

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

COMPORTAMENTO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DAS
BARREIRAS DE SEGURANÇA

HUGO MIGUEL PARENTE LIMA

Licenciado em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação
parcial dos requisitos do grau de mestre
em Vias de Comunicação na Faculdade
de Engenharia da Universidade do Porto

**Dissertação realizada sob a supervisão do Professor Doutor Adalberto Quelhas da
Silva França do Departamento de Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto**

Porto, 2006

RESUMO

Este trabalho procurou investigar o comportamento das barreiras de segurança, quanto ao seu funcionamento e capacidade resistente face à colisão de veículos.

Fez-se um enquadramento geral dos sistemas de segurança rodoviária, dando-se especial atenção às barreiras de segurança.

Caracterizou-se a importância que barreiras de segurança assumem ao nível da segurança rodoviária, evidenciando-se a sua correlação com a mortalidade na estrada.

Em termos normativos foi dada uma ideia geral dos documentos existentes a nível mundial, caracterizando-se dois deles (EN 1317 e NCHRP Report 350) e indicando as principais diferenças e lacunas.

Foram expostos os critérios a ter em conta no dimensionamento das barreiras de segurança, nomeadamente quanto à acção dos veículos pesados e efeito da severidade da colisão sobre os ligeiros.

È proposto um sistema de barreira de segurança, utilizando-se um programa de elementos finitos para a sua validação.

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the behaviour of the safety road barriers, about their working and structural resistance.

Was been presented one classification of Road Restraint Systems, given special attention to the safety barriers.

The importance of the safety road barriers in road safety was demonstrated and highlighted their correlation with the road serious accidents.

The most important standards related to the Road Restraint Systems was been presented, more precisely the European Standard - EN 1317 and the U.S. standard - NCHRP Report 350.

Special attention has been given to the safety barrier design criteria, focused the influence of heavy vehicles and the response of the system in light vehicles in terms of crash severity.

Is presented a prototype of safety barrier and has been used a finite elements program for your validation.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação só foi possível alcançar com muita dedicação pessoal e o apoio de todos aqueles que, de uma forma directa ou indirecta deram o seu contributo.

Gostaria primeiramente de agradecer ao Professor Adalberto Quelhas da Silva França, a sua amizade, a sua dedicação e disponibilidade, bem como o seu contributo na definição das linhas orientadoras e dos objectivos a alcançar, encorajando-me sempre a ultrapassar todas as barreiras.

Também ao Professor Jorge Ambrósio, gostaria de expressar a minha gratidão e apreço, não apenas pelos esclarecimentos prestados e documentação facultada, mas também pela forma acolhedora como fui recebido no IST.

Aos Professores Jorge Justo e Marcelo Moura da FEUP expresso o meu muito obrigado, pela disponibilidade sempre manifestada.

Ao Engenheiro Paquim da Betafiel gostaria de manifestar a mais profunda gratidão por toda a informação facultada, a forma exemplar como me recebeu e o interesse demonstrado neste trabalho.

Também à D. Guilhermina da secretaria da secção de Vias de Comunicação, que sempre se disponibilizou a ajudar em todos os assuntos logísticos, manifesto o meu muito obrigado.

Não poderia esquecer todos os colegas do Curso de Mestrado, em particular ao Filipe, ao Marc, ao André, ao Carlos, à Sílvia, à Sílvia Alheira, à Gorete, ao Jorge, ao Rui e à Paula, pela grande amizade e apreço demonstrados durante esta caminhada.

À Ferreira Lemos Engenharia por todo o apoio técnico e logístico disponibilizado e aos colegas de trabalhos pelo grande espírito de camaradagem manifestado, o meu muito obrigado.

Agradeço também ao meu amigo Bruno por meter acompanhado não só nesta etapa, mas também em todas as etapas da minha vida.

Por último queria agradecer a toda a minha família, e de uma forma mais particular, aos meus pais, ao meu irmão, às minhas avós por terem acreditado em mim e me incentivarem nos momentos de menor ânimo.

À minha mulher Inês por toda a compreensão e ânimo manifestados, mas também pelo inolvidável carinho que tenho por ela, o maior dos obrigados.

ÍNDICE DE TEXTO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE DE TEXTO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE IMAGENS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
Capítulo I	
INTRODUÇÃO	1
Capítulo II	
SISTEMAS DE SEGURANÇA RODOVIÁRIA.....	3
1 – Classificação dos Sistemas de Segurança Rodoviária.....	3
2 – Descrição de Sistemas de Segurança de Veículos.....	4
2.1 - Barreiras de Segurança	4
2.2 - Terminais e Transições	4
2.3 - Muros de Guarda para Veículos	6
2.4 - Atenuadores de Colisão	7
2.5 - Escapatórias	7
3 – Descrição de Sistemas de Segurança de Peões.....	8
3.1 - Muros de Guarda para Peões	8
3.2 - Guarda Corpos para Peões	8
4 – Classificação das Barreiras de Segurança	9
5 – Descrição de Barreiras de Segurança	9
5.1 – Barreiras Flexíveis	9
5.1.1 – Triplo cabo de aço, com poste frágil	9
5.1.2 – quádruplo cabo de aço, com poste frágil	10
5.1.3 – Perfil metálico em “W” ou dupla onda, com poste frágil.....	10
5.1.4 – Perfil metálico em tripla onda, com poste frágil	10
5.2 – Barreiras Semi-Flexíveis.....	11
5.2.1 – Perfil metálico em “W” ou dupla onda, com poste rígido.....	11
5.2.2 – Perfil metálico em tripla onda, com poste rígido.....	11
5.2.3 – Perfil metálico duplo especial tipo “BHO”	12
5.3 – Barreiras Rígidas.....	13
5.3.1 – Referência Histórica	13
5.3.2 – Perfil em betão tipo “New Jersey”	13
5.3.3 – Perfil em betão tipo “F”	15
5.3.4 – Perfil em betão tipo “Ontário”.....	16
5.3.5 – Perfil em betão com paramento constante.....	17
5.3.6 – Outros tipos de perfil de barreira rígida	18
6 - Importância das Barreiras de Segurança.....	20
Capítulo III	
FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS SEMI-FLEXÍVEL E RÍGIDO.....	23

1- Semi-flexível.....	23
1.1 – Introdução	23
1.2 – Vantagens do Sistema	25
1.3 - Desvantagens do Sistema	25
1.4 – Limitações do Sistema	25
2 – Rígido.....	26
2.1 – Introdução	26
2.2 – Vantagens do Sistema	26
2.3 – Desvantagens do Sistema.....	27
2.4 – Limitações do Sistema	27
Capítulo IV	
NORMALIZAÇÃO.....	28
1 - Situação Nacional	28
2 - Situação Internacional	32
2.1 – Apresentação geral.....	32
2.2 - Descrição da EN 1317	32
2.2.1 – Introdução	32
2.2.2 – Análise das Partes 1 e 2 da EN1317.....	33
2.2.2.1 - Parte 1 - Terminologia e critérios gerais dos métodos de ensaios de colisão.....	33
2.2.2.2 - Parte 2 - Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Barreiras de Segurança	36
2.3 - Descrição da NCHRP <i>Report 350</i>	43
2.3.1 - Introdução	43
2.3.2 – Análise dos capítulos 2 a 6.....	43
2.3.2.1 - Capítulo 2 - Parâmetros do ensaio.....	43
2.3.2.2 - Capítulo 3 - Condições de ensaio.....	45
2.3.2.3 - Capítulo 4 - Aquisição de dados	47
2.3.2.4 - Capítulo 5 - Critério de avaliação	47
2.3.2.5 - Capítulo 6 - Documentação do ensaio.....	50
2.4 – Comparação entre a EN1317 e a NCHRP <i>Report 350</i>	50
2.4.1- Diferenças Conceptuais - Preâmbulo	50
2.4.1.1- Âmbito das Normas.....	50
2.4.1.2 - Veículos de Ensaio.....	51
2.4.1.3 - Condições de Ensaio – caso barreiras de segurança.....	52
2.4.1.4 - Critérios de Avaliação.....	52
2.5 - Lacunas da EN 1317.....	53
2.6 – Dificuldades na Aplicação das Normas	55
Capítulo V	
CRITÉRIOS A CONSIDERAR NO DIMENSIONAMENTO DE BARREIRAS DE SEGURANÇA	56
1 – Introdução	56
2 - Efeito dos Pesados	56
2.1 - Cargas e Velocidades Actuais	56
2.2 - Critério de Não Capotamento	57
2.3 - Deslizamento Controlado	58
2.4 - Não Rotura.....	59
3 - Efeito sobre os Ligeiros.....	59
3.1 - Severidade da colisão/efeito sobre os ocupantes do veículo.....	59
Capítulo VI	
SISTEMA ALTERNATIVO PROPOSTO.....	61
1 - Introdução.....	61
2 - Descrição	63
2.1 - Classificação da Barreira segundo a EN1317.....	63

2.2 - Definição conceptual	63
3 – Ensaio a Reproduzir	66
3.1 - Introdução	66
3.2 – Veículos	66
3.3 – Barreira	69
Capitulo VII	
VALIDAÇÃO NUMÉRICA	70
1- Método dos Elementos Finitos.....	70
2 - Programa de FE - ABAQUS.....	71
2.1 - Introdução	71
2.2 - Etapas da Análise.....	71
2.2.1 – Pré-processamento	71
2.2.2 - Simulação (ABAQUS/Standard ou ABAQUS/Explicit)	72
2.1.3 Pós-processamento (ABAQUS/Viewer)	72
3 - Método Explícito.....	73
3.1 - Implementação Numérica	73
3.2 - Massa Nodal e Inércia	74
3.3 – Estabilidade.....	74
3.4 - Tempo de Incrementação.....	75
3.5 - Vantagens do Método Explícito	75
4 - Modelo FE – Introdução de Dados	76
4.1 – Préâmbulo	76
4.2 - Geometria do Modelo	76
4.2.1 – Veículo	76
4.2.2 - Sistema de Barreira Encastrada.....	78
4.2.3 - Sistema de Barreira Proposto	78
4.3 – Malha	79
4.3.1 – Descrição Geral	79
4.3.2 - Escolha dos elementos	81
4.4 – Interações	82
4.5 – Materiais	85
4.5.1 – Apresentação Geral	85
4.6 - Condições Fronteira e Acções	86
4.6.1 - Condições Fronteira.....	86
4.6.1.1 – Deslocamentos.....	86
4.6.1.2 – Velocidades	88
4.6.2 – Acções.....	89
4.7 - Conectores	90
4.7.1 Veículo	90
4.7.2 Sistema de Barreira Proposto	94
Capitulo VIII	
RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	96
1 – Introdução	96
2 – Comportamento do Veículo Pesado	96
2.1 – Trajectória.....	96
2.2 – Velocidades.....	106
2.3 – Acelerações.....	107
2.4 – Energia Cinética.....	109
2.5 – Cabos	110
2.6 – Elemento de ligação do cabo à barreira	113
2.7 – Reforço estrutural entre elementos de ligação	114
3 – Efeito sobre os veículos ligeiros	115
3.1 – Energia Cinética.....	117

3.2 – Acelerações	118
3.3 – Valor de ASI	119
4 – Tempo de processamento	120
Capitulo IX	
CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	121
1 - Conclusões	121
2 – Desenvolvimentos Futuros.....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
BIBLIOGRAFIA	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo II

Figura II. 1 – Classificação dos sistemas de segurança rodoviária.....	3
Figura II. 2 – Perfil da barreira tipo “New Jersey”.....	13
Figura II. 3 - Perfil da barreira tipo “F”.....	16
Figura II. 4 – Perfil tipo Ontário.....	17
Figura II. 5 – Perfil com paramento constante	17
Figura II. 6 – Perfil tipo “RTA”	18
Figura II. 7 – Perfil tipo “RTB”.....	18
Figura II. 8 – Perfil tipo “VFB”.....	19

Capítulo III

Figura III. 1 – Mecanismos de impacto em Barreiras Semi-Flexíveis.....	24
Figura III. 2 – Esquema de colisão contra um separador New Jersey	26

Capítulo IV

Figura IV. 1 – Esquema de colisão.....	39
Figura IV. 2 – Limites da caixa teórica	40
Figura IV. 3 – Relação entre ASI e AIS.....	54
Figura IV. 4 – Programa de simulação – DYNA3D.....	55

Capítulo V

Figura V. 1 – Esquematização da secção de impacto de um veículo contra uma barreira no limite de capotamento.....	57
---	----

Capítulo VI

Figura VI. 1 - Esquema de colisão entre um veículo ligeiro e uma barreira de segurança.....	61
Figura VI. 2 - Esquema de colisão entre um veículo ligeiro e uma barreira de segurança.....	62
Figura VI. 3 – Aspecto geral da barreira aplicada no separador central.....	64
Figura VI. 4 – Esquema de inserção da barreira na plataforma.....	65
Figura VI. 5 – Bloco de barreira com as peças de ligação aos cabos e reforço interior	65

Capítulo VII

Figura VII. 1 – Etapas de uma análise no ABAQUS.....	72
Figura VII. 2- Vista geral do veículo.....	76
Figura VII. 3 – Chassi	77
Figura VII. 4 – Pneu e cintas	77

Figura VII. 5 - Vista geral da barreira e do pavimento	78
Figura VII. 6 – Vista geral da barreira e do pavimento	79
Figura VII. 7 – Pormenor da barreira	79
Figura VII. 8 – Bloco de 2m.....	79
Figura VII. 9 - Vista geral da malha do Sistema de Barreira encastrada	80
Figura VII. 10 - Vista geral da malha do Sistema de Barreira proposta	80
Figura VII. 11 - Vista geral da malha do veículo	81
Figura VII. 12 - Vista do chassi do veículo	81
Figura VII. 13 - Relação exponencial entre a pressão e a penetração	83
Figura VII. 14 - Encastramento na base da Barreira (1).....	87
Figura VII. 15 - Encastramento total do pavimento	87
Figura VII. 16 – Encastramento na base da barreira oposta (2).....	88
Figura VII. 17 – Corpos com velocidade de translação de 22,22 m/s	88
Figura VII. 18 - Corpos com velocidade de translação de 22,22 m/s	89
Figura VII. 19 - Corpos com velocidade de translação de 22,22 m/s	89
Figura VII. 20 - Pressão interna do pneu	90
Figura VII. 21 - Ligação da jante ao braço da suspensão	91
Figura VII. 22 - Conjunto eixo e braço da suspensão dianteira.....	92
Figura VII. 23 - Conjunto eixo e braços da suspensão traseira	92
Figura VII. 24 - Pormenor da ligação do braço ao eixo	93
Figura VII. 25 – Pormenor da ligação entre as barreiras	95

Capítulo VIII

Figura VIII. 1 – Comportamento do veículo durante a simulação e o ensaio à escala real barreira encastrada	98
Figura VIII. 2 – Comportamento do veículo durante a simulação – barreira encastrada	100
Figura VIII. 3 – Tensões instaladas no pára-choques na zona com a barreira ($t=0.091s$)	101
Figura VIII. 4 - Aspecto geral do funcionamento da suspensão e da deformação do pneu	101
Figura VIII. 5 - Comportamento do veículo durante a simulação – barreira proposta	103
Figura VIII. 6 – Aspecto geral da deformação da barreira	104
Figura VIII. 7 – Deformação da barreira proposta	105
Figura VIII. 8 - Vista geral do bloco com os 2 cabos.....	111
Figura VIII. 9 - Pormenor dos varões de aço interiores e das peças de ligação.....	111
Figura VIII. 10 - Pormenor da cunha apertada (A) e solta (B).....	111
Figura VIII. 11 – Numeração dos conectores.....	112
Figura VIII. 12 - Definição da área de corte.....	113
Figura VIII. 13 - Varões de ligação entre elementos de fixação dos cabos.....	114
Figura VIII. 14 – Malha do modelo para a simulação da colisão contra a barreira encastrada	115
Figura VIII. 15 – Malha do modelo para a simulação da colisão contra a barreira proposta	116
Figura VIII. 16 – Deformação da barreira proposta	116

ÍNDICE DE IMAGENS

Capítulo II

Imagem II. 1– Terminal de barreira semi-flexível - tipo cauda de carpa.....	4
Imagem II. 2 – Vários tipos de terminais: A - Nariz de touro; B – Redondo; C - Plástico.....	5
Imagem II. 3 – Transição Barreira Rígida – Semi-flexível	5
Imagem II. 4 – Transição Barreira Semi-flexível - Flexível.....	6
Imagem II. 5 - Muro de guarda para veículos	6
Imagem II. 6 – Tipos de Atenuadores de colisão: R- redireccionais; ND – não redireccionais	7
Imagem II. 7 – Escapatória.....	8
Imagem II. 8 – Guarda corpos para peões	9
Imagem II. 9 – Barreira flexível de cabo triplo: A- aspecto geral B – pormenor da ligação entre cabos	10
Imagem II. 10 – Perfil em “W” colocado no separador central	11
Imagem II. 11 – Perfil em “W” colocado no extremo da plataforma	11
Imagem II. 12 – Perfil em tripla onda	12
Imagem II. 13 – Perfil tipo “BHO”	12
Imagem II. 14 – Barreira “New Jersey” colocada no extremo da plataforma	14
Imagem II. 15 - Barreira “New Jersey” colocada no separador central.....	14
Imagem II. 16 – Execução de barreira de betão tipo New Jersey “ <i>in situ</i> ”	15
Imagem II. 17 – Colocação de barreiras de betão tipo New Jersey pré-fabricadas	15
Imagem II. 18 – Barreira rígida de betão com perfil F	16
Imagem II. 19 – Barreira rígida em betão com paramento constante	18
Imagem II. 20 - Barreira rígida em betão tipo GM.....	19
Imagem II. 21– Barreiras de segurança no extremo da plataforma	21
Imagem II.22 – Barreiras de segurança no separador central	22

Capítulo III

Imagem III. 1 – Pormenor do conjunto: amortecedor/prumo/viga.....	23
---	----

Capítulo IV

Imagem IV. 1 – Atenuadores de impacto para camiões	51
--	----

Capítulo VI

Imagem VI. 1 - Camião IVECO Euro Cargo 170 E21	69
--	----

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo IV

Tabela IV. 1 – Classes de ensaios de colisão de veículos.....	37
Tabela IV. 2 – Níveis de Contenção e Ensaios.....	37
Tabela IV. 3 – Níveis de Severidade das Colisões	38
Tabela IV. 4 – Níveis de deformação das barreiras.....	38
Tabela IV. 5 – Parâmetros de ensaio	40
Tabela IV. 6 - Matriz de ensaio para barreiras longitudinais.....	48
Tabela IV. 7 – Critério para avaliação de sistema de segurança.....	49

Capítulo VI

Tabela VI. 1 – Especificações dos veículos segundo a EN1317	66
Tabela VI. 2 – Características do camião IVECO Euro Cargo 170 E21	67

Capítulo VII

Tabela VII. 1 - Tipo e número de elementos do modelo	82
Tabela VII. 2 - Coeficientes de atrito	83
Tabela VII. 3 - Comportamento dos tipos de contacto	84
Tabela VII. 4 – Pares de Contacto	84
Tabela VII. 5 – Materiais com comportamento Elástico linear	85
Tabela VII. 6 - Materiais com comportamento Elásto-plástico	85
Tabela VII. 7 - Materiais com comportamento Hisperelástico.....	85
Tabela VII. 8 – Resultados dos ensaios relativos aos materiais das cintas dos pneus	86
Tabela VII. 9 - Restrições ao movimento aplicadas às partes	87
Tabela VII. 10 - Movimentos relativos entre os pontos conectados segundo os 3 eixos.....	91
Tabela VII. 11 – Características das suspensões	93

Capítulo VIII

Tabela VIII. 1 – Dados relativos ao tempo de processamento	120
--	-----

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Capítulo II

Gráfico II. 1– Sinistralidade rodoviária a nível mundial em 2003	20
--	----

Capítulo IV

Gráfico IV. 1 – Índice da Necessidade de Barreiras de Segurança (IS)	29
Gráfico IV. 2 – Energia Cinética _{normal}	31

Capítulo VI

Gráfico VI. 1 - Relação força/deslocamento da barreira	62
--	----

Capítulo VII

Gráfico VII. 1 - Comportamento da suspensão	94
Gráfico VII. 2 – Relação Força/Deslocamento no cabo que une as barreiras.....	95

Capítulo VIII

Gráfico VIII. 1 - Velocidade do veículo – barreira encastrada.....	106
Gráfico VIII. 2 - Velocidade do veículo – sistema proposto	107
Gráfico VIII. 3 – Acelerações - sistema encastrado	108
Gráfico VIII. 4 – Acelerações – sistema proposto.....	108
Gráfico VIII. 5 – Energia cinética do veículo – barreira encastrada.....	109
Gráfico VIII. 6 – Energia cinética do veículo – sistema proposto.....	110
Gráfico VIII. 7 - Força nos conectores (cabo).....	113
Gráfico VIII. 8 - Energia Cinética – barreira encastrada	117
Gráfico VIII. 9 - Energia Cinética – barreira proposta	117
Gráfico VIII. 10 - Barreira encastrada.....	118
Gráfico VIII. 11 - Barreira proposta.....	118
Gráfico VIII. 12 – Valores de ASI_{normal} – Barreira encastrada	119
Gráfico VIII. 13 – Valores de ASI_{normal} – Barreira proposta	119

Capítulo I

INTRODUÇÃO

As estradas sempre desempenharam um papel importante no desenvolvimento das civilizações. Através das estradas uniram-se povos, criaram-se laços comerciais, mas também se invadiram nações.

A estrada como estrutura sempre reflectiu o avanço tecnológico de cada civilização. Se em tempos se uniram cidades com estradas em terra batida, hoje em dia qualquer auto-estrada possui piso drenante.

A par de todo o desenvolvimento tecnológico de que as estradas foram alvo, também os veículos evoluíram, tornando-se cada vez mais rápidos e acessíveis às pessoas. Isto levou a um aumento exponencial do número de veículos, que associado às elevadas velocidades passíveis de serem atingidas, tornou as estradas locais bastante perigosos.

Perante esta situação houve a necessidade de se criarem condições de segurança para os utentes das estradas, actuando ao nível dos veículos, das infra-estruturas e da sensibilização. Ao nível dos veículos poder-se-á referir a invenção do cinto de segurança, do air-bag, do ABS e a evolução ao nível da deformação/dissipação de energia por parte da carroçaria. Quanto à sensibilização a mesma passa pela aposta em campanhas publicitárias massivas, incentivando condutores a conduzirem com prudência, através da televisão, dos jornais e dos *outdoors*, revelando-se muitas vezes ineficazes embora se gastem milhões de euros. Por fim a segurança da infra-estrutura e envolvente regista notórios avanços tecnológicos, como é o caso da introdução das barreiras de segurança, dos atenuadores de impacto e das camadas de desgaste com boas características de aderência e capacidade de drenagem.

Mas todo este investimento em segurança rodoviária não chega para anular as inúmeras mortes nas estradas de todo o Mundo. A busca de soluções ao nível do desenvolvimento de sistemas de segurança rodoviária, e em particular das barreiras de segurança, tem registado um aumento notável surgindo no mercado vários tipos de barreiras em alternativa às soluções tradicionais (perfil metálico em dupla onda, cabos de aço e barreiras de betão).

Dada a importância deste tema, bastante actual, tornou-se um desafio enorme o desenvolvimento deste trabalho, centralizado na análise de toda a problemática que envolve a colisão dos veículos contra as barreiras de segurança e a apresentação de um novo conceito de barreira de segurança potencialmente mais eficaz.

Os objectivos que se propõe atingir neste trabalho são os seguintes:

- Apresentar uma classificação dos Sistemas de Segurança Rodoviária;
- enquadrar as Barreiras de Segurança dentro dos Sistemas de Segurança Rodoviária, mostrando as principais diferenças conceptuais entre elas;
- mostrar a importância das Barreiras de Segurança na redução da mortalidade rodoviária;
- indicar os documentos normativos existentes relativos às Barreiras de Segurança, explorar as diferenças entre elas e as principais lacunas;
- analisar o comportamento das Barreiras de Segurança perante as colisões com veículos ligeiros e com pesados;
- propor um novo sistema de Barreira de Segurança capaz de responder de uma forma mais aceitável, perante a colisão de um veículo ligeiro ou de um pesado, em ambos os casos com maior eficácia do que os sistemas actualmente existentes no mercado.

Este trabalho está dividido em 9 capítulos, sendo o primeiro e o último referentes, respectivamente, à introdução e às conclusões.

No capítulo II é apresentada uma classificação para os Sistemas de Segurança Rodoviária, descrevendo-se mais em particular o caso das Barreiras de Segurança e sua importância como sistema de segurança rodoviária.

No capítulo III faz-se uma exposição do funcionamento dos sistemas de Barreiras Semi-flexível e Rígido, expondo-se também as vantagens e desvantagens de cada um.

No capítulo IV é feita uma apresentação dos documentos normativos existentes a nível relativos às Barreiras de Segurança, indicando-se as principais diferenças entre eles, as suas lacunas e a dificuldade da sua implementação.

No capítulo V são expostos os critérios a adoptar no dimensionamento de Barreiras de Segurança.

No capítulo VI apresenta-se um novo sistema de Barreiras de Segurança, classificado segundo a norma europeia EN 1317.

O Capítulo VII é destinado à validação do modelo numérico, através do qual se simularão as colisões entre o veículo e a barreira de segurança.

No capítulo VIII são apresentados os resultados das simulações.

Capítulo II

SISTEMAS DE SEGURANÇA RODOVIÁRIA

1 – Classificação dos Sistemas de Segurança Rodoviária

Os sistemas de segurança rodoviária são caracterizados por um grande número de equipamentos com a função de proteger os ocupantes dos veículos que perderam o controlo e saíram da sua via de tráfego e, simultaneamente, evitar danos em terceiros quer se encontrem na estrada ou nas proximidades. Na Figura II. 1 é apresentada a classificação dos sistemas de segurança rodoviária, segundo a norma EN1317-1 [1] do CEN (Comité Europeu de Normalização).

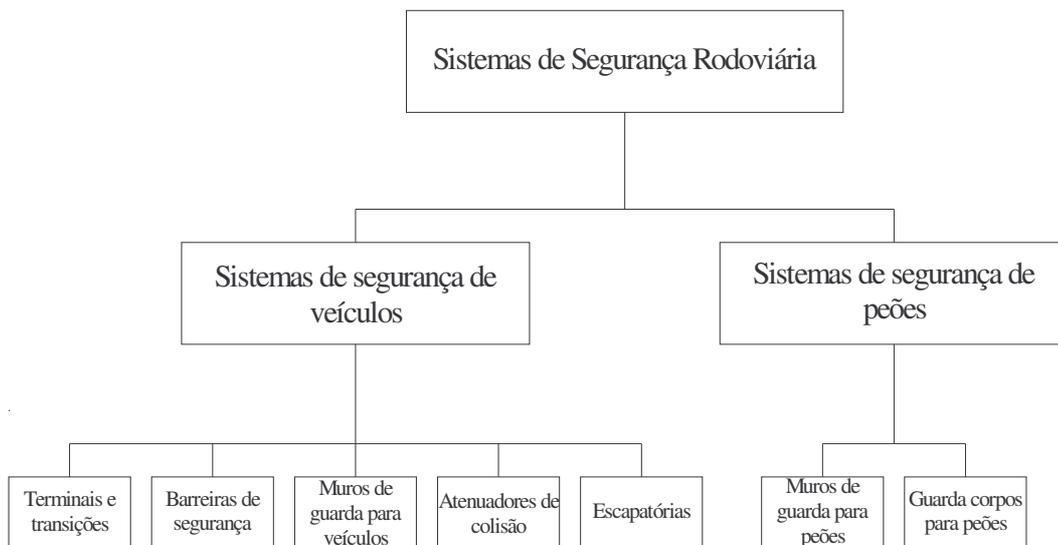


Figura II. 1 – Classificação dos sistemas de segurança rodoviária

2 – Descrição de Sistemas de Segurança de Veículos

2.1 - Barreiras de Segurança

As barreiras ou guardas de segurança, como são vulgarmente conhecidas em Portugal, são dispositivos instalados no extremo da plataforma ou no separador central com a finalidade de conter e redireccionar os veículos acidentados, provocando o menor dano possível aos seus ocupantes. Mais à frente serão apresentadas com mais pormenor as características destes sistemas de segurança.

