ADRIAN YU YONEDA

**Avaliação do desempenho da defesa metálica maleável simples
utilizada nas vias brasileiras, em diversas condições de instalação**

São Paulo
2013

Adrian Yu Yoneda

Avaliação do desempenho da defesa metálica
maleável simples utilizada nas vias brasileiras, em
diversas condições de instalação

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia
Mecânica.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica de
Projeto e Fabricação

Orientador: Prof.^a Dr.^a Larissa
Driemeier

São Paulo
2013

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

Catálogo da Publicação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

FICHA CATALOGRÁFICA

Yoneda, Adrian Yu

**Avaliação do desempenho da defesa metálica maleável
simples utilizada nas vias brasileiras, em diversas condições de
instalação / A.Y. Yoneda. -- São Paulo, 2013.
107 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Veículos (Impacto; Resistência) 2. Dinâmica veicular
(Simulação numérica) 3. Rodovias 4. Método dos elementos
finitos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Depar-
tamento de Engenharia Mecânica II. t.**

Nome: YONEDA, Adrian Yu

Título: Avaliação do desempenho da defesa metálica maleável simples utilizada nas vias brasileiras, em diversas condições de instalação

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Julgamento	_____	Assinatura	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Julgamento	_____	Assinatura	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição	_____
Julgamento	_____	Assinatura	_____

Aos meus pais, pelo suporte e pela educação, ao meu irmão, pelas conversas que me ajudaram nas decisões e à minha namorada, que teve muita paciência e me apoiou muito durante este trabalho.

Adrian Yu Yoneda

Agradecimentos

À Prof. Dr. Larissa Driemeier, pela orientação, paciência e conselho ao longo de todo o projeto, sem os quais certamente este trabalho não alcançaria todas as metas colocadas e atingidas.

Aos meus pais, irmão, namorada e amigos, pela compreensão e apoio, pois a dedicação a este projeto não seria possível sem a ajuda e a paciência de todas essas pessoas.

Ao Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas, por conceder o laboratório e suas ferramentas para a execução dos ensaios experimentais e das simulações numéricas, e aos colegas do laboratório, que se dispuseram quando foram solicitados.

Ao Prof. Dr. Marcílio Alves, por sua orientação na fase inicial deste trabalho.

Ao Renato Neves, pelas discussões e companheirismo no decorrer do projeto.

À Multicorpos Engenharia, em especial ao Rodivaldo Cunha, pelos conselhos, disponibilização do espaço de trabalho e flexibilidade no horário de trabalho, possibilitando a realização desta pesquisa.

Resumo

YONEDA, A. Y.; **Avaliação do desempenho da defesa metálica maleável simples utilizada nas vias brasileiras, em diversas condições de instalação.** 2013. N f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

A aplicação do método de elementos finitos como ferramenta de análise vem crescendo na indústria ao longo dos anos, sendo que uma das áreas em desenvolvimento corresponde ao estudo de impacto e avaliação de resistência ao choque. O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência da defesa metálica maleável simples utilizada nas rodovias do Brasil, no que diz respeito à capacidade de conter um veículo desgovernado de 2000 quilogramas a 100 quilômetros por hora, através da simulação numérica pelo método dos elementos finitos. Para possibilitar a execução das análises, são realizados ensaios experimentais de corpos de prova retirados de um dos componentes da defesa metálica para a caracterização do material. Além disso, são desenvolvidas simplificações no modelo para permitir a realização de análises com baixo custo computacional. A partir do modelo elaborado, são avaliados os comportamentos de impacto na defesa metálica maleável simples em diversas condições de instalação encontradas em vias brasileiras com grande volume de veículos, incluindo-se condições inadequadas. As avaliações indicam que a defesa é incapaz de reter o veículo, ocorrendo o rompimento dos parafusos que unem as lâminas. As defensas em condições irregulares de manutenção apresentam resultados mais catastróficos, colocando mais risco aos ocupantes e pedestres. Por fim, é recomendada a elevação da classe do parafuso para 5.8, permitindo que a defesa retenha o veículo do teste 3-11 do NCHRP *Report* 350.

Palavras chave: Defesa metálica. Impacto. Resistência ao choque. Veículo. Rodovia. Simulação numérica. Elementos finitos. Caracterização de material.

Abstract

YONEDA, A. Y.; **Performance evaluation of a W-Beam guardrail model used in Brazilian roads in several installation conditions**. 2013. N f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

The application of Finite Element Method as an analysis tool in industry has been increasing over the years, so that one of the development areas corresponds to the study of impact and crashworthiness. The objective of this work is to assess the efficiency of a guardrail model used on Brazilian roads, with respect to the ability of containing a runaway vehicle of 2 ton at 100 miles per hour, through numerical simulation using finite element analysis. Experimental tests of samples taken from a component of the guardrail are performed to enable material characterization for the analysis. Furthermore, model simplifications are developed to permit the analysis with low computational cost. The impact behaviors are evaluated in various guardrail installation conditions found on high movement roads, including some inadequate ones. The analysis show that the guardrail is unable to retain the vehicle, shearing the W-beam splice bolts. The irregular maintenance condition guardrails present more catastrophic results, endangering even more the occupants and the pedestrians. Finally, it is recommended that the bolts are upgraded to 5.8, enabling the vehicle retention under test 3-11 of NCHRP Report 350.

Keywords: Guardrail. Impact. Crashworthiness. Vehicle. Highway. Numerical simulation. Finite element. Material characterization.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Pilares de atividades do Plano Global da ONU (ONU, 2011).	1
Figura 1.2 - Defesa metálica maleável simples (Rodovia Anchieta)	2
Figura 1.3 - Exemplo de defesa metálica manutenção (acesso à pista local da Marginal Pinheiros).	3
Figura 3.1 - Agrupamento das referências bibliográficas, conforme a natureza do trabalho.	10
Figura 3.2 – Falhas típicas em defensas metálicas. Figuras extraídas de Ray, Plaxico e Engstrand (2001).	12
Figura 3.3 - Modelagens de fixações parafusadas. (a) modelagem por elementos de viga ligados por elementos rígidos aos furos; (b) modelagem por elementos sólidos e pré-carga; (c) modelagem proposta pelo autor, com a utilização de elementos de ponto de solda. Figuras extraídas de Sonnenschein (2008)	13
Figura 3.4 - Modelo de simplificação de interação solo-poste. (a) modelo simplificado com molas não lineares; (b) modelo com solo representado por elementos Eulerianos. Figuras extraídas de Tabiei e Wu (2000)	15
Figura 3.5 – Modelagem com veículo simplificado. (a) veículo representado por um bloco sólido; (b) comparação dos resultados do cálculo numérico com um ensaio experimental. Figuras extraídas de Shen et al. (2008)	16
Figura 4.1 - Montagem das geometrias que compõem da defesa maleável simples	18
Figura 4.2 - Dimensões da Defesa Maleável Simples, de acordo com a norma ABNT 6971 (1999)	18
Figura 4.3 - Montagem do modelo em elementos finitos	20
Figura 4.4 - Detalhes na montagem da defesa.	20
Figura 4.5 - Modelo em elementos finitos do veículo rígido	21
Figura 4.6 - Curva de tensão por deformação verdadeira e de engenharia	24
Figura 4.7 - Corpo de prova sem entalhe	24
Figura 4.8 - Máquina de tração Instron	25

Figura 4.9 - Foto do ensaio do CP02. (a) instante inicial; (b) instante da ruptura	25
Figura 4.10 - Curva de Tensão Verdadeira por Deformação Verdadeira	26
Figura 4.11 - Ajuste da curva plástica do corpo de prova 2	28
Figura 4.12 - Taxa de deformação do corpo de prova 2	28
Figura 4.13 - Modelo de um quarto do corpo de prova	30
Figura 4.14 - Comparativo do resultado da simulação com o ensaio experimental do corpo de prova 2.	30
Figura 4.15 - Propriedades do material das fixações (fora de escala).	32
Figura 4.16 - Modelo de tração de placas parafusadas.	33
Figura 4.17 - Variação das tensões de cisalhamento e axial no parafuso.	33
Figura 4.18 - Variação da deformação plástica equivalente no parafuso	34
Figura 4.19 - Comparativo do resultado da simulação com o dado de entrada.	35
Figura 4.20 - Modelo isolado de um poste aterrado.	36
Figura 4.21 - Curvas de entrada para o modelo de material MAT078 (Wu e Thomson, 2007).	36
Figura 4.22 - Correlação das molas não-lineares com a utilização de elementos rígidos de ligação.	38
Figura 4.23 - Forças na direção X nas seções "A" a "U".	39
Figura 4.24 - Deslocamento na direção X do nó central nas seções "A" a "U".	39
Figura 4.25 - Molas não-lineares nas seções de "A" a "E" para a direção X.	40
Figura 4.26 - Comparação da força por deslocamento na direção X, aplicada na extremidade do poste.	40
Figura 4.27 - Deformadas do poste em três instantes do carregamento em X. (a) (b) (c) modelo com interação solo-poste; (d) (e) (f) simplificação com molas não-lineares.	41
Figura 4.28 - Forças na direção Y nas seções "A" a "U".	42
Figura 4.29 - Deslocamento na direção Y do nó central nas seções "A" a "U".	43
Figura 4.30 - Molas não-lineares nas seções de "A" a "E" para a direção Y.	43
Figura 4.31 - Comparação da força por deslocamento na direção Y, aplicada na extremidade do poste.	43

Figura 4.32 - Deformadas do poste em três instantes do carregamento em Y. (a) (b) (c) modelo com interação solo-poste; (d) (e) (f) simplificação com molas não-lineares.	44
Figura 4.33 - Momentos na direção Z nas seções "A" a "U".	45
Figura 4.34 - Rotações na direção Z do nó central nas seções "A" a "U".	46
Figura 4.35 - Molas rotacionais não-lineares nas seções de "A" a "E" para a direção Z.	46
Figura 4.36 - Comparação do momento por rotação na direção Z, aplicada na extremidade do poste.	46
Figura 4.37 - Deformadas do poste em três instantes da rotação em Z. (a) (b) (c) modelo com interação solo-poste; (d) (e) (f) simplificação com molas não-lineares.	47
Figura 4.38 - Modelo final da defesa metálica maleável simples.(a) detalhe nos elementos discretos com as propriedades de mola linear na lâmina e na cinta. (b) detalhe nos elementos SPOTWELD representando os parafusos e os elementos discretos ao longo do poste aterrado, com propriedades de mola não-linear.	48
Figura 5.1 - Modelo do veículo Chevrolet C2500 1994 disponibilizado pelo NCAC (2008).	50
Figura 5.2 - Condições de impacto	51
Figura 5.3 - Identificação dos postes, lâminas e parafusos para as avaliações.	52
Figura 6.1 - Posicionamento do veículo para análise do ponto crítico de impacto	53
Figura 6.2 - Tensão de von Mises na região do poste de referência após 0,3s de impacto em vista frontal	54
Figura 6.3 – Deformação plástica equivalente na região do poste de referência após 0,3s de impacto em vista lateral	54
Figura 6.4 - Deslocamento no instante em que a região da roda do veículo passa pelo poste de referência. Vista inferior	55
Figura 6.5 - Exemplo de instalação na condição normal de uso (Rodovia Anchieta).	56
Figura 6.6 - Estado do dispositivo nas condições normais de uso a 0,3 de impacto.	57

Figura 6.7 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição normal de uso.	57
Figura 6.8 - Instantes das rupturas dos parafusos. (a) ruptura do parafuso entre o espaçador e a lâmina. (b) rompimento dos parafusos que unem as lâminas C e D.	58
Figura 6.9 – (a) altura da lâmina na condição normal de uso; (b) comportamento de flexo-torção.	59
Figura 6.10 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição normal de uso.	59
Figura 6.11 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição normal de uso.	59
Figura 6.12 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição normal de uso.	60
Figura 6.13 - Foto de defesa na condição de engaste (concreto). Nota-se que este exemplo está irregular, faltando a cinta no poste à esquerda.	61
Figura 6.14 - Modelo com o poste engastado	61
Figura 6.15 - Estado do dispositivo na condição de engaste a 0,3 de impacto.	62
Figura 6.16 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição de engaste.	62
Figura 6.17 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição de engaste.	62
Figura 6.18 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição de engaste.	63
Figura 6.19 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição de engaste.	63
Figura 6.20 – Fotos de instalações com ausência de postes. (a) exemplo com duas irregularidades: ausência de um poste e das cintas; (b) exemplo com ausência de dois postes.	65
Figura 6.21 - Modelo com ausência de um poste.	65
Figura 6.22 - Estado do dispositivo na condição irregular com ausência de um poste a 0,3 de impacto.	66
Figura 6.23 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição irregular com ausência de um poste.	66

Figura 6.24 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição irregular com ausência de um poste.	67
Figura 6.25 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição irregular com ausência de um poste.	67
Figura 6.26 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição irregular com ausência de um poste.	68
Figura 6.27 – Fotos de instalações sem cinta. (a) Acesso à pista local da Marginal Pinheiros; (b) Rodovia Anchieta.	69
Figura 6.28 - Modelo sem cinta.	69
Figura 6.29 - Estado do dispositivo na condição irregular sem cinta a 0,3 de impacto.	70
Figura 6.30 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição irregular sem cinta.	70
Figura 6.31 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição irregular sem cinta.	71
Figura 6.32 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição irregular sem cinta.	71
Figura 6.33 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição irregular sem cinta.	71
Figura 6.34 - Propriedades do material das fixações na classe 5.8 (fora de escala).	73
Figura 6.35 - Instante final da análise com a recomendação de melhoria do parafuso.	74
Figura 6.36 - Trajetória do veículo durante o impacto, com a recomendação de melhoria no parafuso.	74
Figura 6.37 - Soltura da cinta. (a) instante em que ocorre a soltura; (b) consequência da soltura.	74
Figura 6.38 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, com a recomendação de melhoria no parafuso.	75
Figura 6.39 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, com a recomendação de melhoria no parafuso.	75
Figura 6.40 - Variação das energias total, cinética e interna, com a recomendação de melhoria no parafuso.	76

Figura A.1 – (a) Modelo utilizado para a verificação do modelo de material do solo; (b) carregamento para a primeira verificação.	86
Figura A.2 - Comparação dos parâmetros de entrada e os resultados obtidos para a equação de estado.	87
Figura A.3 - Variação das pressões no tempo, para a segunda verificação do modelo de material do solo.	87
Figura A.4 - Comparação dos parâmetros de entrada e os resultados obtidos para o critério de escoamento.	88

