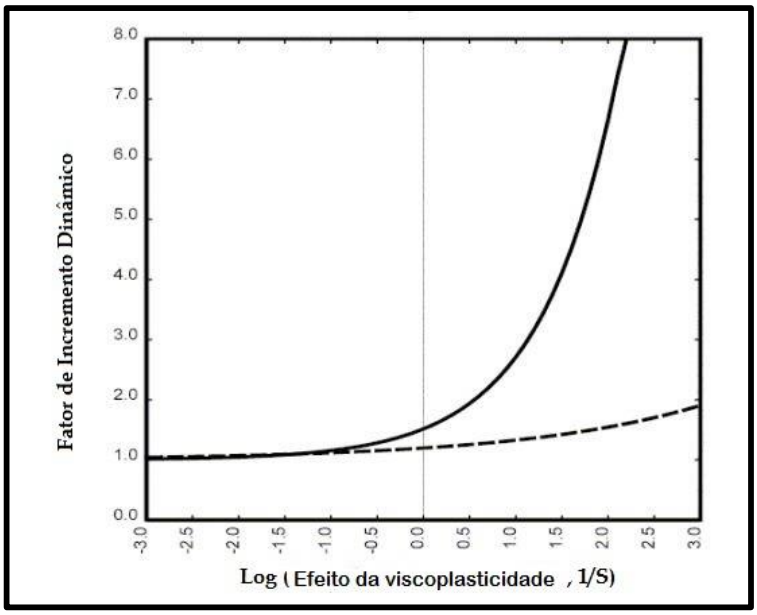


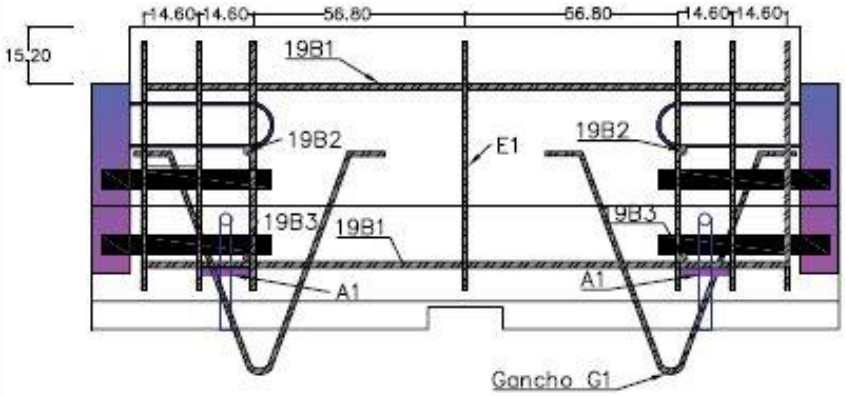
Figura A.13 –Fator de incremento dinâmico em relação à velocidade de carregamento do modelo de um concreto padrão

APÊNDICE B

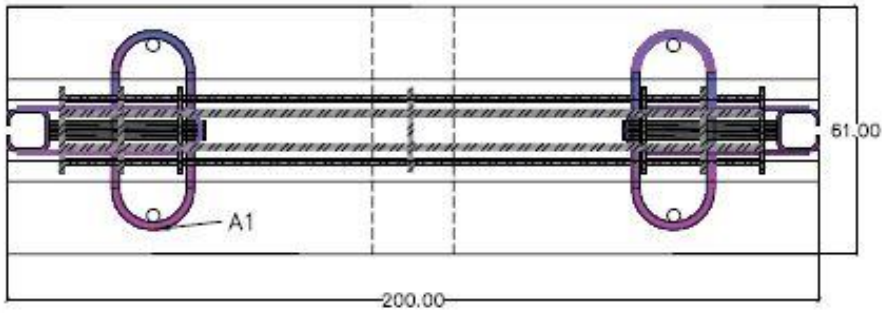
PROJETOS BNJ-NY E BNJ-M

Os projetos de construção dos modelos BNJ-NY e BNJ-M, estão apresentados nas pranchas seguintes: BNJ-NY numeradas de 1 a 4 e BNJ-M numeradas de 1 a 3.