2.2 - Terminais e Transições

Os terminais são o tratamento utilizado nas extremidades das barreiras de segurança. As transições são o equipamento utilizado na união de duas barreiras com diferentes concepções e desempenhos.



Imagem II. 1– Terminal de barreira semi-flexível - tipo cauda de carpa

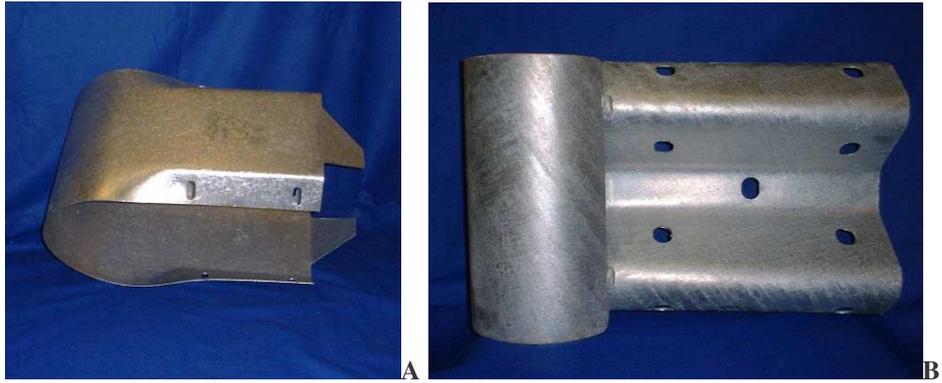


Imagem II. 2 – Vários tipos de terminais: A - Nariz de touro; B – Redondo; C - Plástico



Imagem II. 3 – Transição Barreira Rígida – Semi-flexível



Imagem II. 4 – Transição Barreira Semi-flexível - Flexível

2.3 - Muros de Guarda para Veículos

Os muros de guarda para veículos são barreiras de protecção instaladas na extremidade de uma ponte, de um muro de suporte ou outra estrutura em que possa existir uma queda vertical. Estes dispositivos protegem ainda peões e outros utilizadores da estrada.



Imagem II. 5 - Muro de guarda para veículos

2.4 - Atenuadores de Colisão

Os atenuadores de colisão ou de impacto são dispositivos instalados em frente a um objecto rígido e destinados à absorção de energia de um veículo rodoviário, com vista a reduzir a gravidade de uma possível colisão. Quanto à funcionalidade os atenuadores de impacto podem-se classificar em 2 tipos:

- **redireccionais** – concebidos para conter e redireccionar o veículo;
- **não redireccionais** – concebidos para conter e capturar o veículo descontrolado.



NR



NR



R

Imagem II. 6 – Tipos de Atenuadores de colisão: R- redireccionais; ND – não redireccionais

2.5 - Escapatórias

As escapatórias são locais adjacentes à estrada e que devem ser localizadas no fim dos declives superiores a 6% e com extensões maiores que 2 km. Pretende-se que estes dispositivos permitam desacelerar um veículo que, por qualquer razão, não conseguiu travar durante a descida.



Imagem II. 7 – Escapatória

3 – Descrição de Sistemas de Segurança de Peões

3.1 - Muros de Guarda para Peões

Os muros de guarda para peões são sistemas de segurança para peões, cavaleiros, ciclistas ou gado ao longo de uma ponte ou no topo de um muro de suporte ou estrutura semelhante e que não constitui, intencionalmente, um sistema de segurança para veículos.

3.2 - Guarda Corpos para Peões

Os guarda corpos para peões são sistemas de segurança para peões, cavaleiros, ciclistas ou gado localizados ao longo da extremidade de passeios ou caminhos de peões e concebidos para impedir os peões de transporem ou atravessarem a estrada ou outra área provavelmente perigosa.



Imagem II. 8 – Guarda corpos para peões

4 – Classificação das Barreiras de Segurança

As barreiras de segurança, face ao seu comportamento estrutural, dividem-se em 3 grandes grupos:

- **Flexíveis**
- **Semi-Flexíveis**
- **Rígidas**

5 – Descrição de Barreiras de Segurança

5.1 – Barreiras Flexíveis

5.1.1 – Triplo cabo de aço, com poste frágil

Este tipo de barreira consiste em três cabos de aço copulados a postes metálicos de fraca capacidade estrutural e baixo nível de encastramento no solo. A função dos cabos de aço é de conter e redireccionar os veículos. Os postes devem manter os cabos na altura desejada. A altura do cabo mais elevado situa-se, normalmente, entre os 690mm e os 760mm, estando os postes afastados cerca de 5m.

Estas barreiras são principalmente utilizadas nos EUA.



Imagem II. 9 – Barreira flexível de cabo triplo: A- aspecto geral B – pormenor da ligação entre cabos

5.1.2 – Quádruplo cabo de aço, com poste frágil

O sistema com quádruplo cabo de aço e poste frágil é muito semelhante ao anterior, sendo caracterizado por uma disposição simétrica dos cabos que permite a sua aplicação tanto no extremo da plataforma como no separador central. Este tipo de barreira é amplamente utilizado nas estradas australianas e inglesas.

5.1.3 – Perfil metálico em “W” ou dupla onda, com poste frágil

O sistema de barreira flexível de dupla onda e poste frágil tem um comportamento muito idêntico ao das barreiras com cabos de aço. A viga em “W” ou dupla onda desempenha a função de conter e redireccionar o veículo, servindo os postes apenas para a sustentar à altura a que o veículo colide. Os postes possuem sistemas de desengate fácil da viga metálica em caso de colisão. A altura da viga está a uma distância do solo entre os 700mm e os 760mm.

5.1.4 – Perfil metálico em tripla onda, com poste frágil

Este sistema é muito semelhante ao de dupla onda, apenas se diferenciando deste pelo uso de uma viga em tripla onda, caracterizada por uma resistência estrutural superior e uma consequente capacidade de contenção mais elevada. A altura da viga ronda os 840mm.

5.2 – Barreiras Semi-Flexíveis

5.2.1 – Perfil metálico em “W” ou dupla onda, com poste rígido

É ainda o sistema mais utilizado na actualidade, particularmente em Portugal, sendo caracterizado por uma viga metálica em “W” ligada a um poste metálico através de um amortecedor de aço, madeira, plástico resistente ou outro. Este sistema pode ser também montado com 2 vigas em “W” proporcionando maior capacidade de contenção, especialmente em pontos críticos como é o caso das curvas perigosas.



Imagem II. 10 – Perfil em “W” colocado no separador central



Imagem II. 11 – Perfil em “W” colocado no extremo da plataforma

5.2.2 – Perfil metálico em tripla onda, com poste rígido

A barreira semi-flexível com perfil em tripla onda é muito semelhante ao sistema com perfil em “W”, diferenciando-se apenas na capacidade de contenção, e devido à sua altura entre os 810mm e os 900mm, ser mais adequada para veículos mais altos.



Imagem II. 12 – Perfil em tripla onda

5.2.3 – Perfil metálico duplo especial tipo “BHO”

Este sistema é muito semelhante ao do perfil em “W” diferenciando-se apenas na forma do perfil da viga e espaçamento entre prumos.

As barreiras foram especialmente concebidas para serem aplicadas em pontes e viadutos, locais onde o espaço para a deformação da barreira é pequeno e o aspecto estético na obra de arte é importante.



Imagem II. 13 – Perfil tipo “BHO”

5.3 – Barreiras Rígidas

5.3.1 – Referência Histórica

Não são conhecidos a data e o local da primeira aplicação das barreiras de segurança rígidas. Sabe-se, no entanto, que as mesmas foram usadas em meados dos anos 40 na estrada US-99, sita na descida das Montanhas Tehachapi, no sul do vale central de Bakersfield, na Califórnia [3].

A primeira geração de barreiras rígidas foi desenvolvida para minimizar o número de invasões da faixa contrária por caminhões e também de reduzir o custo e o perigo que representava a manutenção das guardas semi-flexíveis, nomeadamente em zonas acidentadas.

5.3.2 – Perfil em betão tipo “New Jersey”

Os primeiros separadores centrais rígidos foram aplicados em New Jersey, em 1955, com apenas 457 mm de altura. Eram semelhantes a uma pequena parede vertical com uma deflexão na base de cada lado. Problemas operacionais da barreira levaram a que o perfil sofresse alterações pelo que a sua altura foi incrementada para 607 mm e, posteriormente, em 1959, para 813 mm [3].

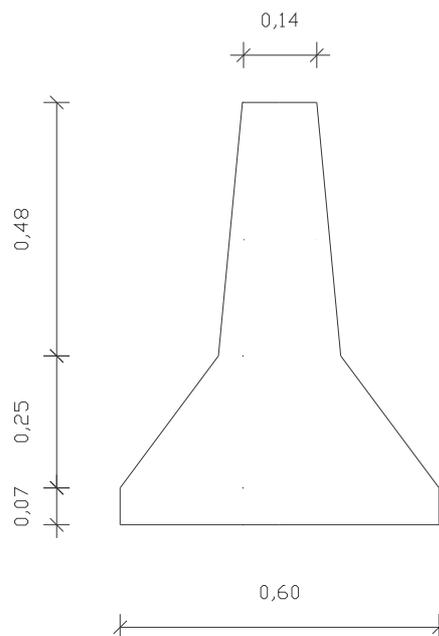


Figura II. 2 – Perfil da barreira tipo “New Jersey”



Imagem II. 14 – Barreira “New Jersey” colocada no extremo da plataforma



Imagem II. 15 - Barreira “New Jersey” colocada no separador central

O separador New Jersey não foi desenvolvido através de estudos baseados em crash-test, mas sim a partir da observação de acidentes contra barreiras e sucessivos aperfeiçoamentos do perfil, nos estados da Califórnia e New Jersey.

A partir da década de 60 o uso dos “New Jerseys” estendeu-se a todos os estados da U.S.A..

O grande sucesso do separador New Jersey reside no seu perfil, que induz um redirecionamento do veículo, logo que as suas rodas, no momento da colisão, provocam a subida do terço inferior da barreira. Simultaneamente, a elevação do centro de massa do veículo que decorre da mesma subida, permite uma absorção da energia cinética do veículo. Esta será restituída quando o veículo descer a parte menos inclinada da barreira, após a colisão, mas o redirecionamento da viatura para a sua faixa com o ângulo de reflexão adequado evitou a sua presença nos momentos críticos do embate.

Este tipo de barreira pode ser executada “*in situ*”, i.e., recorrendo a um equipamento com um molde com a forma da barreira que é alimentado por um camião de betão (Imagem II. 16) ou pré-fabricada e posteriormente fixa no local - Imagem II. 17. As grandes vantagens de executar a barreira “*in situ*” são a obtenção de uma barreira contínua, sem emendas e a um custo inferior ao sistema pré-fabricado.



Imagem II. 16 – Execução de barreira de betão tipo New Jersey “*in situ*”



Imagem II. 17 – Colocação de barreiras de betão tipo New Jersey pré-fabricadas

5.3.3 – Perfil em betão tipo “F”

A barreira de segurança em betão tipo “F” é semelhante à do perfil NJ, contudo, o ponto de quebra das inclinações situa-se 75 mm mais baixo. Existe ainda uma versão do perfil F mais alta, com 1065mm, especialmente desenhada para estradas com grandes volumes de tráfego pesado.

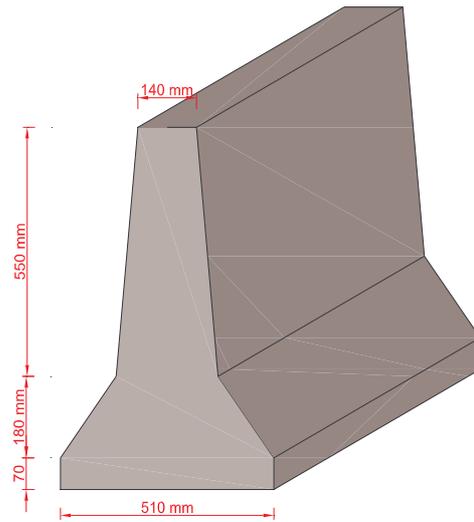


Figura II. 3 - Perfil da barreira tipo “F”



Imagem II. 18 – Barreira rígida de betão com perfil F

5.3.4 – Perfil em betão tipo “Ontário”

A barreira de segurança tipo “Ontário”, embora tenha as mesmas inclinações do NJ, distingue-se daquele por ser 270 mm mais alta e possuir secção de maior espessura.

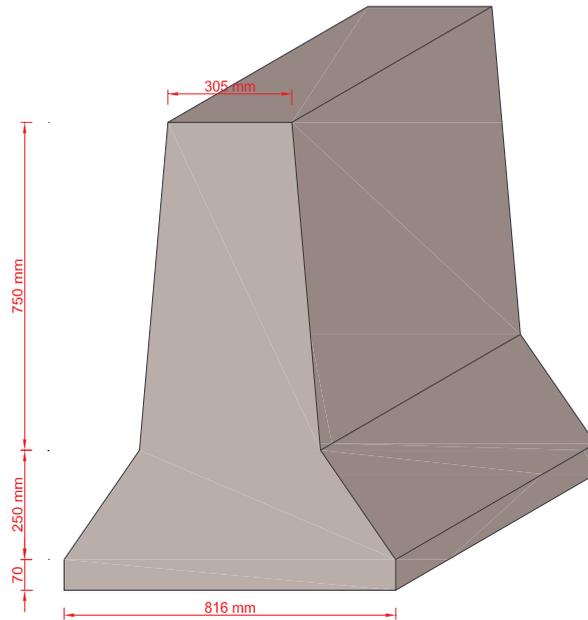


Figura II. 4 – Perfil tipo Ontário

5.3.5 – Perfil em betão com paramento constante

A barreira com paramento constante tem uma altura de 1070mm e uma inclinação das paredes de 79°. Esta é a barreira mais recentemente desenvolvida, recorrendo para tal a crash-tests. Na estrada I-95, na Virgínia, foi instalado este tipo de separador em cerca de 2 km [3].

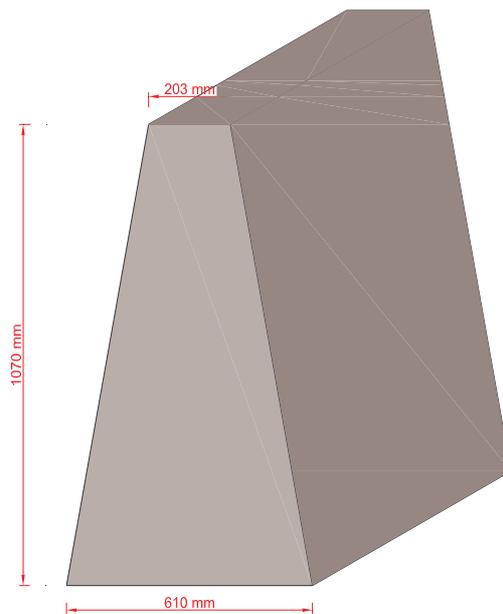


Figura II. 5 – Perfil com paramento constante



Imagem II. 19 – Barreira rígida em betão com paramento constante

5.3.6 – Outros tipos de perfil de barreira rígida

Existem muitos mais tipos de barreiras rígidas, como é o caso das de perfil em betão tipo “VFB”, do tipo “RTA” ou do tipo “RTB”.

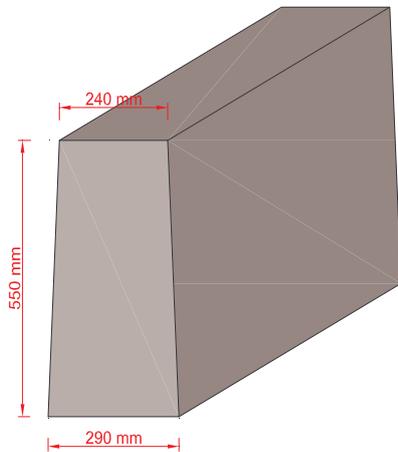


Figura II. 6 – Perfil tipo “RTA”

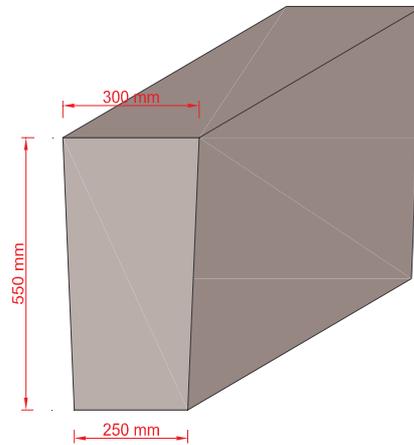


Figura II. 7 – Perfil tipo “RTB”

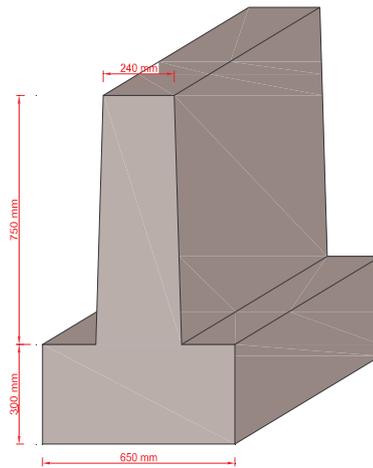


Figura II. 8 – Perfil tipo “VFB”

Existe ainda o registo de um separador, desenvolvido em conjunto pela General Motors e o Instituto de Transportes do Texas, em inícios dos anos 70. Esse separador era semelhante ao New Jersey, mas mais largo, já que o seu desenvolvimento foi baseado em crash-tests, com veículos mais largos e pesados. Isto implicava que o comportamento face aos veículos ligeiros não fosse tão favorável, como posteriormente se veio a revelar [3].



Imagem II. 20 - Barreira rígida em betão tipo GM

6 - Importância das Barreiras de Segurança

De uma maneira geral as estradas são lugares bastante perigosos. As altas velocidades, o peso dos veículos e o elevado número de veículos que aí circula, leva a que se note um incremento do número dos acidentes.

Como se pode verificar no Gráfico II. 1, ainda somos dos países desenvolvidos do mundo com maior percentagem de mortos na estrada em relação à população residente, como se consta pelo exemplo do ano de 2003, segundo o IRTAD (*International Road Traffic and Accident Database*) [4].

Por outro lado as estatísticas também nos indicam que, cerca de 35% das mortes ocorridas nas estradas são devidos a despistes, e que a probabilidade de uma pessoa morrer, quando o carro em que circula entra em despiste e transpõe a barreira de protecção, é de 17% [5].

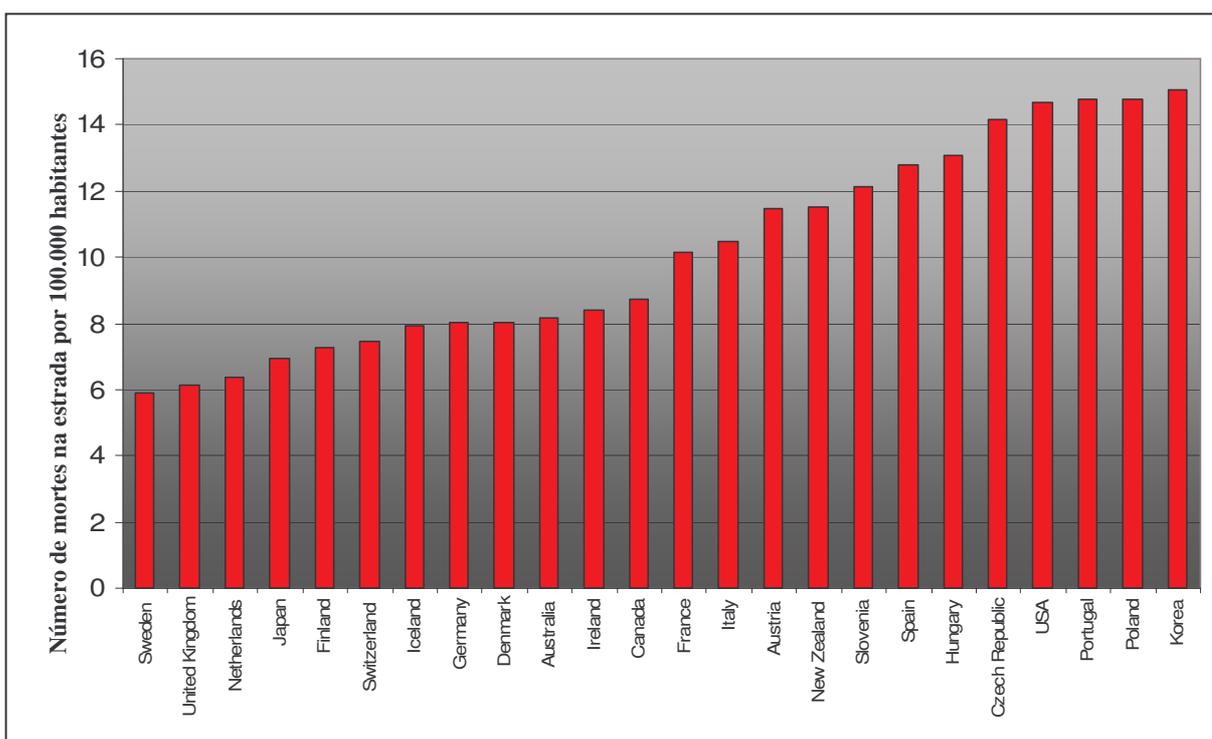


Gráfico II. 1– Sinistralidade rodoviária a nível mundial em 2003

As características da estrada (traçado, pavimento, drenagem, etc.) influenciam decisivamente a segurança daqueles que dela se servem. Contudo, é de realçar que mesmo a estrada “perfeita” a nível conceptual não previne a ocorrência de todos os acidentes. O comportamento humano, assim como as condições climáticas são factores a ter em conta na origem dos acidentes. A par dos sistemas de segurança do veículo (ABS, EPS, controlo de tracção, cintos de segurança e sistemas inteligentes) as guardas de segurança

desenvolvem um papel fundamental na Segurança Rodoviária. Basicamente a função das guardas de segurança é a de impedir a saída do veículo da sua faixa de rodagem, tendo em conta as solicitações transmitidas aos passageiros.

A função das guardas de segurança depende da posição onde se encontram, isto é, terão diferentes funcionalidades as guardas de segurança aplicadas nas bermas (extremos de plataforma) e em posição central (separador).

Quando se encontram no **extremo da plataforma**, de entre as suas funções, destacam-se as seguintes:

- protecção contra potenciais impactos com obstáculos capazes de produzir grande danos no veículo e seus ocupantes. De entre esses objectos destacam-se os elementos rígidos tais como: pilares de pontes, muros, postes de iluminação e suportes dos sistemas de sinalização;

- reter o veículo na faixa de rodagem, especialmente na presença de aterros com grande altura, pontes e terrenos com fortes declives;

- criar uma protecção para zonas de circulação pedonal/ciclistas;

- quando as características geométricas da estrada não são as ideais (curvas de raio mínimo), levando à adopção de soluções que garantam alguma segurança aos utilizadores face à situação invulgar com que se debatem;

- em zonas onde as condições climatéricas são em geral adversas (neve, nevoeiro, geadas, etc), diminuindo deste modo, em muito, a segurança da estrada;

- em geral, sempre que as consequências previsíveis para os ocupantes seja mais grave quando haja saída da plataforma do que as que resultam do choque contra as estruturas de contenção.



Semi-flexíveis



Rígidas (tipo New Jersey)

Imagem II. 21 – Barreiras de segurança no extremo da plataforma

A sua colocação em **separadores centrais**, para além de garantir objectivos genericamente idênticos deverá impedir que, quando os veículos fora de controlo possam invadir a faixa de sentido contrário, os acidentes daí eventualmente decorrentes assumam gravidade muito superior.



Semi-flexíveis



Rígidas (tipo New Jersey)

Imagem II.22 – Barreiras de segurança no separador central

Capítulo III

FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS SEMI-FLEXÍVEL E RÍGIDO

1- Semi-flexível

1.1 – Introdução

O funcionamento deste tipo de contenção caracteriza-se, numa 1ª fase, pela absorção de energia através do amortecedor (localizado entre a viga e o prumo) e numa 2ª fase, pela deformação dos prumos verticais e das vigas entre prumos. A rigidez dos prumos e vigas é determinante no desempenho da guarda metálica, i.e., deverão ter um valor suficientemente elevado para conseguir reter o veículo; contudo esse valor não deverá ser exagerado, para não provocar desacelerações elevadas aos ocupantes do veículo.



Imagem III. 1 – Pormenor do conjunto: amortecedor/prumo/viga

Na realidade, nestas matérias, existirão sempre objectivos, que não sendo antagónicos são pelo menos dificilmente compatibilizáveis. De facto, se as consequências da retenção dos veículos na sua faixa, fossem garantidamente menos graves do que aquelas que resultariam da sua transposição, não existiriam dúvidas e a opção deveria recair no uso de barreiras rígidas. Na realidade, essa garantia não existe em alguns casos, onde apesar de tudo, interessa reter os veículos na sua zona de circulação pela probabilidade de, em caso contrário, as consequências do acidente poderem ser agravadas. Complica o procedimento o facto de o comportamento das barreiras ser completamente diferenciados face à diversidade

de veículos que circulam nas estradas. As massas dos veículos ligeiros e dos pesados são completamente diferentes tais como o são as suas velocidades de circulação. O objectivo principal, que consiste em reter os veículos na sua faixa, pode exigir uma grande rigidez do dispositivo de retenção no caso dos veículos pesados. Ora essa grande rigidez pode ocasionar gravíssimas consequências no embate de um veículo ligeiro que circula geralmente a maior velocidade, o que ocasiona muitas vezes desacelerações demasiado violentas para os ocupantes desse tipo de viatura. As dificuldades de quantificar os índices de retenção são assim um problema recorrente nestas matérias e serão aqui também tratadas. Seria particularmente vantajoso conceber um dispositivo de retenção que, segurando os pesados descontrolados na sua faixa de rodagem conseguisse ser suficientemente flexível para minimizar os danos físicos nos ocupantes dos veículos ligeiros. Estas preocupações serão também valorizadas ao longo do trabalho.

Na Figura III. 1 reproduzem-se em esquema os mecanismos decorrentes do impacto de um veículo com as barreiras do tipo semi-flexível.