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Agrupamento das referências bibliográficas, conforme o tipo de trabalho.	10
Tabela 4.1 – Massa e momento de inércia do veículo	21
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas mínimas do material	22
Tabela 4.3 – Propriedades médias do aço-carbono	22
Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade (E) para os corpos de prova 2 a 7.	26
Tabela 5.1 – Principais propriedades dos veículos recomendados por Ross et al. (1993).	49
Tabela 5.2 - Propriedades do modelo do veículo Chevrolet C2500 1994, disponibilizado pelo NCAC (2008).	50
Tabela 5.3 – Testes de qualificação. Ross et al. (1993).	50
Tabela 5.4 - Critério de avaliação para o teste, indicado no NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993).	52
Tabela 6.1 – Rotações máximas em relação ao eixo vertical	55
Tabela 6.2 - Avaliação da defesa na condição normal de uso, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993).	60
Tabela 6.3 - Avaliação da defesa na condição de engaste, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)	64
Tabela 6.4 - Avaliação da defesa na condição irregular com ausência de um poste, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)	68
Tabela 6.5 - Avaliação da defesa na condição irregular sem cinta, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)	72
Tabela 6.6 - Avaliação da defesa com a recomendação de melhoria no parafuso, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)	76
Tabela A.1 - Fator de escala do carregamento e resultados obtidos.	88

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABCR	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer Aided Design
CNT	Companhia Nacional do Transito
CG	Centro de Gravidade
DER/SP	Departamento de Estrada de Rodagem do Estado de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
EDP	Equações Diferenciais Parciais
ET	Especificação Técnica
GMSIE	Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
MGS	Midwest Guardrail System
MEF	Método dos Elementos Finitos
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation
NBR	Norma Brasileira
NCAC	National Crash Analysis Center
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
QUAD	Elementos quadriláteros
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
SUV	Sport-utility Vehicle
TRIA	Elementos triangulares

Lista de Símbolos

I_{XX}	Momento de inércia no eixo X do veículo (<i>roll</i>)	$kg.m^2$
I_{YY}	Momento de inércia no eixo Y do veículo (<i>pitch</i>)	$kg.m^2$
I_{ZZ}	Momento de inércia no eixo Z do veículo (<i>yaw</i>)	$kg.m^2$
I_{XY}	Produto de inércia nos eixos X e Y do veículo	$kg.m^2$
σ_E	Limite de escoamento	Pa
σ_R	Limite de resistência à tração	Pa
e	Alongamento mínimo na ruptura	%
E	Módulo de elasticidade	Pa
ν	Coefficiente de Poisson	adimensional
ρ	Densidade	kg/m^3
S	Tensão de engenharia	Pa
e	Deformação de engenharia	adimensional
σ	Tensão real ou verdadeira	Pa
ε	Deformação real ou verdadeira	adimensional
F	Força	N
A_0	Área inicial do corpo de prova	m^2
ΔL	Variação de comprimento	m
L_0	Comprimento inicial do corpo de prova	m
A	Constante do material para o modelo de Johnson-Cook	Pa
B	Constante do material para o modelo de Johnson-Cook	Pa
n	Constante do material para o modelo de Johnson-Cook	adimensional
C	Constante do material para o modelo de Johnson-Cook	adimensional

$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação	s^{-1}
$\dot{\varepsilon}_0$	Taxa de deformação de referência para o modelo de Johnson-Cook	s^{-1}
PSFAIL	Parâmetro de falha por deformação plástica equivalente do modelo de Johnson-Cook	adimensional
k	Rigidez	N/m
SIGY	Limite de escoamento do modelo SPOTWELD	Pa
ET	Módulo de encruamento do modelo SPOTWELD	Pa
EFAIL	Parâmetro de falha por deformação plástica equivalente do modelo SPOTWELD	adimensional
σ_{vM}	Tensão equivalente de von Mises	Pa
σ_x	Tensão normal na direção X	Pa
σ_y	Tensão normal na direção Y	Pa
σ_z	Tensão normal na direção Z	Pa
σ_{axial}	Tensão axial no parafuso	Pa
$\tau_{cisalhamento}$	Tensão de cisalhamento no parafuso	Pa
ε_{total}	Deformação total	adimensional
$\varepsilon_{elástico}$	Parcela elástica da deformação	adimensional
$\varepsilon_{plástico}$	Parcela plástica da deformação	adimensional
G	Módulo de cisalhamento	Pa
K	Módulo volumétrico	Pa
PC	Pressão de corte na tração para o material do solo	Pa
g	Gravidade	$9,8 \text{ m/s}^2$
σ_1	Tensão máxima principal	Pa
σ_2	Tensão média principal	Pa
σ_3	Tensão mínima principal	Pa

Sumário

Resumo	i
Abstract	ii
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas	x
Lista de Símbolos	xi
1. Introdução	1
2. Objetivos	4
2.1. Caracterização do material	4
2.2. Avaliação do modelo atual	4
2.3. Instalação deficiente	5
2.4. Estudo de melhorias	5
3. Revisão bibliográfica	6
3.1. Continuidade da lâmina	11
3.2. Fixações	11
3.3. Interação solo-poste	14
3.4. Outras simplificações	15
4. Modelo e simplificações	17
4.1. Modelo CAD	17
4.2. Modelo em elementos finitos	19
4.2.1. Malha em elementos finitos da defesa maleável simples	19
4.2.2. Modelo do veículo simplificado	21
4.3. Material das defensas metálicas	21
4.3.1. Ensaio de tração quase-estático	22

4.3.2. Modelo de Johnson-Cook	27
4.3.3. Verificação do modelo de material	29
4.4. Simplificação da continuidade da lâmina e da cinta	31
4.5. Simplificação das fixações parafusadas	32
4.5.1. Verificação do modelo de parafuso	33
4.6. Simplificação da interação solo-poste	35
4.6.1. Translacional paralela à lâmina (direção X)	38
4.6.2. Translacional perpendicular à lâmina (direção Y)	42
4.6.3. Rotacional no eixo do poste (direção Z)	45
4.7. Modelo completo da defesa metálica maleável simples	48
5. Metodologia de avaliação	49
5.1. Testes	49
5.2. Critério de avaliação	51
6. Resultados e discussões	53
6.1. Análise de verificação do ponto crítico de impacto	53
6.2. Análise do modelo completo	56
6.2.1. Análise na condição normal de uso	56
6.2.2. Análise na condição engastada (concreto)	61
6.2.3. Análise na condição irregular 1 – Defesa com ausência de um poste	65
6.2.4. Análise na condição irregular 2 – Defesa sem cinta	68
6.2.5. Proposta de melhoria	72
7. Conclusões	77
8. Trabalhos futuros	79
9. Referências Bibliográficas	80
APÊNDICE A – Material do solo	86
A.1. Verificação do modelo de material	86

1. Introdução

Pela rede rodoviária do Brasil circulam cerca de 42 milhões de automóveis, 7,8 milhões de comerciais leves, 2,3 milhões de caminhões e cerca de 510 mil ônibus (Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias, 2012). Segundo estatísticas da Confederação Nacional do Transporte (2012b), o país possui cerca de 1,6 milhões de quilômetros de estradas e mais de 61% do transporte de cargas é realizado através das rodovias nacionais. E, de acordo com o banco de dados de acidentes de trânsito do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (2012), houve aproximadamente 7.008 acidentes com vítimas fatais no ano de 2011.

De fato, a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2009) estima que, a cada ano, cerca de 1,3 milhões de pessoas são mortas nas estradas do mundo, e até 50 milhões são feridas, das quais muitas permanecem inválidas. Noventa por cento dessas mortes em estradas ocorrem em países em desenvolvimento, que inclui, entre outros, o Brasil.

Dessa forma, a Organização das Nações Unidas (ONU, 2011) lançou a Década de Ação para a Segurança Viária 2011-2020 em mais de 100 países, com o objetivo de evitar 5 milhões de mortes por acidente de trânsito até 2020. Este trabalho situa-se no pilar 2 (Figura 1.1), correspondente à melhoria da segurança e da qualidade de proteção inerente da rede viária para o benefício de todos os usuários.

Figura 1.1 - Pilares de atividades do Plano Global da ONU (ONU, 2011).

Os dados mencionados anteriormente apontam a importância no estudo de melhoria da segurança nas rodovias e também em vias urbanas rápidas e

expressas. Para essa finalidade, são utilizados dispositivos ao longo das vias, conhecidos como defensas, que servem para evitar que um veículo saia da pista ou invada outras vias. Essa proteção é realizada através da absorção da energia cinética e do retorno do veículo à via de forma a não interferir em outros veículos. As defensas podem ser de concreto, em diversas formas de blocos, e também metálicas, que serão o foco deste estudo.

Segundo a norma NBR 6971 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999), a defesa metálica (Figura 1.2) é um “dispositivo de proteção contínua, constituído por perfis metálicos, implantado ao longo das vias com circulação de veículos, projetado na sua forma, resistência e dimensões, para absorver a energia cinética de veículos desgovernados pela deformação do dispositivo”.

Figura 1.2 - Defesa metálica maleável simples (Rodovia Anchieta)

Conforme o estudo realizado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2012a), somente 42,5% das rodovias que necessitam de defensas possui proteções contínuas ou intermitentes. Portanto, deve-se salientar que além de melhorar a eficiência das defensas atuais, deve ser feito um melhor controle nas proteções já existentes, assim como a instalação nas regiões faltantes. A Figura 1.3 ilustra um exemplo de defesa metálica com manutenção precária.

Na literatura são encontrados diversos artigos sobre as defensas metálicas, devido à sua importância na segurança dos ocupantes. Estes artigos relatam resultados de ensaios experimentais e também de simulações numéricas através do uso do Método dos Elementos Finitos.

Figura 1.3 - Exemplo de defesa metálica manutenção (acesso à pista local da Marginal Pinheiros).

No entanto, não foram encontrados trabalhos relativos às defensas utilizadas no Brasil. Portanto, este trabalho tem a finalidade de criar um modelo representativo, em elementos finitos, da defesa metálica maleável simples utilizada nas vias deste país e apresentar possíveis melhorias no modelo atual, baseadas nos resultados obtidos. Para ilustrar a deficiência no comportamento em condições inadequadas de manutenção das defensas metálicas, são avaliadas algumas situações representando casos reais de instalação encontrados nas vias de grande movimentação da cidade de São Paulo.

Dessa forma, o estudo das defensas metálicas no Brasil tratado neste trabalho é organizado conforme descrito a seguir. O segundo capítulo descreve os objetivos almejados por este trabalho, separando-os em metas. No capítulo 3, é feita a revisão bibliográfica, com a apresentação do estado da arte na área de estudo de defensas metálicas, indicando a colaboração de cada trabalho nas definições deste projeto. No capítulo 4 é apresentado o modelo elaborado, com a descrição dos métodos utilizados para obtenção dos parâmetros de modelagem. A seguir, no capítulo 5 é apresentada a metodologia de análise utilizada, com a descrição do veículo a ser impactado e os critérios de avaliação. No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos nas análises para as diversas condições de instalação, bem como suas avaliações e uma proposta de melhoria. Finalmente, no capítulo 7 encontram-se as conclusões, com a descrição sucinta dos resultados e das principais conquistas do trabalho. No capítulo 8 são indicados possíveis trabalhos decorrentes desta pesquisa.

2. Objetivos

Os principais objetivos deste projeto são:

1. Caracterizar as propriedades do material utilizado nas defensas metálicas;
2. Avaliar o modelo da defesa maleável simples atual no que diz respeito à capacidade de conter um veículo desgovernado, através da análise em elementos finitos;
3. Alertar sobre a perda na eficiência das defensas quando estas possuem deficiências na manutenção;
4. Apresentar melhorias de fácil execução nas defensas metálicas, com base nos resultados encontrados.

2.1. Caracterização do material

A caracterização do material tem uma grande relevância no cálculo de elementos finitos. Se os parâmetros do material não estiverem corretos, os resultados encontrados não serão representativos.

Um dos objetivos deste trabalho é caracterizar o aço utilizado nas defensas metálicas, pois na literatura encontram-se somente as propriedades mínimas do material. Foram realizados ensaios quase-estáticos de tração uniaxial de corpos retirados de uma lâmina, para a aquisição de parâmetros de Johnson-Cook.

2.2. Avaliação do modelo atual

Para a avaliação das defensas metálicas da atualidade, foram elaboradas as geometrias em CAD dos componentes da defesa metálica maleável simples, a partir dos desenhos técnicos obtidos na norma NBR 6971 (ABNT, 1999). Para este fim, foi utilizada uma ferramenta de pré-processamento em elementos finitos, que possui ferramentas de geração de geometria. Tais geometrias foram geradas em extensões livres, como IGES, STEP e Parasolid, para futura utilização.

A partir das geometrias criadas, foram geradas as discretizações em elementos finitos, utilizando elementos de casca quadrangulares e triangulares. Por

motivo de custo computacional, simplificações, como a utilização de molas não lineares ao longo do poste para representação da interação solo-poste e a utilização de modelagem SPOTWELD para as ligações parafusadas, são desenvolvidas.

Os testes a serem analisados foram selecionados dos procedimentos indicados por Ross et al. (1993), no *Report 350*, do *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)* dos Estados Unidos, utilizando um veículo de 2000 quilogramas a 100 quilômetros por hora. Os procedimentos e as condições estão mais bem descritos no capítulo 5.

2.3. Instalação deficiente

Através da observação de casos irregulares de manutenção das defensas metálicas encontradas em vias de grande movimentação, são avaliados casos reais de instalação para alertar os órgãos responsáveis pela fiscalização e manutenção destas. As deficiências no comportamento sob o impacto de veículo são apontadas em cada caso.

2.4. Estudo de melhorias

A última etapa deste trabalho consiste no estudo de melhoria nas defensas metálicas, de forma a obter maior segurança aos ocupantes dos veículos.

Para este fim, é avaliada, por meio da simulação numérica, uma sugestão interpretadas pelo autor, através dos resultados obtidos. Grandes mudanças no processo de fabricação e de instalação são evitadas, de modo a não elevar excessivamente o custo de fabricação dos componentes.

3. Revisão bibliográfica

Defensas metálicas são extensivamente estudadas na literatura tanto através de ensaios experimentais, quanto simulações virtuais através do método dos elementos finitos.

Em 1997, Reid et al. (1997) propuseram o desenvolvimento de um novo sistema de defesa metálica, baseando-se na mudança da frota do país, com o aumento de automóveis de maior porte, como *pick-ups*, vans e SUVs (*sport-utility vehicles*). O novo sistema, chamado de *Buffalo Rail*, possui um formato diferente da seção transversal (elevando a altura total do sistema), menor espessura e aumento no espaçamento entre os postes, que permitiu sua validação em relação ao novo critério adotado na época, o nível de teste 3 do NCHRP *Report 350* (Ross et al., 1993).

Plaxico, Patzner e Ray (1998) apresentaram em seu trabalho uma forma de representar a interação solo e poste utilizando molas não lineares distribuídas nos nós da face externa do poste de madeira. A comparação dos resultados com testes experimentais indicaram a validade da utilização desta simplificação nos modelos de análise da defesa completa.