Vista Lateral



Vista Superior



Memorial Descritivo para três barreiras				
Item	Qtde.	Unidade	Material	Tam.(Tot.)
S	1,5	m³	Concreto fck = 25 MPa	--
A1	12,0	und	ASTM A36 19,0 mm	11,14 m
B1	12,0	und	Aço CA-50 19,0 mm	20,80 m
B2	6,0	und	ASTM A36 19 mm	91,20 cm
B3	6,0	und	ASTM A36 19 mm	2,14 m
B4	2,0	und	ASTM A36 32 mm	1,16 m
T1	4,0	und	Tubo 10,2x10,2x1,27	2,10 m
T2	2,0	und	Tubo 10,2x10,2x1,27	1,05 m
C1	6,0	und	Chapa 5,10x75,52x0,64	0,15 m²
C2	12,0	und	Chapa 5,10x89,72x0,64	0,36 m²
C3	2,0	und	Chapa 5,76x64,93x1,27	0,095 m²
C4	2,0	und	Chapa 5,00x64,93x1,27	0,083 m²
C5	2,0	und	Chapa 20,40x45,40x1,27	0,235 m²
C6	2,0	und	Chapa 15,65x3,5x1,27	0,014 m²
C7	2,0	und	Chapa 6,40x10,20x1,27	0,017 m²
E1	18,0	und	Aço CA-50 12,7 mm	1,36 m
G1	2,0	und	Aço CA-25 12,7 mm	1,36 m

Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Estruturas

Folha: 1/4

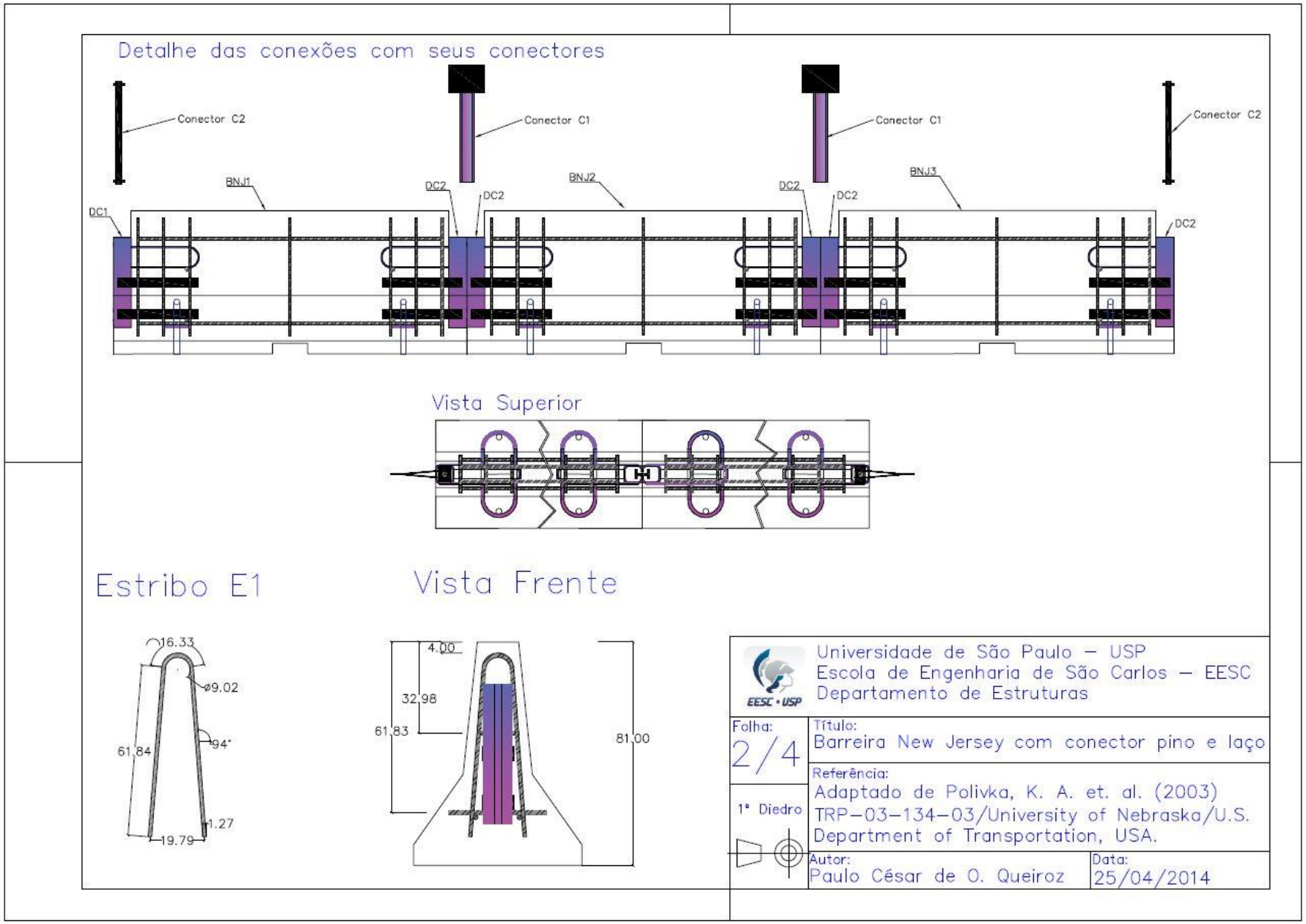
Título: Barreira New Jersey com conector NY