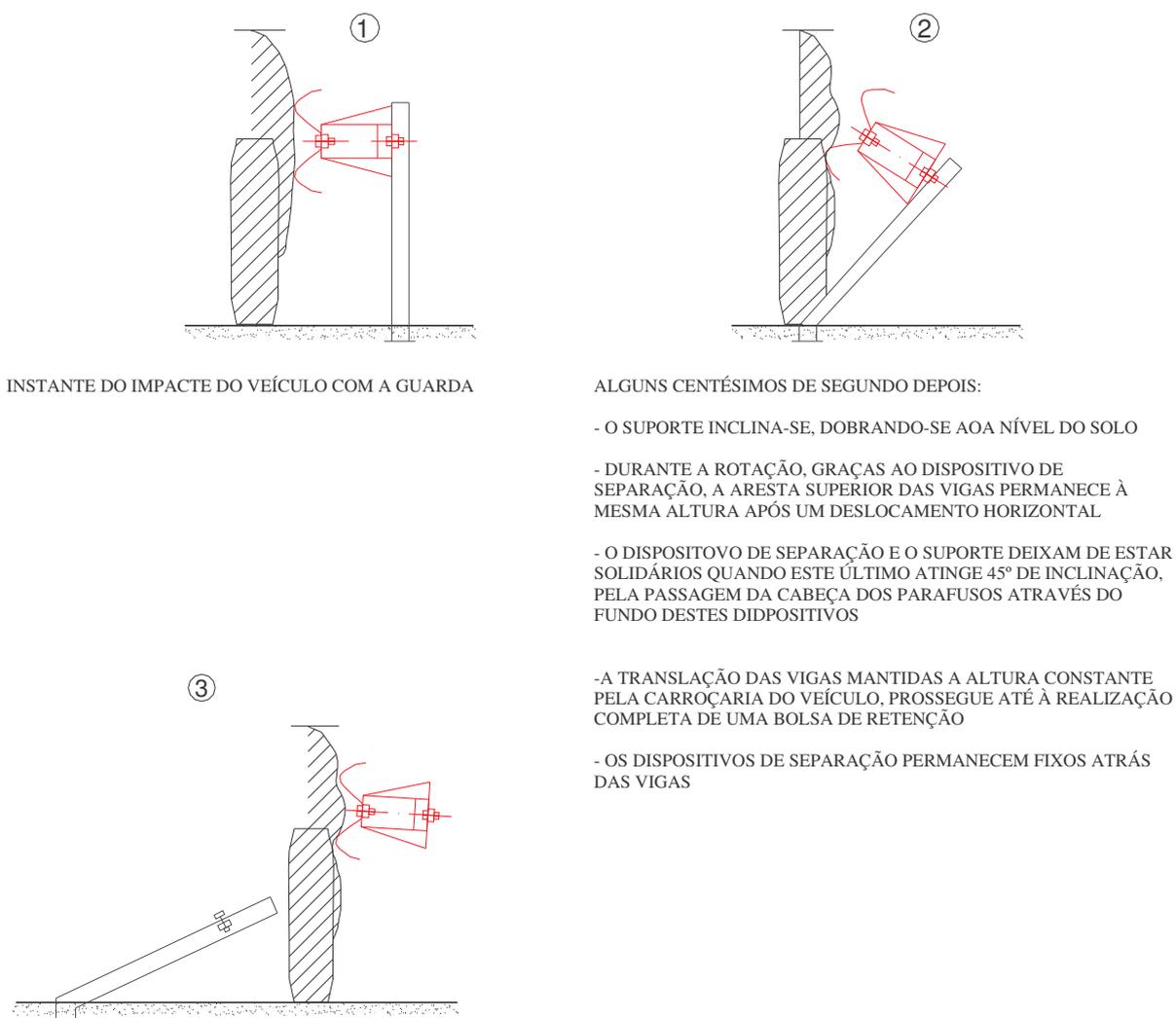


Figura III. 1 – Mecanismos de impacto em Barreiras Semi-Flexíveis

1.2 – Vantagens do Sistema

- em termos de custos de instalação são mais baratas 2 a 3 vezes, em relação ao sistema rígido;
- quando instaladas no separador central permitem uma melhor visão para a faixa contrária;
- proporcionam uma maior facilidade de remoção das vigas, em zonas de atravessamento de emergência em estradas de faixas separadas;
- a maior parte da energia cinética é absorvida pelo sistema (viga + prumo) e não pelo veículo, o que se traduz numa redução das desacelerações impostas aos ocupantes dos veículos;
- pelas mesma razões impõem danos menos severos aos veículos.

1.3 - Desvantagens do Sistema

- maiores custos de manutenção (especialmente quanto sujeitas a ambientes agressivos, tais como, zonas de neve ou ambientes salinos) comparativamente aos sistemas rígidos;
- necessidade de tratamentos especiais, quando inseridas em zonas potencialmente perigosas para os motociclistas, tendo-se que recorrer à utilização de sistemas duplos ou protecção dos prumos;
- não permitem a sua reutilização após uma colisão, uma vez que a mesma lhe provoca deformações permanentes.

1.4 – Limitações do Sistema

- necessidade de grandes espaços na sua retaguarda, para que a deformação das vigas ocorra sem restrições, transformando-se desta forma a energia cinética em energia de deformação.
- baixo nível de contenção face à acção dos pesados;

2 – Rígido

2.1 – Introdução

Neste tipo de sistema de segurança, a absorção/dissipação da energia cinética pode ser realizada pela contenção através dos seguintes fenómenos:

- rotura dos elementos que compõem o sistema;
- rotação dos elementos em torno da charneira, na base, do lado oposto à colisão;
- deslizamento dos elementos em plano horizontal.

O veículo por seu lado também absorve energia cinética, quer através da sua deformação (assumindo neste caso muita maior relevância do que no sistema semi-flexível), da elevação do centro de gravidade, devido à configuração da base da contenção e do atrito entre este e o sistema de segurança.

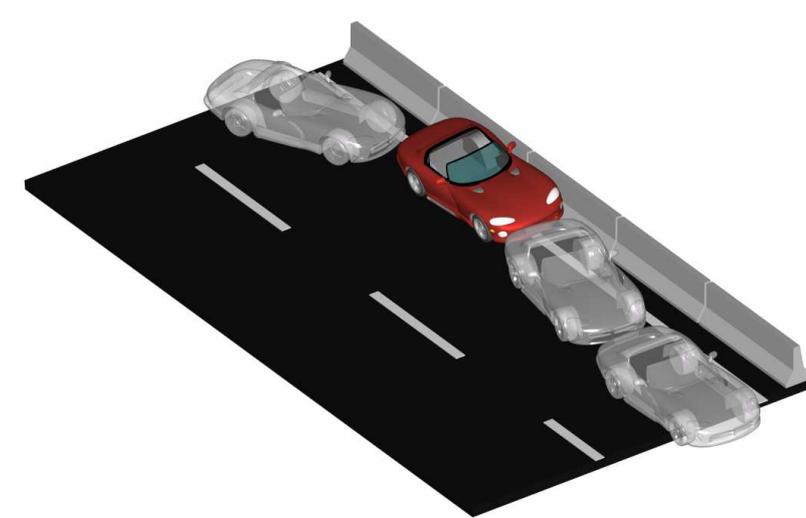


Figura III. 2 – Esquema de colisão contra um separador New Jersey

2.2 – Vantagens do Sistema

- grande capacidade de contenção face à acção dos veículos pesados;
- baixos custos de manutenção;
- necessidade de pouco espaço, sendo por isso ideal como separador central em zonas urbanas;

- bom funcionamento em pontes, quando associado a uma sistema de ancoragens.

2.3 – Desvantagens do Sistema

- necessidade de equipamento pesado para a sua colocação/substituição, nomeadamente no que respeita aos módulos de 6m;
- obriga a utilização de sistemas de drenagem mais dispendiosos, junto às barreiras colocadas no separados central.

2.4 – Limitações do Sistema

- embora a utilização de módulos maiores garanta um bom nível de contenção para os veículos pesados, no que respeita às solicitações provocadas nos ligeiros, as mesmas agravam-se à medida que o nível de contenção aumenta (aumento das desacelerações);
- a recarga de um pavimento, sem uma prévia fresagem, leva a que os módulos que constituem a barreira fiquem encastrados (não permitindo a sua translação) o que também potencia o capotamento dos pesados.

Capítulo IV

NORMALIZAÇÃO

1 - Situação Nacional

Actualmente, os únicos documentos com referência a disposições e critérios a respeitar, relativamente a Barreiras de Segurança e utilizados pelos projectistas, são os contidos no Caderno de Encargos Tipo e nas Normas de Traçado da Ex-JAE.

No que diz respeito ao CET, o documento faz referência aos sistemas de segurança nas seguintes rubricas:

14.05 – Equipamentos de Sinalização e Segurança – Características dos Materiais

15.05 – Equipamentos de Sinalização e Segurança – Métodos Construtivos

16.05 – Equipamentos de Sinalização e Segurança – Dicionário de Rubricas e Critérios de Medição.

As Normas de Traçado estabelecem um critério para a verificação da necessidade de colocação de guardas de segurança, limitando-se a análise às barreiras a colocar no extremo da plataforma. O critério de colocação ou Índice da Necessidade de Barreiras de Segurança (IS) é função da altura do aterro, largura da berma, perfil longitudinal, inclinação do terreno natural e condições climáticas. A obtenção do valor de IS pode ser efectuada a partir do Gráfico IV. 1. Por sua vez a adopção de um índice maior ou menor é dependente do Tráfego Médio Diário (TMD) no troço em análise.

IS\geq70	TMD\leq2000
IS\geq50	TMD$>$2000

Este documento, para além de não ser uma norma, apresenta muitas lacunas, nomeadamente nos capítulos relativos às barreiras de segurança rígidas.

No que concerne à Norma EN 1317, a mesma foi já transposta para Portugal, através do IPQ, no que respeita aos sub capítulos 1 e 2 (NP EN 1317-1 e NP EN 1317-2 [2]). Os sub capítulos 3 e 4, embora disponíveis através do IPQ(versão Inglesa, Francesa e Alemã), não se encontram em vigor em Portugal.

Apesar de as disposições normativas existirem (NP EN 1317) a sua referência em Cadernos de Encargos é pouco conhecida.

Ainda, relativamente a estes sistemas de segurança existe um projecto-lei cujo nome oficial é “COLOCAÇÃO DE GUARDAS DE SEGURANÇA METÁLICAS NAS VIAS DE COMUNICAÇÃO PÚBLICAS, INTEGRADAS OU NÃO NA REDE RODOVIÁRIA NACIONAL, CONTEMPLANDO A PERSPECTIVA DA SEGURANÇA DOS VEÍCULOS DE DUAS RODAS”, que estipula critérios de disposições relativamente à localização, características e tratamentos a dar às guardas de segurança, com vista a uma maior protecção dos motociclistas.

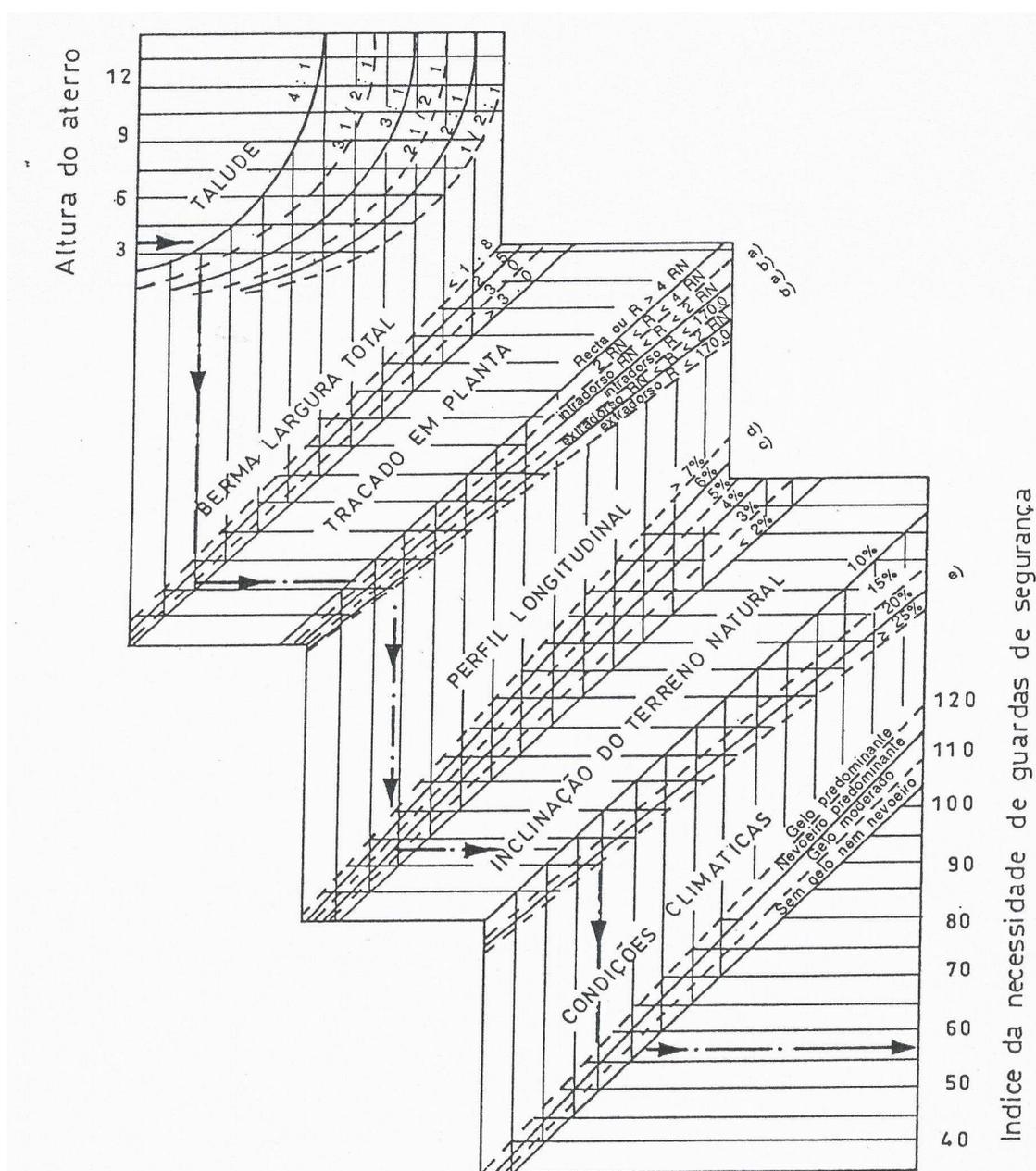


Gráfico IV. 1 – Índice da Necessidade de Barreiras de Segurança (IS)

As disposições normativas relativas às guardas de segurança rígidas, expressas no CE da ex-Jae, estabelecem como critérios a respeitar pela estrutura de contenção, unicamente a garantia de contenção de um veículo com 12 ton, circulando a uma velocidade de 70 km/h e incidindo com um ângulo de 20°.

Com estes dados não é de esperar uma eficácia adequada já que, legalmente, podem circular veículos pesados com 38 toneladas e a velocidades de 90 Km/h.

A energia cinética aumenta linearmente com a massa; no entanto, relativamente à velocidade e ângulo de colisão esse aumento é quadrático. Isto revela a enorme importância que se deve dar, na análise da massa, velocidades e ângulo de colisão.

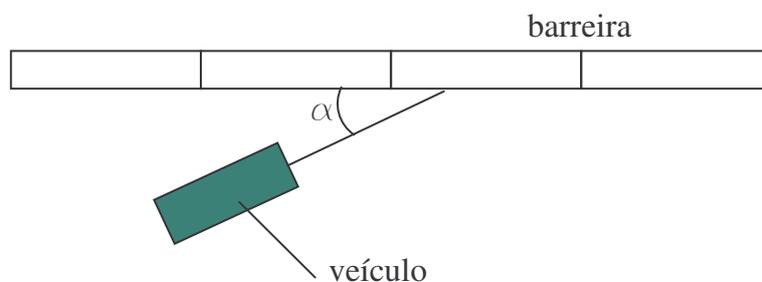
Na adopção dos valores para estes parâmetros, deve ser tida em conta a importância da estrada, a sua localização, o tráfego característico e também a probabilidade de ocorrência de determinado tipo de acidente e sua gravidade (sistema mais vocacionado para veículos pesados ou para veículos ligeiros).

O Gráfico IV. 2 mostra a variação da energia cinética (na sua componente normal ao sistema de segurança), em função das suas variáveis.

A energia cinética é dada pela seguinte fórmula (IV.1):

$$Ec = \frac{1}{2}m.v^2 \quad Ec_{(normal)} = \frac{1}{2}m.(v.\sin(\alpha))^2 \quad , \quad (IV.1)$$

onde m é a massa do veículo, v a velocidade do veiculo e α o ângulo de colisão com a barreira.



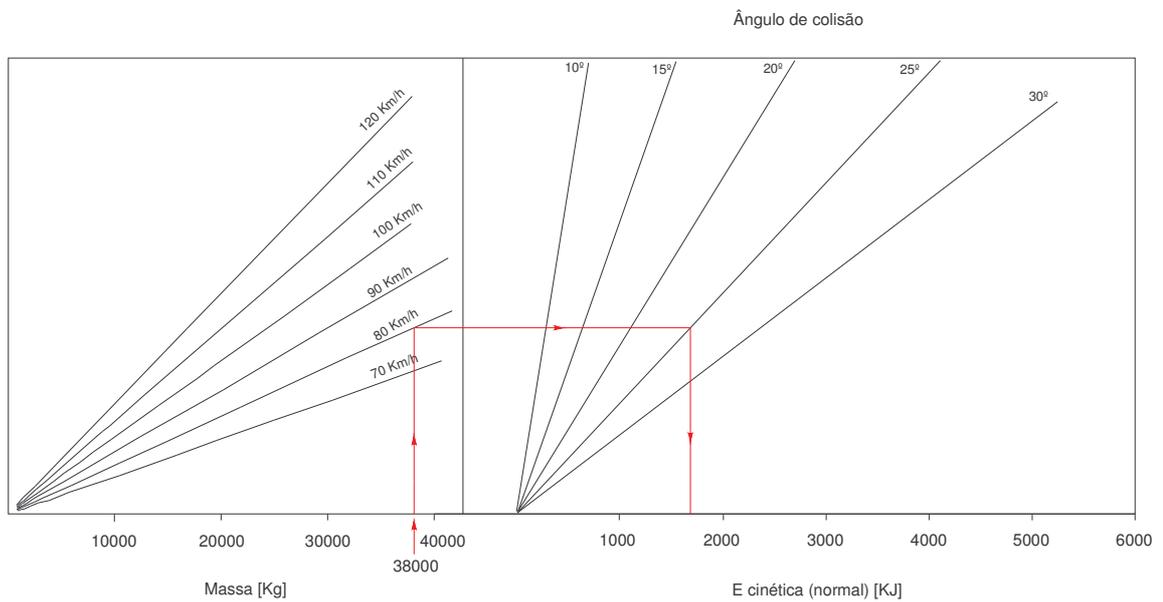
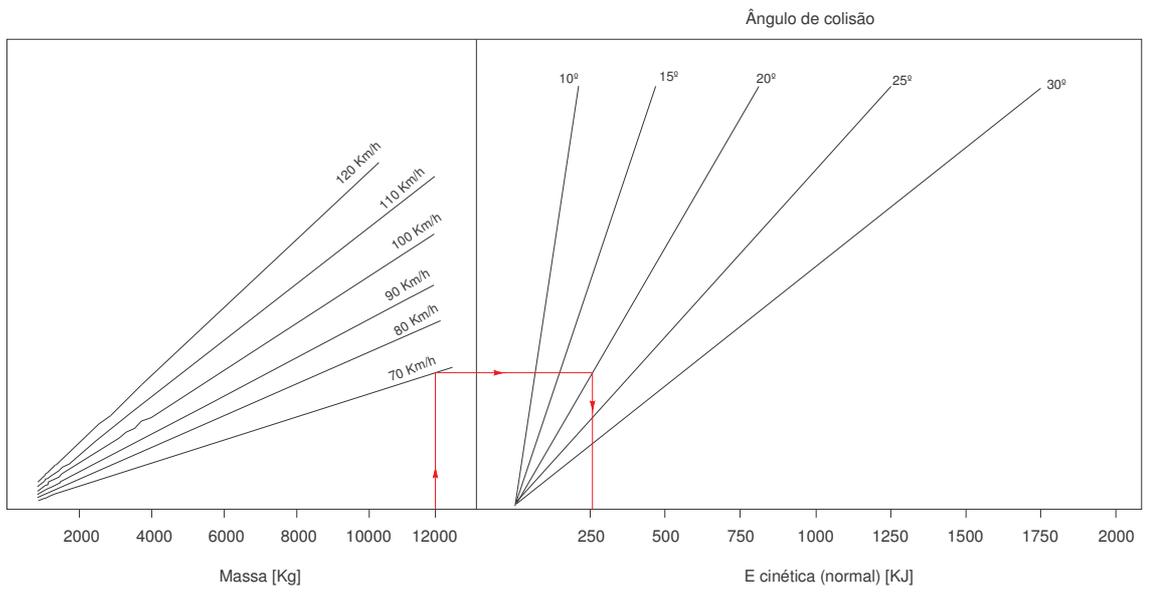


Gráfico IV. 2 – Energia Cinética normal

2 - Situação Internacional

2.1 – Apresentação geral

A crescente preocupação relacionada com as questões de segurança, nomeadamente as relativas ao comportamento dos Sistemas de Segurança Rodoviária, levou a que na Europa e nos Estados Unidos fossem criados documentos normativos, com o objectivo de avaliar o funcionamento dos sistemas de segurança.

Na Europa foi criada pelo CEN a **EN 1317** – “ Sistemas de Segurança Rodoviária”, a qual se divide em 6 partes.

Nos EUA, o National Cooperative Highway Research Program elaborou a **NCHRP Report 350** [6].

A Austrália em conjunto com a Nova Zelândia criou a **AS/NZS 3845** relativa a sistemas de segurança rodoviária.

De um modo geral estas são as normas mais utilizadas em todo mundo e as que servem de base ao desenvolvimento de novos sistemas de segurança rodoviária.

No nosso país o IPQ emitiu, em 2000, a versão portuguesa da EN 1317, no que se refere aos dois primeiros capítulos (NP EN 1317-1 e NP EN 1317-2 [2]). As EN 1317-3 e EN 1317-4 estão apenas disponíveis em versão inglesa, francesa ou alemã.

Convirá no entanto realçar que a aplicação da norma em Portugal, relativamente ao fabrico de sistemas de segurança não é conhecida, em parte pela ausência de laboratórios vocacionados para o tipo de ensaios a que ela se refere.

Do mesmo modo a referência à norma em Cadernos de Encargos não é conhecida, limitando-se os projectistas à aplicação do especificado no CET da ex-Jae, que como já foi referido, é caracterizado por fortes simplificações e até algumas lacunas.

2.2 - Descrição da EN 1317

2.2.1 – Introdução

A EN 1317 foi elaborada pelo Comité Técnico CEN/TC 226” Equipamento Rodoviário” e surgiu de forma a suprir uma lacuna em termos normativos e de forma a uniformizar os critérios de avaliação dos Sistemas de Segurança Rodoviária na Europa.

A presente norma está dividida em vários sub capítulos:

- EN 1317-Parte 1:1998 - Terminologia e critérios gerais dos métodos de ensaios de colisão;
- EN 1317-Parte 2:1998 - Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Barreiras de Segurança;
- EN 1317-Parte 3:2000 – Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Atenuadores de Colisão;
- EN 1317-Parte 4:2001 – Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Terminais e Transição das Barreiras de Segurança;
- prEN 1317-Parte 5:2001 – Critérios de durabilidade e requisitos mínimos para a utilização da marcação CE;
- prEN 1317-Parte 6:1998 – Sistemas de barreiras de segurança para peões.

2.2.2 – Análise das Partes 1 e 2 da EN1317

2.2.2.1 - Parte 1 - Terminologia e critérios gerais dos métodos de ensaios de colisão

Este sub capítulo está dividido em 9 partes das quais se destacam as 5 mais importantes para este trabalho:

Cap5. - Especificações dos veículos sob condições de ensaio

Cap6. – Medição do índice de severidade de aceleração (ASI)

Cap7. – Medição da velocidade de colisão da cabeça teórica (THIV) e desaceleração da cabeça após-colisão (PHD)

Cap8. – Compensação pela deslocação de instrumentos do centro de gravidade

Cap9. – Relatório de ensaio

A. Especificações dos veículos sob condições de ensaio

Neste item são indicadas as características dos veículos a utilizar nos ensaios de colisão com Barreiras de Segurança, Atenuadores de Colisão, Terminais e Transição das Barreiras de Segurança.

Características dos veículos ligeiros:

- Tipo de veículo
- automóvel (900Kg)
- automóvel (1300Kg)
- automóvel (1500Kg)
- Massa [Kg](do veículo; do balastro; do manequim; total do ensaio)
- Dimensões [cm]
- Localização do Centro de Gravidade [cm]

Características dos veículos pesados:

- Tipo de veículo
- caminhão pesado de mercadorias rígido (10000Kg)
- autocarro (13000Kg)
- caminhão pesado de mercadorias rígido (16000Kg)
- caminhão pesado rígido (30000Kg)
- caminhão pesado de mercadorias articulado (36000Kg)
- Massa [Kg](da carga; do balastro; total do ensaio)
- Dimensões [cm]
- Localização do Centro de Massa [cm]
- Número de eixos

B. Medição do índice de severidade de aceleração (ASI)

Um dos parâmetros de avaliação da gravidade de uma colisão é o valor do ASI – Índice de Severidade de Aceleração. Este valor assume especial importância em colisões que envolvam veículos ligeiros.

São indicadas neste item as linhas de orientação para o cálculo do ASI, para a instalação dos instrumentos no veículo de forma a obter os dados que servirão de base ao cálculo de ASI e um resumo para calcular o ASI.

O **índice de severidade de aceleração** num determinado ponto do veículo sujeito ao ensaio de colisão, é calculável pela expressão (IV.2):

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{\bar{a}x}{\hat{a}x}\right)^2 + \left(\frac{\bar{a}y}{\hat{a}y}\right)^2 + \left(\frac{\bar{a}z}{\hat{a}z}\right)^2} \quad (IV.2)$$

Onde:

$\hat{a}x$; $\hat{a}y$ e $\hat{a}z$ são os valores limite para os componentes da aceleração segundo as três direcções espaciais.

$\bar{a}x$; $\bar{a}y$ e $\bar{a}z$ são as componentes da aceleração de um ponto seleccionado no veículo, durante um intervalo de tempo $\delta=50 \times 10^{-3}$ segundos, centradas no instante da máxima força de impacto, de modo que:

$$\bar{a}x = \frac{1}{\delta} \int_t^{t+\delta} ax.dt; \quad \bar{a}y = \frac{1}{\delta} \int_t^{t+\delta} ay.dt; \quad \bar{a}z = \frac{1}{\delta} \int_t^{t+\delta} az.dt \quad (IV.3)$$

Para uma situação em que os passageiros estão com os cintos de segurança colocados, os valores limites de aceleração impostos são:

$$\hat{a}x=12g; \hat{a}y=9g \text{ e } \hat{a}z=10g$$

$$g(\text{aceleração da gravidade})=9.81 \text{ m.s}^{-2}$$

O valor de ASI a considerar será o máximo valor de ASI(t) verificado durante a colisão.

C. Medição da velocidade de colisão da cabeça teórica (THIV) e desaceleração da cabeça após-colisão (PHD)

A THIV é, por definição, a **velocidade de colisão da cabeça teórica**, isto é, a velocidade com que a cabeça de um ocupante do veículo, colidiria com o interior do veículo.