Engstrand (2000), em sua dissertação de mestrado, teve o objetivo de melhorar o comportamento de um modelo de defesa metálica dos Estados Unidos, para atender aos requisitos do teste 3-11 do NCHRP *Report 350* (Ross et al., 1993). Para isso, avaliou o comportamento das ligações entre as lâminas, a conexão poste-lâmina e um teste físico realizado com um veículo de 2000 kg, no qual a defesa não foi capaz de reter o veículo. Através destes resultados, elaborou três principais modificações no modelo: a utilização de uma chapa de mesmo formato da lâmina atrás da lâmina, na região de fixação ao poste; reposicionamento das uniões entre as lâminas para a região entre os postes; elevação da altura da lâmina em 100 milímetros. Tais modificações possibilitaram a aprovação no teste 3-11.

Plaxico, Ray e Hiranmayee (2000) fizeram um estudo comparativo do desempenho de dois tipos semelhantes de defesa metálica utilizada nos Estados Unidos, denominados de G4(1W) e G4(2W). A diferença entre os modelos está na utilização de um perfil maior de poste de madeira no caso do G4(1W). A avaliação

foi feita a partir de resultados de análises em elementos finitos, comparando resultados como deflexão, redirecionamento do veículo e fatores de risco dos ocupantes. O modelo G4(2W) foi validado através de resultados de um teste de colisão em escala real. Na modelagem da defesa metálica, foram utilizadas molas não lineares no lugar dos parafusos e molas lineares nas seções finais das lâminas. Na interação solo e poste, os autores utilizaram molas não lineares distribuídas na face do poste enterrado. Ambos os modelos apresentaram um desempenho semelhante, aprovados conforme os requisitos do teste 3-11 do *NCHRP Report 350* (Ross et al., 1993).

Tabiei e Wu (2000) sintetizaram em seu trabalho as possíveis simplificações na modelagem das defensas para uma simulação acurada de impacto. Dentre as simplificações, verificaram a melhor metodologia numérica para simplificar fixações parafusadas. Além disso, compararam a utilização de malha lagrangeana ou eulereana para a representação do solo para adquirir as rigidezes das molas não lineares. Por fim, apresentaram a mesma formulação utilizada por Plaxico, Ray e Hiranmayee (2000) para o cálculo da rigidez da mola linear nas seções finais das lâminas.

Ray, Plaxico e Engstrand (2001) descreveram e resumiram a avaliação das uniões entre as lâminas apresentada na dissertação de mestrado de Engstrand (2000).

Em sua tese de doutorado, Plaxico (2003) avaliou o efeito das guias (meios-fios) no impacto do carro com as defensas metálicas e criou diretrizes para suas utilizações. Os testes mostraram que muitas vezes a existência de guias pode resultar em tragédias arremessando o carro e causando capotamento. Os diversos tipos de guias foram avaliados a partir de testes físicos e simulações numéricas. Foi recomendada a não utilização de guias em vias rápidas.

Sennah, Samaan e Elmarakbi (2003) apresentaram um estudo comparativo de modelos de defensas utilizadas no Canadá, com postes de madeira e diferentes perfis de aço, utilizando a ferramenta de elementos finitos LS-DYNA®.

No mesmo período, Vesenjok e Ren (2003) apresentaram um estudo comparativo de quatro modelos de espaçadores, com o objetivo de melhorar o comportamento inicial do impacto através da deformação destes componentes. A proposta com o espaçador hexagonal apresentou o melhor resultado, por absorver o maior nível de absorção de energia cinética.

Atahan e Cansiz (2005) concentraram seus estudos no impacto na transição entre ponte e defesa metálica. Os autores modelaram em elementos finitos um teste real de impacto feito para avaliar uma transição conforme os critérios do NCHRP *Report 350* (Ross et al., 1993). A transição foi reprovada no teste, pois ocorreu o capotamento do veículo. Através de resultados qualitativos e quantitativos, identificaram que o problema no projeto avaliado era a altura da lâmina e propuseram uma elevação desta, que resultou na aprovação conforme os mesmos critérios.

Grzebieta et al. (2005) mostraram testes de impacto feitos em escala real, de veículos em diversas barreiras, como de concreto, metálica e de plástico cheias de água. São apresentados sinais de acelerações e imagens de cada tipo de barreira, inclusive casos em que o acidente resultaria em morte. Por fim, os autores afirmam que deveria haver uma aproximação maior entre as montadoras de automóveis e os responsáveis pelos projetos de segurança em vias, para aumentar a segurança dos ocupantes.

Wu e Thomson (2007) estudaram a interação do poste e solo com carregamentos quase-estáticos e dinâmicos. Para que esse estudo fosse possível, fizeram testes experimentais a baixa taxa de deformação com a utilização de um cinto de tração e a alta taxa de deformação com um veículo de impacto. Os resultados foram comparados com simulações em elementos finitos, utilizando dois tipos diferentes de materiais da biblioteca do LS-DYNA®. Nos testes experimentais, conclui-se que a resistência dinâmica do conjunto poste-solo era aproximadamente duas vezes maior que no comportamento quase-estático, principalmente devido à diferença do comportamento à taxa de deformações do aço. Nas simulações numéricas os resultados foram mais satisfatórios no uso do modelo “*soil and concrete*” (MAT078). Os parâmetros apresentados pelos autores podem ser utilizados se não houver deflexão maior do que 280 mm no poste.

Faller et al. (2007) concentraram seus estudos no *Midwest Guardrail System* (MGS). Estudaram variações em parâmetros do projeto, como espaçamento entre os postes, altura da lâmina, para atender aos requisitos do nível de teste 3 do NCHRP *Report 350* (Ross et al., 1993). Para essa finalidade, foram feitos testes experimentais e simulações no programa Barrier VII. As modificações nos parâmetros mostraram melhores comportamentos, tendo bons resultados em todos

os testes. No entanto, os autores lembram que ainda deve ser estudado o comportamento dos terminais desse novo projeto.

No mesmo ano, o mesmo grupo de pesquisadores, tendo como autores Polivka et al. (2007), estudaram o comportamento da transição entre dois modelos de lâminas, chamados de *W-Beam* e *Thrie-Beam* (aqui, conhecido como tripla onda), que não haviam sido validados com os critérios de segurança. Os testes experimentais indicaram que a transição rápida de rigidez leva à ruptura e o capotamento do veículo. Por fim, desenvolveram um novo modelo de transição e um sistema de enrijecimento na defesa com lâmina em W (menos rígida) que resultaram na aprovação segundo os critérios adotados.

Ainda no mesmo ano, Faller et al. (2007) fizeram ensaios experimentais para avaliar os sistemas G4(1W) modificado e MGS, para permitir as definições de novos procedimentos e diretrizes de ensaios de colisão. Foram feitos cinco ensaios sendo: com *pick-up* de 1750 kg de duas portas e *pick-up* de 1500 kg de quatro portas no sistema G4(1W). No sistema MGS, além desses mesmos veículos, foi feito um ensaio com um veículo de passeio. A partir dos resultados, definiram que o melhor procedimento de avaliação é com a utilização da *pick-up* de 1500 kg de quatro portas, pois apresenta a altura do CG próxima aos veículos SUV.

Shen et al. (2008) investigaram o efeito da diferença relativa entre a altura do centroide do veículo e da altura de montagem da lâmina e a influência do coeficiente de atrito entre o solo e a face inferior de um modelo simplificado do veículo. Sua principal conclusão foi que com 600 mm de diferença na altura, ocorre a maior absorção de energia cinética através da deformação plástica.

Em um trabalho mais recente, Reid et al. (2009) fizeram outro estudo verificando o efeito do distanciamento da defesa metálica em relação à via no comportamento do impacto. O objetivo foi obter a menor razão (calculada entre comprimento da defesa ao longo desse distanciamento e o distanciamento propriamente dito) sem reprovar nos requisitos do NCHRP *Report 350* (Ross et al., 1993). A conclusão foi que se forem utilizadas defensas MGS (*Midwest Guardrail System*), que tem como principais diferenças a profundidade do poste no solo, a altura da lâmina e a localização da junção entre lâminas, é possível chegar a uma razão de 5:1, enquanto que no sistema comum, a mínima razão era de 15:1. Este resultado foi verificado tanto em testes experimentais quanto em simulações numéricas.

A Figura 3.1 e a Tabela 3.1 agrupam as referências descritas conforme a natureza e o tipo de trabalho realizado, respectivamente.

Figura 3.1 - Agrupamento das referências bibliográficas, conforme a natureza do trabalho.

Tabela 3.1 - Agrupamento das referências bibliográficas, conforme o tipo de trabalho.

Desenvolvimento de melhorias	Estudo de comportamento
Reid et al (1997); Engstrand (2000); Atahan e Cansiz (2005); Faller et al. (2007); Polivka et al (2007);	Ray, Plaxico e Engstrand (2001); Plaxico (2003); Grzebieta et al (2005); Faller et al (2007); Shen et al (2008); Reid et al (2009);
Estudo comparativo	Simplificações
Plaxico, Ray e Hiranmayee (2000); Sennah, Samaan e Elmarakbi (2003); Vesenjak e Ren (2003);	Plaxico, Patzner e Ray (1998); Tabiei e Wu (2000); Wu e Thomson (2007);

A partir dos artigos discutidos acima, foi definida a metodologia que será empregada no cálculo das defensas metálicas. Simplificações, como a utilização de molas em substituição da interação solo-poste, são utilizadas no modelo, pois não

há a necessidade de fazer uma análise em escala completa para a avaliação qualitativa do modelo atual. Esta, e as demais simplificações, são discutidas abaixo, relacionando trabalhos anteriores.

3.1. Continuidade da lâmina

Para que o modelo da defesa metálica não fosse muito grande com relação ao comprimento das lâminas, Tabiei e Wu (2000) propuseram a utilização de uma mola linear com rigidez equivalente à rigidez axial da lâmina, a partir de uma região em que lâmina passa a ter pouco efeito no comportamento durante o impacto.

3.2. Fixações

Atualmente, os programas de elementos finitos permite o modelamento de componentes fixos por parafusos através de carregamentos chamados de “*bolt load*”. Esse recurso permite que a partir da geometria do parafuso e dos componentes a serem fixados, seja possível obter o comportamento de pressão e atrito resultantes do aperto do parafuso.

No entanto, da mesma forma que a interação solo-poste, o custo computacional passa a ser elevado, quando se considera o aperto em cada parafuso do conjunto a ser analisado.

Uma possível simplificação é a utilização de elementos rígidos ligando as peças parafusadas. No entanto, essa representação desconsidera a elasticidade do parafuso e o atrito entre os componentes. Para melhor representar esse comportamento, Plaxico, Ray e Hiranmayee (2000) e Tabiei e Wu (2000) propuseram a utilização de molas não lineares, com rigidez extraída através de um cálculo de um parafuso isolado.

No entanto, segundo o estudo realizado por Ray, Plaxico e Engstrand (2001), as falhas nas defensas, quando ocorrem, tipicamente apresentam o mecanismo de falha nas lâminas, e não nos parafusos. As imagens na Figura 3.2 mostram exemplos das falhas típicas. Desta forma, o comportamento destas fixações passa a ser um efeito secundário. Portanto, neste trabalho buscou-se a utilização de uma modelagem mais simplificada.

Figura 3.2 – Falhas típicas em defensas metálicas. Figuras extraídas de Ray, Plaxico e Engstrand (2001).

Sonnenschein (2008) avaliou em seu trabalho, três modelagens de fixações parafusadas, sendo duas usuais e uma proposta por ele. Tais modelagens são ilustradas na Figura 3.3. A primeira das modelagens é com a utilização de elementos de viga de seção equivalente, ligados por elementos rígidos aos furos. A segunda abordagem é através de elementos sólidos, aplicando a pré-carga (modelagem apresentada no início desta subseção). A terceira modelagem, proposta pelo autor, mescla as duas primeiras modelagens, porém com a utilização de elementos de ponto de solda (*spotweld*) ligados em elementos de placa representando a cabeça do parafuso e a porca. Este modelo, apesar de se mais simples que a segunda modelagem, ainda apresenta elevado custo computacional, pois é necessário utilizar a pré-carga, que deve ser introduzida quase-estaticamente. Neste trabalho, optou-se por utilizar o tipo de elemento de ponto de solda, que permite a definição de forças ou tensões de ruptura, ligados por elementos rígidos de ligação (modelagem da Figura 3.3a, com a substituição do elemento de viga por elemento de ponto de solda).

Figura 3.3 - Modelagens de fixações parafusadas. (a) modelagem por elementos de viga ligados por elementos rígidos aos furos; (b) modelagem por elementos sólidos e pré-carga; (c) modelagem proposta pelo autor, com a utilização de elementos de ponto de solda. Figuras extraídas de Sonnenschein (2008)

3.3. Interação solo-poste

A interação entre o solo e o poste, considerando-se o contato, o atrito e a rigidez do solo, tem grande influência no comportamento das defensas metálicas durante o choque de um veículo. No entanto, para a simulação do choque pelo método dos elementos finitos, a consideração desta interação em cada poste da defesa impossibilita o cálculo devido ao custo computacional e o extenso tempo necessário para obter os resultados.

Portanto, alguns autores, como Plaxico, Patzner e Ray (1998), Plaxico, Ray e Hiranmayee (2000) e Tabiei e Wu (2000), propuseram a utilização de molas não lineares presas ao poste para representar de forma simplificada o comportamento da interação. Os primeiros autores utilizaram molas em todos os nós da face externa do poste (inteiriço, de madeira) em contato com o solo, com rigidez que varia linearmente com a profundidade no solo. No entanto, informações mais detalhadas dos parâmetros das molas não foram dadas pelos dois primeiros autores. Tabiei e Wu (2000) utilizaram os resultados de análises em elementos finitos de um poste envolto por elementos sólidos representando o solo. Para a obtenção das rigidezes, foram aplicados deslocamentos na direção transversais ao poste e rotação no eixo do poste. Para a representação do comportamento da interação entre o solo e o poste, foram utilizados elementos com formulação Euleriana na região do solo. A partir dos resultados de força por deslocamento obtidos, foram utilizadas molas não lineares distribuídas ao longo da profundidade. O modelo de representação utilizado por esses autores está na Figura 3.4.

Os dados do material do solo são obtidos do trabalho de Wu e Thomson (2007), que compararam resultados dos cálculos numéricos com experimentos com carregamentos quase-estáticos e dinâmicos. Apesar do solo se comportar diferentemente em relação ao solo do Brasil, serve como um bom parâmetro, considerando-se que a mesma defesa metálica será utilizada em diferentes terrenos ao longo das vias.

Figura 3.4 - Modelo de simplificação de interação solo-poste. (a) modelo simplificado com molas não lineares; (b) modelo com solo representado por elementos Eulerianos. Figuras extraídas de Tabiei e Wu (2000)

3.4. Outras simplificações

No modelo preliminar para verificação do ponto crítico de impacto, o veículo foi representado por bloco, de geometria aproximada, formado por elementos rígidos com massa concentrada e momentos de inércia equivalentes no centro de gravidade (CG) do veículo. Shen et al. (2008) utilizaram uma simplificação semelhante, porém com elementos sólidos deformáveis, e o modelo apresentou resultados satisfatórios (Figura 3.5).