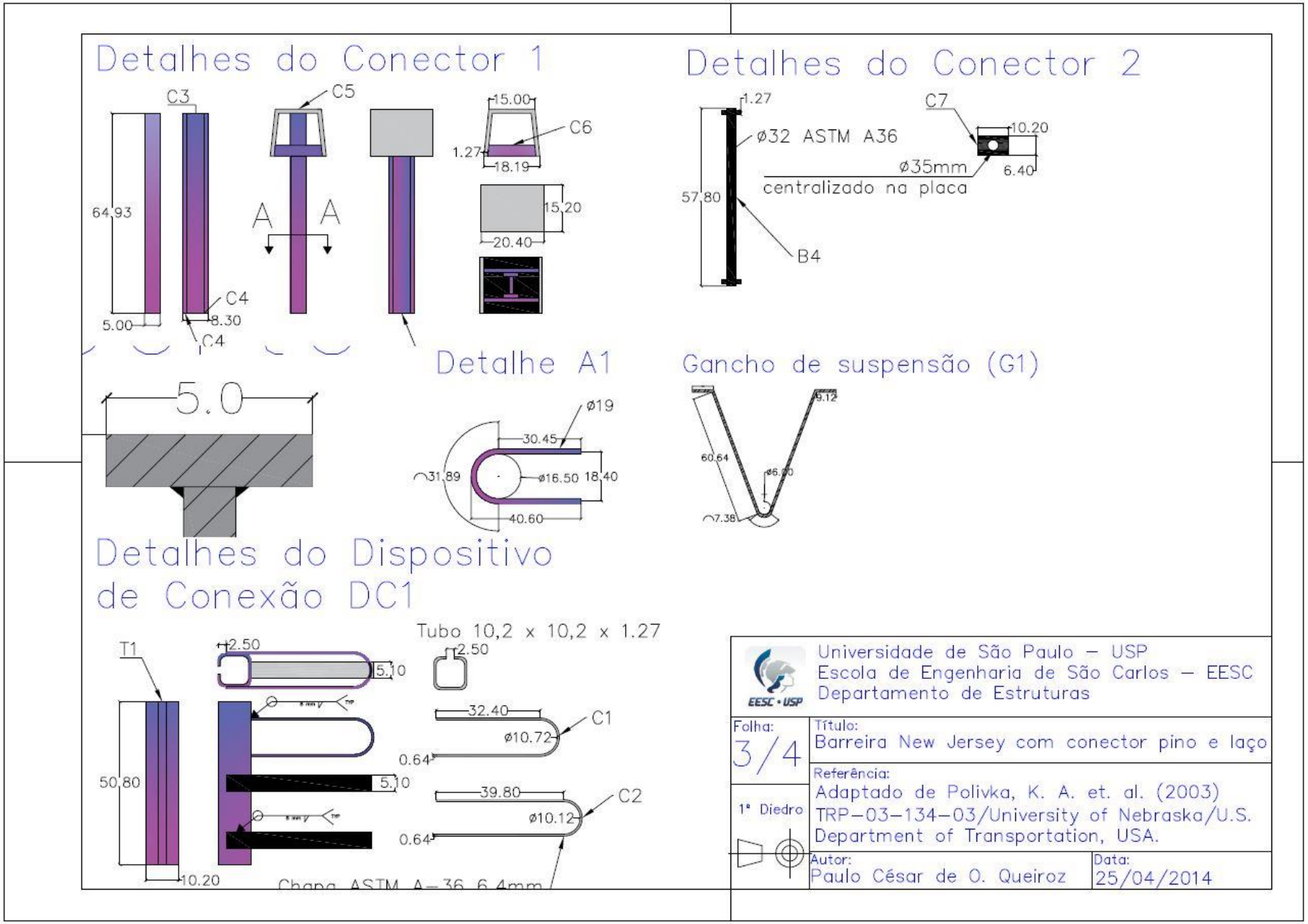
Referência: Adaptado de Lechtenberg, K. A. et. al. (2010) TRP-03-224-10/University of Nebraska/U.S. Department of Transportation, USA.