Por seu lado a PHD traduz a **desaceleração da cabeça pós-colisão**, que é em termos gerais, a desaceleração sofrida pela cabeça de um ocupante, que após ter chocado com uma determinada velocidade (THIV) no interior do veículo, sofre as mesmas desacelerações que ele até este se imobilizar.

Nesta secção são indicados os procedimentos e bases teóricas para o cálculo da PHD e da THIV.

D. Compensação pela deslocação de instrumentos do centro de gravidade

Face à complexidade em termos de instrumentação que requer um ensaio de colisão, nem sempre é possível colocar os equipamentos nos locais teoricamente ideais. Por essa razão neste item são indicados os procedimentos a seguir por forma a compensar essas deslocações dos instrumentos.

E. Relatório de ensaio

Este item indica a informação que deve constar do relatório do ensaio de colisão, nomeadamente os dados do laboratório de ensaio, o número do relatório, o nome do cliente, o sistema ensaiado, os procedimentos de ensaio, os resultados obtidos, as declarações gerais e a aprovação do relatório.

2.2.2.2 - Parte 2 - Classes de desempenho, critérios de aceitação e métodos dos ensaios de colisão para Barreiras de Segurança

Este sub capítulo está dividido em 5 partes das quais se destacam seguintes:

Cap3. – Classes de desempenho

Cap4. – Critérios de aceitação dos ensaios

Cap5. – Metodologia dos ensaios

A. Classes de desempenho

A.1 – Classes de ensaios de colisão de veículos

A EN 1317 define 11 tipos de ensaios básicos. Cada ensaio é caracterizado por um tipo de veículo e sua massa, velocidade de colisão e ângulo de colisão –Tabela IV. 1.

A.2 – Nível de contenção

O nível de contenção de um sistema de segurança, segundo a metodologia apresentada da EN 1317, varia desde um baixo grau de contenção (T1, T2 e T3) até um muito elevado (H4a e H4b) – Tabela IV. 2. Cada nível de contenção tem associado um tipo de ensaio de colisão, que o caracteriza. A definição de um nível de contenção pressupõe a verificação de 2 critérios:

- capacidade de retenção do veículo (Ensaios de colisão com maior valor de Energia Cinética);

- variação da Energia de maneira a respeitar a segurança dos ocupantes (valores de desaceleração moderados).

Tabela IV. 1 – Classes de ensaios de colisão de veículos

Ensaio	Velocidade de colisão [Km/h]	Ângulo de colisão [°]	Massa Total do veículo [Kg]	Tipo de veículo	Energia Cinética [KJ]
TB 11	100	20	900	Ligeiro	347
TB 21	80	8	1 300	Ligeiro	321
TB 22	80	15	1 300		321
TB 31	80	20	1 500		370
TB 32	110	20	1 500		700
TB 41	70	8	10 000	Pesado Rígido	1890
TB 42	70	15	10 000	Pesado Rígido	1890
TB 51	70	20	13 000	Autocarro	2458
TB 61	80	20	16 000	Pesado Rígido	3951
TB 71	65	20	30 000	Pesado Rígido	4890
TB 81	65	20	38 000	Pesado Articulado	6194

Como se pode ver também na Norma Europeia perpassa a preocupação de compatibilizar contenções fortes para manter os pesados na sua faixa e, simultaneamente, evitar que as desacelerações que os ocupantes dos ligeiros possam vir a sofrer lhes causem lesões irreversíveis.

É exemplificativo deste procedimento, que, tomando o nível de contenção H2 terá de se verificar a capacidade de contenção para o ensaio TB51 (Autocarro 13ton) e, simultaneamente, a segurança em termos dos ocupantes de um veículo de 900 Kg (TB11).

Tabela IV. 2 – Níveis de Contenção e Ensaio

Nível de Contenção	Ensaio a respeitar	
Baixo	T1	TB 21
	T2	TB 22
	T3	TB 41 e TB 21
Normal	N1	TB 31
	N2	TB 32 e TB 11
Alto	H1	TB 42 e TB 11
	H2	TB 51 e TB 11
	H3	TB 61 e TB 11
Muito alto	H4a	TB 71 e TB 11
	H4b	TB 81 e TB 11

A.3 – Severidade da colisão

A severidade da colisão é expressa em 2 níveis, em função do valor de 3 índices: ASI, THIV e PHD - Tabela IV. 3.

Tabela IV. 3 – Níveis de Severidade das Colisões

Nível de Severidade da Colisão	Valores dos índices		
A	ASI ≤ 1,0	e	THIV ≤ 33 Km/h
B	ASI ≤ 1,4		PHD ≤ 20 g

A.4 – Deformação da barreira

A norma EN1317 refere os níveis de deformação das guardas conforme o Tabela IV. 4.

Tabela IV. 4 – Níveis de deformação das barreiras

Níveis de deformação	Deformação [m]
W1	W ≤ 0,6
W2	W ≤ 0,8
W3	W ≤ 1,0
W4	W ≤ 1,3
W5	W ≤ 1,7
W6	W ≤ 2,1
W7	W ≤ 2,5
W8	W ≤ 3,5

B. Critérios de aceitação dos ensaios

Num ensaio de colisão contra uma barreira de segurança existem dois desempenhos a controlar: o da barreira e o do veículo.

B.1 – Desempenho das barreiras

O desempenho das **barreiras** é caracterizado por 2 níveis de avaliação:

B.1.1. Comportamento da barreira

Relativamente ao comportamento das barreiras, as mesmas deverão:

- conter e redireccionar o veículo, sem que este destrua completamente os elementos que a constituem;
- evitar o desprendimento de parte dos elementos, que as compõem, atingindo desta forma os veículos que circulam em sentido contrário;
- não perfurar o veículo, salvaguardando desta forma a integridade dos ocupantes;
- não originar deformações excessivas nos veículos; essas deformações podem causar ferimentos graves aos ocupantes.

B.1.2. Deformação da barreira

Quanto à deformação da barreira, a mesma é avaliada por 2 parâmetros:

- deflexão dinâmica;
- comprimento de trabalho.

Estes parâmetros deverão constar do Relatório de Ensaio (EN 1317 – 1).

B.2 – Desempenho do veículo

O desempenho do **veículo** é avaliado por 3 parâmetros:

B.2.1. Comportamento do veículo

No que concerne ao **comportamento do veículo**, deverão ser respeitados os seguintes itens:

- o centro de gravidade do veículo não deve ultrapassar a linha central da posição inicial da barreira, conforme a Figura IV. 1;

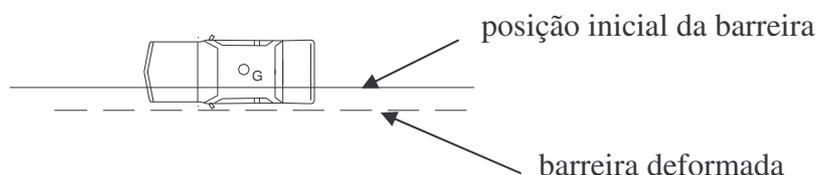


Figura IV. 1 – Esquema de colisão

- o veículo tem de se manter direito após a colisão; contudo, são admitidas algumas rotações ligeiras em torno dos 3 eixos;

- os veículos deverão deixar o contacto com o sistema de contenção e voltar à via, no entanto, nessa ocasião, os veículos não deverão ultrapassar os limites definidos na figura abaixo.

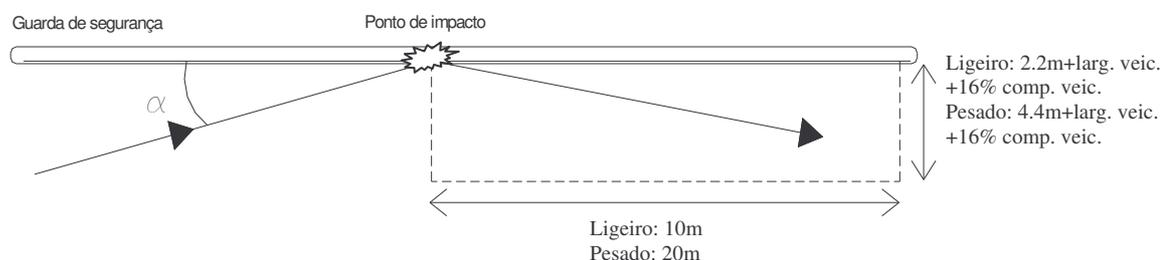


Figura IV. 2 – Limites da caixa teórica

B.2.2. Índice de severidade

Os valores dos índices ASI e THIV (PHD) deve ser calculados e fazerem parte do Relatório de Ensaio.

B.2.3. Deformação do veículo

A deformação do interior do veículo deve ser avaliada e registada conforme o modelo VCDI (Índice de Deformação da Cabine do Veículo) EN1317 – 1, em todos os ensaios com veículos ligeiros.

Em suma, a Tabela IV. 5 apresenta os requisitos a verificar em função do nível de contenção que se deseja para uma barreira de segurança.

Tabela IV. 5 – Parâmetros de ensaio

Nível de contenção	Comportamento da barreira e veiculo	Nível de Severidade da Colisão (ASI-THIV-PHD)	Deformação do veículo (VCDI)	Deformação da barreira
T1	TB 21	TB 21	TB 21	TB 21
T2	TB 22	TB 22	TB 22	TB 22
T3	TB 41+TB 21	TB 21	TB 21	TB 21
N1	TB 31	TB 31	TB 31	TB 31
N2	TB 32+TB 11	TB 32+TB 11	TB 32+TB 11	TB 32
H1	TB 42+TB11	TB 11	TB 11	TB 42
H2	TB 51+TB11	TB 11	TB 11	TB 51
H3	TB 61+TB 11	TB 11	TB 11	TB 61
H4a	TB 71+TB11	TB 11	TB 11	TB 71
H4b	TB 81+TB 11	TB 11	TB 11	TB 81

C. Metodologia dos ensaios

A forma como os ensaios devem decorrer, por forma a serem obtidos resultados fidedignos passíveis de serem comparados, é caracterizada por um conjunto de regras e procedimentos relativos ao local de ensaio, veículos, barreira de segurança, procedimentos e registo de dados do ensaio, tolerâncias relativas à velocidade e ângulo de impacto, instrumentação do veículo, reportagem fotográfica e de vídeo e relatório do ensaio.

C.1- Local de ensaio

O piso do local de ensaio deve ser aproximadamente plano não devendo existir inclinações superiores a 2.5%. A superfície deve ser pavimentada e resistente, livre de lixo, água, gelo ou neve aquando da realização dos ensaios. As dimensões devem ser suficientemente grandes para o veículo conseguir acelerar até à velocidade desejada e de uma forma controlada.

A superfície pavimentada deve ser suficientemente grande (40m após o ponto de impacto e 15m à frente da barreira) com vista a uma avaliação correcta das condições pós-impacto.

O local deve estar limpo e ser reduzida ao máximo a probabilidade de existir poeira, evitando-se deste modo que a reportagem fotográfica seja pouco nítida.

Os obstáculos no local de ensaio devem estar longe de maneira a não interferir nos parâmetros que se prevê controlar, nomeadamente os relativos à deformação do veículo (VCDI).

C.2 - Veículos

Os veículos utilizados nos ensaios devem ser modelos comerciais e representativos do tipo de tráfego existente na Europa. As suas características e dimensões devem satisfazer o preconizado na EN1317 – 1.

As pressões dos pneus devem ser as recomendadas pelos fabricantes. Não são permitidas modificações nos veículos. O veículo deve estar limpo e livre de elementos que causem poeira durante a colisão. Devem ser marcados pontos de referência para facilitar a análise.

A direcção não deve estar fixa durante o impacto e enquanto o veículo estiver na “caixa teórica” - Figura IV. 2.

C.3 - Barreira de segurança

A descrição das barreiras e seu funcionamento teórico devem fazer parte do Relatório de Ensaio. Devem ainda ser referidos os seguintes pontos:

- Tipo de instalação

- Posição e ponto de impacto

C.4 - Procedimentos e registo dos dados dos ensaios

O ensaio deve ser registado em 3 fases:

- Pré-colisão: fotografias do interior e exterior do veículo e da barreira;
- durante a colisão: velocidade de impacto, ângulo de colisão, acelerações lineares e velocidades angulares; deflexão dinâmica e comprimento de trabalho, fotografias e vídeo;
- pós-colisão: estragos e deformação do veículo, estragos na barreira e fotografias.

C.5 - Tolerâncias relativas à velocidade e ângulo de impacto

A tolerância na velocidade de impacto não deve ser superior em 7% nem inferior ao valor do ensaio, para uma precisão de $\pm 1\%$. Quanto à variação do ângulo de aproximação deve estar compreendida entre -1.0° e $+1.5^\circ$, para uma precisão de $\pm 0.5^\circ$.

È ainda definido, na EN1317 – 2, um gráfico com combinações de variações de ângulos e velocidades de impacto que devem ser respeitadas.

C.6 - Instrumentação do veículo

Quanto à instrumentação mínima a utilizar são:

- 3 transdutores de aceleração linear, mutuamente ortogonais e alinhados com o eixo do veículo
- 1 transdutor angular para registar a variação da guinada;
- 3 acelerómetros e um sensor de variação da guinada devem ser montados o mais próximo do CG do veículo;

Os transdutores de aceleração linear e velocidade angular devem respeitar a norma ISO 6487, para uma classe de frequência CFC 180.

C.7 - Reportagem fotográfica e de vídeo

A reportagem fotográfica deve ser suficientemente clara na descrição do comportamento da barreira e do veículo. As câmaras utilizadas devem ser de alta velocidade com um mínimo de 200 fotogramas por segundo.

C.8 - Relatório de ensaio

O relatório do ensaio deverá ser realizado conforme as indicações da EN1317 – 1.

2.3 - Descrição da NCHRP *Report 350*

2.3.1 - Introdução

A NCHRP *Report 350* foi elaborada pelo National Cooperative Highway Research Program dos Estados Unidos, como forma de suprir uma lacuna relativa à falta de critérios de avaliação dos sistemas de segurança rodoviária.

O objectivo da *Report 350* é apresentar procedimentos para a realização de ensaios de colisão entre veículos e sistemas de segurança rodoviária permanentes e temporários.

O relatório divide-se em 7 capítulos:

1. Introdução
2. Parâmetros do ensaio
3. Condições de ensaio
4. Aquisição de dados
5. Critério de avaliação
6. Documentação do ensaio
7. Implementação e avaliação do sistema em serviço

2.3.2 – Análise dos capítulos 2 a 6

2.3.2.1 - Capítulo 2 - Parâmetros do ensaio

Neste capítulo são indicadas as características de todos os elementos envolvidos no ensaio, tais como:

A. Condições fronteira

- Características do piso
- Tipo de solo e encastramento do sistema
- Particularidades de sistemas posicionados em zonas particulares (pontes, terminais, etc.)

B. Sistema a testar

Nesta secção são indicadas as características dos sistemas a testar e para os quais a norma estabelece critérios que são os seguintes:

- Barreiras de segurança longitudinais;
- terminais e atenuadores de impacto;
- elementos estruturais (ex. pilares de pontes; estruturas para controlo de tráfego em zona de obras e escapatórias;
- atenuadores de impacto para camiões.

C. Veículos de ensaio

Os veículos a ensaiar devem ser veículos comerciais ou substitutos com características semelhantes às dos comerciais.

Características dos veículos ligeiros:

- Tipo de veículo
- 700C – automóvel
- 820C – automóvel
- 2000P – pickup
- Massa [Kg](do veículo; do balastro; do manequim; total do ensaio)
- Dimensões [cm]
- Localização do Centro de Massa [cm]

Relativamente à escolha do modelo representativo dos veículos da classe 700C e 820C a mesma deve ter em conta os 2 modelos mais vendidos no último ano.

Características dos veículos pesados:

- Tipo de veículo
- 8000S – camião de mercadorias rígido
- 36000V – camião de mercadorias articulado

- 36000T – camião cisterna articulado
- Massa [Kg](da carga; do balastro; total do ensaio)
- Dimensões [cm]
- Localização do Centro de Massa [cm]
- Localização do motor
- Localização do eixo de tracção
- Tipo de transmissão

Relativamente às características dos veículos, são feitas anotações no que concerne ao tipo de propulsão, travagem e direcção.

D. Manequim

O uso de manequins de forma a avaliar o seu comportamento durante a colisão só é obrigatório quando se utilizam veículos da classe 700C e 820C. É recomendado o uso do manequim Hybrid III; contudo, é feita uma ressalva à sua utilização, quando se tratar de colisões oblíquas (ex: colisão contra uma barreira longitudinal).

2.3.2.2 - Capítulo 3 - Condições de ensaio

A NCHRP *Report 350* estabelece 6 níveis de ensaio para os sistemas de segurança rodoviária. Os ensaios permitem avaliar o comportamento estrutural e funcional do sistema de segurança, o risco para os ocupantes do veículo e o comportamento do veículo após a colisão.

Os níveis 1 e 2 apenas são aplicados para o estudo de sistemas de segurança temporários (ex: obras) ou para volumes e velocidades de tráfego baixas. O nível 3 é o mínimo de referência a utilizar caso a aplicação dos sistemas seja em auto-estradas ou estradas.

De referir que, os níveis 4, 5 e 6 apenas são aplicados às barreiras de segurança longitudinais, devendo a sua escolha ser realizada tendo em conta o volume e tipo de tráfego pesado, assim como as consequências da penetração do veículo pesado na barreira.

As condições de ensaio e critérios de avaliação encontram-se definidos numa matriz, aplicada a cada sistema de segurança (barreiras longitudinais, transições, atenuadores de impacto, etc).

Cada matriz é caracterizada no mínimo por 5 colunas básicas, as quais traduzem os seguintes itens:

- Nível do ensaio
- Designação do ensaio
- Condições de impacto
 - Tipo de veiculo
 - Velocidade
 - Ângulo de colisão
- Ponto de impacto
- Critério de avaliação

A. Caso das Barreiras Longitudinais

A matriz de ensaio para as barreiras longitudinais, além das colunas acima referidas, tem uma relativa à secção da barreira a ensaiar (secção corrente ou zona de transição).

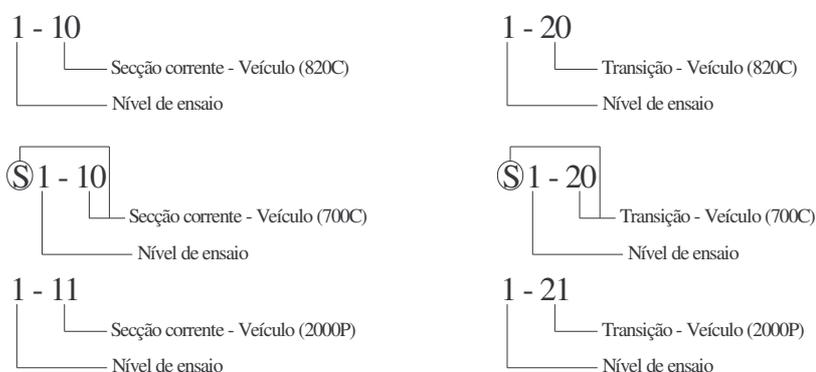
A.1- Designação do ensaio

A realização dos ensaios 11 e 21 só obrigatória até ao nível 3, uma vez que existe a necessidade de avaliar o comportamento após colisão do veiculo 2000P e consequente deformação da barreira.

O ensaio 20 com veiculo 700C é opcional, apenas sendo realizado quando existem dúvidas quanto à quantificação do risco para os ocupantes e comportamento do veículo após colisão.

Quantos aos ensaios 12 e 22 a sua aplicação destina-se a aferir a capacidade de retenção da barreira e comportamento do veículo pesado após impacto.

Para o nível 1 a designação dos ensaios é a seguinte:



A.2 - Ponto de impacto

A localização do ponto de impacto na barreira a testar estabelecido em função das características da barreira (material; funcionamento; encastramento ao solo) e do tipo de ensaio a realizar.

A.3 - Critério de avaliação

Para cada ensaio é definido um critério de avaliação de acordo com a Tabela IV. 6.

2.3.2.3 - Capítulo 4 - Aquisição de dados

O capítulo relativo à aquisição de dados indica o tipo de procedimento a adoptar relativamente a descrição das características do sistema a testar, das condições fronteira, dos veículos e dos manequins.

Também neste capítulo é indicado o modo como as operações de instrumentação do ensaio devem ser conduzidas e cuidados a ter em conta.

2.3.2.4 - Capítulo 5 - Critério de avaliação

O critério de avaliação do comportamento funcional de estrutural de um sistema de segurança baseia-se em três factores:

- adequabilidade estrutural do sistema
- risco para os ocupantes
- comportamento do veículo após colisão

A NCHRP *Report 350* estabelece um conjunto de critérios para cada um dos factores acima enumerados e os ensaios que os devem respeitar –Tabela IV. 7.

Tabela IV. 6 - Matriz de ensaio para barreiras longitudinais

Nível de Ensaio	Secção da barreira	Designação do ensaio	Condições de impacto			Ponto de impacto	Critério de Avaliação
			Tipo de veículo	Velocidade [Km/h]	Ângulo de impacto		
1	Corrente	1-10	820C	50	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S1-10	700C	50	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		1-11	2000P	50	25	(b)	A,D,F,K,L,M
	Transição	1-20	820C	50	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S1-20	700C	50	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		1-21	2000P	50	25	(b)	A,D,F,K,L,M
2	Corrente	2-10	820C	70	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S2-10	700C	70	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		2-11	2000P	70	25	(b)	A,D,F,K,L,M
	Transição	2-20	820C	70	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S2-20	700C	70	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		2-21	2000P	70	25	(b)	A,D,F,K,L,M
3 (Nível básico)	Corrente	3-10	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S3-10	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		3-11	2000P	100	25	(b)	A,D,F,K,L,M
	Transição	3-20	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S3-20	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		3-21	2000P	100	25	(b)	A,D,F,K,L,M
4	Corrente	4-10	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S4-10	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		4-11	2000P	100	25	(b)	A,D,F,K,L,M
		4-12	8000S	80	15	(b)	A,D,G,K,M
	Transição	4-10	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S4-10	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
5	Corrente	5-10	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S5-10	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		5-11	2000P	100	25	(b)	A,D,F,K,L,M
		5-12	36000V	80	15	(b)	A,D,G,K,M
	Transição	5-20	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S5-20	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
6	Corrente	6-10	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S6-10	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		6-11	2000P	100	25	(b)	A,D,F,K,L,M
		6-12	36000T	80	15	(b)	A,D,G,K,M
	Transição	6-20	820C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		S6-20	700C	100	20	(b)	A,D,F,H,I,(J),K,M
		6-21	2000P	100	25	(b)	A,D,F,K,L,M
		6-22	36000T	80	15	(b)	A,D,G,K,M

Tabela IV. 7 – Critério para avaliação de sistema de segurança

Factor de avaliação	Critério de avaliação	Ensaio de referência		
Adequabilidade estrutural	A. O sistema deve conter e redireccionar o veículo; o veículo não deve penetrar, nem transpor o sistema embora seja aceitável uma deformação controlada do sistema	10, 11, 12, 20 21, 22 , 35, 36 37, 38		
	B. O sistema deve responder prontamente de maneira a não ser quebrado, fracturado ou ceder.	60, 61, 70 71, 80, 81		
	C. É aceitável que as performances do sistema permitam redireccionar o veículo, ter uma penetração controlada ou uma paragem do veículo controlada.	30, 31, 32, 33, 34, 39, 40 41, 42, 43, 44, 50, 51, 52 53		
Risco para os ocupantes	D. Partes ou fragmentos do sistema não devem penetrar ou serem passíveis de penetrar no habitáculo do veículo, assim como não devem atingir os outros veículos, peões ou trabalhadores. Não são permitidas deformações que causem lesões graves aos ocupantes.	Todos os ensaios		
	E. Partes ou fragmentos do sistema ou os danos do veículo não devem tapar a visão do condutor ou provocar a perda de controlo do veículo.	70, 71		
	F. O veículo deve manter-se direito durante e após a colisão, contudo são aceitáveis pequenas oscilações.	Todos os ensaios excepto os correspondentes ao critério G		
	G. É preferível, contudo não essencial, que o veículo permaneça direito após a colisão.	12, 22 , 30, 31, 32, 33, 34 35, 35, 37, 38, 39, 40 41, 42, 43, 44		
	H. Velocidade de impacto dos ocupantes deve satisfazer o seguinte:			
	Limites da velocidade de impacto dos ocupantes (m/s)			
	Componente	Preferível	Máxima	
	Longitudinal e Lateral	9	12	10, 20 , 30, 31, 32, 33, 34 36, 40, 41, 42, 43, 50, 51 52, 53, 80, 81
	Longitudinal	3	5	60, 61, 70, 71
	I. Acelerações verticais dos ocupantes devem satisfazer o seguinte:			
Limites da velocidade de impacto dos ocupantes (m/s)				
Componente	Preferível	Máxima		
Longitudinal e Lateral	15	20	10, 20 , 30, 31, 32, 33, 34 36, 40, 41, 42, 43, 50, 51 52, 53, 60, 61, 70, 71, 80, 81	
J. (Opicional) Hybrid III – manequim		10, 20 , 30, 31, 32, 33, 34 36, 40, 41, 42, 43, 50, 51 52, 53, 60, 61, 70, 71, 80, 81		
Comportamento do veículo após colisão	K. Após a colisão é preferível que a trajectória do veículo não invada a outras vias.	Todos os ensaios		
	L. A velocidade de impacto dos ocupantes na direcção longitudinal não deve exceder os 12 m/s e a aceleração vertical descendente no sentido longitudinal não deve exceder os 20 G's.	11, 21 , 35, 37 38, 39		
	M. O ângulo de saída após contacto com o sistema deve ser menor que 60% do de entrada, logo que o veículo deixe de estar em contacto com o sistema.	10, 11, 12, 20 21, 22 , 35, 36 37, 38, 39		
	N. Se a trajectória do veículo seguir a deslocação do sistema é aceitável.	30, 31, 32, 33 34, 39, 42, 43 44, 60, 61, 70 71, 80, 81		

Nota: Esta tabela é aplicável a todos os sistemas desde as barreiras longitudinais até aos atenuadores de impacto. São indicados a vermelho os ensaios referentes às barreiras de segurança.

2.3.2.5 - Capítulo 6 - Documentação do ensaio

Neste capítulo são referidos os requisitos em termos de organização dos resultados obtidos, de maneira existir uma uniformização do modo de apresentação dos resultados e consequente facilidade de interpretação e comparação com outros ensaios ou com resultados de outros laboratórios.

2.4 – Comparação entre a EN1317 e a NCHRP *Report 350*

2.4.1- Diferenças Conceptuais - Preâmbulo

Por serem criadas em zonas geográficas e culturais distintas, a norma europeia EN 1317 e a norte-americana NCHRP *Report 350* apresentam concepções e fundamentos ligeiramente diferentes. Neste item pretende-se analisar as principais diferenças entre elas, relativamente aos seguintes aspectos:

1. Âmbito das Normas
2. Veículos de Ensaio
3. Condições de Ensaio
4. Critérios de Avaliação

2.4.1.1- Âmbito das Normas

Existem dois grupos de sistemas de segurança rodoviária que constam da NCHRP *Report 350* e não da EN 1317:

1. Elementos estruturais; estruturas de controlo de tráfego em zona de obras e zonas de resguardo;
2. Atenuadores de impacto para camiões (TMA).



Imagem IV. 1 – Atenuadores de impacto para camiões

Em relação ao primeiro grupo a sua inclusão na EN 1317 deve já estar prevista, face à importância que o mesmo representa.