Nas análises finais foi utilizado um modelo validado pelo Centro Nacional de Análise de Colisão (em inglês, *National Crash Analysis Center*, NCAC, 2008) da Universidade George Washington. Demais detalhes do veículo utilizado são descritos na próxima seção.

Figura 3.5 – Modelagem com veículo simplificado. (a) veículo representado por um bloco sólido; (b) comparação dos resultados do cálculo numérico com um ensaio experimental. Figuras extraídas de Shen et al. (2008)

4. Modelo e simplificações

A metodologia empregada neste projeto é baseada em simulações numéricas através do método dos elementos finitos, com o uso de programas comerciais largamente utilizados como o Abaqus® e o LS-DYNA®. O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais parciais (EDP), bem como de equações integrais.

Como as análises são de impacto entre o veículo e a defesa metálica, o evento ocorre em um curto período e, portanto, é utilizado o método de integração explícita no tempo, que é uma aproximação utilizada na análise numérica para a obtenção de soluções numéricas de equações diferenciais ordinárias e parciais dependentes do tempo. Maiores detalhes desses métodos podem ser obtidos nos trabalhos de Bathe (1996) e Alves (2007, 2008 e 2012).

Neste capítulo são apresentadas as etapas para a obtenção dos parâmetros do modelo da defesa maleável simples elaborado, como a elaboração das geometrias, a geração da malha de elementos finitos, o modelo de material da defesa e as simplificações introduzidas.

4.1. Modelo CAD

Através dos desenhos disponíveis no documento NBR 6971 (ABNT, 1999), foram geradas as geometrias, em formato CAD, com a utilização da ferramenta MSC.Sofy®. A montagem de um conjunto da defesa metálica maleável simples pode ser verificada na Figura 4.1.

Neste modelo de defesa, conforme a norma nacional, o espaçamento entre os postes deve ser de 2 metros e estes devem ser enterrados 1,1 metro. As dimensões globais dos postes encontram-se na Figura 4.2

Figura 4.1 - Montagem das geometrias que compõem da defesa maleável simples

Figura 4.2 - Dimensões da Defesa Maleável Simples, de acordo com a norma ABNT 6971 (1999)

4.2. Modelo em elementos finitos

4.2.1. Malha em elementos finitos da defesa maleável simples

O modelo em elementos finitos da defesa maleável simples foi gerado através do uso do programa MSC.Sofy®. As malhas de elementos foram cuidadosamente criadas com os seguintes critérios de qualidade:

- Tamanho: mínimo 5 mm – com o objetivo de garantir o incremento de tempo no método explícito de integração que, ao mesmo tempo, garanta bons resultados e não eleve excessivamente o custo computacional;
- Ângulo interno dos elementos retangulares (QUAD): mínimo 45° e máximo 135° – evita que sejam utilizados elementos muito inclinados;
- Ângulo interno dos elementos triangulares (TRIA): mínimo 20° e máximo 120° – evita que sejam utilizados elementos semelhantes a agulhas;
- *Warpage*: máximo 12° – ângulo máximo entre as normais de dois triângulos que seriam formados se o retângulo fosse cortado na diagonal (distorção);
- Jacobiano: mínimo 0,6 – razão entre o mínimo e o máximo determinante da matriz Jacobiana (matriz de transformação do elemento para um elemento ideal 1 x 1 un);
- Taper: máximo 0.5 – razão entre arestas opostas do quadrilátero;
- Aspect: máximo 5 – máxima razão entre duas arestas adjacentes;
- Furos: todos os furos receberam malhas radiais uniformemente distribuídas, de largura 5 mm;
- Visual: a malha também passou por uma avaliação visual, garantindo maior uniformidade. Além disso, evita-se a utilização de elementos triangulares em regiões de maior importância, como bordas e regiões com grandes mudanças de direção, como dobras.

O conjunto montado pode ser visto na Figura 4.3. No modelo final foram representadas cinco lâminas (mostradas apenas três), sendo que a lâmina central, que recebe o impacto do veículo, possui malha mais refinada. O poste C-110 (identificado na Figura 4.1) também recebeu malha mais grosseira na região que fica

abaixo da terra para reduzir o número total de elementos. Os detalhes podem ser visualizados na Figura 4.4.

Figura 4.3 - Montagem do modelo em elementos finitos

Figura 4.4 - Detalhes na montagem da defesa.

O modelo da defesa metálica é composto por 95495 elementos e 102303 nós. Foram utilizados elementos com integração reduzida (utilizando somente um ponto de Gauss) e controle de “*hourglass*” (modos espúrios de deformação sem energia).

4.2.2. Modelo do veículo simplificado

Para as análises de verificação do ponto crítico de impacto, foi elaborado um modelo simplificado do veículo, representado por um bloco de dimensões semelhantes a um veículo popular, com massa concentrada e momento de inércia no CG aproximado do veículo. A massa concentrada considera um veículo carregado, com massa total de 2000 kg. O modelo pode ser visto na Figura 4.5 e os dados de massa e momento de inércia na Tabela 4.1.

Figura 4.5 - Modelo em elementos finitos do veículo rígido

Tabela 4.1 – Massa e momento de inércia do veículo

Massa (kg)	I_{xx} (kg.m²)	I_{yy} (kg.m²)	I_{zz} (kg.m²)	I_{xy} (kg.m²)
2000	940	4700	4800	100

4.3. Material das defensas metálicas

O material utilizado na fabricação dos componentes da defesa metálica devem atender à norma ABNT NBR6650 CF-24 (ABNT, 1986), portanto possuem as características mínimas apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas mínimas do material

σ_E (MPa)	σ_R (MPa)	Alongamento mínimo (mm)	
Limite de escoamento	Limite de resistência à tração	$e < 3,0$ mm	$e \geq 3,0$ mm
240	370	20	23

Tais propriedades são adquiridas e verificadas a partir dos ensaios de tração uniaxiais de corpos de provas. A Tabela 4.3 identifica as demais propriedades médias comuns do aço-carbono. O valor do Módulo de Elasticidade desta tabela é utilizado de referência para a escolha do ensaio para a extração dos parâmetros de Johnson-Cook.

Tabela 4.3 – Propriedades médias do aço-carbono

E (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Módulo de elasticidade	Coefficiente de Poisson	Densidade
205000	0,3	7800

4.3.1. Ensaio de tração quase-estático

Ensaio de tração é um teste físico destrutivo no qual um corpo de prova de geometria padrão é submetido a um carregamento axial de tração deformando-o, normalmente, até a sua ruptura. Neste ensaio são medidos: o carregamento aplicado (força) através de um dinamômetro e a deformação do corpo de prova, através do deslocamento medido na garra da máquina, ou diretamente através de medidores de deformação acoplados nos corpos de prova. Através deste ensaio é possível traçar um gráfico de força por deslocamento, ou mais comumente tensão por deformação, no qual é possível analisar o comportamento do material. No ensaio de tração quase-estático, o carregamento aplicado é feito de forma lenta, resultando em uma taxa de deformação baixa, desconsiderando-se a resposta dinâmica do material. O equacionamento para extrair a curva tensão deformação a partir dos resultados da carga e do deslocamento será descrito a seguir.

A tensão uniaxial é calculada a partir da força axial dividido pela área inicial. Essa tensão é conhecida como tensão de engenharia.

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

A deformação de engenharia é dada pela variação do comprimento dividido pelo comprimento inicial:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

No entanto, estas grandezas não são úteis para uso no cálculo de elementos finitos, pois não consideram a variação da área, no caso da tensão, e da variação instantânea do comprimento. Para que esses valores sejam utilizáveis, devem ser corrigidos para tensão e deformação verdadeiras.

Supondo a conservação de volume durante a deformação, temos que:

$$A_0 \cdot L_0 = A \cdot L \Rightarrow A = \frac{A_0 \cdot L_0}{L} \quad (3)$$

Assim,

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{L}{L_0} \quad (4)$$

Comparando-o com as equações (8) e (9), resulta em:

$$\sigma = S \cdot (1 + e) \quad (5)$$

Para o caso da deformação verdadeira, considerando um Δl infinitesimal, temos:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{\infty} \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{l} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} \quad (6)$$

Integrando a equação (13) e comparando à equação (9):

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + e) \quad (7)$$

As curvas típicas de tensão por deformação de engenharia e verdadeira podem ser vistas na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Curva de tensão por deformação verdadeira e de engenharia

Particularmente, para a definição das propriedades do material que compõe as defensas metálicas, foram realizados testes em corpos de prova planos no formato apresentado na Figura 4.7, na máquina Instron do Laboratório do GMSIE, ilustrada na Figura 4.8. Os corpos de prova foram extraídos de uma lâmina no sentido do seu comprimento.

Figura 4.7 - Corpo de prova sem entalhe

Figura 4.8 - Máquina de tração Instron

Foram realizados dez ensaios de tração a taxas de deslocamento que configuram a condição quase-estática (que resultam na taxa de deformação de $1\text{E-}4 \text{ s}^{-1}$). Os corpos de prova foram retirados de lâmina, no sentido do comprimento. A Figura 4.9 mostra fotos tiradas no instante inicial e final (ruptura) do corpo de prova 2 e na Figura 4.10 são apresentadas seis curvas obtidas nos testes de tração.

(a)

(b)

Figura 4.9 - Foto do ensaio do CP02. (a) instante inicial; (b) instante da ruptura

Figura 4.10 - Curva de Tensão Verdadeira por Deformação Verdadeira

As curvas encontradas indicam que as propriedades mínimas do material NBR 6650 CF-24 (1986), indicadas na Tabela 4.2 da seção 4.3.2, foram respeitadas.

A partir destes resultados são obtidos os parâmetros do modelo de material de Johnson-Cook. A metodologia empregada para a obtenção destes parâmetros segue o trabalho de Yoneda e Morales (2009).

Através dos pontos da região linear, foi encontrado o módulo de elasticidade por regressão linear de cada corpo de prova, que está sintetizado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade (E) para os corpos de prova 2 a 7.

Corpo de Prova	CP02	CP03	CP04	CP05	CP06	CP07	Literatura
E (GPa)	203,26	189,46	182,40	188,18	180,04	181,39	205

O corpo de prova 2 foi escolhido para a obtenção dos demais parâmetros, por apresentar módulo de elasticidade próximo à literatura e um comportamento médio dos ensaios realizados.

4.3.2. Modelo de Johnson-Cook

Para a representação do material utilizado nos componentes das defensas metálicas, é utilizado o modelo de Johnson-Cook, disponível na ferramenta LS-DYNA®. O modelo é bastante usado em análises de impacto, devido à sua simplicidade em comparação a outros modelos.

Neste trabalho, é utilizada a versão simplificada deste modelo (MAT098 do LS-DYNA®), que apresenta dependência somente da taxa de deformação, desprezando o termo dependente da temperatura. A seguinte equação rege o modelo:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \cdot \left[1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \quad (8)$$

Os parâmetros A, B, C e n são constantes do material e são determinadas experimentalmente por meio de processo de caracterização. $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação e $\dot{\varepsilon}_0$ é a taxa de deformação de referência. O modelo de Johnson e Cook é amplamente empregado devido à simplicidade de obtenção das constantes do modelo, em comparação com outros modelos. Tal simplicidade está ligada ao fato dos efeitos de encruamento, da taxa de deformação e de fluência estarem desacoplados no modelo constitutivo, ou seja, considera-se que tais efeitos sejam independentes.

A obtenção dos parâmetros A, B e n do modelo de Johnson-Cook é feita através de ajuste da curva na região plástica. A Figura 4.11 apresenta os pontos da curva plástica, encontrados através do ensaio, e o ajuste de curva realizado através da ferramenta *Curve Fitting Tool* do programa MATLAB.

Os valores encontrados foram:

$$A = 289,5 \text{ MPa} \quad B = 446,1 \text{ MPa} \quad n = 0,6505$$

Devido à falta de ensaios dinâmicos para a obtenção do parâmetro C do modelo, é utilizado o valor de 0,0162, encontrado por Schwer (2003) no ensaio

quase estático do material ASTM A36, que apresenta composição química e propriedades mecânicas semelhantes ao material utilizado nas defensas.

Figura 4.11 - Ajuste da curva plástica do corpo de prova 2

A taxa de deformação do ensaio é encontrada através da regressão linear dos pontos de deformação em função do tempo, retirados da região uniforme da curva tensão-deformação, conforme ilustrado na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Taxa de deformação do corpo de prova 2

Segundo o estudo realizado por Schwer (2003), a utilização de parâmetros de Johnson-Cook com a taxa de deformação de referência para o ensaio de tração quase estático (aproximadamente $1\text{E-}4\text{ s}^{-1}$) apresenta resultados melhores para toda a faixa de taxa de deformação. Desta forma, neste trabalho, são utilizados diretamente os valores de A, B e n encontrados no ajuste da Figura 4.11 e a taxa de referência ($\dot{\epsilon}_0$) da Figura 4.12.

Como critério de falha, é utilizado o da máxima deformação plástica equivalente. Este critério é definido através o parâmetro PSFAIL do modelo de Johnson-Cook simplificado do programa LS-DYNA®. Este critério de falha possui um funcionamento simples, utilizando o estado de deformação plástica efetiva do elemento para desativá-lo ao atingir o valor limite. Como o dano se inicia no ponto de tensão máxima, com a extricção, é utilizada a deformação no ponto máximo da curva do corpo de prova 2, que corresponde ao valor de 24%. Desta forma, considera-se que a fratura ocorre logo no início do dano.

Portanto, os parâmetros de material de Johnson-Cook a serem inseridos no modelo são:

$$\begin{array}{lll} E = 203,26\text{ GPa} & \nu = 0,3 & \rho = 7800\text{ kg/m}^3 \\ A = 289,5\text{ MPa} & B = 446,1\text{ MPa} & n = 0,6505 \\ C = 0,0162 & \dot{\epsilon}_0 = 0,000132\text{ s}^{-1} & PSFAIL = 0,24 \end{array}$$

4.3.3. Verificação do modelo de material

Para averiguar a consistência dos dados obtidos, foi realizada uma simulação do ensaio de tração uniaxial. O corpo de prova foi simplificado, com a modelagem de um quarto da região de seção uniforme, com condições de contorno de simetria, conforme ilustrado na Figura 4.13.

Na extremidade do corpo, foi introduzida uma condição de contorno de velocidade constante a $4,17\text{E-}3\text{ mm/s}$, que corresponde à taxa de deslocamento medida do ensaio experimental do corpo de prova 2.

Figura 4.13 - Modelo de um quarto do corpo de prova

O resultado de tensão de von Mises por deformação efetiva extraído do programa, cruzado com a curva do ensaio experimental é apresentado na Figura 4.14. A curva encontrada apresenta boa correlação com o teste físico, o que permite sua utilização no modelo completo.