1º Diedro

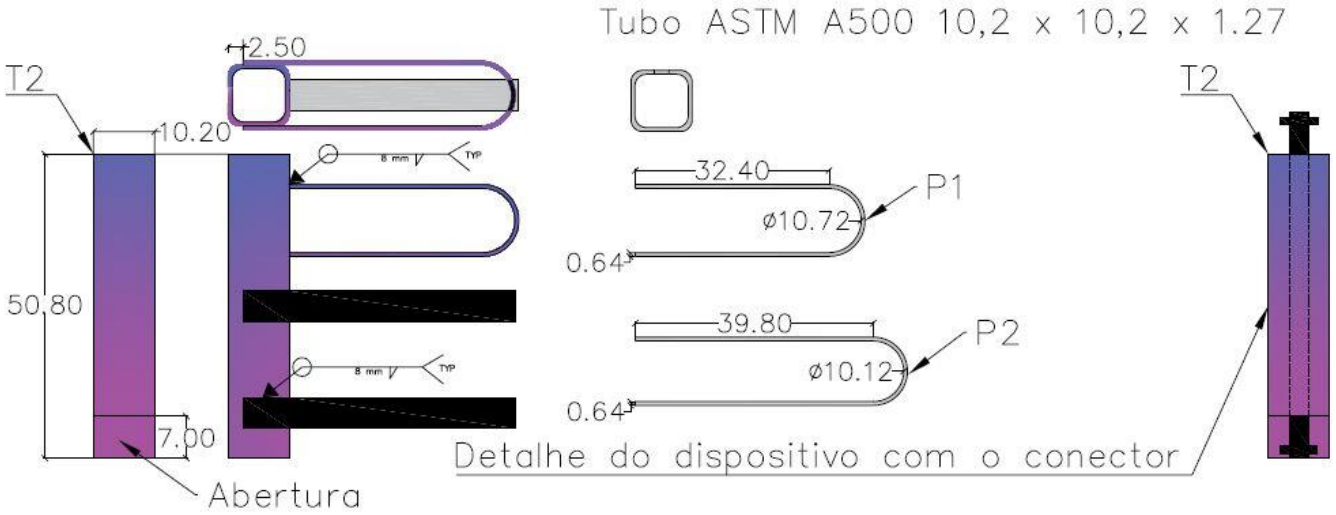
Autor: Paulo César de O. Queiroz

Data: 25/04/2014


Detalhe das conexões com seus conectores
Conector C2
Conector C1
Conector C1
Conector C2
BNJ1
BNJ2
BNJ3
DC1
DC2
DC2
DC2
DC2
DC2
Vista Superior
Estribo E1
Vista Frente
16.33
ø9.02
94°
61.84
1.27
19.79
4.00
32.98
61.83
81.00
Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Estruturas
EESC • USP
Folha:
2/4
Título:
Barreira New Jersey com conector pino e laço
Referência:
Adaptado de Polivka, K. A. et. al. (2003)
TRP–03–134–03/University of Nebraska/U.S.
Department of Transportation, USA.
1° Diedro
Autor:
Paulo César de O. Queiroz
Data:
25/04/2014

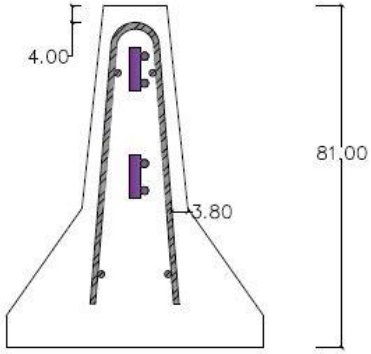

Detalhes do Conector 1
C3
C5
15.00
C6
1.27
18.19
64.93
A
A
15.20
20.40
C4
5.00
8.30
C4
Detalhes do Conector 2
1.27
C7
10.20
ø32 ASTM A36
ø35mm
6.40
centralizado na placa
57.80
B4
5.0
Detalhe A1
ø19
30.45
31.89
ø16.50
18.40
40.60
Gancho de suspensão (G1)
9.12
60.64
7.38
Detalhes do Dispositivo de Conexão DC1
Tubo 10,2 x 10,2 x 1.27
T1
12.50
5.10
2.50
32.40
C1
ø10.72
0.64
50.80
5.10
39.80
C2
ø10.12
0.64
10.20
Chapa ASTM A-36 6.4mm
Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Estruturas
EESC • USP
Folha:
3/4
Título:
Barreira New Jersey com conector pino e laço
Referência:
Adaptado de Polivka, K. A. et. al. (2003)
TRP-03-134-03/University of Nebraska/U.S.
Department of Transportation, USA.
1° Diedro
Autor:
Paulo César de O. Queiroz
Data:
25/04/2014