Relativamente aos atenuadores de impacto para camiões (TMA) em Portugal o seu uso não é conhecido; contudo, é possível que nos outros estados membros europeus os mesmos sejam utilizados. Este tipo de sistema é extremamente importante, especialmente em vias com grandes volumes de tráfego e onde se pratiquem altas velocidades.

2.4.1.2 - Veículos de Ensaio

Ao nível da classe dos veículos ligeiros a tipologia adoptada é claramente reflexo do parque automóvel de cada zona.

A EN 1317 divide os ligeiros em 3 categorias em função da massa (**1.** 900 Kg – ex: SMART, Audi A2, Daewoo Matiz, Fiat Panda, etc.; **2.** 1300Kg – ex: Renault Clio, Opel Corsa, Honda Civic, etc. e **3.** 1500 Kg – ex: Renault Laguna, Opel Signum, Peugeot 406, Nissan Primera, etc.).

A NCHRP Report 350 adopta como veículos de referência, veículos com massa de 800 a 1020 Kg, uma vez que são os mais desfavoráveis para a aferição das desacelerações geradas na colisão; por outro lado é utilizado um veículo com 2045 Kg, que traduz o tipo de veículo corrente nos EUA, como são os casos dos Todo-Terreno e Pickup's.

No que concerne aos pesados a EN 1317 estabelece 5 classes de veículos, desde os 10000 Kg até aos 38000 Kg. Por seu lado a NCHRP Report 350 apenas estabelece 2 classes: 8000 Kg e 36000 Kg. Existe também uma particularidade ao nível da NCHRP Report 350, que é a introdução de duas tipologias de veículo pesado da classe de 36000 Kg: uma com tractor + atrelado e outra com tractor + cisterna.

2.4.1.3 - Condições de Ensaio – caso barreiras de segurança

A NCHRP *Report 350* estabelece 6 níveis de ensaio, sendo o nível 3, o mais básico para a aceitação de uma barreira como sistema de retenção para uso permanente. Cada nível é caracterizado pelo ensaio com um veículo ligeiro e um pesado. O ensaio da barreira pode ser efectuado em secção corrente e/ou na zona de transição, dependendo o ponto de impacto de 3 factores: nível de ensaio, tipo de veículo e tipo de barreira.

A EN 1317 determina 4 níveis de ensaio, cada um deles com sub-níveis, perfazendo um total de 10 níveis, em que o nível básico é o N2. À semelhança da NCHRP *Report 350* cada nível é caracterizado pelo ensaio com um veículo ligeiro e outro pesado, à excepção dos níveis T1, T2, T3 e N1 só realizados com ligeiros. Quanto ao ponto de impacto na barreira apenas é referido que deve ser a 1/3 da extensão da barreira a montante do terminal.

2.4.1.4 - Critérios de Avaliação

Os critérios de avaliação em que se baseiam as normas têm como base os mesmos princípios, só que são adoptadas formas de quantificar diferentes.

As principais diferenças surgem ao nível do risco para os ocupantes (designação NCHRP *Report 350*) ou índice de severidade (designação EN 1317) e comportamento de veículo.

Relativamente ao risco para os ocupantes a NCHRP *Report 350* estabelece critérios genéricos (ex: o veículo deverá manter-se voltado para cima, os elementos que compõem a barreira não deverão penetrar no veículo nem serem projectados para outros), valores máximos e preferíveis para a Velocidade de Impacto dos Ocupantes e para as Desacelerações dos Ocupantes na direcção longitudinal e lateral. Por seu lado, a EN 1317 avalia o risco para os ocupantes através do ASI, THIV e PHD.

Quanto ao comportamento do veículo a EN 1317 estabelece um conceito de caixa de saída e não permite que o centro de gravidade do veículo ultrapasse a posição inicial da barreira. Na NCHRP *Report 350* é referido que o veículo não deverá ter um ângulo de saída maior que 60% do de entrada e não invadir as outras vias de tráfego.

Na EN 1317 são também estabelecidos os conceitos de Comprimento de Trabalho e Deflexão Dinâmica, associados ao comportamento da barreira.

Por último, a deformação do veículo é abordada na EN 1317 através do Índice de Deformação da Cabine do Veículo (VCDI).

2.5 - Lacunas da EN 1317

1. Os níveis de contenção, índices de severidade e níveis de deformação, tal como é afirmado na Norma, deverão ser escolhidos em função do tipo estrada, tráfego, condições climatéricas locais, etc. Contudo, na Norma nada é indicado relativamente a esses critérios, situação essa que remete a decisão para os Estados Membros. Isto leva à adopção de diferentes critérios em cada país, logo níveis de segurança diferentes para situações idênticas.

2. O tipo de classificação dos níveis de severidade é muito básico (2 níveis) e de difícil percepção. Neste caso, é opinião do autor que o trabalho apresentado por [7] na 3ª Swiss Transport Research Conference, “Uma Escala Simplificada de Ferimentos Cerebrais (AIS- Abbreviated Injury Scale)”, composta por 6 níveis, em que o 1º nível (mínimo) correspondia a ferimentos ligeiros e o 6º nível (máximo) à morte esclarece dúvidas que a Norma coloca.

As correlações estabelecidas na comunicação de [7] na referida conferência podem, com vantagem, ser juntas num ábaco, por uniformização de escalas de modo a ler-se mais facilmente o valor de AIS a partir do Índice de Severidade de Aceleração (ASI). É esta relação directa que pode ser observada na Figura IV.3.

O valor de AIS é correlacionável com o HIC (Head Injury Criterion), que por sua vez se relaciona com o ASI.

3. A localização das barreiras de segurança não é recomendada. O uso dos critérios definidos no ponto 1 seria um ponto de partida para definição de uma metodologia.

4. Os métodos e pormenores de instalação, em função da sua localização e tipo de barreira de segurança, deveriam estar previstos.

5. O valor considerado para os ângulos de colisão deveria ser maior (da ordem dos 25° - 30°).

6. As velocidades dos veículos pesados e mesmo dos ligeiros deveriam ser mais elevadas, aproximando-se assim mais dos valores realmente praticados nas estradas.

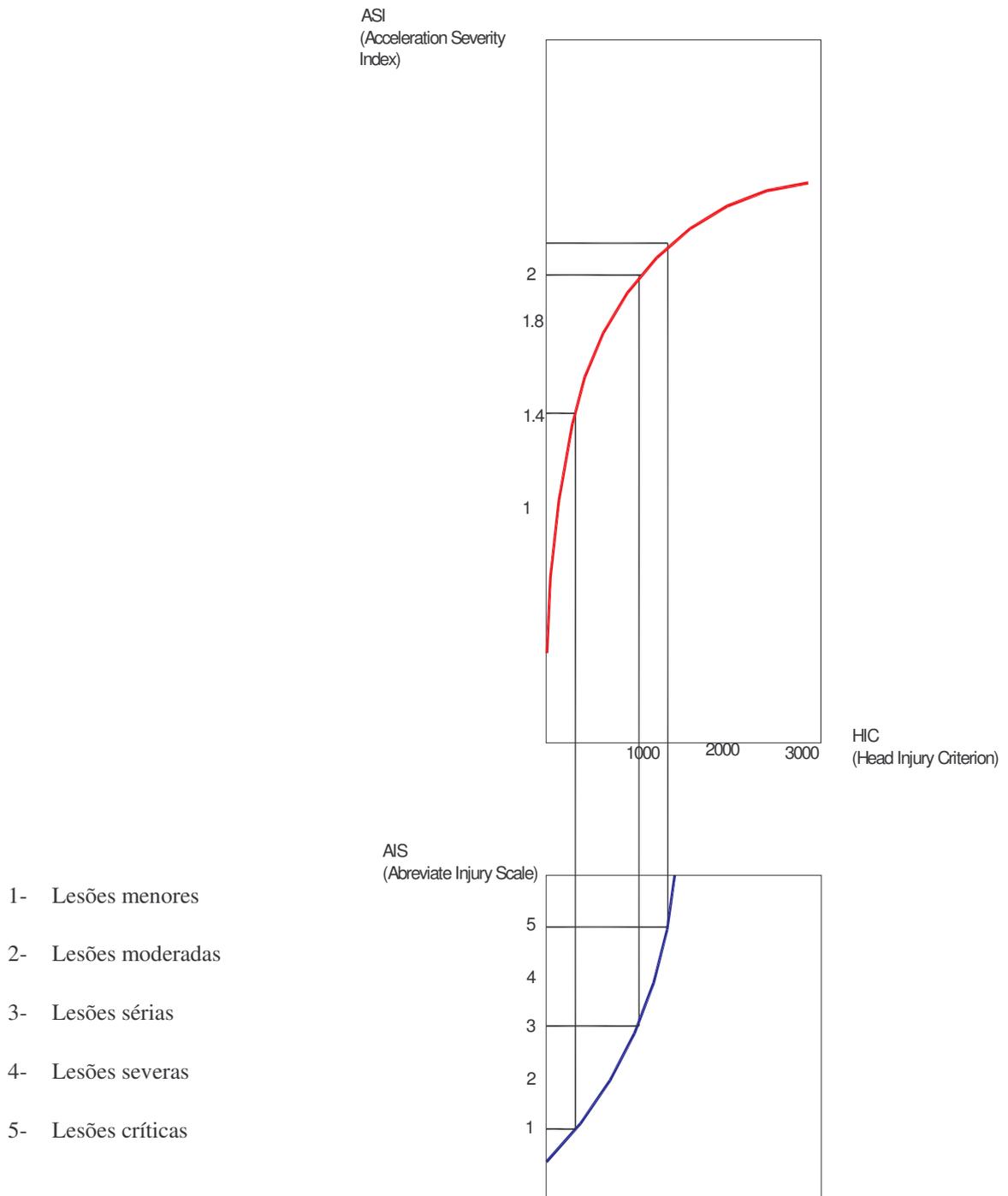


Figura IV. 3 – Relação entre ASI e AIS

2.6 – Dificuldades na Aplicação das Normas

1. Os valores dos impulsos e das desacelerações são de difícil determinação, variando ainda de ponto para ponto do veículo (corpo não rígido). Deverão ter-se em atenção as oscilações produzidas pelo veículo, visto as mesmas poderem originar acréscimos de acelerações, que terão de ser corrigidos.

2. Os variadíssimos modelos de veículos existentes no mercado, com comportamentos naturalmente diferentes, podem ser um entrave à escolha do modelo representativo.

3. Os elevados custos que representa a realização de ensaios de colisão.

Contudo, devido ao avanço da Engenharia de Software e da Modelação Numérica, é possível simular a colisão de um veículo contra um sistema de contenção e analisar o fenómeno com um grau de correlação elevado face ao ensaio à escala real. Um dos programas mais utilizados é DYNA 3D, existindo também outros como é o caso do HVE 3D, ABAQUS, PAM-CRASH, etc.

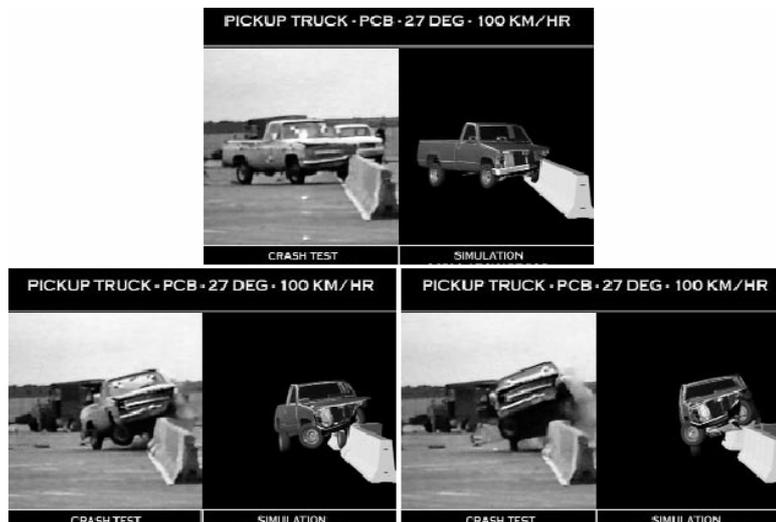


Figura IV. 4 – Programa de simulação – DYNA3D

Capítulo V

CRITÉRIOS A CONSIDERAR NO DIMENSIONAMENTO DE BARREIRAS DE SEGURANÇA

1 – Introdução

Num sistema de barreiras de segurança existem dois tipos de veículos que determinam o seu comportamento: pesados e ligeiros.

Às barreiras de segurança exige-se uma acção de retenção do veículo sem o deixar transpor o sistema, uma deformação controlada do sistema, uma configuração geométrica atenuadora do risco de capotamento e uma boa resistência estrutural, critérios esses dependentes dos efeitos provocados pelos veículos pesados.

Por outro lado, os sistemas de contenção deverão ter um comportamento compatível com os níveis de segurança (desacelerações) exigidos para os veículos ligeiros.

Tendo em conta o binómio funcional exigido às barreiras de segurança (**Retenção-Pesados/Níveis de Segurança- Ligeiros**), far-se-á uma análise dos critérios necessários a ter em conta no dimensionamento de um sistema de contenção – relativamente a um **sistema rígido**.

2 - Efeito dos Pesados

2.1 - Cargas e Velocidades Actuais

A velocidade praticada pelos veículos, associada ao seu peso bruto, permite obter a energia cinética que terá de ser dissipada pelo sistema de contenção e veículo.

Embora a norma EN 1317 preveja ensaios com veículos de 38 ton e velocidades de 65 Km/h ($E_c=725$ KJ-ângulo 20°), o Caderno de Encargos da Ex-Jae exige para ensaio um veículo de 12 ton e uma velocidade de 70 Km/h ($E_c=265$ KJ-ângulo 20°), o que corresponde apenas a cerca de 37% do valor previsto na Norma CEN.

Em termos legais é possível circular em nas estradas portuguesas veículos pesados desde 19 ton até 44 ton e capazes de praticarem velocidades de 100Km/h a 80 Km/h (AE's),

respectivamente. Na realidade o que se assiste nas estradas portuguesas é um violar constante dos limites de carga e velocidades, com consequências desastrosas em caso de despiste e choque contra sistemas de protecção.

São relevantes ainda duas situações, uma que diz respeito ao facto de a EN 1317 já ter entrado em vigor em Portugal e não ser conhecida a sua aplicação, continuando-se a incluir nos CE's as antigas prescrições da Jae; a segunda situação refere-se ao facto de, embora a EN 1317 preveja ensaios com veículos de 38 ton, a velocidade admissível deveria ser 90 Km/h, o que em termos práticos, produziria um acréscimo de 92% do valor da energia cinética, no momento da colisão.

A escolha de um sistema de contenção, para um determinado local de uma estrada, deverá ter por base o tipo de veículos (peso bruto) e o comportamento (velocidades praticadas) mais representativo, que nela passam ou se espera poderem vir a passar (no caso de ser nova).

2.2 - Critério de Não Capotamento

O não capotamento é sem dúvida uma das questões a ter em conta na escolha do perfil (altura) adequado para um separador/barreira rígida, tomando o tema especial relevo quando se procede a uma repavimentação.

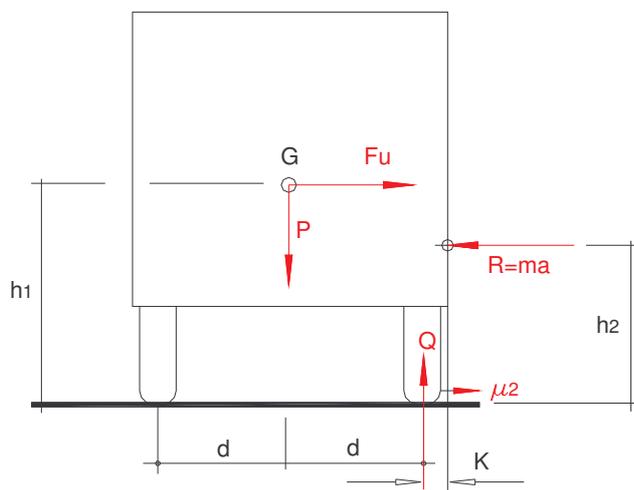


Figura V. 1 – Esquemática da secção de impacto de um veículo contra uma barreira no limite de capotamento.

Da Figura V. 1 é possível estabelecer a seguinte equação de equilíbrio (V.1):

$$\frac{P}{g} \times a_t \times (h_1 - h_2) - P \times (d + K) + Q \times k - \mu_2 \times Q \times h_2 = 0 \quad , \text{ em que:} \quad (\text{V.1})$$

P - do veículo [Kg];

g – aceleração da gravidade [m/s²];

a_t – aceleração transversal admissível [m/s²];

μ₂ – coeficiente de atrito pneu/pavimento na direcção transversal.

Resolvendo a equação em ordem a a_t (aceleração transversal) vem que (V.2):

$$a_t > \frac{g \times (d + \mu_2 \times h_2)}{h_1 - h_2} \quad (\text{V.2})$$

A estabilidade relativamente ao capotamento de um veículo é função da aceleração transversal, coeficiente de atrito pneu/pavimento, altura do centro de gravidade do veículo e ponto de rotação (altura do sistema de protecção). Naturalmente a estabilidade será menor quanto maior a aceleração transversal e altura do centro de gravidade do veículo e menor a altura do pavimento em relação ao ponto de rotação. Logo, a verificação deste critério é por si só função do tipo de veículo pesado, velocidade característica praticada e altura útil do pavimento ao ponto de rotação.

O último item toma bastante relevância, quando se realiza uma repavimentação, sem se proceder previamente a uma fresagem. Isto leva a que o valor de h₂ diminua, aumentando deste modo a instabilidade. Uma recarga de pavimento de 0.15m reduz o valor da aceleração transversal máxima admissível em 25%.

2.3 - Deslizamento Controlado

Os veículos pesados, devido à sua massa, geram uma energia cinética bastante elevada, o que leva à existência de um sistema de contenção capaz de absorver toda essa energia, uma parte através de um sistema de fixação ao solo e outra pelo próprio deslocamento/deslizamento dos elementos da barreira. Este deslizamento terá que ser limitado, não permitindo uma “invasão” excessiva da faixa de sentido contrário.

2.4 - Não Rotura

A resistência estrutural assume sem dúvida um papel primordial, razão pela qual se exigem duas características funcionais:

- resistência às solicitações provocadas pelo pesado, não permitindo que o veículo transponha o separador central, colidindo desta forma com os veículos que circulam em sentido contrário;

- não permitir que os fragmentos (sistema contenção) penetrem no veículo ou atinja outros veículos – criar um efeito semelhante ao dos pára-brisas dos automóveis;

3 - Efeito sobre os Ligeiros

3.1 - Severidade da colisão/efeito sobre os ocupantes do veículo

A severidade da colisão é um dos critérios em que se baseia a NP EN 1317, sendo o de maior importância na análise dos efeitos sobre os ocupantes dos veículos ligeiros.

Tal como referido anteriormente, o valor da desaceleração durante uma colisão, é um indicador da gravidade dos ferimentos, que poderão ser provocados nos ocupantes dos veículos que chocam contra um sistema de retenção.

O valor da desaceleração, i.e., a razão da diferença entre a velocidade do veículo imediatamente antes da colisão e a velocidade final (repouso) pelo período tempo respectivo, originará ferimentos nos ocupantes com uma gravidade crescente em função do seu aumento. Este valor assume uma notória importância, quando se aborda a sua componente transversal.

Durante uma colisão a energia cinética é transformada em energia de deformação da barreira (corpo rígido), energia de deformação elástica e plástica do veículo, energia potencial (subida do centro de gravidade do veículo, devido ao galgamento da base do separador), energia absorvida pelo atrito lateral entre o veículo e a barreira e energia cinética residual eventualmente existente.

A absorção de energia deverá ser realizada na sua maior parte pela barreira, através da sua deformação (deslocamento dos módulos que a constituem), limitando deste modo a deformação do veículo e possíveis ferimentos causados aos seus ocupantes.

Dada a rigidez dos módulos que constituem um sistema de segurança rígido, como do tipo New Jersey, importa aferir a taxa de variação da absorção de energia, a qual traduzirá o

valor da desaceleração, que através do índice ASI, permite obter o grau de severidade da colisão. O valor do índice de severidade de aceleração (ASI) deveria ser preferencialmente menor que **1.4** (nível B – NP EN 1317-2), evitando sempre valores acima de 2 (lesões sérias-Escala Simplificada de Ferimentos Cerebrais).

Esta variação da absorção é naturalmente dependente da massa dos módulos que compõem a barreira (1150Kg – 2m; 2300 Kg – 4m e 3450Kg – 6m) e do espaço disponível para a sua deformação. Do ponto de vista da segurança, para os ligeiros interessa que os módulos sejam o mais leve possível. Sob este ponto de vista seria de privilegiar os módulos de 2m, e com bastante espaço para a deformação. Uma vez que a aplicação deste tipo de barreira de segurança é mais comum em separadores centrais, o espaço para a deformação do sistema está limitado, não sendo aceitável a ocupação de mais de 1 metro da faixa contrária. O problema que surge com a utilização dos módulos leves diz respeito ao seu baixo nível de contenção perante a acção de um pesado.

Capítulo VI

SISTEMA ALTERNATIVO PROPOSTO

1 - Introdução

Os dois tipos de sistema de segurança usados no nosso país têm funcionamentos distintos, e conseqüentemente, revelam comportamentos privilegiados perante os veículos pesados (barreiras rígidas) ou os ligeiros (barreiras semi-flexíveis).

O que se pretende estudar é um sistema de contenção capaz de revelar um bom comportamento perante os veículos pesados (contenção e resistência estrutural) e os veículos ligeiros (desacelerações moderadas/segurança dos passageiros).

Este tipo de estudo deve ter uma forte componente prática, caracterizada por ensaios de colisão, uma vez que num embate entre um veículo e um sistema de contenção, existem inúmeras variáveis, das quais nem sempre é possível prever o comportamento.

Os ensaios de colisão realizados ao longo do tempo mostram que a colisão de um veículo contra um sistema de segurança (não ancorado) se desenvolve em 2 fases, segundo [8]. Na primeira o veículo embate contra o sistema segundo um determinado ângulo e executa uma manobra de rotação em torno do ponto de contacto. A segunda fase é caracterizada por uma translação em conjunto do veículo e a barreira.

Nas Figuras VI.1 e VI.2 é possível observar as duas fases:

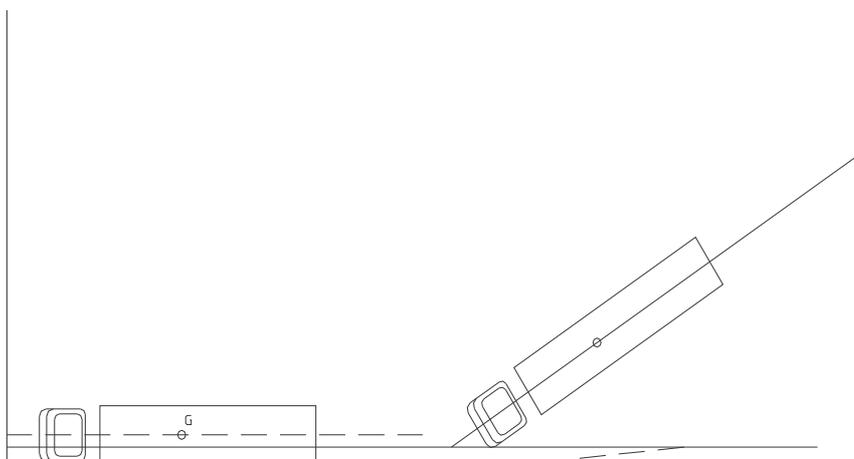


Figura VI.1 - Esquema de colisão entre um veículo ligeiro e uma barreira de segurança

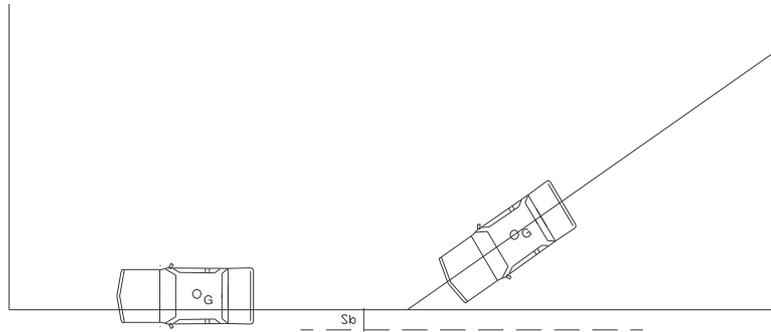


Figura VI. 2 - Esquema de colisão entre um veículo leveiro e uma barreira de segurança

O grande desafio da engenharia rodoviária ao nível dos sistemas de retenção é, sem dúvida, a procura do sistema que permita uma absorção/dissipação de energia, especialmente na direcção normal ao sistema, em 2 níveis diferentes, isto é, capaz de absorver a energia cinética transmitida por um ligeiro sem gerar desacelerações elevadas e também gerar uma reacção compatível com o elevado valor da força transmitida por um pesado [10]. A ideia base pode ser sintetizada no Gráfico VI. 1.

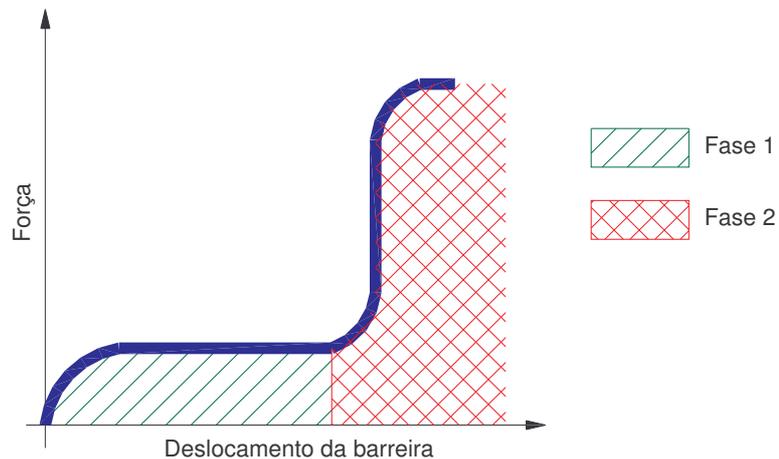


Gráfico VI. 1 - Relação força/deslocamento da barreira

A 1ª fase de absorção de energia deverá ser compatível com níveis de carga baixos – **Veículos Ligeiros**.

Durante a 1ª fase os objectivos que se pretendem alcançar são os seguintes:

- a desaceleração gerada deve permitir garantir a segurança dos ocupantes do veículo, limitando-se desta forma o valor de ASI a 1,0 ou 1,4, consoante o nível de severidade da colisão pretendido (nível A ou B – EN 1317);

- a deformação/translação da barreira não deverá ultrapassar o limite definido pelo nível de deformação;

A 2ª fase de absorção de energia deverá ser compatível com níveis de carga elevados – **Veículos Pesados**.

Durante a 2ª fase os objectivos que se pretendem alcançar são os seguintes:

- a barreira deverá oferecer suficiente resistência estrutural para não quebrar e simultaneamente reter o veículo, impedindo que o mesmo transponha o dispositivo de contenção;

- a deformação/translação da barreira não deverá ultrapassar o limite estabelecido em função do nível de deformação, tal como na primeira.

2 - Descrição

2.1 - Classificação da Barreira segundo a EN1317

Atendendo a este enorme desafio estudou-se um sistema de barreira de segurança capaz de responder aos requisitos acima referidos.