Figura 4.14 - Comparativo do resultado da simulação com o ensaio experimental do corpo de prova

4.4. Simplificação da continuidade da lâmina e da cinta

Para a simplificação da continuidade da lâmina e da cinta, foi utilizada a equação que relaciona a rigidez de uma mola equivalente aos parâmetros de geometria e de material dos componentes, a partir da Lei de Hooke:

$$k = \frac{EA}{L_0} \quad (9)$$

Para que a constante elástica k seja encontrada, é necessário conhecer os valores de módulo de elasticidade (E), área da seção transversal e comprimento de referência. Nesta simplificação, foi considerado que o poste seguinte ao fim da representação é rigidamente engastado. Portanto, têm-se que L_0 é equivalente a dois metros, referente à distância entre dois postes. Através da ferramenta MSC.Sofy[®], foram obtidas as áreas das seções transversais da lâmina e da cinta. Os valores encontrados foram, respectivamente, $1,4215E-3 \text{ m}^2$ e $3,2725E-4 \text{ m}^2$. Assim,

$$k_{Lâmina}^{Total} = \frac{210E9 * 1,4215E-3}{2} = 149.257.500 \text{ N/m} \quad (10)$$

$$k_{Cinta}^{Total} = \frac{210E9 * 3,2725E-4}{2} = 34.361.250 \text{ N/m} \quad (11)$$

Foram utilizados elementos de mola (*ELEMENT_DISCRETE, com propriedades *SPRING_LINEAR) em paralelo, fixados em cada nó do final da lâmina e da cinta. Portanto, para associação de molas em paralelo, cada mola individual deve ter a rigidez total dividido pela quantidade de nós. No modelo existem 50 nós na seção final da lâmina e 7 nós na cinta. Portanto,

$$k_{Lâmina} = \frac{k_{Lâmina}^{Total}}{N_{Nós, Lâmina}} = \frac{149.257.500}{50} = 2.985.150 \text{ N/m} \quad (12)$$

$$k_{Cinta} = \frac{k_{Cinta}^{Total}}{N_{Nós, Cinta}} = \frac{34.361.250}{7} = 4.908.750 \text{ N/m} \quad (13)$$

4.5. Simplificação das fixações parafusadas

Sabe-se através da especificação técnica do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (2006), que os parafusos utilizados na montagem da defesa metálica são feitos de aço que deve atender aos requisitos da norma NBR8855 (ABNT, 1991) classe 4.6. Nesta norma, a classe do parafuso define a resistência à tração e o limite de escoamento através da sua numeração. Sendo “i” o primeiro número e “j” o segundo número e, portanto, classe i.j:

- Limite de resistência à tração: primeiro número multiplicado por 100:

$$\sigma_R = i \times 100 = 4 \times 100 = 400 \text{ MPa} \quad (14)$$

- Limite de escoamento: segundo número multiplicado pelo limite de resistência, dividido por 10:

$$\sigma_E = \frac{j \times \sigma_R}{10} = j \times i \times 10 = 4 \times 6 \times 10 = 240 \text{ MPa} \quad (15)$$

Como a norma não estabelece o alongamento mínimo na ruptura, este valor foi retirado do catálogo de informações técnicas da Würth (2013), que indica o valor de 22%.

A partir destes três valores, e sabendo-se as características básicas do aço indicadas na Tabela 4.3, são calculados os dados de entrada do MAT100 (*MAT_SPOTWELD), identificados na Figura 4.15.

Figura 4.15 - Propriedades do material das fixações (fora de escala).

4.5.1. Verificação do modelo de parafuso

Para verificar o comportamento do modelo de parafuso utilizando os parâmetros mencionados, foi realizada uma análise de tração em um modelo de duas placas parafusadas, ilustrado na Figura 4.16. Esse conjunto parafusado é uma seção do modelo da lâmina e, portanto, contempla todas as características do modelo completo: elementos de placa de 3 milímetros de espessura com o material caracterizado, parafuso M16 e contato entre as placas.

Figura 4.16 - Modelo de tração de placas parafusadas.

A Figura 4.17 ilustra os gráficos de resultado das tensões cisalhante e axial e a Figura 4.18, da deformação plástica equivalente, atuantes no parafuso.

Figura 4.17 - Variação das tensões de cisalhamento e axial no parafuso.

Figura 4.18 - Variação da deformação plástica equivalente no parafuso

Para que a comparação com a curva de entrada do modelo do parafuso seja feita, é necessário calcular a tensão equivalente no parafuso, através da equação de von Mises, que segue (Jong e Springer, 2009):

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (16)$$

No caso do parafuso, considerando que as demais componentes de tensão, além da axial e cisalhante atuante no sentido da força, são desprezíveis, essa equação pode ser simplificada para:

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\sigma_{axial}^2 + 3\tau_{cisalhamento}^2} \quad (17)$$

Além disso, a deformação plástica equivalente deve ser transformada para deformação total, adicionando a componente de deformação elástica, dividindo-se a tensão de von Mises (na região elástica) pelo módulo de elasticidade do material:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{plástico} + \varepsilon_{elástico} = \varepsilon_{plástico} + \frac{\sigma_{vM}}{E} \quad (18)$$

Com o tratamento dos resultados através das equações 17 e 18, traça-se a curva de tensão de von Mises por deformação total. Comparando-a à curva de entrada do material do parafuso (Figura 4.19), o resultado obtido mostra que o modelo do parafuso apresenta comportamento adequado para a sua utilização no modelo completo.

Figura 4.19 - Comparativo do resultado da simulação com o dado de entrada.

4.6. Simplificação da interação solo-poste

Para a representação da interação do poste com o solo no modelo completo, são utilizadas molas não lineares distribuídas ao longo do poste. Tais molas lineares são dimensionadas a partir de um modelo localizado do poste inserido ao solo (Figura 4.20). O material utilizado para a modelagem do solo é o MAT078 (*MAT_SOIL_CONCRETE) e os parâmetros foram retirados do trabalho de Wu e Thomson (2007) e estão ilustrados na Figura 4.21.

Figura 4.20 - Modelo isolado de um poste aterrado.

Figura 4.21 - Curvas de entrada para o modelo de material MAT078 (Wu e Thomson, 2007).

Além destas curvas, é necessário introduzir outros quatro parâmetros, que são (Wu e Thomson, 2007):

- Densidade: $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$

- Módulo de cisalhamento: $G=69MPa$
- Módulo volumétrico: $K=115MPa$
- Pressão de corte para fratura por tração: $PC=-30kPa$ (Tração)

O coeficiente de atrito foi retirado do trabalho de Tan, Lee e Sivadass (2008) e de Çanakçı et al. (2011), que avaliaram o comportamento do atrito entre o solo e o aço. Em seus trabalhos, os primeiros autores encontraram um ângulo de atrito de $18,57^\circ$ para a interface solo e aço de superfície lisa. Já o grupo de Çanakçı, encontrou um ângulo de atrito de 16° na pior condição (75% de umidade). O coeficiente de atrito estático corresponde à tangente do ângulo de atrito e, portanto, escolhendo-se o menor valor apresentado pelos autores, encontra-se o valor de $\mu=0,287$. As propriedades básicas do material do solo foram verificadas e constam no Apêndice A.

Conforme observado por Tabiei e Wu (2000), as três principais componentes de rigidez da interação solo e poste que atuam em condição de funcionamento são:

- Translacional paralela à lâmina (direção X, na Figura 4.20);
- Translacional perpendicular à lâmina (direção Y, na Figura 4.20);
- Rotacional no eixo do poste (direção Z, na Figura 4.20).

Desta forma, são realizadas três análises, uma em cada direção indicada e as forças de reação são medidas em 21 seções ao longo do comprimento do poste aterrado, espaçados em 55 milímetros. Como condição de carregamento, são impostos movimentos prescritos no ponto central dos furos do poste de 300 mm/s nos casos translacionais e $\pi/2$ rad/s no caso rotacional. As reações em cada seção de medição são obtidas através do parâmetro SECFORC do LS-DYNA®. Os deslocamentos são medidos nos nós centrais, posicionados no centro geométrico das seções.

Inicialmente, foram seguidas as instruções de Tabiei e Wu (2000), com a utilização de elementos de corpo rígido, denominados de CNRB (CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY), para a fixação das molas não-lineares ao poste. Com esta modelagem, obteve-se uma boa correlação entre o modelo com as molas não-lineares e o modelo contemplando o solo (ambas contemplando os elementos CNRB), conforme ilustrado na Figura 4.22. No entanto, foi observado que

esta modelagem ocasiona enrijecimento excessivo do poste, causado pelo travamento de todos os nós da seção pelo elemento. Além disso, com essa modelagem não foi possível obter um comportamento coerente na torção.

Figura 4.22 - Correlação das molas não-lineares com a utilização de elementos rígidos de ligação.

Então, partiu-se para o estudo de correlação com a utilização de ligações com `CONSTRAINED_INTERPOLATION`, que distribui as forças de reação das molas aos nós da seção, mantendo a flexibilidade do poste. Todavia, pela ausência do solo na região interna ao poste no modelo simplificado, as análises indicaram falta de rigidez ao fechamento e à abertura da seção, que, por sua vez, resultaram na baixa rigidez principalmente ao carregamento em Y.

A seguir, são descritos os resultados e as curvas obtidas para as molas não-lineares em cada sentido de aplicação de carga.

4.6.1. Translacional paralela à lâmina (direção X)

A partir da análise com deslocamento em X, são obtidos os gráficos de SECFORC (forças nas seções) e NODOUT (deslocamento dos pontos centrais das seções), ilustrados nas Figura 4.23 e Figura 4.24. As curvas identificadas por “A” correspondem aos resultados obtidos no nível do solo, sucedendo até a letra “U” em ordem alfabética, correspondendo às demais seções, espaçadas em 55 milímetros em direção a terra.

Figura 4.23 - Forças na direção X nas seções "A" a "U".

Figura 4.24 - Deslocamento na direção X do nó central nas seções "A" a "U".

Através destes gráficos, são obtidas as curvas de força por deslocamento em cada seção, que correspondem às curvas a serem introduzidas nas propriedades das molas não-lineares (SPRING_INELASTIC). Para tal, segundo Tabiei e Wu (2000), a força é calculada como sendo a diferença entre a curva da seção de interesse e a curva seguinte (por exemplo, no caso da curva "A", a variação da força da mola não-linear é obtida com a subtração da curva "B" de "A"). Para o deslocamento, são utilizados diretamente os valores da Figura 4.24. A Figura 4.25 apresenta as rigidezes não-lineares das seções de maior participação, de "A" a "E", obtidas através do método descrito. As demais curvas apresentam o mesmo padrão, porém com menores deslocamentos. Na seção L, onde a curva de deslocamento

tende a zero, é colocada uma condição de contorno em X. Todas as molas atuam nos dois sentidos da direção X

Figura 4.25 - Molas não-lineares nas seções de "A" a "E" para a direção X.

As curvas de força externa por deslocamento aplicada na extremidade do poste, nos furos de fixação, são comparadas entre o modelo que considera a interação solo-poste e o modelo com as molas não-lineares na Figura 4.26. A curva obtida apresenta grande similaridade àquela resultante da interação solo-poste.

Figura 4.26 - Comparação da força por deslocamento na direção X, aplicada na extremidade do poste.

Figura 4.27 - Deformadas do poste em três instantes do carregamento em X. (a) (b) (c) modelo com interação solo-poste; (d) (e) (f) simplificação com molas não-lineares.

Apesar do modelo simplificado não apresentar a rigidez volumétrica do solo, a simplificação resultou em um comportamento semelhante ao modelo completo (Figura 4.27 ilustra as deformadas dos dois modelos em três instantes da análise). Salienta-se que o resultado do poste simplificado já contempla as molas nas demais direções.

4.6.2. Translacional perpendicular à lâmina (direção Y)

Similarmente, os gráficos de SECFORC (forças nas seções) e NODOUT (deslocamento dos pontos centrais das seções) na direção Y são extraídos de um modelo solicitado nessa direção. As Figura 4.28 e Figura 4.29 ilustram os gráficos obtidos.

Figura 4.28 - Forças na direção Y nas seções “A” a “U”.

Utilizando a mesma metodologia descrita na direção X, são geradas as curvas das molas não-lineares em Y (ilustradas de “A” a “E” na Figura 4.30).

A Figura 4.31 apresenta a curva de força por deslocamento na direção Y e a Figura 4.32 ilustra a deformada em três instantes da análise, comparando o comportamento com as duas modelagens.

Figura 4.29 - Deslocamento na direção Y do nó central nas seções "A" a "U".

Figura 4.30 - Molas não-lineares nas seções de "A" a "E" para a direção Y.

Figura 4.31 - Comparação da força por deslocamento na direção Y, aplicada na extremidade do poste.

Figura 4.32 - Deformadas do poste em três instantes do carregamento em Y. (a) (b) (c) modelo com interação solo-poste; (d) (e) (f) simplificação com molas não-lineares.

Observa-se, pelos resultados, que nesse sentido de carregamento não foi possível obter uma boa correlação entre os modelos. Foram realizadas diversas tentativas para solucionar esta diferença, com o enrijecimento das molas de algumas seções e a adição de molas entre as flanges do poste, porém, não foi possível resolver a discrepância, tendo como o resultado apresentado o melhor obtido. A dificuldade ocorre devido à falta de material (solo) no interior do poste no modelo simplificado, o que facilita o fechamento do perfil “C” e posterior torção. Apesar da correlação não ter sido fiel, estas molas foram adotadas no modelo final, pois o solo pode apresentar grandes variações de comportamento, dependendo do tipo de solo e sua compactação.

4.6.3. Rotacional no eixo do poste (direção Z)

Para o caso das molas rotacionais, são obtidos os momentos e os deslocamentos rotacionais na direção Z, através dos parâmetros de resultados SECFORC e NODOUT (Figura 4.33 e Figura 4.34).

A partir destes gráficos, são obtidas as rigidezes rotacionais em Z (Figura 4.35).

Figura 4.33 - Momentos na direção Z nas seções “A” a “U”.

Com a utilização destas molas, foi obtido o resultado da Figura 4.36, que comparado ao modelo com a interação solo-poste, apresentou comportamento semelhante, apesar da rigidez torcional ligeiramente menor.

Figura 4.34 - Rotações na direção Z do nó central nas seções "A" a "U".

Figura 4.35 - Molas rotacionais não-lineares nas seções de "A" a "E" para a direção Z.

Figura 4.36 - Comparação do momento por rotação na direção Z, aplicada na extremidade do poste.

Figura 4.37 - Deformadas do poste em três instantes da rotação em Z. (a) (b) (c) modelo com interação solo-poste; (d) (e) (f) simplificação com molas não-lineares.

A Figura 4.37 compara as deformadas nas duas modelagens. Nota-se boa semelhança nos resultados obtidos.