Detalhes do Dispositivo de Conexão DC2

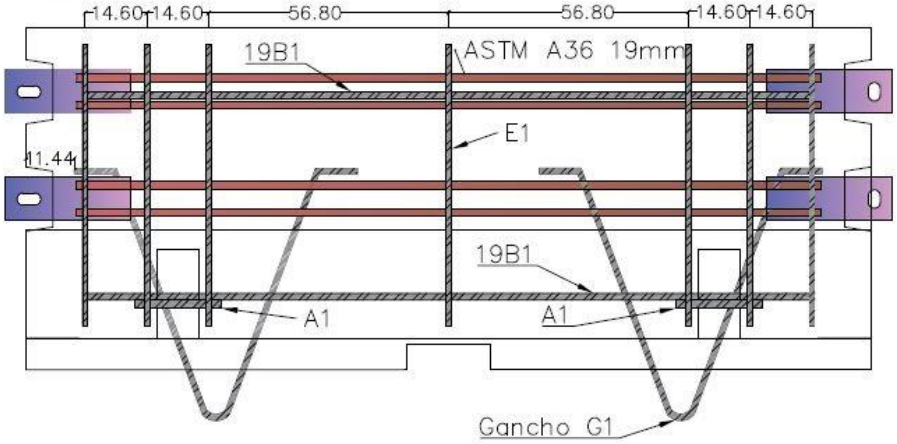


Universidade de São Paulo – USP Escola de Engenharia de São Carlos – EESC Departamento de Estruturas	
Folha: 4/4	Título: Barreira New Jersey com conector NY
1° Diedro	Referência: Adaptado de Polivka, K. A. et. al. (2003) TRP–03–134–03/University of Nebraska/U.S. Department of Transportation, USA.
Autor: Paulo César de O. Queiroz	Data: 25/04/2014

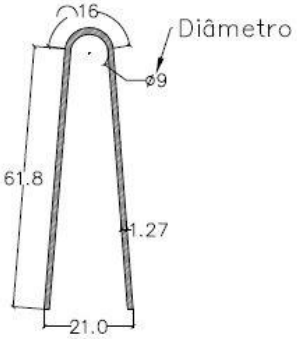
Vista Frente



Vista Lateral



Estribo E1



Memorial Descritivo para 6 barreiras

Item	Qtde.	Unidade	Material	Comprim.	Total	Peso (Kg)
B1	24,0	und	Aço CA–50 20,0 mm	1,73 m	35,80 m	88,10 Kg
B2	12,0	und	Aço CA–50 20,0 mm	15,2 cm	1,83 m	4,50 Kg
B3	12,0	und	Aço CA–50 20,0 mm	0,36 m	4,32 m	10,70 Kg
E1	42,0	und	Aço CA–50 12,7 mm	1,40 m	58,80 m	58,80 Kg
A1	48,0	und	Aço CA–50 16,0 mm	0,93 m	44,64 m	71,50 Kg
G1	12,0	und	Aço CA–25 16,0 mm	1,47 m	17,64 m	28,40 Kg

Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
EESC • USP Departamento de Estruturas