Segundo a EN 1317 a barreira de segurança estudada corresponderia a uma nível de contenção **H3** (nível elevado), com um nível de severidade da colisão **A** e um nível de deformação **W1**.

2.2 - Definição conceptual

O conceito de barreira de segurança que se propõe, reside na conjugação de dois comportamentos de barreiras de segurança: barreiras flexíveis e barreiras rígidas. Se por um lado se pretende que a barreira se deforme o necessário para absorver energia, por outro exige-se que o sistema contenha o veículo e o redireccione.

Convém referir que este conceito já foi posto em prática pela Delta-BlocK[®], no entanto, o tipo de ligação entre os blocos é diferente.

Este sistema é constituído por módulos de barreira rígida (perfis com face simples – meio New Jersey) com 2m de comprimento (em betão leve) unidos entre si por 2 cabos de aço, fixos na parte posterior.

Numa primeira fase e para impactos de fraca energia (veículos ligeiros) o sistema deforma-se livremente actuando apenas os blocos em contacto com o veículo, existindo como força contrária a esse movimento o atrito entre a barreira e o piso.

No caso dos veículos de massa mais elevada (o caso em estudo neste trabalho), após esgotada essa deformação da primeira barreira, existe a necessidade de conter a sua deformação. Essa contenção é conseguida à custa da barreira existente na faixa contrária, que se encontra encostada ao pavimento na parte inferior.

De notar que o cabo apenas garante o movimento em conjunto dos diferentes módulos de perfil – meio New Jersey, não lhe sendo conferida qualquer característica que impeça o movimento (tracção do cabo/amortecimento). Ou seja o sistema proposto pretende que o cabo solidarize os módulos, fazendo deformar em conjunto a primeira linha da barreira, não tendo sido contabilizada qualquer resistência do cabo.

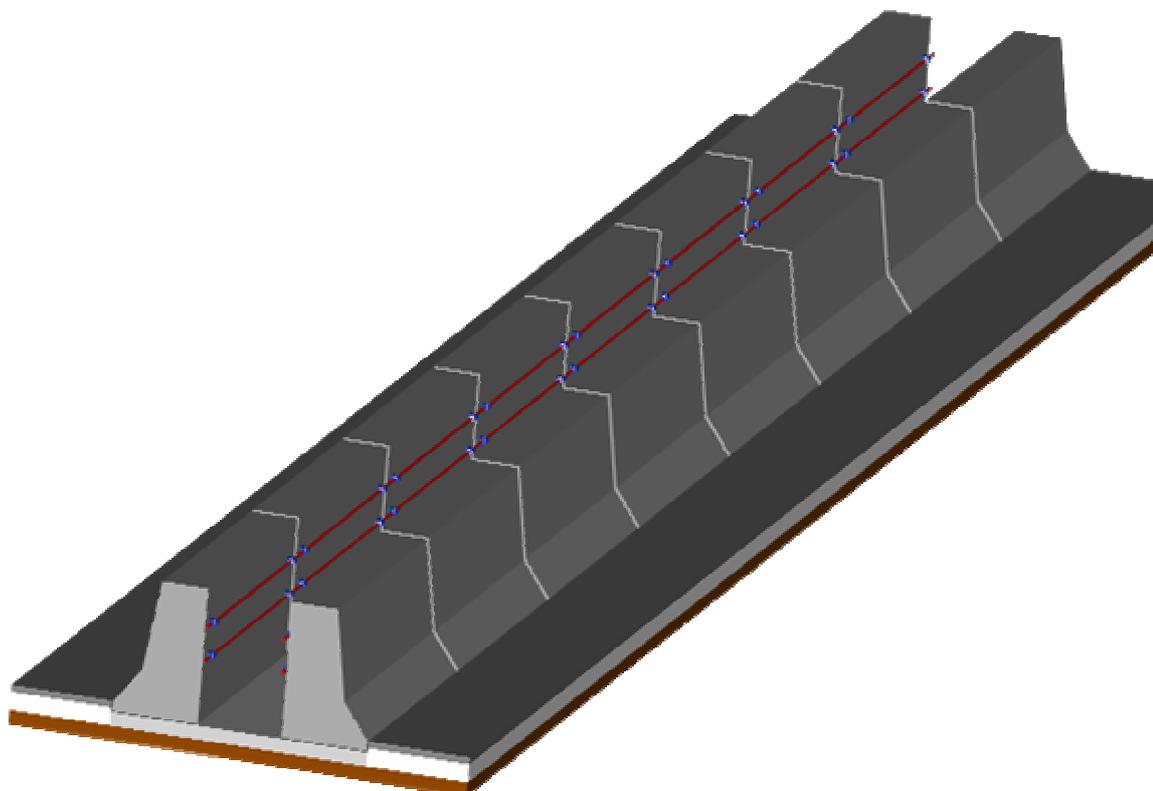


Figura VI. 3 – Aspecto geral da barreira aplicada no separador central

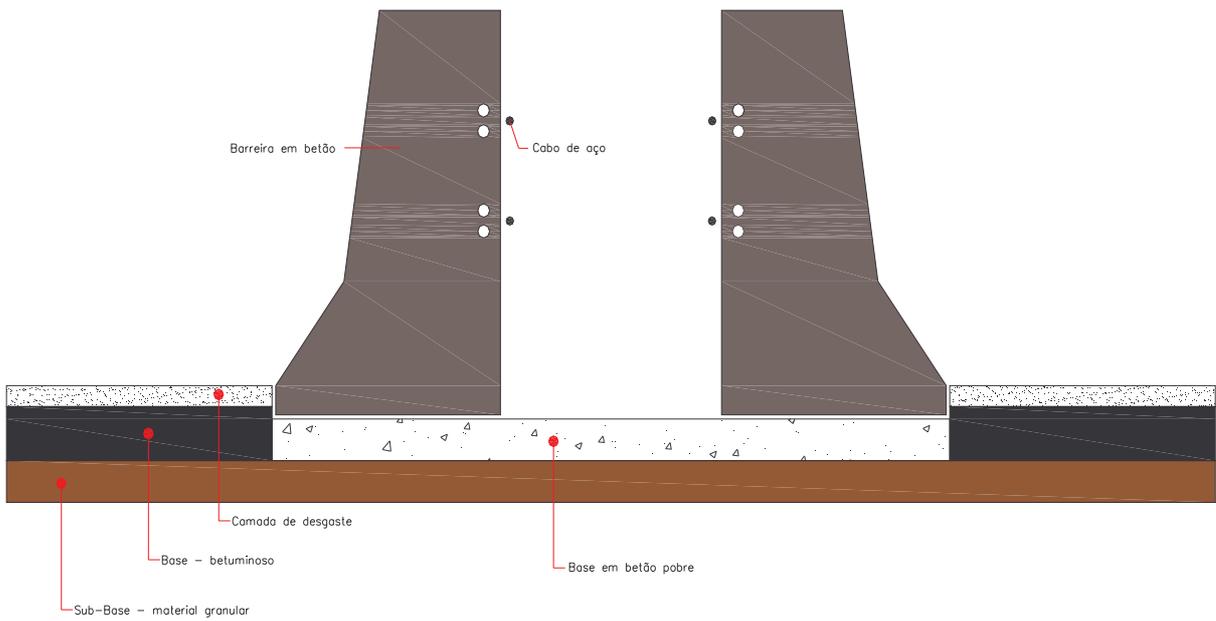


Figura VI. 4 – Esquema de inserção da barreira na plataforma

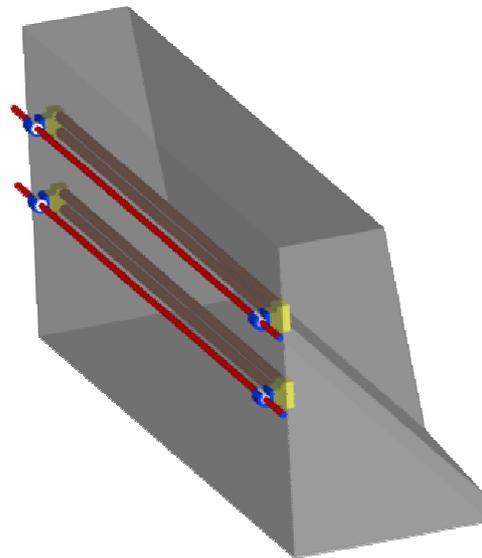


Figura VI. 5 – Bloco de barreira com as peças de ligação aos cabos e reforço interior

3 – Ensaio a Reproduzir

3.1 - Introdução

Para um nível de contenção H3 ser atribuído a uma barreira é necessário que a mesma satisfaça os ensaios TB 61 e TB 11.

O ensaio TB 61 tem como objectivo verificar o comportamento da barreira e do veículo bem como a deformação da barreira. Por seu lado, o ensaio TB 11 pretende aferir o comportamento da barreira e do veículo, o nível de severidade da colisão e a deformação do veículo.

3.2 – Veículos

Devido à extensão e complexidade que envolve este tipo de problemas, decidiu-se restringir o estudo apenas à verificação do ensaio TB 61.

O ensaio TB 61 tem as seguintes características:

Velocidade de colisão: 80 Km/h

Ângulo de colisão: 20°

Massa Total do veículo: 16 000 Kg

Tipo de veículo: Pesado Rígido

O veículo deverá respeitar as especificações expressas na Tabela VI. 1.

Tabela VI. 1 – Especificações dos veículos segundo a EN1317

Massa [Kg]

massa do veículo (incluindo carga)	16000 ±500
massa total do ensaio	16000 ±500

Dimensões [m]_(desvio limite ±15%)

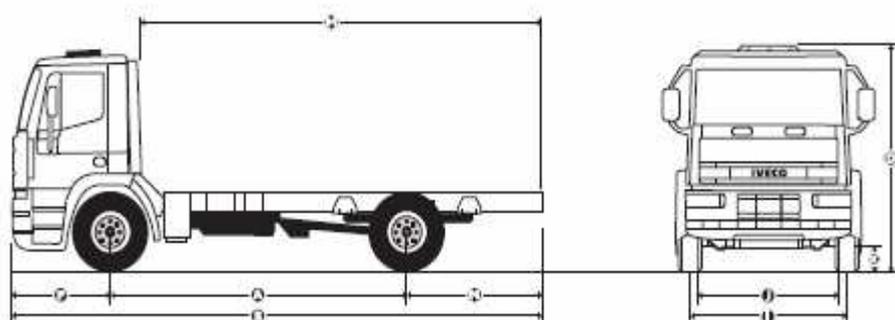
Via do eixo (dianteiro e traseiro)	2.00
Raio da roda (sem carga)	0.52
Base da roda (entre eixos extremos)	5.90
Número de eixos	1S+1/2
Altura mínima do solo ao pára-choques da frente medido no canto	0.58

Localização do centro de gravidade [m] (desvio limite $\pm 10\%$)

Distância longitudinal do eixo dianteiro (CGX) $\pm 10\%$	3.10
Distância lateral da linha central do veículo (CGY)	± 0.10
Altura acima do chão (CGZ)	1.60

Face às especificações a respeitar pelo veículo, resolveu-se simular a utilização do camião IVECO Euro Cargo 170 E21, que apresenta as seguintes características, segundo [9]:

Tabela VI. 2 – Características do camião IVECO Euro Cargo 170 E21



Dimensões [m] (desvio limite $\pm 15\%$)

Distância entre eixos	A	4.815
Comprimento total	B	8.385
Balanço dianteiro	P	1.290
Balanço traseiro	N	2.280
Altura descarregado	D	2.936
Bitola eixo dianteiro	I	1.971
Bitola eixo traseiro	J	1.820
Largura (entre faces externas dos pneus traseiros)		2.454
Vão livre (eixo traseiro)	K	0.244
Distância da cabine à extremidade do chassi	M	6.830

Massa [Kg]

Peso Bruto Total	16.000
Peso admissível legal no eixo dianteiro	6.000
Peso admissível legal no eixo traseiro	10.000
Eixo dianteiro	3.150
Eixo traseiro	1.930
Carga útil + peso da carroçaria	10.920

Chassi

Constituído por duas longarinas planas de perfil U em chapa de alta resistência unidas por travessas rebitadas e aparafusadas à alma.	
• Altura da longarina	276.5 mm
• Largura da aba	80mm
• Espessura da longarina	7mm
• Bitola entre as longarinas	854mm
EIXO DIANTEIRO	
IVECO 5872 Viga I em aço forjado com rolamentos dos cubos em banho de óleo.	
Capacidade máxima	7.100 Kg
EIXO TRASEIRO	
MERITOR RS 23-240 de dupla velocidade com accionamento pneumático, tipo portante, com carcaça em aço e perfis estampados e soldados, com bujão magnético.	
Capacidade máxima	10.400 Kg
SUSPENÇÃO DIANTEIRA	
Molas semi-elípticas de estágio único com batentes de borracha e buchas SILENT-BLOCK. Dois amortecedores telescópicos de dupla acção e barra estabilizadora.	
Capacidade máxima	6.600 Kg
SUSPENÇÃO TRASEIRA	
Molas semi-elípticas de duplo estágio com feixe auxiliar, batentes de borracha e buchas SILENT-BLOCK.	
Capacidade máxima	11.500 Kg

Pneus

Jante 8.25"×22.5", 10 furos
Pneus radiais 275/80 R 22.5", tubeless



Imagem VI. 1 - Camião IVECO Euro Cargo 170 E21

3.3 – Barreira

Em termos normativos, segundo EN1317-2, o piso do local de ensaio deve ser aproximadamente plano possível plano não devendo existir inclinações superiores a 2.5%. A superfície deve ser pavimentada e resistente, livre de lixo, água, gelo ou neve aquando da realização dos ensaios. As dimensões devem ser suficientemente grandes para o veículo conseguir acelerar até à velocidade desejada e de uma forma controlada.

A superfície pavimentada deve ser suficientemente grande com vista a se avaliar correctamente as condições pós-impacto.

Quanto à dimensão da barreira a mesma deverá ser suficientemente longa para se verificar o ser comportamento.

Capítulo VII

VALIDAÇÃO NUMÉRICA

1- Método dos Elementos Finitos

A maior parte dos fenômenos físicos que ocorrem em engenharia mecânica são passíveis de ser modelados por equações diferenciais, mas usualmente bastante complicado de resolver através dos métodos clássicos. O método dos elementos finitos (FEM) é uma aproximação numérica através da qual as equações diferenciais gerais podem ser resolvidas de uma forma aproximada. A equação diferencial ou equações, que descrevem o fenômeno físico considerado abrangem a totalidade uma certa região. Esta região pode ser mono, bi ou tridimensional; no caso em análise o problema é a três dimensões. É uma característica comum do método dos elementos finitos que, em vez da aproximação da solução ser procurada de uma forma global a toda a região, esta é dividida em pequenas partes. É esta a razão pela qual se chama elementos finitos, e a aproximação é obtida elemento a elemento. Os elementos podem ser todos do mesmo tamanho ou não. Ao conjunto de todos os elementos é chamada malha de elementos finitos. Os elementos estão conectados apenas nos nós ou pontos nodais. Os pontos nodais são as extremidades dos elementos e cada nó tem um número de graus de liberdade (DOF-degrees of freedom) [11].

Quando o tipo de aproximação que será aplicada a cada elemento estiver escolhido e o comportamento mecânico dos materiais for conhecido, o correspondente comportamento mecânico de cada elemento pode ser determinado. Isto pode ser realizado porque a aproximação realizada a cada elemento é bastante simples. Depois de determinado o comportamento de todos os elementos, estes são reunidos usando regras específicas para formarem uma região única através da qual é possível obter uma aproximação da solução do comportamento de todo o corpo.

O método dos elementos finitos pode ser aplicado para a obtenção de soluções aproximadas de equações diferenciais arbitrárias.

2 - Programa de FE - ABAQUS

2.1 - Introdução

As simulações das colisões foram obtidas usando o programa ABAQUS (versão 6.4) de elementos finitos.

O programa ABAQUS é uma poderosa ferramenta na análise de problemas envolvendo elementos finitos. O ABAQUS é constituído por vários módulos:

- *ABAQUS/CAE*, um pré-processador interactivo que pode ser usado para a criação de modelos de elementos finitos e gerar os ficheiros de input (.inp) para o ABAQUS/Standard e para o ABAQUS/Explicit [13];
- *ABAQUS/Standard*, um motor de cálculo de elementos finitos de uso geral [12];
- *ABAQUS/Explicit*, um motor de cálculo de elementos finitos dirigido para a análise dinâmica explícita [12];
- *ABAQUS/Viewer*, um interface gráfico para visualização de resultados;

No presente trabalho todos os módulos foram utilizados para a obtenção dos resultados das colisões, à excepção do Standard.

2.2 - Etapas da Análise

Normalmente uma análise completa no ABAQUS é composta por 3 etapas: pré-processamento, simulação e pós-processamento. Estas 3 etapas relacionam-se entre si através de ficheiros, como se pode observar na Figura VII. 1.

2.2.1 – Pré-processamento

Nesta etapa é definido o modelo do problema e criado o ficheiro de entrada do ABAQUS (input file) – nome do trabalho.*inp*. O modelo pode ser criado usando o ABAQUS/CAE, como foi o caso do presente trabalho ou usando um editor de texto.

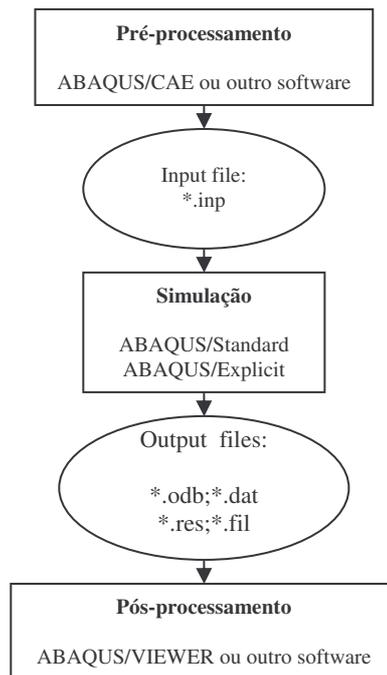


Figura VII. 1 – Etapas de uma análise no ABAQUS

2.2.2 - Simulação (ABAQUS/Standard ou ABAQUS/Explicit)

A simulação, que normalmente é corrida em *background*, é a etapa onde o ABAQUS/Standard ou ABAQUS/Explicit resolve o problema numérico definido no modelo. O módulo usado nas simulações deste trabalho foi o ABAQUS/Explicit. Exemplos de resultados obtidos a partir de uma análise do estado de tensão são os deslocamentos e as tensões, dados que são armazenados num ficheiro para serem usados em pós-processamento. Dependendo da complexidade do problema e da potência do computador usado, uma simulação pode demorar segundos ou dias.

2.1.3 Pós-processamento (ABAQUS/Viewer)

Os resultados podem ser analisados, quando a simulação estiver concluída ou durante o cálculo. A análise dos resultados pode ser efectuada através do módulo *Visualization* do ABAQUS/CAE ou através do ABAQUS/Viewer. Os resultados podem ser observados de vários modos: contornos de cores, animações, deformadas e gráficos.

3 - Método Explícito

A análise dinâmica explícita origina eficientemente um grande número de pequenos incrementos de tempo. Sendo usada a regra da diferença central explícita do tempo de integração, cada incremento é relativamente mais rápido de obter (comparando com análise dinâmica por integração directa) porque não se obtém uma solução para um conjunto de equações simultâneas.

O método da diferença central explícita satisfaz as equações de equilíbrio dinâmico desde o início do incremento, t ; as acelerações são calculadas no instante t e são usadas para obter a velocidade no instante $t+\Delta t/2$ e os deslocamentos no instante $t+\Delta t$.

3.1 - Implementação Numérica

A análise dinâmica explícita é baseada na implementação de uma regra de integração explícita em conjunto com o uso de uma matriz de elementos de massa diagonal. As equações do movimento para o corpo são integradas usando a método da diferença central explícita,

$$\dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N = \dot{u}_{\left(i-\frac{1}{2}\right)}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)}^N, \quad (\text{VII.1})$$

$$u_{(i+1)}^N = u_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N, \quad (\text{VII.2})$$

onde u^N é o grau de liberdade (componente deslocamento ou rotação) e o índice i refere-se ao número do incremento no *step* da análise dinâmica explícita. A integração por diferença central é explícita no sentido que o estado cinemático é obtido usando os valores conhecidos de $\dot{u}_{\left(i-\frac{1}{2}\right)}^N$ e $\ddot{u}_{(i)}^N$ do incremento anterior.

A regra de integração explícita é bastante simples, mas por si só não proporciona a eficiência computacional associada aos procedimentos da análise dinâmica explícita. A chave para obter a eficiência computacional da análise explícita é o uso da matriz diagonal de elementos de massa, porque as acelerações no início do incremento são calculadas por (VII.3):

$$\ddot{u}_{(i)}^N = (M^{NJ})^{-1} (P_{(i)}^J - I_i^J), \quad (\text{VII.3})$$

onde M^{NJ} é a matriz de massa, P^J é vector de aplicação de carga, e I^J é o vector das forças internas. A matriz de massa uniforme é usada porque é inversa e simples de trabalhar e porque o vector multiplicação de massa inverso das forças de inércia requer apenas n operações, onde n é o número de graus de liberdade do modelo.

A análise explícita não requer iterações nem tangentes da matriz de rigidez. O vector das forças internas, I^J , é formado com contribuições dos elementos individuais tal como a matriz global de rigidez necessita para ser formada.

3.2 - Massa Nodal e Inércia

O esquema de integração explícita no ABAQUS/Explicit requer massa nodal ou inércia para que todos os graus de liberdade estejam activos, a menos que restrições estejam aplicadas através do uso de condições fronteira. Mais precisamente, um valor diferente de zero da massa nodal terá que existir, a menos que todos os graus de liberdade de translação estejam bloqueados e um valor diferente de zero da inércia de rotação terá que existir a menos que todos os graus de liberdade de rotação estejam bloqueados. Os nós que fazem parte de corpos rígidos não necessitam de massa, mas o corpo rígido em si necessita de possuir massa e inércia, a menos que sejam usadas restrições.

Quando os graus de liberdade de um nó são activados por elementos com valores de densidade de massa diferentes de zero (ex: sólido, casca, barra) ou elementos de massa e inércia, valores de massa ou inércia diferentes de zero são criados naturalmente a partir da formação da matriz de massa uniforme.

Quando os graus de liberdade de um nó são activados por elementos com valores de densidade de massa iguais a zero (ex: molas, conectores), terá que se tomar cuidado enquanto se restringem os nós ou se adiciona massa e inércia.

3.3 – Estabilidade

A análise explícita realiza a integração usando muitos incrementos de tempo pequenos. O operador da diferença-central é condicionalmente estável, e o limite da estabilidade para método (sem amortecimento) é dado em termos da maior frequência do sistema por (VII.4),

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}}, \text{ em que } \omega_{\max} \text{ é a maior frequência do sistema} \quad (\text{VII.4})$$

Tendo em conta o amortecimento, o incremento de tempo estável é dado por (VII.5):

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \left(\sqrt{1 + \xi_{\max}^2} - \xi_{\max} \right), \quad (\text{VII.5})$$

onde ξ_{\max} é a fracção do amortecimento crítico no modo com a maior frequência. Contrariamente à intuição usual em engenharia, a introdução de amortecimento reduz o incremento de tempo estável.

3.4 - Tempo de Incrementação

O tempo de incrementação usado nesta análise tem que ser tão pequeno quanto o limite de estabilidade do operador diferença-central. O uso de incrementos de tempo não suficientemente pequenos torna a solução instável. Quando a solução se torna instável, o tempo de resposta das variáveis da solução tais como os deslocamentos, tendem a oscilar com incrementos de amplitudes. O balanço total de energia muda significativamente.

Neste problema não-linear em concreto, com grandes deformações e materiais com comportamento não linear, a maior frequência do modelo muda continuamente. Como consequência o limite de estabilidade também se altera. O ABAQUS/Explicit tem duas estratégias para o controlo do tempo de incrementação: tempo de incrementação automático e tempo de incrementação fixo.

3.5 - Vantagens do Método Explícito

O uso de incrementos pequenos (determinados pelo limite de estabilidade) é uma vantagem porque permite que a solução prossiga sem iterações ou sem requerer tangentes às matrizes de rigidez. Isto simplifica o tratamento do contacto.

A análise dinâmica explícita é ideal para analisar fenómenos de alta velocidade, mas muitos dos problemas lentos (quase-estáticos) podem igualmente ser tratados recorrendo a este tipo de análise.

Os resultados numa análise dinâmica explícita não são automaticamente verificados quanto à precisão, como acontece no ABAQUS/Standard. Enquanto a análise é caracterizada por um número extremamente grande de incrementos, cada incremento por seu lado é relativamente fácil de obter, resultando numa solução “economicamente” rápida. É comum no ABAQUS/Explicit que numa análise se produzam mais de 10^5 incrementos.

4 - Modelo FE – Introdução de Dados

4.1 – Preâmbulo

O presente estudo compreende a realização de simulações numéricas com dois modelos distintos. Um modelo permitirá aferir o comportamento do camião durante a colisão contra uma barreira rígida e encastrada na base e outro contra o sistema de retenção proposto.

4.2 - Geometria do Modelo

Em termos de modelação numérica cada modelo é caracterizado por 3 elementos: sistema de retenção (barreira), pavimento e veículo (camião). A diferença ao nível dos elementos que compõem os dois modelos verifica-se apenas no sistema de retenção.

4.2.1 – Veículo

O veículo comercial escolhido para representar um veículo com as características exigidas pela EN 1317 foi o Iveco EuroCargo 170E21, como se descreveu no capítulo anterior.

Em termos dimensionais e de distribuição de massa o modelo adoptado representa com o maior realismo possível o modelo real – Figuras VII.2 e VII.3.

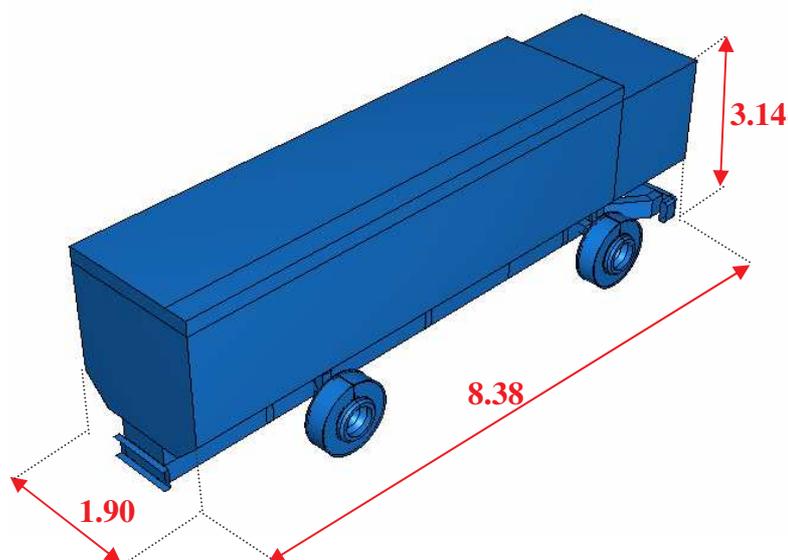


Figura VII. 2- Vista geral do veículo

Ao nível do chassi, as longarinas utilizadas têm exactamente as dimensões em perfil das do modelo real; contudo a sua configuração na parte dianteira foi alterada de forma a obter-se um efeito de amortecimento no pára-choques semelhante ao que acontece na realidade. Esta configuração foi obtida por aproximação.