4.7. Modelo completo da defesa metálica maleável simples

Com a introdução de todas as simplificações obtidas neste capítulo, foi elaborado o modelo simplificado completo da defesa metálica maleável simples, ilustrado na Figura 4.38. São mostrados os elementos discretos colocados nas extremidades das lâminas e das cintas, os elementos discretos com propriedades de molas não-lineares distribuídos ao longo do poste enterrado e os elementos 1D, com propriedades SPOTWELD para representação dos parafusos com falha.

Figura 4.38 - Modelo final da defesa metálica maleável simples. (a) detalhe nos elementos discretos com as propriedades de mola linear na lâmina e na cinta. (b) detalhe nos elementos SPOTWELD representando os parafusos e os elementos discretos ao longo do poste aterrado, com propriedades de mola não-linear.

A partir deste modelo, são realizadas as modificações para representação das diversas condições de instalações encontradas nas vias de São Paulo, assim como são introduzidas simples melhorias com o propósito de elevar a eficiência do dispositivo.

5. Metodologia de avaliação

5.1. Testes

Os testes analisados para a avaliação das defensas metálicas seguem as instruções feitas por Ross et al. (1993). Em seu trabalho, recomendam-se testes com veículos de 700, 820 e 2000 quilogramas. Maiores informações das dimensões dos veículos estão na Tabela 5.1. No entanto, em suas recomendações, os autores indicam que a escolha das massas foi feita baseada nos veículos que são mais utilizados nas vias dos Estados Unidos. No Brasil, a grande maioria da frota se enquadra na categoria dos carros populares de passeio, que têm em média 1000 kg. Porém, o texto reporta que os testes com a *pick-up* de 2000 kg são os mais importantes e severos em condições comuns de via e volume de tráfego, e que os testes com os veículos de 700 e 820 kg são opcionais em muitos casos. Desta forma, neste trabalho, é utilizado um veículo que se enquadra na categoria de 2000 kg,

Tabela 5.1 – Principais propriedades dos veículos recomendados por Ross et al. (1993).

Propriedades	700C (Carro pequeno)	820C (Carro pequeno)	2000P (<i>Pick-up</i>)
Massa (kg)	700 ± 25	820 ± 25	2000 ± 45
Comprimento total (mm)	3700 ± 20	3700 ± 20	5350 ± 25
Entre-eixos (mm)	2300 ± 10	2300 ± 10	3350 ± 25
Largura (mm)	1350 ± 10	1350 ± 10	1650 ± 15

A Figura 5.1 ilustra o veículo utilizado, um Chevrolet C2500 1992, modelado e validado pelo NCAC (2008). Detalhes das propriedades do modelo são descritos na Tabela 5.2.

Figura 5.1 - Modelo do veículo Chevrolet C2500 1994 disponibilizado pelo NCAC (2008).

Tabela 5.2 - Propriedades do modelo do veículo Chevrolet C2500 1994, disponibilizado pelo NCAC (2008).

Propriedades	C2500 1994 (Pick-up)
Massa (kg)	2013
Comprimento total (mm)	5622
Entre-eixos (mm)	3382
Largura (mm)	1971
Número de nós	66586
Número de elementos	58313

Os autores do NCHRP *Report 350* (Ross et al., 1993) indicam três níveis de testes básicos que são obrigatórios para este tipo de veículo. As condições dos testes são apresentadas na Tabela 5.3 e na Figura 5.2 são ilustrados os parâmetros.

Tabela 5.3 – Testes de qualificação. Ross et al. (1993).

Nível de teste	Designação de teste	Veículo	Velocidade (km/h)	Ângulo θ (graus)
1	1-11	2000P	50	25
2	2-11	2000P	70	25
3	3-11	2000P	100	25

Figura 5.2 - Condições de impacto

Como a diferença entre os níveis de teste apresentados é somente na velocidade de impacto, neste projeto é avaliado somente o teste 3-11, que representa a condição de maior energia cinética e, portanto, mais crítica. Além disso, os trabalhos encontrados na literatura se concentram neste nível de teste, para a avaliação e elaboração de melhorias.

Ainda segundo o documento, existe um ponto crítico de impacto (distância x da fixação no poste, indicada na Figura 5.2) que pode ser calculado através de alguns parâmetros da defesa metálica. No entanto, esse cálculo não se aplica a este trabalho, por possuir dimensões não tabeladas nesse documento. Portanto, para que esse ponto crítico seja encontrado, são realizadas simulações simplificadas de impacto em diversos pontos ao longo da defesa, tendo como critério de seleção aquele que resulta na maior invasão da região da roda no poste, conforme indicado no NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993).

5.2. Critério de avaliação

A avaliação é feita seguindo as diretrizes do NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993), quando cabíveis. A Tabela 5.4 sintetiza os critérios estabelecidos. Além desses critérios, as variações das energias cinética e interna são levantadas para comparação dos comportamentos nas diversas condições de instalação.

Para a identificação dos postes nas avaliações, estes são numerados de 1 a 11 a partir do primeiro poste no sentido de marcha do veículo. Similarmente, as lâminas são denominadas de A a E, conforme Figura 5.3

Tabela 5.4 - Critério de avaliação para o teste, indicado no NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993).

Fator de avaliação	Critério	
Suficiência estrutural	A	O artigo de teste deve conter e redirecionar o veículo; o veículo não pode penetrar ou passar por baixo ou por cima da instalação, embora deflexão lateral controlada do artigo de teste seja aceitável.
Risco do ocupante	D	Elementos destacados, fragmentos ou outros detritos do artigo de teste não devem penetrar ou apresentar potencial para penetrar o habitáculo, ou apresentar um risco indevido para outros veículos, pedestres ou pessoas em zona de trabalho. Deformações ou intrusões no habitáculo que podem causar lesões graves não devem ser permitidas.
	F	O veículo deve permanecer em posição normal durante e após a colisão, embora moderada rolagem, arfagem e guinagem sejam aceitáveis.
Trajetória do veículo	K	Após a colisão, é preferível que a trajetória do veículo não invada faixas de tráfego adjacentes.
	L	A velocidade de impacto do ocupante na direção longitudinal não deve exceder 12 m/s, e a desaceleração do ocupante na direção longitudinal não deve exceder 20g (onde g é a gravidade da terra).
	M	O ângulo de saída veículo em relação ao artigo de teste deve ser, de preferência, inferior a 60% do ângulo de impacto, medido no momento da perda de contato do veículo com o dispositivo de teste

Figura 5.3 - Identificação dos postes, lâminas e parafusos para as avaliações.

6. Resultados e discussões

6.1. Análise de verificação do ponto crítico de impacto

Para a definição do ponto crítico de impacto foram feitas quatro simulações, denominadas de Li (com $i = 1, 2, 3$ ou 4), com um veículo rígido. O teste L1 foi feito com o ponto inicial de impacto alinhado ao poste anterior ao poste de referência, ou seja, com x igual a 2 metros. A cada incremento de i , a distância x foi reduzida em 0,30 m. A Figura 6.1 ilustra o ponto inicial de impacto de cada análise. Para ter maior sensibilidade às diferenças, as simulações foram feitas no nível de teste 1, ou seja, com velocidade inicial de 50 km/h e ângulo de impacto de 25° .

Figura 6.1 - Posicionamento do veículo para análise do ponto crítico de impacto

A Figura 6.2 e a Figura 6.3 apresentam os resultados de tensões de Von Mises na vista frontal e deformação plástica na vista lateral na região do poste de referência, após 0,3s de impacto.

É possível ver que uma notável parcela da energia interna de deformação ocorre no poste, próximo ao solo, confirmando a tendência indicada na norma ABNT NBR6971 (1999). No entanto, essa parcela aparenta ser maior na simulação L2, conforme a Figura 6.2.

Figura 6.2 - Tensão de von Mises na região do poste de referência após 0,3s de impacto em vista frontal

Figura 6.3 – Deformação plástica equivalente na região do poste de referência após 0,3s de impacto em vista lateral

Foram verificados os ângulos máximos em relação à vertical que a coluna de referência rotacionou em cada simulação. Os valores encontrados se encontram na Tabela 6.1. Esses valores confirmam o fato da simulação L2 absorver mais energia cinética com a deformação do poste.

Tabela 6.1 – Rotações máximas em relação ao eixo vertical

Modelo	Rotação em X	Rotação em Y
	(graus)	(graus)
L1	37.75	6.52
L2	38.04	6.33
L3	36.34	3.60
L4	32.48	2.83

Apesar dessas constatações, o critério adotado para a escolha do ponto crítico de impacto é o ponto no qual há maior invasão da roda no poste de referência durante o impacto. Desta forma, conforme pode ser observado na Figura 6.4, a simulação L3 é a mais próxima da crítica, pois apresenta maior deslocamento no sentido Y (contra a defesa metálica) e no momento em que a região da roda do veículo passa pelo poste de referência, resulta em uma maior sobreposição.

Figura 6.4 - Deslocamento no instante em que a região da roda do veículo passa pelo poste de referência. Vista inferior

Juntando as duas informações, conclui-se que deve haver um ponto intermediário a L2 e L3 onde ambas as constatações convergem. Portanto, para as análises com o modelo completo, foi estabelecida a distância média de L2 e L3, no valor de 1,55 m.

6.2. Análise do modelo completo

A partir do modelo da defesa metálica maleável simples gerado em elementos finitos, introduzindo-se as simplificações obtidas no capítulo 4 e o posicionamento no ponto crítico de impacto, foi elaborado o modelo completo de avaliação do dispositivo de proteção.

Diversas condições de utilização são avaliadas nas próximas subseções e, por final, é indicada uma proposta de melhoria, com modificações simples, apresentando os resultados comparativamente aos obtidos nas condições atuais. Todas as análises tem duração máxima de 0,5 segundos.

6.2.1. Análise na condição normal de uso

Por condição normal de uso, entende-se a utilização do dispositivo completo, instalado nas condições indicadas na norma NBR 6971 (ABNT, 1999) e na especificação técnica ET-DE-L00/008 (DER-SP, 2006). Nesta condição, os postes cravados no solo a 1100 mm de profundidade e espaçados a cada 2 metros. São instalações como na foto da Figura 6.5.

Figura 6.5 - Exemplo de instalação na condição normal de uso (Rodovia Anchieta).

Conforme pode ser observado na Figura 6.6, o dispositivo não foi capaz de conter o veículo, estando reprovado no teste 3-11. A Figura 6.7 mostra a trajetória do veículo durante o impacto e a Figura 6.8 mostra as rupturas dos parafusos em duas regiões em instantes diferentes. No primeiro instante, ocorre a soltura do

espaçador da lâmina. Segundo Engstrand (2000), essa separação é esperada e deve ser projetada de forma a ocorrer quando o para-choque estiver em total contato com a lâmina. Assim, a lâmina passa a trabalhar como uma membrana, absorvendo a energia cinética através da deformação axial e redirecionando o veículo de volta à pista. No entanto, num segundo instante durante a absorção do impacto do veículo, ocorre o rompimento em cadeia dos oito parafusos que unem as lâminas III e IV (da Figura 5.3) entre si, contrariando o estudo de Ray, Plaxico e Engstrand (2001), que indicou que a ruptura normalmente ocorre nas lâminas, e não nos parafusos. A ruptura impede que a lâmina continue a redirecionar o veículo, permitindo que o mesmo penetre no dispositivo. Além disso, a ruptura causa a soltura de componentes, gerando pontas agudas que podem representar perigo de outros incidentes. Entende-se que a cinta tem como principal função manter os espaçadores presos entre si, impedindo que estes sejam lançado, colocando mais risco aos pedestres e veículos próximos à localização do acidente. Essa função é verificada em uma das condições irregulares de instalação (ausência da cinta).

Figura 6.6 - Estado do dispositivo nas condições normais de uso a 0,3 de impacto.

Figura 6.7 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição normal de uso.

Figura 6.8 - Instantes das rupturas dos parafusos. (a) ruptura do parafuso entre o espaçador e a lâmina. (b) rompimento dos parafusos que unem as lâminas C e D.

Um ponto importante a se observar é a altura da lâmina na condição especificada. Conforme ilustrado na Figura 6.9a, o para-choque do veículo fica na altura da dobra inferior da seção em “W” da lâmina (em casos de impacto em veículos menores, nos quais a altura do para-choque é menor, poderá ocasionar a passagem do veículo por baixo da lâmina). Essa circunstância faz com que o choque do veículo à lâmina ative o comportamento de flexo-torção (Figura 6.9b), carregando os parafusos de união de lâminas de forma irregular. A Figura 6.10 mostra a variação, no tempo, da deformação plástica equivalente dos parafusos rompidos (denominados de A a H, conforme a Figura 5.3). Nota-se que, inicialmente, os parafusos F e B são sobrecarregados e, então, inicia-se o rompimento em cadeia. Portanto, sugere-se que os parafusos estejam subdimensionados, dando margem à insegurança do dispositivo. Além disso, alguns autores, como Reid et al. (1997), Engstrand (2000), Atahan e Cansiz (2005), Faller et al. (2007) e Shen et al. (2008), trabalharam na altura da defesa com o propósito de melhorar a eficiência do sistema. Portanto, uma vez definido um sistema suficiente para reter o veículo neste teste, poderá ser realizado um estudo do efeito da altura no comportamento do impacto.

Figura 6.9 – (a) altura da lâmina na condição normal de uso; (b) comportamento de flexo-torção.

Figura 6.10 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição normal de uso.

Figura 6.11 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição normal de uso.

Para a avaliação da velocidade e da aceleração longitudinais, foi utilizado o encosto da cabeça do motorista (Figura 6.11), pois o modelo não contempla um *dummy* (boneco de impacto). A aceleração máxima encontrada foi de 14,8g, estando abaixo do limite de 20g do critério. A velocidade longitudinal também se manteve abaixo do limite estabelecido de 12 m/s, atingindo o valor máximo de 2,3 m/s.

Figura 6.12 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição normal de uso.

Tabela 6.2 - Avaliação da defesa na condição normal de uso, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993).

Fator de avaliação	Critério	
Suficiência estrutural	A	O artigo de teste não foi capaz de conter e redirecionar o veículo; ocorrendo a penetração do veículo na instalação.
Risco do ocupante	D	Devido à ruptura de diversos parafusos de fixação, ocorre a soltura de vários componentes, colocando em perigo os passageiros do veículo e demais pessoas próximas ao impacto.
	F	O veículo manteve posição normal durante e após a colisão.
Trajetória do veículo	K	Devido à penetração do veículo na instalação, pode ocorrer a invasão do veículo em outras faixas de tráfego, se existir outras vias nas adjacências.
	L	A velocidade máxima de impacto do ocupante na direção longitudinal foi de 2,3 m/s e não excedeu o critério de 12 m/s. A desaceleração do ocupante na direção longitudinal atingiu 14,8g, mantendo-se abaixo do limite de 20g.
	M	Este critério não se aplica, pois o veículo penetrou na instalação.