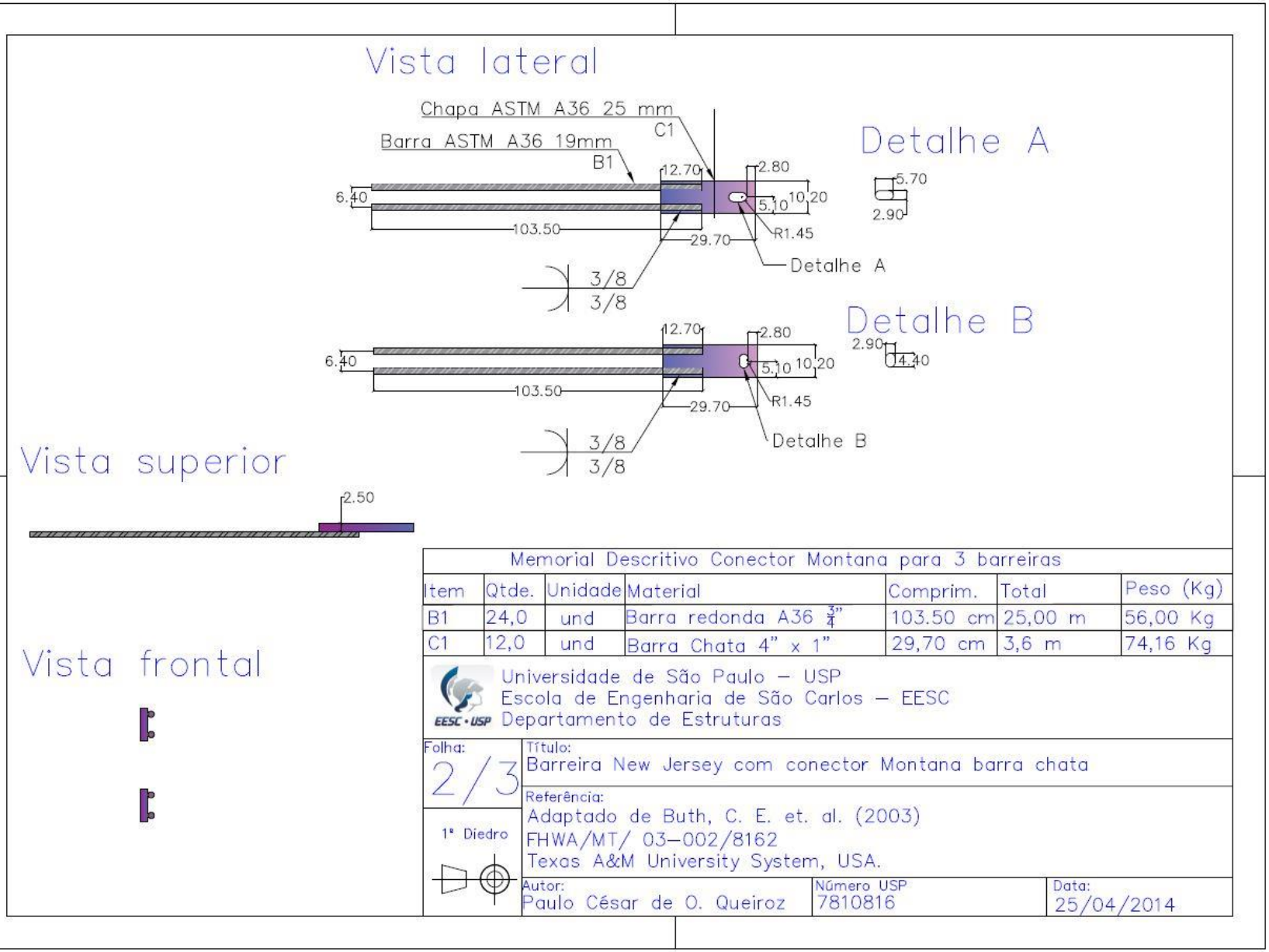
Folha: 1/3

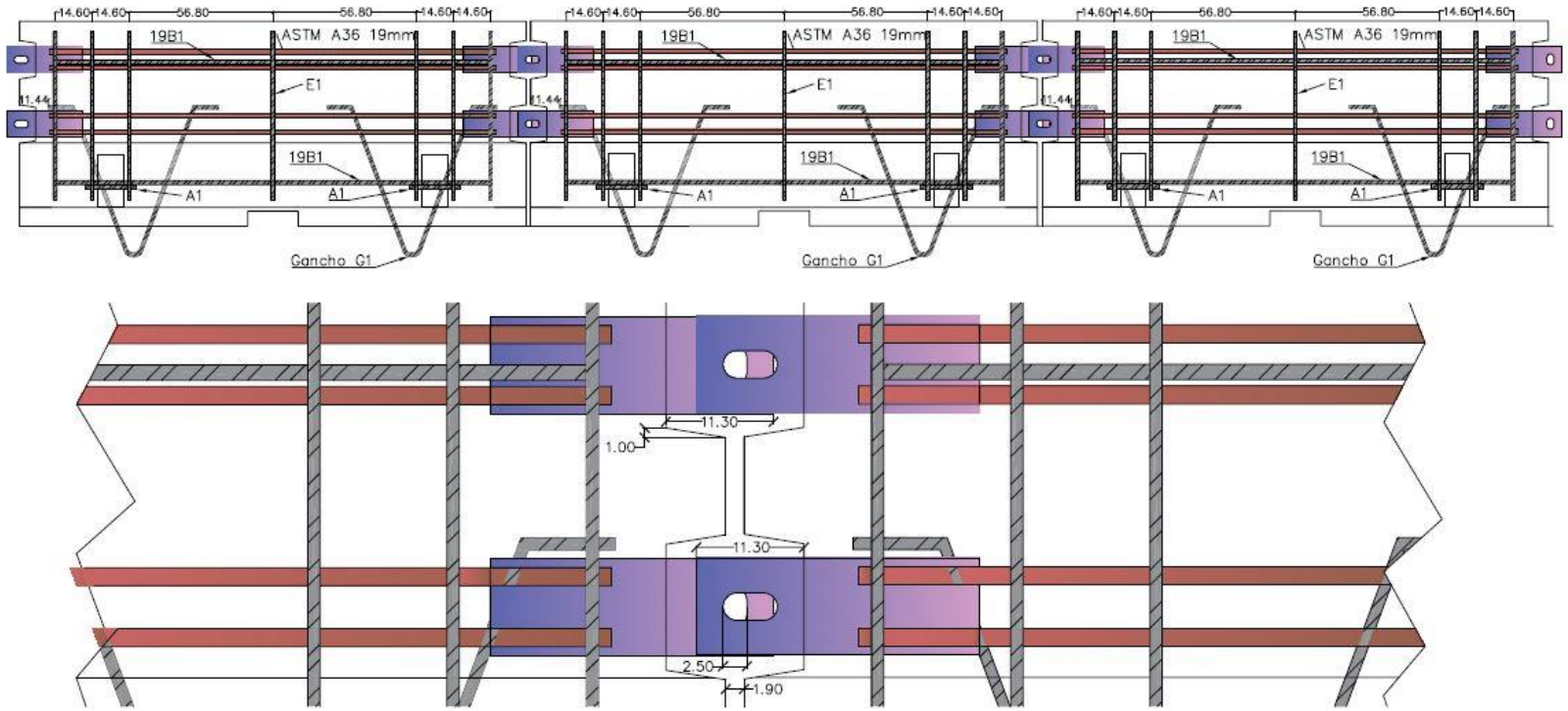
Título: Barreira New Jersey com conector Montana barra chata

Referência: Adaptado de Buth, C. E. et. al. (2003)
FHWA/MT/ 03–002/8162
Texas A&M University System, USA.

1° Diedro

Autor: Paulo César de O. Queiroz | Número USP 7810816 | Data: 25/04/2014


Vista lateral
Chapa ASTM A36 25 mm
C1
Barra ASTM A36 19mm
B1
12.70
2.80
6.40
5.10
10.20
103.50
29.70
R1.45
Detalhe A
3/8
3/8
Detalhe A
5.70
2.90
Detalhe B
12.70
2.80