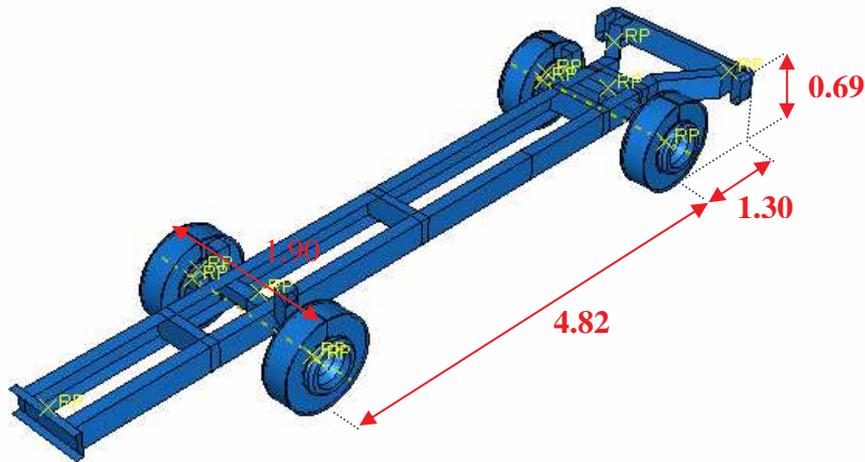


Figura VII. 3 – Chassi

A modelação do pneu em termos dimensionais foi seguida à risca. No entanto, as características da borracha do pneu e cintas foram obtidas através de [14] e afinadas por tentativas até se obter uma resposta do pneu próxima da realidade.

Na Figura VII. 4 é possível observar o pneu, caracterizado por uma secção tubular em borracha onde foram embebidas três superfícies do mesmo material mas reforçadas com cintas de aço na direcção longitudinal e transversal.

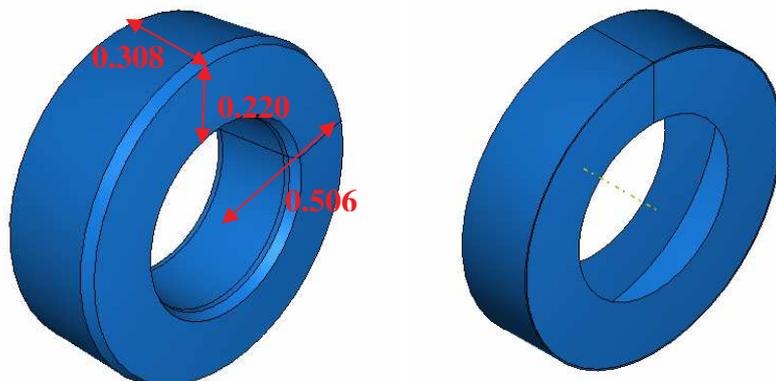


Figura VII. 4 – Pneu e cintas

No que diz respeito às suspensões as mesmas careceram de algumas alterações, de forma a simplificar o modelo. Enquanto o veículo real possui, à frente e atrás, um eixo rígido e molas semi-elípticas, na modelação foi considerado um sistema de suspensão independente com dois conjunto mola/amortecedor por roda. Por uma questão de simplificação a roda direita da frente não possui qualquer tipo de suspensão. Uma vez que a colisão se processará do lado esquerdo este facto não possui relevância.

Refira-se que, na modelação do veículo, se tentou reproduzir o mais fielmente possível a realidade, de modo a obter-se uma resposta bastante realista. Contudo, não é o objecto deste trabalho o estudo do veículo, razão pela qual as simplificações introduzidas apenas serviram para aligeirar o modelo numérico, concentrando os recursos informáticos na questão central do problema: o sistema de retenção.

4.2.2 - Sistema de Barreira Encastrada

A modelação da barreira foi obtida com base no perfil da barreira rígida tipo New Jersey. Por uma questão de simplificação do contacto pneu/barreira não se considerou o pequeno paramento de 70mm na base do separador. Esta situação é de resto muito comum quando se faz uma recarga do pavimento e se anulam os 70mm.

Para o pavimento, em termos de modelação, apenas foi tida em consideração a dimensão necessária para o veículo embater e “abandonar” a barreira.

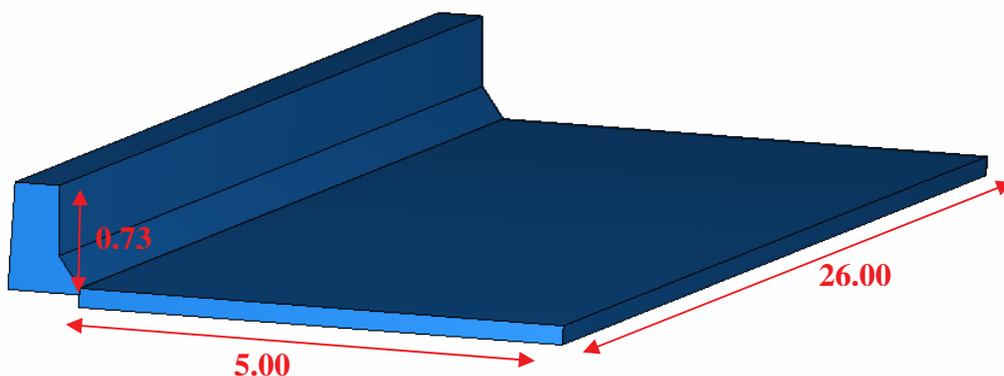


Figura VII. 5 - Vista geral da barreira e do pavimento

4.2.3 - Sistema de Barreira Proposto

A modelação do sistema de barreira de segurança proposto, caracteriza-se pela modelação de 17 blocos de 2 m de meia barreira New Jersey capazes de se movimentarem livremente, mas unidos entre si por uma ligação em dois níveis, simulando o comportamento dos cabos

de aço. Por uma questão de simplicidade considerou-se a ligação do cabo à barreira, numa zona rígida especialmente criada para o efeito - Figura VII. 6.

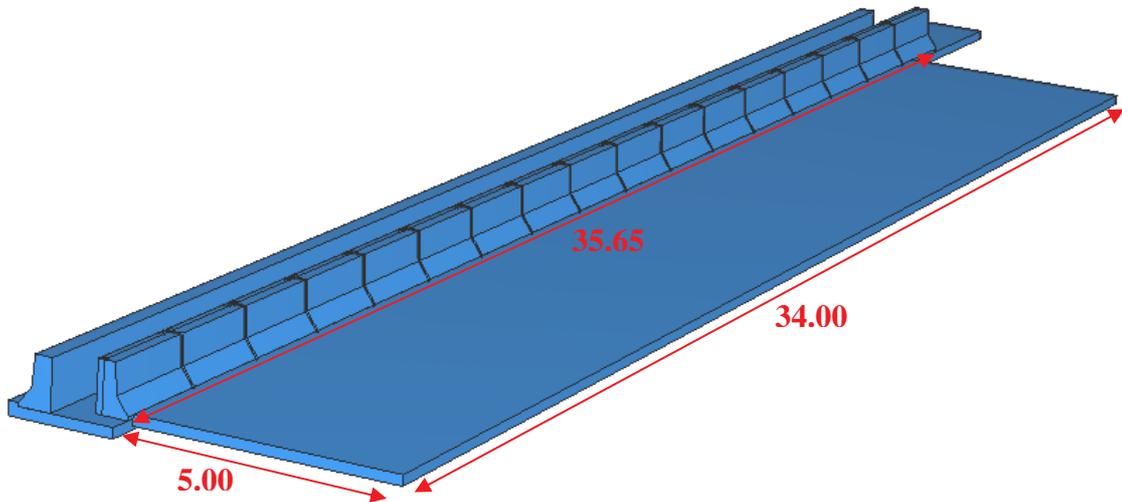


Figura VII. 6 – Vista geral da barreira e do pavimento

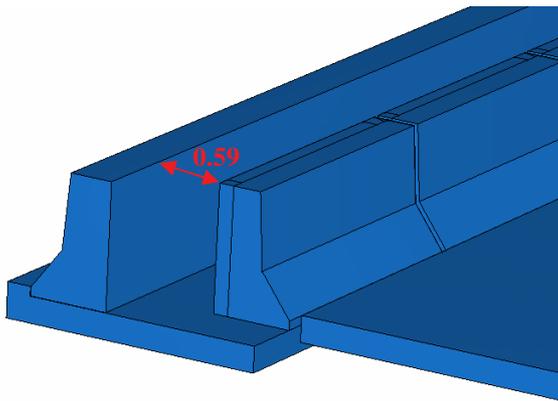


Figura VII. 7 – Pormenor da barreira

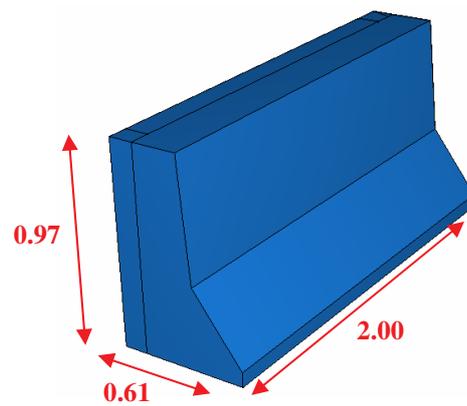


Figura VII. 8 – Bloco de 2m

4.3 – Malha

4.3.1 – Descrição Geral

A criação de uma malha é o procedimento usado para dividir o modelo em pequenas partes. Quanto mais pequenos forem esses elementos maior é a precisão da simulação. Contudo, a excessiva redução das dimensões da malha leva a que o tempo de processamento seja superior e também os ficheiros gerados sejam maiores.

Diferentes malhas foram testadas de modo a ser possível obter uma densidade de elementos óptima para cada parte do modelo.

No presente trabalho convencionou-se que, cada parte do modelo era constituída por sub-partes, isto é, o modelo é constituído por várias partes (barreira, pavimento e veículo) e em particular o veículo é uma parte formada por diversas sub-partes (eixos, jantes, pneu, etc.).

Nas Figuras VII.9, VII.10, VII.11 e VII.12 são mostradas as malhas finais para cada parte do modelo.

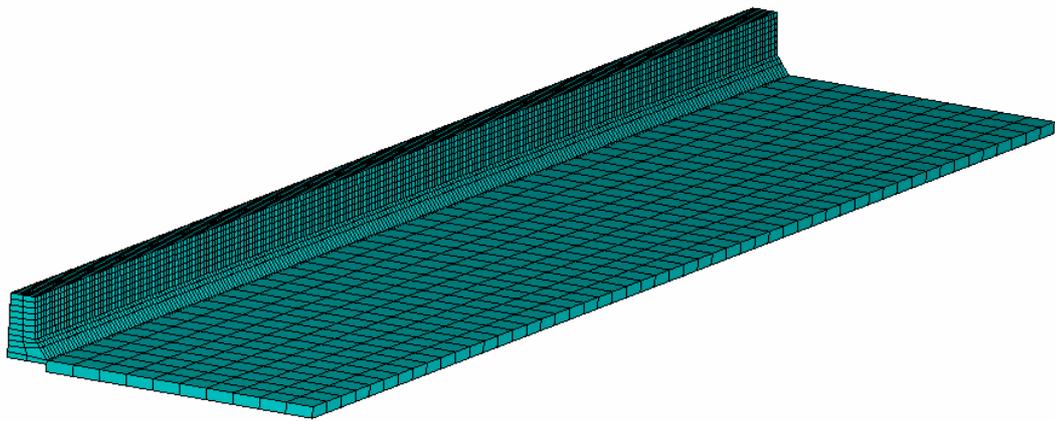


Figura VII. 9 - Vista geral da malha do Sistema de Barreira encastrada

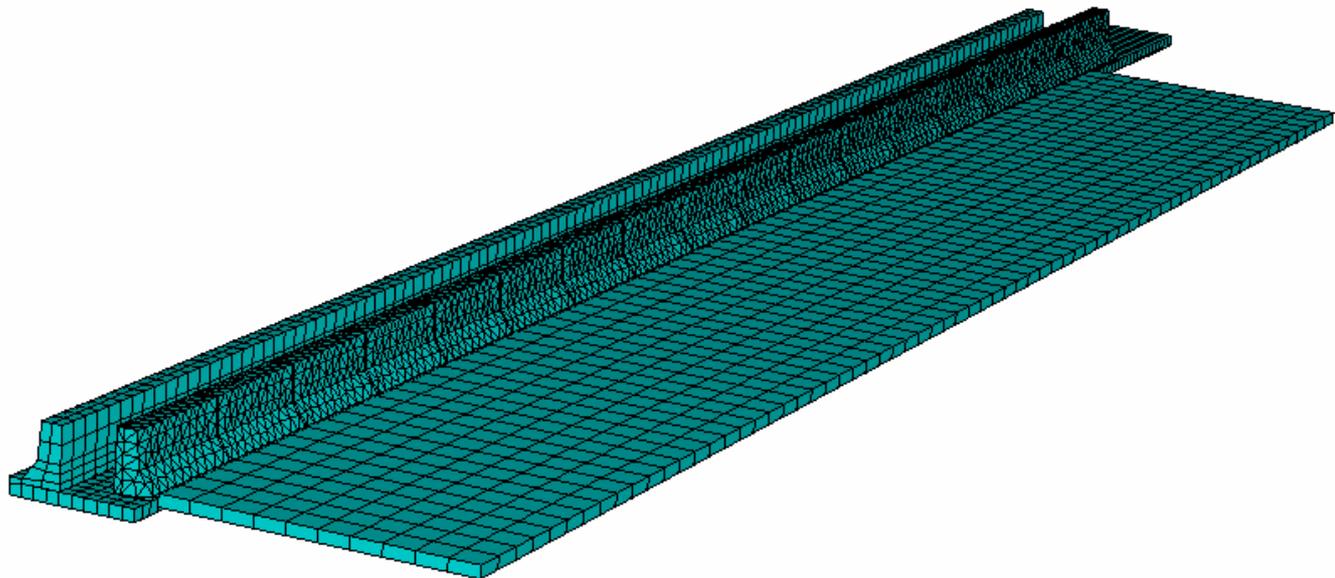


Figura VII. 10 - Vista geral da malha do Sistema de Barreira proposta

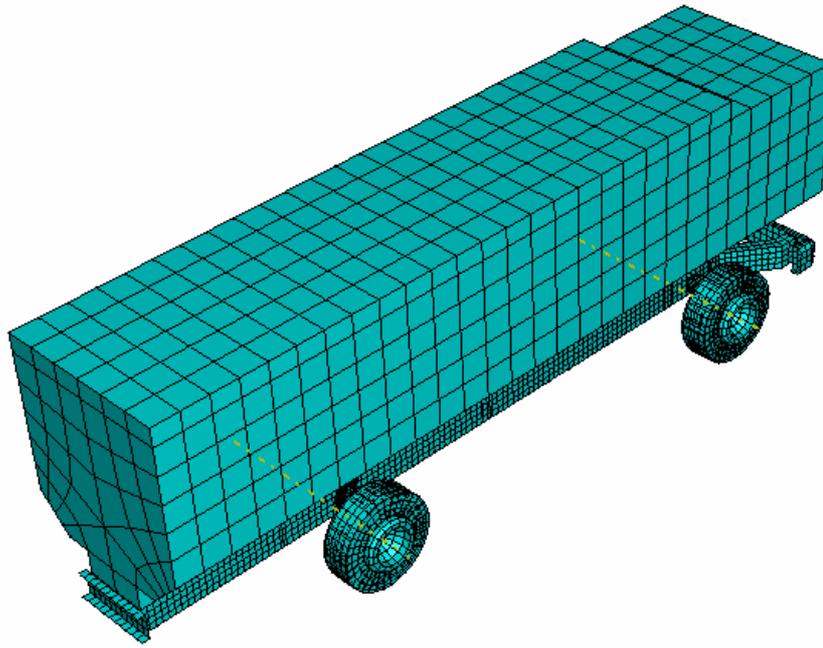


Figura VII. 11 - Vista geral da malha do veículo

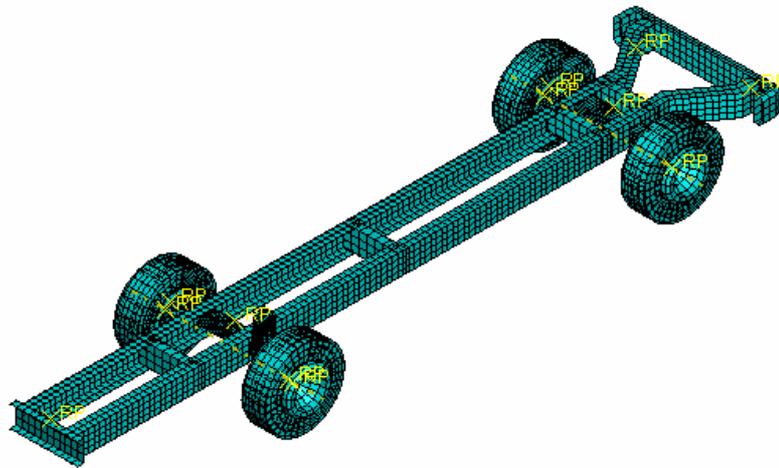


Figura VII. 12 - Vista do chassi do veículo

4.3.2 - Escolha dos elementos

Foram utilizados 3 tipos de elementos básicos: elementos de casca, sólidos e membrana.

A utilização de elementos sólidos apenas foi considerada por problemas relacionados com o contacto entre elementos de casca, nomeadamente entre o pneu/pavimento e o pneu/barreira.

Os elementos de casca apresentam a sua grande vantagem no ganho de tempo de processamento face aos elementos sólidos, em especial se considerarmos dimensões de peças pequenas (por ex: um perfil laminado idêntico ao das longarinas), uma vez que o *time step* aumenta com aumento do tamanho do menor elemento do modelo.

A Tabela VII. 1 apresenta o tipo de elemento atribuído a cada sub-parte e o número de elementos que as compõem.

Tabela VII. 1 - Tipo e número de elementos do modelo

Parte	Sub-partes	Elementos	
		Tipo	Número
<i>Sistema de Barreira encastrada</i>	Barreira	Sólidos	520
	Pavimento		5720
<i>Veiculo</i>	Eixo frente	Casca	768
	Eixo trás		1466
	Braços suspensões		584
	Longarinas		960×2
	Barras transversais		56×3
	Pára-choques		344
Jantes	204		
<i>Sistema de Barreira proposto</i>	Bloco-CG	Sólidos	1136
	Pneus		1190×4
	Cintas	Membrana	438×4
<i>Sistema de Barreira proposto</i>	Barreira	Sólidos	840×17
	Barreira oposta		5850
	Pavimento		680

4.4 – Interacções

Os tipos de contactos que existem no modelo são essencialmente os relativos à interacção pneu/pavimento, jante/barreira, pneu/barreira e pára-choques/barreira.

O contacto é dos problemas mais complexos na modelação, não estando ainda hoje completamente resolvido.

O comportamento do contacto entre duas superfícies é caracterizado por uma componente normal e outra tangencial. O ABAQUS permite que na direcção normal ao contacto se possam utilizar diferentes formulações para a obtenção das pressões geradas entre as superfícies: "*Hard contact*" ou "*Softened contact*" (Exponencial, Linear ou Tabelado). Essa pressão é calculada em função essencialmente das características dos materiais (E e ρ), da densidade da malha, da penetração entre superfícies e do *time step* utilizado. Contudo, o valor dessa pressão pode ser definido à partida, utilizando formulações diferentes, tais como

relações exponenciais e lineares entre pressões/penetrações ou através da definição de um coeficiente de rigidez.

No presente trabalho utilizaram-se as formulações do tipo “*Hard contact*” onde a pressão é calculada automaticamente pelo programa, de acordo com o referido e do tipo *Exponencial* de acordo com os parâmetros introduzidos (C_0 e P_0) - Figura VII. 13.

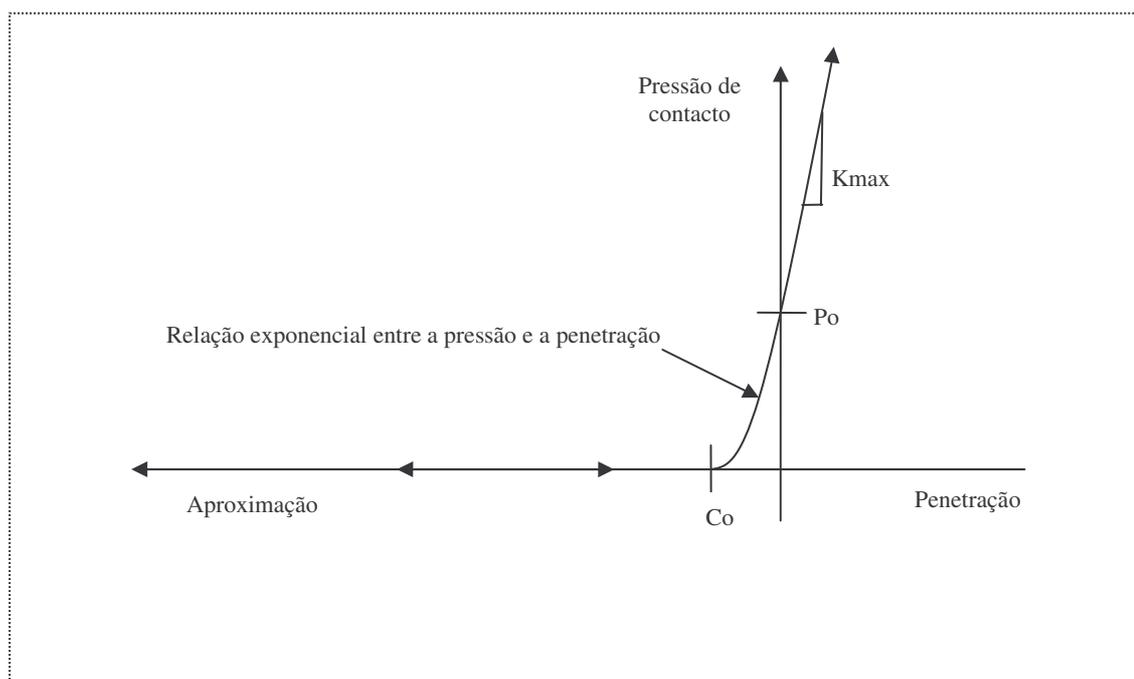


Figura VII. 13 - Relação exponencial entre a pressão e a penetração

O comportamento tangencial é regido pela seguinte lei de fricção de Coulomb:

$$\tau_{\text{tan}} = \mu \times p, \text{ onde } \tau_{\text{tan}} \text{ é a tensão tangencial, } \mu \text{ o coeficiente de atrito e } p \text{ a pressão.} \quad (\text{VII.6})$$

Os valores dos coeficientes de atrito (μ) adoptados, foram os expressos na Tabela VII. 2, segundo os dados obtidos de [16]. Estes valores de μ corresponde a contactos entre superfícies secas (característica preferencial segundo a norma EN1317).

Tabela VII. 2 - Coeficientes de atrito

Pares de contacto	Coefficiente de atrito (μ)
Pneu/Pavimento(betuminoso)	0.60
Pneu/Barreira(betão)	0.65
Jante(aço)/Barreira	0.30
Para-choques(aço)/Barreira	0.30

Em função do seu comportamento normal e tangencial foram definidos os diferentes tipos de contacto – Tabela VII. 3.

Tabela VII. 3 - Comportamento dos tipos de contacto

Nome	Comportamento				
	Normal			Tangencial	
	Formulação	Rigidez do contacto	Separação permitida após contacto	Formulação	Coefficiente de atrito (μ)
CONT_1	“Hard” contact	Calculada automaticamente	Sim	Penalty	0.65
CONT_2	“Hard” contact	Calculada automaticamente	Sim	Penalty	0.60
CONT_3	“Hard” contact	Calculada automaticamente	Sim	Penalty	0.30
CONT_4	Softened (Exponencial)	$C_0=0.5$ $P_0=800000$	Sim	Penalty	0.65
CONT_5	Softened (Exponencial)	$C_0=0.5$ $P_0=800000$	Sim	Penalty	0.30
CONT_6	“Hard” contact	Calculada automaticamente	Sim	Penalty	0.50

Para o contacto ficar definido terá que se entrar em linha de conta com a energia dissipada durante o contacto. Esta questão pode ser equacionada utilizando 2 formulações diferentes: penalidade ou cinemático. Sendo que, apenas no último é tida em linha de conta a energia dissipada no contacto (amortecimento) de forma automática, uma vez que quando é usada a penalidade esse amortecimento é definido à priori e com um valor fixo.

Em suma as características do contacto são as expressas na Tabela VII. 4.

Tabela VII. 4 – Pares de Contacto

Pares de contacto	Método	Nome contacto
Pneu/Pavimento	Penalidade	CONT_2
Pára-choques/Barreira	Penalidade	CONT_3
Pneu/Barreira	Penalidade	CONT_1
Jante/Barreira	Penalidade	CONT_3
Pneu traseiro/Barreira	Cinemático	CONT_4
Jante traseira/Barreira	Cinemático	CONT_5
Restantes pares	Penalidade	CONT_6

4.5 – Materiais

4.5.1 – Apresentação Geral

Nesta simulação utilizaram-se vários tipos de materiais, divididos em 3 domínios de elasticidade: elástico linear, elásto-plástico e hiperelástico.

As Tabelas VII.5, VII.6 e VII.7 mostram as características dos materiais utilizados no modelo.

Tabela VII. 5 – Materiais com comportamento Elástico linear

Material	Sub-Parte	ρ (Kg/m ³)	Elasticidade	
			<i>Elástico Linear</i>	
			E(GPa)	ν
<i>AÇO-1</i>	Jantes Longarinas Braços suspensão Eixos	7800	200	0.3
<i>BETÃO</i>	Barreira – encastrada Barreira – proposta	2500 1200	20	0.3
<i>PAVIMENTO</i>	Pavimento	5000	0.02	0.3
<i>MASSA-CG</i>	Bloco-CG	1379.43	20	0.3

Tabela VII. 6 - Materiais com comportamento Elásto-plástico

Material	Sub-Parte	ρ (Kg/m ³)	Elasticidade			
			<i>Elásto-plástico</i>			
			E(GPa)	σ_{vd} (MPa)	σ_{fd} (MPa)	ϵ_{vd}
<i>AÇO-2</i>	Pára-choques	7800	200	270	600	0.0085

Tabela VII. 7 - Materiais com comportamento Hiperelástico

Material	Sub-Parte	ρ (Kg/m ³)	Elasticidade				
			<i>Hiperelástico</i>				
			Lei	Coeficientes			Viscosidade Domínio
				C ₁₀	C ₀₁	D ₁	
<i>BORRACHA</i>	Pneu	1100	Polinomial (ordem 1)	1E06	0	2E-08	Tempo – Prony g i=0.3 k i=0.0 τ i=0.1
<i>CINTAS(PNEU)</i>	Cinta 1 Cinta 2	5900 1500	Marlow	Calculados a partir da Tabela VII. 8			- -

O comportamento dos materiais que constituem as cintas dos pneus foi obtido através de [14]. Os materiais têm um comportamento hiperelástico. Os coeficientes (Tabela VII. 7)

destes materiais são calculados pelo programa a partir dos valores resultantes dos ensaios à compressão/tracção uniaxial realizados em provetes - Tabela VII. 8.