Com o propósito de comparar o comportamento entre as condições de instalação, são levantadas as curvas da variação das energias cinética, interna e total. As curvas para a condição normal de uso encontram-se na Figura 6.12. Nota-se que, nessa condição, a defesa metálica contribui com a maior parte da energia

interna de deformação do evento. Finalmente, o resumo das avaliações conforme os critérios do Report 350 (Ross et al., 1993) estão na Tabela 6.2.

6.2.2. Análise na condição engastada (concreto)

Em extensões pequenas (limitada a 300 metros), a norma permite a utilização da defesa com os postes introduzidos no concreto. Nesta condição avalia-se a defesa com a condição de engaste na superfície do concreto. A Figura 6.13 mostra um exemplo de defesa usada nesta condição e a Figura 6.14 ilustra o modelo analisado (poste modelado até o nível do concreto)

Figura 6.13 - Foto de defesa na condição de engaste (concreto). Nota-se que este exemplo está irregular, faltando a cinta no poste à esquerda.

Figura 6.14 - Modelo com o poste engastado

A Figura 6.15 mostra a análise no instante 0,3 segundos e a Figura 6.16, a trajetória do veículo. Novamente, o dispositivo foi insuficiente para reter o veículo desgovernado, ocorrendo a ruptura dos parafusos que unem as lâminas III e IV. As mesmas observações quanto à ruptura dos parafusos, feitas para a condição normal

de uso, são válidas neste modelo. A Figura 6.17 mostra a variação das deformações plásticas atuantes nos parafusos que unem as lâminas III e IV.

Figura 6.15 - Estado do dispositivo na condição de engaste a 0,3 de impacto.

Figura 6.16 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição de engaste.

Figura 6.17 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição de engaste.

Nota-se que, por ser uma condição mais rígida, ocorre menor concentração nos parafusos B e F, causando o rompimento mais tardio e em instantes mais próximos aos demais parafusos, se comparados à condição normal de uso.

As curvas de aceleração e velocidade longitudinais estão apresentadas na Figura 6.18. Comparativamente à condição normal de uso, a desaceleração atinge picos maiores nos instante iniciais do impacto, justamente devido à maior rigidez do engaste. No entanto, o valor máximo encontrado foi de 19,7g, estando próximo, porém abaixo do limite do requisito. A velocidade se mantém baixa durante todo o impacto.

Figura 6.18 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição de engaste.

Figura 6.19 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição de engaste.

A Figura 6.19 ilustra as variações das energias durante o evento. Nota-se grande semelhança em relação à condição aterrada ao solo, apesar da diferença de rigidez inicial.

Há mais um fator agravante nesta condição, que é a projeção de um espaçador. Na região superior da Figura 6.16, é possível visualizar o espaçador do poste 7 sendo arremessado, podendo causar outros acidentes consequentes do choque.

Os fatores de avaliação para a condição engastada estão resumidos na Tabela 6.3, estando a defesa metálica maleável simples reprovada no teste 3-11 do NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993), nas condições regulares de instalação.

Tabela 6.3 - Avaliação da defesa na condição de engaste, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)

Fator de avaliação	Critério	
Suficiência estrutural	A	O artigo de teste não foi capaz de conter e redirecionar o veículo; ocorrendo a penetração do veículo na instalação.
Risco do ocupante	D	Devido à ruptura de diversos parafusos de fixação, ocorre a soltura de vários componentes, colocando em perigo os passageiros do veículo e demais pessoas próximas ao impacto. Além disso, um espaçador é arremessado, com a energia do impacto.
	F	O veículo manteve posição normal durante e após a colisão.
Trajetória do veículo	K	Devido à penetração do veículo na instalação, pode ocorrer a invasão do veículo em outras faixas de tráfego, se existir outras vias nas adjacências.
	L	A velocidade máxima de impacto do ocupante na direção longitudinal foi de 2,3 m/s e não excedeu o critério de 12 m/s. A desaceleração do ocupante na direção longitudinal atingiu 19,7g, mantendo-se abaixo do limite de 20g.
	M	Este critério não se aplica, pois o veículo penetrou na instalação.

Em posse dos resultados nas duas condições regulares de instalação, conclui-se que os parafusos de união das lâminas estão subdimensionados, permitindo a ocorrência da ruptura por cisalhamento. Apesar da observação de Ray, Plaxico e Engstrand (2001) com relação aos modos de falha mais comuns em lâminas, as análises mostraram que os parafusos são os pontos mais frágeis da estrutura.

6.2.3. Análise na condição irregular 1 – Defesa com ausência de um poste

A primeira condição irregular de instalação e manutenção da defesa metálica maleável simples analisada consiste na ausência de um ou mais postes, que está ilustrada nas fotos da Figura 6.27. São mostradas fotos de exemplos encontrados na Rodovia Anchieta. No modelo analisado, o poste de referência (6) foi retirado, com os demais aterrados ao solo (Figura 6.28).

(a)

(b)

Figura 6.20 – Fotos de instalações com ausência de postes. (a) exemplo com duas irregularidades: ausência de um poste e das cintas; (b) exemplo com ausência de dois postes.

Figura 6.21 - Modelo com ausência de um poste.

Como já esperado, a defesa é incapaz de reter o veículo (Figura 6.22). Comparando a trajetória do veículo, ilustrada na Figura 6.23, com os casos já apresentados (Figura 6.7 e Figura 6.16), observa-se que houve menor redirecionamento do veículo. Com a ausência do poste 6, menos energia é absorvida nos instantes iniciais do impacto (Figura 6.26), solicitando ainda mais os parafusos de união das lâminas III e IV, motivo pelo qual a ruptura dos parafusos é antecipada (Figura 6.24).

Figura 6.22 - Estado do dispositivo na condição irregular com ausência de um poste a 0,3 de impacto.

Figura 6.23 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição irregular com ausência de um poste.

Figura 6.24 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição irregular com ausência de um poste.

Por ser uma condição mais flexível, as variações de velocidade e aceleração longitudinais são mais brandas (Figura 6.25), atingindo picos menores (13,6g de aceleração e 1,4 m/s de velocidade).

Figura 6.25 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição irregular com ausência de um poste.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a ausência do poste de referência reduz a capacidade da defesa de absorver energia nos instantes iniciais do impacto, sobrecarregando os parafusos de união das lâminas. Dessa forma, deverão ser evitadas as ausências de postes, principalmente próximas a outras irregularidades, como encontradas nas fotos da Figura 6.20. Na Tabela 6.4, são elencadas as observações conforme os critérios de avaliação assumidos.

Figura 6.26 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição irregular com ausência de um poste.

Tabela 6.4 - Avaliação da defesa na condição irregular com ausência de um poste, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)

Fator de avaliação	Critério	
Suficiência estrutural	A	O artigo de teste não foi capaz de conter e redirecionar o veículo; ocorrendo a penetração do veículo na instalação.
Risco do ocupante	D	Devido à ruptura de diversos parafusos de fixação, ocorre a soltura de vários componentes, colocando em perigo os passageiros do veículo e demais pessoas próximas ao impacto.
	F	O veículo manteve posição normal durante e após a colisão.
Trajetória do veículo	K	Devido à penetração do veículo na instalação, pode ocorrer a invasão do veículo em outras faixas de tráfego, se existir outras vias nas adjacências.
	L	A velocidade máxima de impacto do ocupante na direção longitudinal foi de 1,4 m/s e não excedeu o critério de 12 m/s. A desaceleração do ocupante na direção longitudinal atingiu 13,6g, mantendo-se abaixo do limite de 20g.
	M	Este critério não se aplica, pois o veículo penetrou na instalação.

6.2.4. Análise na condição irregular 2 – Defesa sem cinta

A segunda condição irregular de instalação e manutenção da defesa metálica maleável simples analisada consiste na ausência da cinta, que está ilustrada nas fotos da Figura 6.27. Esta condição é muito comum de ser encontrada e são mostradas fotos de duas grandes vias de São Paulo: Marginal Pinheiros e Rodovia Anchieta.

(a)

(b)

Figura 6.27 – Fotos de instalações sem cinta. (a) Acesso à pista local da Marginal Pinheiros; (b) Rodovia Anchieta.

O modelo analisado se encontra na Figura 6.28. Foi avaliada a condição da defesa da Rodovia Anchieta, ou seja, com o poste aterrado ao solo.

Figura 6.28 - Modelo sem cinta.

Como já esperado, a defesa é incapaz de reter o veículo. Além disso, com a ausência das cintas para segurar os espaçadores, estes são lançados, podendo atingir veículo ou pedestres ao redor (é possível identificá-los nas Figura 6.29 e Figura 6.30), aumentando o risco de outros acidentes.

Figura 6.29 - Estado do dispositivo na condição irregular sem cinta a 0,3 de impacto.

Os parafusos atingem a ruptura prematuramente, em relação à condição normal de uso (Figura 6.31), pois sem a cinta, há a redução da rigidez torcional do dispositivo. Por consequência do rompimento antecipado, a energia absorvida pela defesa metálica é menor com essa irregularidade (Figura 6.39).

Figura 6.30 - Trajetória do veículo durante o impacto, na condição irregular sem cinta.

Figura 6.31 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, na condição irregular sem cinta.

Figura 6.32 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, na condição irregular sem cinta.

Figura 6.33 - Variação das energias total, cinética e interna, na condição irregular sem cinta.

A velocidade e a aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista (Figura 6.38) se mantêm em níveis abaixo do limite estabelecido, atingindo máximas de 2,0 m/s e 18,9g, respectivamente.

Finalmente, na Tabela 6.5 são descritas as avaliações segundo os critérios do NCHRP *Report* 350 (Ross et al., 1993), para a condição irregular avaliada.

Tabela 6.5 - Avaliação da defesa na condição irregular sem cinta, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)

Fator de avaliação	Critério	
Suficiência estrutural	A	O artigo de teste não foi capaz de conter e redirecionar o veículo; ocorrendo a penetração do veículo na instalação.
Risco do ocupante	D	Devido à ruptura de diversos parafusos de fixação, ocorre a soltura de vários componentes, colocando em perigo os passageiros do veículo e demais pessoas próximas ao impacto. Além disso, com a ausência das cintas, os espaçadores são lançados com a energia de impacto do veículo.
	F	O veículo manteve posição normal durante e após a colisão.
Trajetória do veículo	K	Devido à penetração do veículo na instalação, pode ocorrer a invasão do veículo em outras faixas de tráfego, se existir outras vias nas adjacências.
	L	A velocidade máxima de impacto do ocupante na direção longitudinal foi de 2,0 m/s e não excedeu o critério de 12 m/s. A desaceleração do ocupante na direção longitudinal atingiu 18,9g, mantendo-se abaixo do limite de 20g.
	M	Este critério não se aplica, pois o veículo penetrou na instalação.

6.2.5. Proposta de melhoria

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o principal motivo da incapacidade da defesa metálica maleável simples de conter o veículo é o subdimensionamento dos parafusos de fixação. Assim, é sugerida a elevação da classe dos parafusos para NBR8855 5.8 (ABNT, 1991). Similarmente aos cálculos realizados na seção 4.5, são definidos

:

- Limite de resistência à tração: primeiro número multiplicado por 100:

$$\sigma_R = i \times 100 = 5 \times 100 = 500 \text{ MPa} \quad (19)$$

- Limite de escoamento: segundo número multiplicado pelo limite de resistência, dividido por 10:

$$\sigma_E = \frac{j \times \sigma_R}{10} = j \times i \times 10 = 5 \times 8 \times 10 = 400 \text{ MPa} \quad (20)$$

Como a norma não estabelece o alongamento mínimo na ruptura, novamente este valor foi retirado do catálogo de informações técnicas da Würth (2013), que indica o valor de 20%.

A partir destes três valores, e sabendo-se as características básicas do aço indicadas na Tabela 4.3, são calculados os dados de entrada do MAT100 (*MAT_SPOTWELD) para a proposta de melhoria, identificados na Figura 6.34.

Figura 6.34 - Propriedades do material das fixações na classe 5.8 (fora de escala).

Para a avaliação, é utilizado o modelo na condição normal de uso, com o material atualizado. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a análise no instante final da análise e a Figura 6.36, a trajetória do veículo. Dessa vez, o dispositivo foi capaz de reter o veículo e reorientá-lo de volta a via. No entanto, conforme pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ocorre o destaque do parafuso da cinta. A Figura 6.37 mostra o instante em que esta soltura ocorre e o estado final da cinta. Essa soltura pode apresentar risco a pedestres e veículos que se encontram próximos ao ponto de impacto.

Figura 6.35 - Instante final da análise com a recomendação de melhoria do parafuso.

Figura 6.36 - Trajetória do veículo durante o impacto, com a recomendação de melhoria no parafuso.

(a)

(b)

Figura 6.37 - Soltura da cinta. (a) instante em que ocorre a soltura; (b) consequência da soltura.

Figura 6.38 - Variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H, com a recomendação de melhoria no parafuso.

A Figura 6.38 mostra a variação da deformação plástica equivalente nos parafusos A a H. Nota-se que a deformação alcançada nos parafusos B e H ficaram muito próximos ao limite do parafuso (0,181, ante 0,182). Portanto, apesar da defesa ter contido o veículo nesta análise, com pouca variação de sobrecarga ou velocidade de impacto, poderá apresentar a penetração do veículo.

A velocidade e a aceleração longitudinal medida no encosto de cabeça do motorista estão ilustradas na Figura 6.39. A velocidade máxima foi de 3,4 m/s, estando abaixo do limite do critério, porém a aceleração máxima ultrapassou o limite de 20g, atingindo a máxima de 24,6g.

Figura 6.39 - Variação da velocidade e aceleração longitudinal do encosto de cabeça do motorista, com a recomendação de melhoria no parafuso.

Figura 6.40 - Variação das energias total, cinética e interna, com a recomendação de melhoria no parafuso.

A variação das energias está ilustrada na Figura 6.40. Nota-se que a absorção da energia cinética através da deformação plástica é mais acentuada neste modelo, por não ocorrer a ruptura no início do impacto.

Considerando todos os pontos de avaliação (Tabela 6.6), apesar da defesa ter conseguido reter e redirecionar o veículo adequadamente, está reprovado na avaliação teste 3-11 do NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993), pois apresenta risco na vizinhança do impacto, com a soltura da cinta, e a aceleração longitudinal ultrapassa o limite de 20g.

Tabela 6.6 - Avaliação da defesa com a recomendação de melhoria no parafuso, conforme NCHRP Report 350 (Ross et al., 1993)

Fator de avaliação	Critério	
Suficiência estrutural	A	O artigo de teste foi capaz de conter e redirecionar o veículo, mas a deformação máxima encontrada nos parafusos foi muito próximo à deformação de ruptura.
Risco do ocupante	D	Devido ao destaque da cinta, a projeção de componentes pode apresentar riscos a pedestres ou veículos próximos ao ponto de impacto.
	F	O veículo manteve posição normal durante e após a colisão.
Trajetória do veículo	K	O veículo manteve trajetória paralela à defesa, não havendo a tendência de invasão a outras vias.
	L	A velocidade de impacto do ocupante na direção longitudinal não deve exceder 12 m/s, e a desaceleração do ocupante na direção longitudinal não deve exceder 20g (onde g é a gravidade da terra).
	M	Este critério não se aplica, pois o veículo penetrou na instalação.