2.90
14.40
6.40
5.10
10.20
103.50
29.70
R1.45
Detalhe B
3/8
3/8
Vista superior
2.50
Vista frontal
Memorial Descritivo Conector Montana para 3 barreiras
Item | Qtde. | Unidade | Material | Comprim. | Total | Peso (Kg)
B1 | 24,0 | und | Barra redonda A36 3/4" | 103.50 cm | 25,00 m | 56,00 Kg
C1 | 12,0 | und | Barra Chata 4" x 1" | 29,70 cm | 3,6 m | 74,16 Kg
Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
EESC • USP
Departamento de Estruturas
Folha:
2/3
Título:
Barreira New Jersey com conector Montana barra chata
Referência:
Adaptado de Buth, C. E. et. al. (2003)
FHWA/MT/ 03–002/8162
Texas A&M University System, USA.
1° Diedro
Autor:
Paulo César de O. Queiroz
Número USP
7810816
Data:
25/04/2014



Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Estruturas

Folha: 3/3	Título: Barreira New Jersey com conector Montana barra chata		
1ª Diedro	Referência: Adaptado de Buth, C. E. et. al. (2003) FHWA/MT/ 03-002/8162 Texas A&M University System, USA.		
	Autor: Paulo César de O. Queiroz	Número USP 7810816	Data: 25/04/2014