7. Conclusões

Através das informações compiladas na revisão bibliográfica, foi possível definir a metodologia para a realização das simulações numéricas e a avaliação da defesa metálica maleável simples utilizada no Brasil. Três principais simplificações no modelo foram elaboradas, seguindo exemplos extraídos de trabalhos anteriores encontrados na literatura: representação da interação solo-poste através de molas não-lineares distribuídas ao longo do poste, utilização do material SPOTWELD para desempenhar os parafusos com falha e o emprego de molas lineares para exercer a função da continuidade da lâmina e da cinta.

O material utilizado nas defensas foi devidamente caracterizado para definição do modelo de material Johnson-Cook simplificado, através da realização de ensaios experimentais em corpos de prova retirados de uma lâmina.

Com o modelo definido, diversas condições de instalação encontradas nas vias de São Paulo, como a condição normal de uso, engaste do poste no concreto e duas circunstâncias irregulares. Todos os resultados indicaram que o dispositivo atual é insuficiente para reter o veículo designado no teste 3-11 do NCHRP *Report* 350 (Ross et al., 1993), de 2000 quilogramas a 100 quilômetros por hora com incidência de 25°, estando reprovado. Os parafusos que unem a lâmina que recebe o impacto à lâmina seguinte se rompem, permitindo a penetração do veículo, colocando os passageiros, os demais carros e os pedestres em perigo.

Os resultados das análises com irregularidades mostram que os acidentes nestas situações podem ser mais catastróficos, diminuindo a capacidade de absorção de energia do impacto e aumentando os riscos para a sociedade. Estes resultados têm como objetivo alertar os órgãos responsáveis pela instalação e manutenção, para um maior controle dos dispositivos existentes.

Com a finalidade de solucionar a deficiência dos parafusos, é recomendada e avaliada a elevação da classe dos parafusos de fixação para NBR8855 5.8 (ABNT, 1991). Apesar de não estar plenamente aprovado nos requisitos do teste 3-11, apresentando perigo com o rompimento da cinta e aceleração longitudinal acima de 20g, a defesa foi capaz de reter o veículo e retorná-lo à via, exercendo sua principal função.

O autor também ressalta a importância da aproximação dos órgãos responsáveis da segurança nas vias com instituições de ensino e montadoras de veículos, para o desenvolvimento de dispositivos cada vez mais adequados com a frota existente.

8. Trabalhos futuros

Com a realização deste primeiro trabalho de avaliação da defesa metálica maleável simples utilizada no Brasil, são abertas as possibilidades de avaliação de melhorias nos modelos atuais ou até o desenvolvimento de um novo dispositivo.

Para isso, no entanto, sugere-se que sejam realizados testes de impacto experimentais para validação do modelo elaborado. Também são sugeridos ensaios experimentais das uniões parafusadas para ratificar o modelo simplificado das fixações.

A simplificação da interação solo-poste, através da metodologia empregada, mostrou-se de difícil execução e correlação com o resultado contemplando o solo. Apesar do recente crescimento da capacidade de cálculo dos computadores, simplificações com boa representatividade são essenciais para o ágil desenvolvimento de sistemas ou produtos, permitindo respostas rápidas de modificações propostas. Portanto, sugere-se o desenvolvimento de uma nova metodologia para a simplificação da interação solo poste.

Também poderá ser introduzida a modelagem do parafuso conforme Sonnenschein (2008), com a utilização de contato e aperto dos parafusos através da utilização de elementos de viga, representando o fuso, e elementos de casca na cabeça e na porca do parafuso.

Havendo o interesse dos órgãos responsáveis pela segurança viária, o modelo poderá ser aprimorado e utilizado para a avaliação em outros casos de impacto ou outros modelos de defensas metálicas.

9. Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS. **Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.abcr.org.br/Conteudo/Secao/43/estatisticas.aspx>>. Acesso em: 26 Dez. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6323**: Produto de Aço ou Ferro Fundido Revestido de Zinco por Imersão a Quente. Rio de Janeiro, 1990. 3 p.

_____. **NBR 6650**: Chapas Finas a Quente de Aço-Carbono para Uso Estrutural. Rio de Janeiro, 1986. 2 p.

_____. **NBR 6971**: Defensas Metálicas - Projeto e Implantação. Rio de Janeiro, 1999. 44 p.

_____. **NBR 8855**: Propriedades mecânicas de elementos de fixação - Parafusos e prisioneiros - Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 17 p.

ATAHAN, A. O.; CANSIZ, O. F., **Impact analysis of a vertical flared back bridge rail-to-guardrail transition structure using simulation**. Finite Elements in Analysis and Design, Elsevier Science, Oxford, v. 41, p. 371-396, 2005.

BATHE, K. J., **Finite Element Procedures**. Prentice Hall, New Jersey, 1037 p., 1996.

ÇANAKCI, H.; YAVUZ, H. E.; ÇELIK, F.; GÜLLÜ, H., **Interface Friction between Organic Soil and Construction Materials**. International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, Tirana, 6 p., 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2012: Relatório Gerencial**. CNT, Brasília, 408 p., Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Relatorios/2012/RelatorioGeral2012_BaixaResolucao.pdf>. Acesso em: 26 Dez. 2012.

_____. **Revista CNT Transporte Atual.** e. 207, p. 73, Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Revista-CNT-Transporte-Atual.aspx?r=120>>. Acesso em: 26 Dez. 2012.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Defensas Metálicas.** ET-DE-L00/008. 7 p. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **Quadro 0102 – Número de acidentes por tipo e gravidade.** p. 28, Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes/quadro-0102-numero-de-acidentes-por-tipo-e-gravidade-ano-de-2011.pdf>>. Acesso em: 26 Dez. 2012.

DIETENBERGER, M.; BUYUK, M.; KAN, C.D., **Development of a High Strain-Rate Dependent Vehicle Model.** In: Fórum de Usuários de LS-Dyna. Bamberg, 2005.

ENGSTRAND, K. E., **Improvements to the Weak-Post W-Beam Guardrail.** 2000. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, 2000.

FALLER, R. K.; POLIVKA, K. A.; KUIPERS, B. D.; BIELENBERG, R. W.; REID, J. R.; ROHDE, J. R.; SICKING, D. L., **Midwest Guardrail System for Standard and Special Applications.** Transportation Research Record 1890, TRB, Washington D.C., p 19-33, 2007.

FALLER, R. K.; SICKING, D. L.; BIELENBERG, R. W.; ROHDE, J. R.; POLIVKA, K. A.; REID, J. R., **Performance of Steel-Post, W-Beam Guardrail Systems.** Transportation Research Record 2025, TRB, Washington D.C., p 18-33, 2007.

FILHO, A. A., **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE.** Editora Érica, e. 5, 320 p., 2007.

FILHO, A. A., **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE / Análise Dinâmica.** Editora Érica, e. 2, 302 p., 2008.

FILHO, A. A., **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE / Análise Não-Linear.** Editora Érica, e. 1, 320 p., 2012.

GRZEBIETA, R. H.; ZOU, R.; JIANG, T.; CAREY, A., **Roadside Hazard and Barrier Crashworthiness Issues Confronting Vehicle and Barrier Manufactures and Government Regulators**. Monash University, Dept. of Civil Engineering, Australia, 15 p, 2005.

JOHNSON, G. R.; COOK, W. H., **A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures**. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, p. 541-547, 1983.

JONG, I. C.; SPRINGER, W., **Teaching von Mises stress: from principal axes to nonprincipal axes**. American Society for Engineering Education, 9 p., 2009.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K., **Mechanical Behavior of Materials**. Cambridge University Press, Cambridge, e. 2, 856 p, 2009.

NATIONAL CRASH ANALYSIS CENTER, **Finite Element Model of C2500 Pickup Truck**. The George Washington University, 2008. Disponível em: <<http://www.ncac.gwu.edu/vml/archive/ncac/vehicle/c2500pickup-0.7.tgz>>. Acesso em: 25 Jul 2011.

OBERG, E.; JONES, F. D.; HORTON, H. L.; RYFFEL, H. H., **Machinery's Handbook**. Industrial Press Inc., Nova York, e. 27, 2640 p., 2004.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, **Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020**. 25 p. 2011.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, **Global Status Report on Road Safety: Time for Action**. 301 p. 2009.

PLAXICO, C. A., **Design Guidelines for the Use of Curbs and Curb/Guardrails Combinations Along High-Speed Roadways**. 2002. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, 2003.

PLAXICO, C. A.; PATZNER, G. S.; RAY, M. H., **Finite-Element Modeling of Guardrail Timber Posts and the Post-Soil Interaction**. Transportation Research Report 1647, TRB, Washington D.C., p. 139-146, 1998.

PLAXICO, C. A.; RAY, M. H.; HIRANMAYEE, K., **Comparison of the Impact Performance of the G4(1W) and G4(2W) Guardrail Systems Under NCHRP Report 350 Test 3-11 Conditions**. Transportation Research Record 1720, TRB, Washington D.C., p. 7-18, 2000.

POLIVKA, K. A.; COON, B. A.; SICKING, D. L.; FALLER, R. K.; BIELENBERG, R. W.; ROHDE, J. R.; REID, J. R., **Midwest Guardrail System (MGS) W-Beam to Thrie-Beam Transition**. Transportation Research Record 2025, TRB, Washington D.C., p 45-50, 2007.

RAY, M. H.; PLAXICO, C. A.; ENGSTRAND, K., **Performance of W-Beam Splices**. Transportation Research Record 1743, TRB, Washington D.C., p. 120-125, 2001.

REID, J. D.; KUIPERS, B. D.; SICKING, D. L.; FALLER, R. K., **Impact Performance of W-beam Guardrails Installed at Various Flare Rates**. International Journal of Impact Engineering, Elsevier Science, Oxford, v. 36, p. 467-485, 2009.

REID, J. D.; SICKING, D. L.; FALLER, R. K.; PFEIFER, B. G., **Development of a New Guardrail System**. Transportation Research Record 1599, TRB, Washington D.C., p. 72-80, 1997.

ROSS JR., H. E.; SICKING, D. L.; ZIMMER, R. A.; MICHIE, J. D., **Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features**. National Cooperative Highway Research Program, Report 350, National Academy Press, Washington, D.C., 1993.

SCHWER, L., **Optional Strain Rate Forms for the Johnson-Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon_0**. In: LS-Dyna Anwenderforum, Frankenthal, 2007.

SENNAH, K.; SAMAN, M.; ELMARAKBI, A., **Impact Performance of Flexible Guardrail Systems Using LS-DYNA**. In: 4th European LS-DYNA Users Conference, Crash/Automotive Applications III, p. 35-44, 2003.

SHEN, X.; GUO, L.; YANG, L.; DU, X.; CAO, P., **Numerical Analysis of Impact Effect on Mechanical Behavior of Strong Guardrail System**. Journal of Physics, Conference Series 96, 2008.

SHIGLEY, J. E.; MITCHELL, L. D., **Mechanical Engineering Design**. McGraw Hill, e. 4, 869 p., 1983.

SONNENSCHNEIN, U., **Modelling of Bolts Under Dynamic Loads**. In: LS-Dyna Anwenderforum, Bamberg, 2008.

TABIEI, A.; Wu, J., **Roadmap for Crashworthiness Finite Element Simulation of Roadside Safety Structures**. International Journal of Finite Elements in Analysis and Design, Elsevier Science, Oxford, v. 34, n. 2, p. 145-157, 2000.

TAN, W. H.; LEE, C. Y.; SIVADASS, T., **Behavior of Clay-Steel Interfaces**. In: International Conference on Construction and Building Technology 2008, e. 2, p. 11-20, 2008.

VESENJAK, M.; REN, Z., **Improving the Roadside Safety with Computational Simulations**. In: 4th European LS-DYNA Users Conference, Crash/Automotive Applications II, p. 21-32, 2003.

YONEDA, A. Y.; MORALES, E. D., **Estudo numérico e experimental de falha em vigas de aço sob condições de impacto**. p. 74, Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecatrônica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WU, W.; THOMSON, R., **A Study of the Interaction between a Guardrail Post and Soil During Quasi-Static and Dynamic Loading**. International Journal of Impact Engineering, Elsevier Science, Oxford, v. 34, p. 883-898, 2007.

WÜRTH, **Technical Information on Fasteners**: catálogo. p. 1743-1832. Disponível em: <http://www.wuerth-industrie.com/web/media/en/pictures/wis/00_pdfs/03_produkte/produktmanagement_1/de_technische_informationen.pdf>. Acesso em: 10 Jan 2013, 2011.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Material do solo

A.1. Verificação do modelo de material

O modelo de material do solo foi verificado com a realização de duas análises de compressão triaxial, utilizando um elemento hexaédrico de oito nós. Essa verificação é feita por Wu e Thomson (2007) e foi reproduzida para averiguar a definição correta dos parâmetros no modelo.

A primeira simulação consiste na verificação da equação de estado (definido pelo LCPV do modelo de material), com a aplicação de uma pressão hidrostática uniforme em todas as faces do elemento. A Figura A.1 ilustra o modelo utilizado (em ambas as verificações) e a variação do carregamento no tempo.

Figura A.1 – (a) Modelo utilizado para a verificação do modelo de material do solo; (b) carregamento para a primeira verificação.

A Figura A.2 mostra a comparação da equação de estado inserida no modelo e o resultado obtido. Nota-se boa correlação até 10 MPa e a partir de 40 MPa, havendo divergência entre estes valores. No entanto, conforme observado por Wu e Thomson (2007), o solo apresenta pressões abaixo de 10 MPa durante a deformação com o poste. Então, considerou-se que o modelo está de acordo.

A segunda verificação é do critério de escoamento (*yield surface*, definido pelo LCYP do modelo de material). Para tal, é aplicada a pressão conforme a Figura A.3, com uma das pressões maior que as outras duas.

Figura A.2 - Comparação dos parâmetros de entrada e os resultados obtidos para a equação de estado.

Figura A.3 - Variação das pressões no tempo, para a segunda verificação do modelo de material do solo.

Nessa análise, é verificada a pressão e a tensão equivalente de von Mises no instante que ocorre o escoamento, em quatro níveis de pressão (aplicando-se um fator de escala no carregamento da Figura A.3). Os valores encontrados estão na

Tabela A.1 e a curva encontrada na Figura A.4, provando que os resultados estão condizentes com o parâmetro de entrada.

Tabela A.1 - Fator de escala do carregamento e resultados obtidos.

Fator de escala	1,0	2,7	5,0	8,0
Pressão (MPa)	2,08	5,56	10,3	16,4
Tensão de escoamento (MPa)	3,38	8,95	16,5	26,3

Figura A.4 - Comparação dos parâmetros de entrada e os resultados obtidos para o critério de escoamento.