Tabela VII. 8 – Resultados dos ensaios relativos aos materiais das cintas dos pneus

Cinta 1		Cinta 2	
Tensão Nominal (Pa)	Extensão Nominal	Tensão Nominal (Pa)	Extensão Nominal
-1.90E+08	-0.0951626	-1.09E+07	-0.0951626
-1.70E+08	-0.0860688	-9.72E+06	-0.0860688
-1.49E+08	-0.0768837	-8.55E+06	-0.0768837
-1.29E+08	-0.0676062	-7.41E+06	-0.0676062
-1.10E+08	-0.0582355	-6.29E+06	-0.0582355
-9.05E+07	-0.0487706	-5.19E+06	-0.0487706
-7.17E+07	-0.0392106	-4.11E+06	-0.0392106
-5.32E+07	-0.0295545	-3.05E+06	-0.0295545
-3.51E+07	-0.0198013	-2.01E+06	-0.0198013
-1.74E+07	-0.00995017	-996920	-0.00995017
0	0	0	0
1.70E+09	0.0100502	9.77E+07	0.0100502
3.38E+09	0.0202013	1.93E+08	0.0202013
5.01E+09	0.0304545	2.87E+08	0.0304545
6.62E+09	0.0408108	3.79E+08	0.0408108
8.19E+09	0.0512711	4.69E+08	0.0512711
9.73E+09	0.0618365	5.58E+08	0.0618365
1.12E+10	0.0725082	6.44E+08	0.0725082
1.27E+10	0.0832871	7.29E+08	0.0832871
1.42E+10	0.0941743	8.12E+08	0.0941743
1.56E+10	0.105171	8.93E+08	0.105171

4.6 - Condições Fronteira e Acções

4.6.1 - Condições Fronteira

4.6.1.1 – Deslocamentos

Como foram realizadas 2 simulações, uma referente ao sistema fixo (1)(barreira encastrada na base) e outra ao sistema proposto (2). As restrições aplicadas são as expressas na Tabela VII. 9.

Tabela VII. 9 - Restrições ao movimento aplicadas às partes

Parte	Translação			Rotação		
	U_x	U_y	U_z	R_x	R_y	R_z
Pavimento	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(1) Barreira (base)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(2) Barreira oposta (base)						

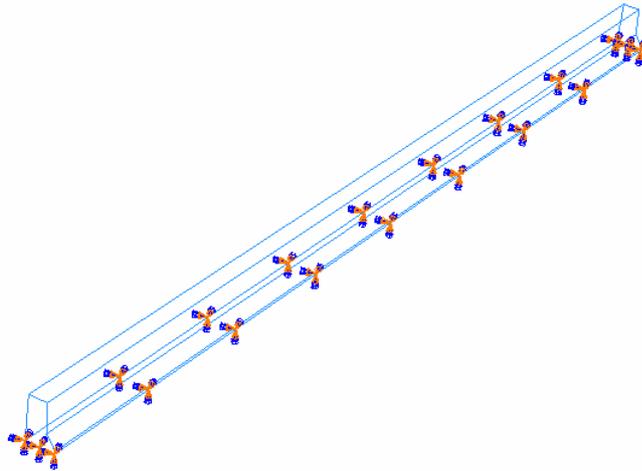


Figura VII. 14 - Encastramento na base da Barreira (1)

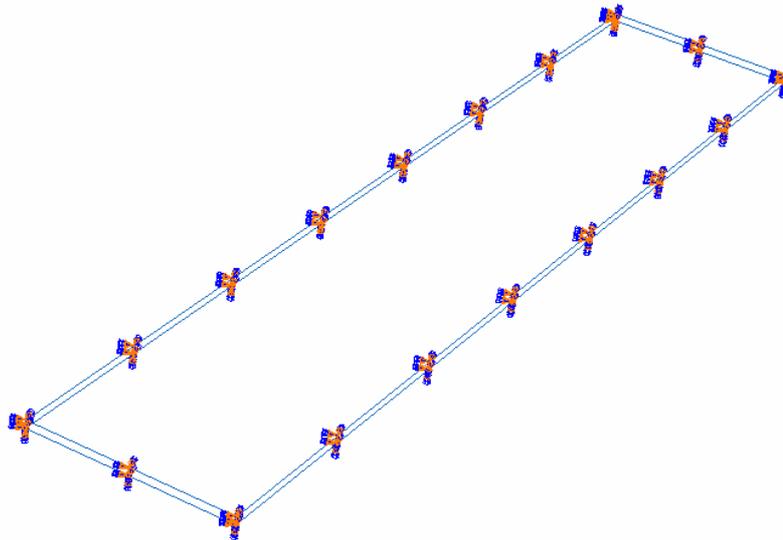


Figura VII. 15 - Encastramento total do pavimento

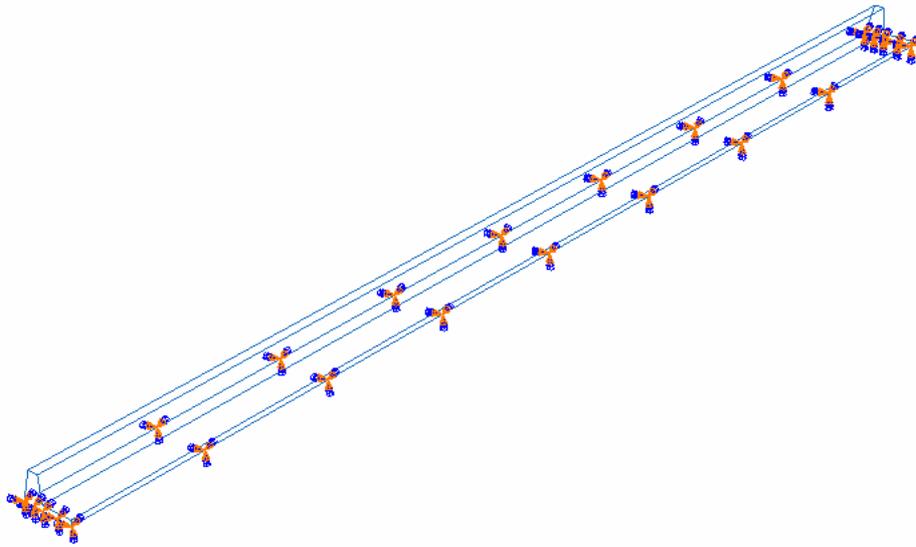


Figura VII. 16 – Encastramento na base da barreira oposta (2)

4.6.1.2 – Velocidades

A velocidade a que o caminhão choca contra a barreira é de 80 Km/h (22 m/s), em ambas as simulações.

No modelo foi considerado que o corpo do veículo – Figura VII. 17, possuía uma velocidade de translação de -22,22 m/s e o conjunto jante/pneu – Figuras Figura VII. 18 e Figura VII. 19, uma velocidade de translação de -22,22 m/s e uma velocidade de rotação em torno dos respectivos eixos de 43.48 rad/s.

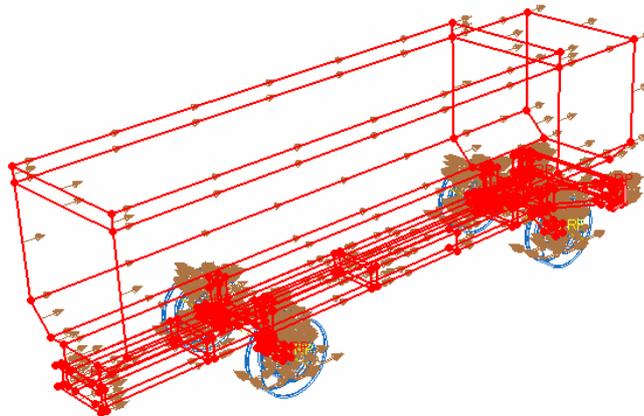


Figura VII. 17 – Corpos com velocidade de translação de 22,22 m/s

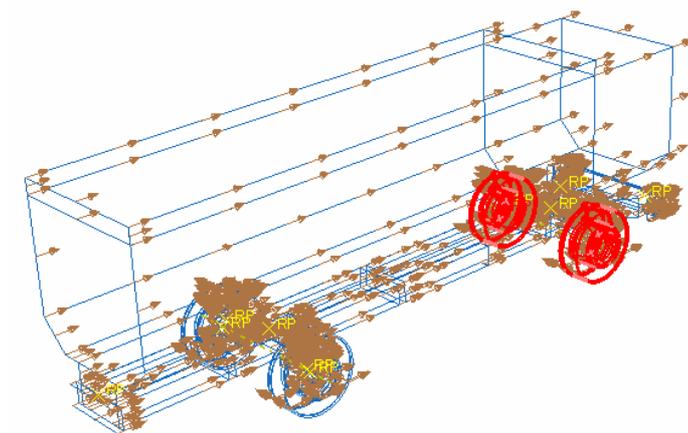


Figura VII. 18 - Corpos com velocidade de translação de 22,22 m/s e de rotação 43.48 rad/s em torno do eixo dianteiro

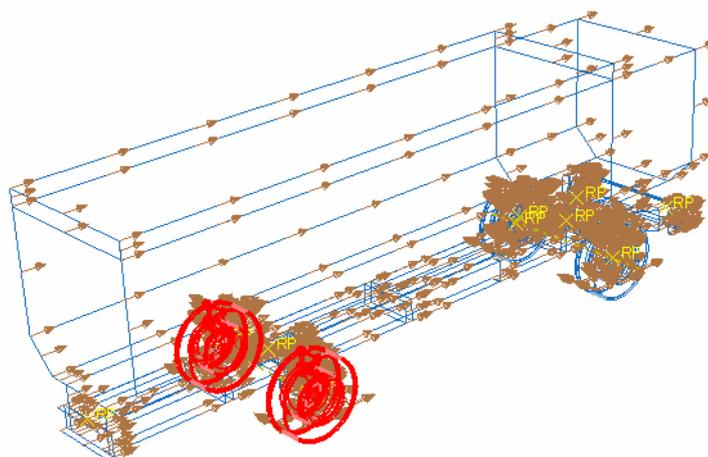


Figura VII. 19 - Corpos com velocidade de translação de 22,22 m/s e de rotação 43.48 rad/s em torno do eixo traseiro

4.6.2 – Acções

As acções a que estão sujeitas as diversas partes do modelo são a gravidade $g=9.81$ m/s e no caso dos pneus adicionalmente um valor de pressão interna de 900 KPa – Figura VII. 20.



Figura VII. 20 - Pressão interna do pneu

Estas acções foram introduzidas no modelo segundo uma lei linear crescente durante os primeiros 0.04s do tempo de simulação. Em alternativa, poderia se ter adoptado qualquer outra lei ou a aplicação instantânea das acções, causando contudo no último caso algum ruído numérico.

4.7 - Conectores

4.7.1 Veículo

A utilização de conectores permite aligeirar o modelo em termos de elementos e controlar melhor as características das ligações. Permite ainda concentrar os recursos de cálculo noutras áreas mais importantes para o presente estudo. Contudo, só é possível o uso de conectores quando se conhece o seu comportamento.

Neste trabalho utilizaram-se 3 tipos de conectores ou ligações: AXIAL, JOIN e JOIN+REVOLUTE.

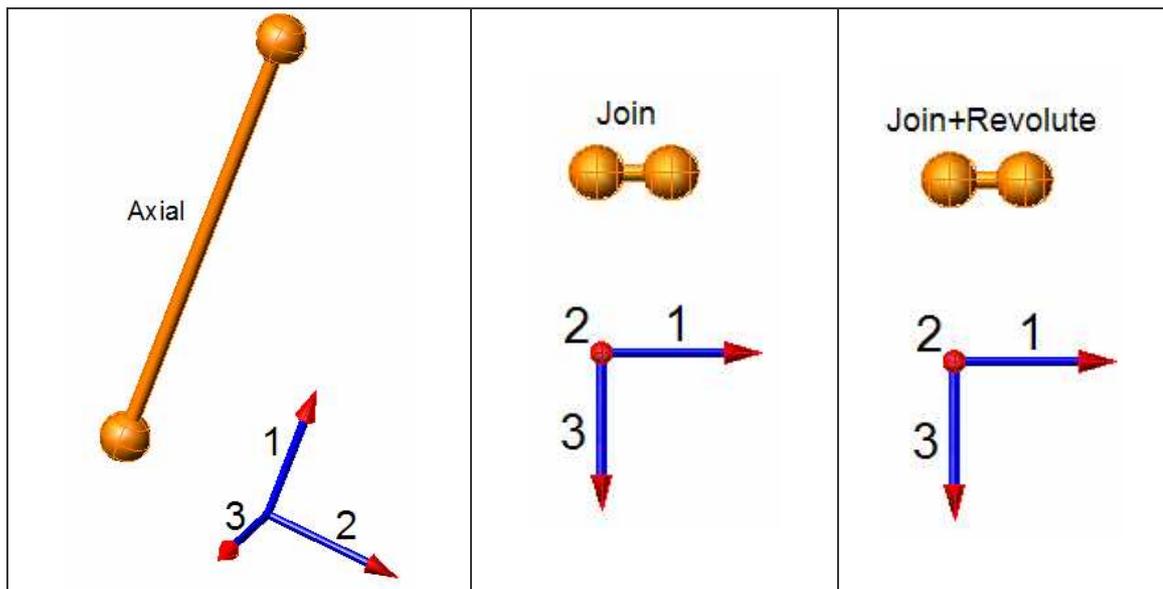
As características de cada um deles estão expressas na Tabela VII. 10.

Tabela VII. 10 - Movimentos relativos entre os pontos conectados segundo os 3 eixos

	<i>Translações</i>			<i> rotações</i>		
	1	2	3	1	2	3
AXIAL	✓	✗	✗	✓	✓	✓
JOIN	✗	✗	✗	✓	✓	✓
JOIN+REVOLUTE	✗	✗	✗	✓	✗	✗

✓ - movimento permitido

✗ - movimento não permitido



A ligação entre a jante e o eixo é caracterizado por uma ligação do tipo JOIN+REVOLUTE - Figura VII. 21.

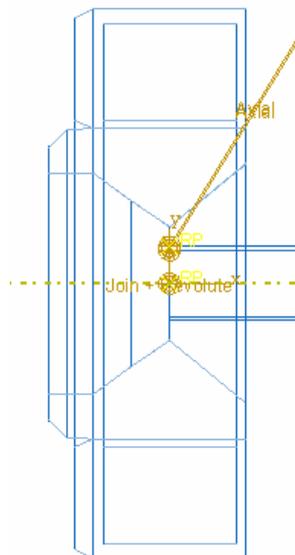


Figura VII. 21 - Ligação da jante ao braço da suspensão

O sistema de suspensão utilizado não representa o sistema original do caminhão, proporcionando contudo um comportamento bastante próximo do real. A ligação utilizada é do tipo AXIAL de forma simular o conjunto mola/amortecedor – Figuras VII.22 e VII.23. Para a ligação entre o eixo e o braço da suspensão utilizaram-se ligações do tipo JOIN – Figura VII. 24.

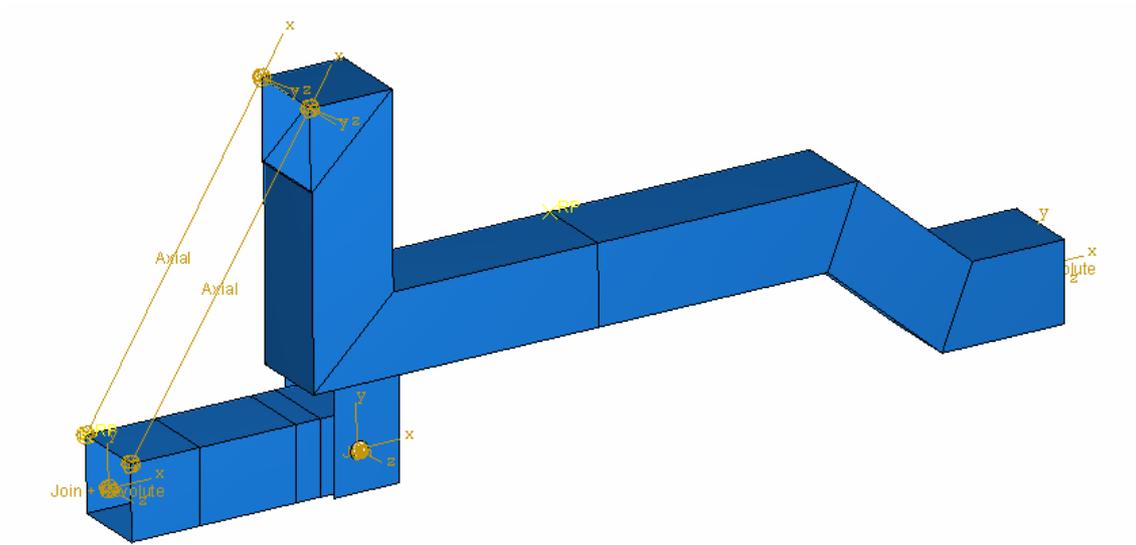


Figura VII. 22 - Conjunto eixo e braço da suspensão dianteira

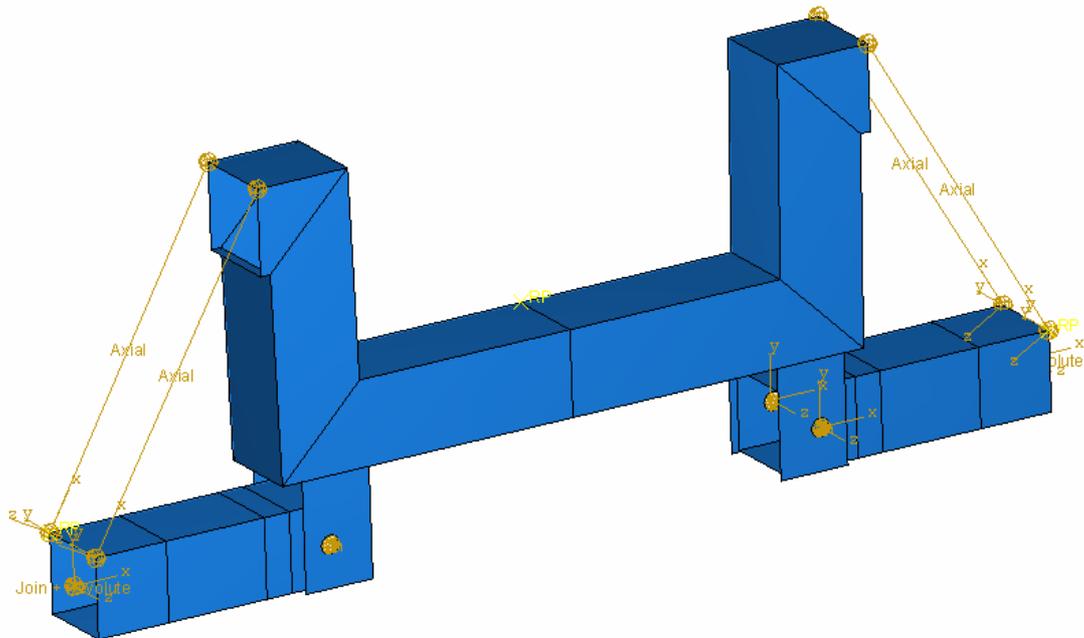


Figura VII. 23 - Conjunto eixo e braços da suspensão traseira

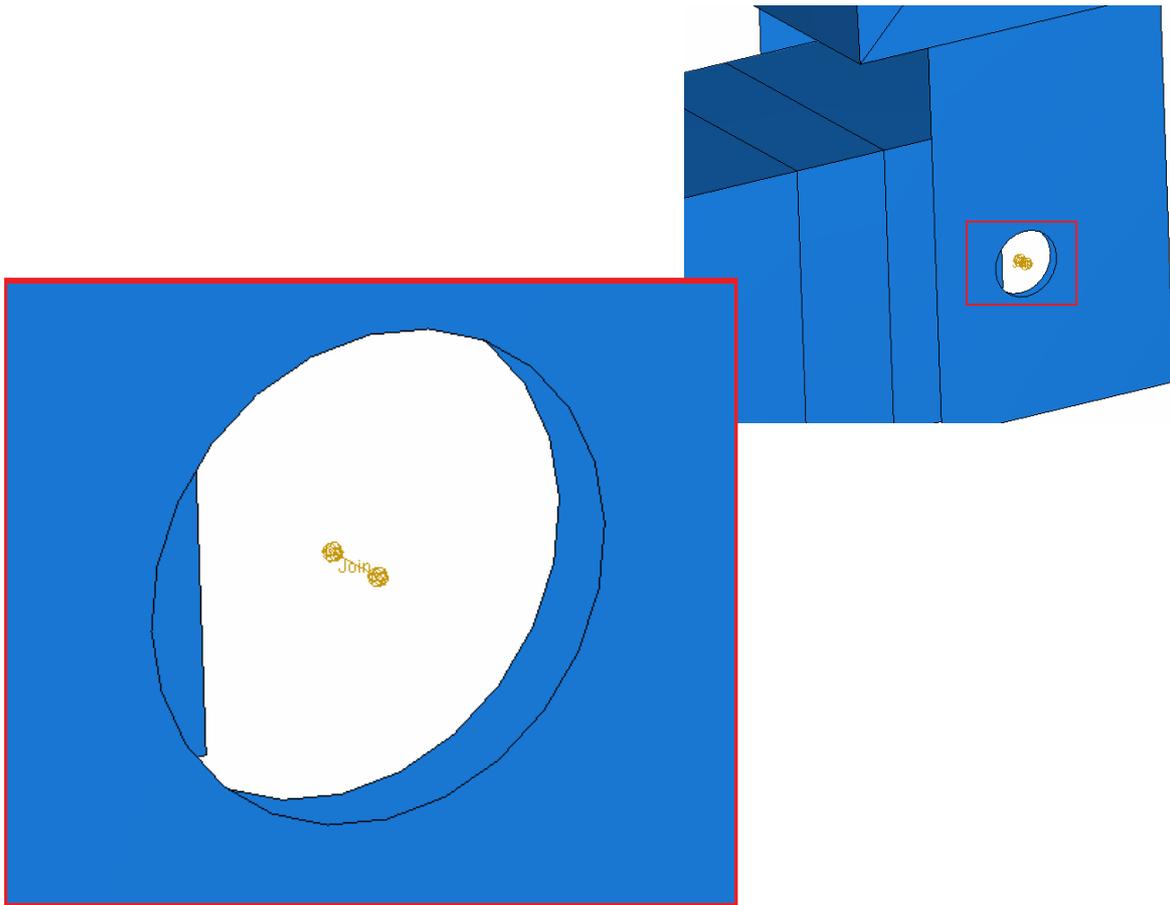


Figura VII. 24 - Pormenor da ligação do braço ao eixo

Na Tabela VII. 11 são apresentadas as características da suspensão. Os valores da tabela resultam de aproximações sucessivas realizadas com o modelo do veículo de modo a o mesmo ter um comportamento aceitável e próximo da realidade.

Tabela VII. 11 – Características das suspensões

	Rigidez (KN.m)	Amortecimento (N.s)	Comprimento de referência (m)	Curso da suspensão (m)
Dianteira	500	800	0.607	0.100
Traseira	1000	800	0.600	0.050

Para limitar o curso da suspensão poder-se-ia se ter utilizado uma funcionalidade do programa que limita a amplitude do conector; contudo, essa limitação é realizada de um forma brusca produzindo-se forças extremamente elevadas. Para contornar este problema definiu-se um comportamento elástico bi-linear para a suspensão - Gráfico VII. 1, onde o primeiro tramo corresponde ao comportamento da suspensão propriamente dita com uma

rigidez de 500 KN.m e o segundo ao comportamento do batente que limita o curso, com uma rigidez muito elevada, eliminando-se o aparecimento de uma força exagerada (tanto maior quanto menor o *time-step*).

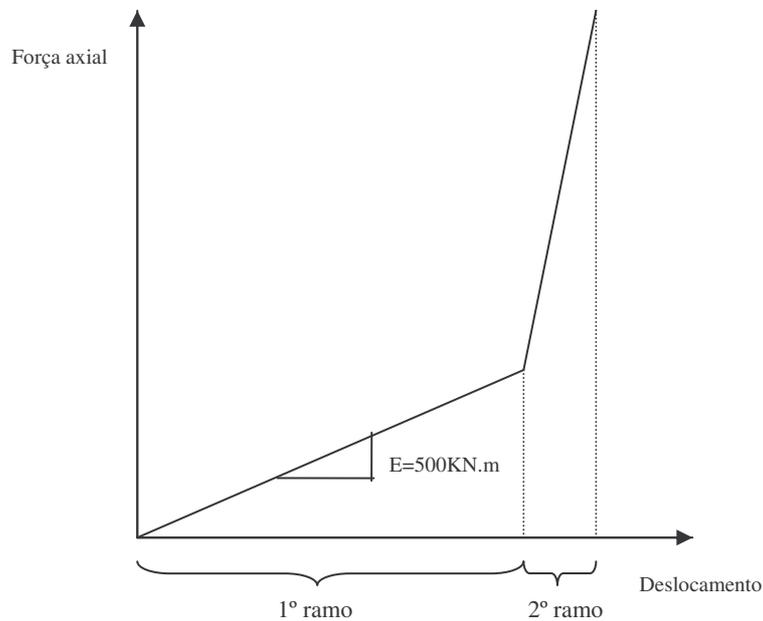


Gráfico VII. 1 - Comportamento da suspensão

4.7.2 Sistema de Barreira Proposto

O Sistema de Barreira Proposto é caracterizado por possuir vários blocos de barreira com 2.00m com perfil New Jersey, unidos entre si por dois cabos de aço a dois nível diferentes.

Para simular o efeito do cabo, funcionando apenas à tracção, utilizou-se uma ligação do tipo AXIAL com o seguinte comportamento – Gráfico VII. 2.

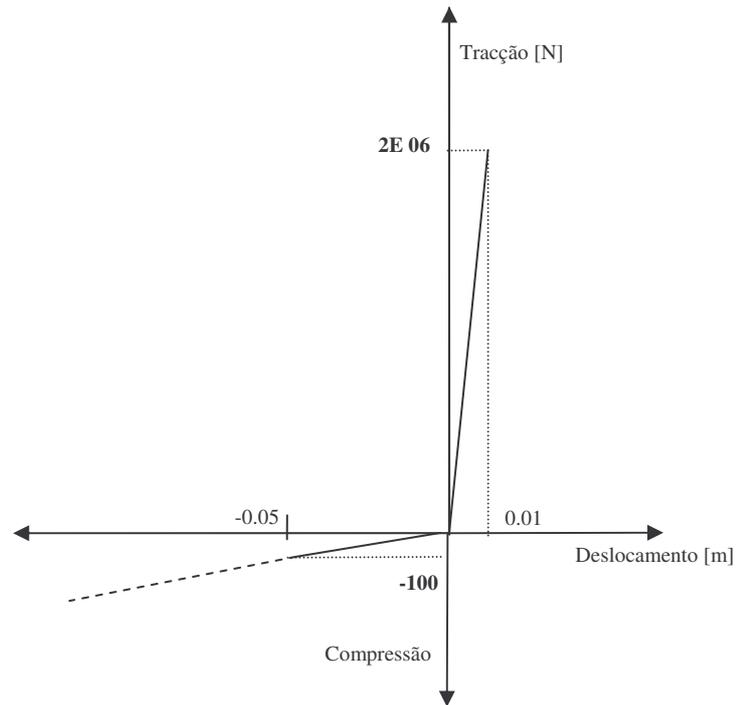


Gráfico VII. 2 – Relação Força/Deslocamento no cabo que une as barreiras

Os cabos de aço utilizados possuem uma capacidade resistente de 200 ton.

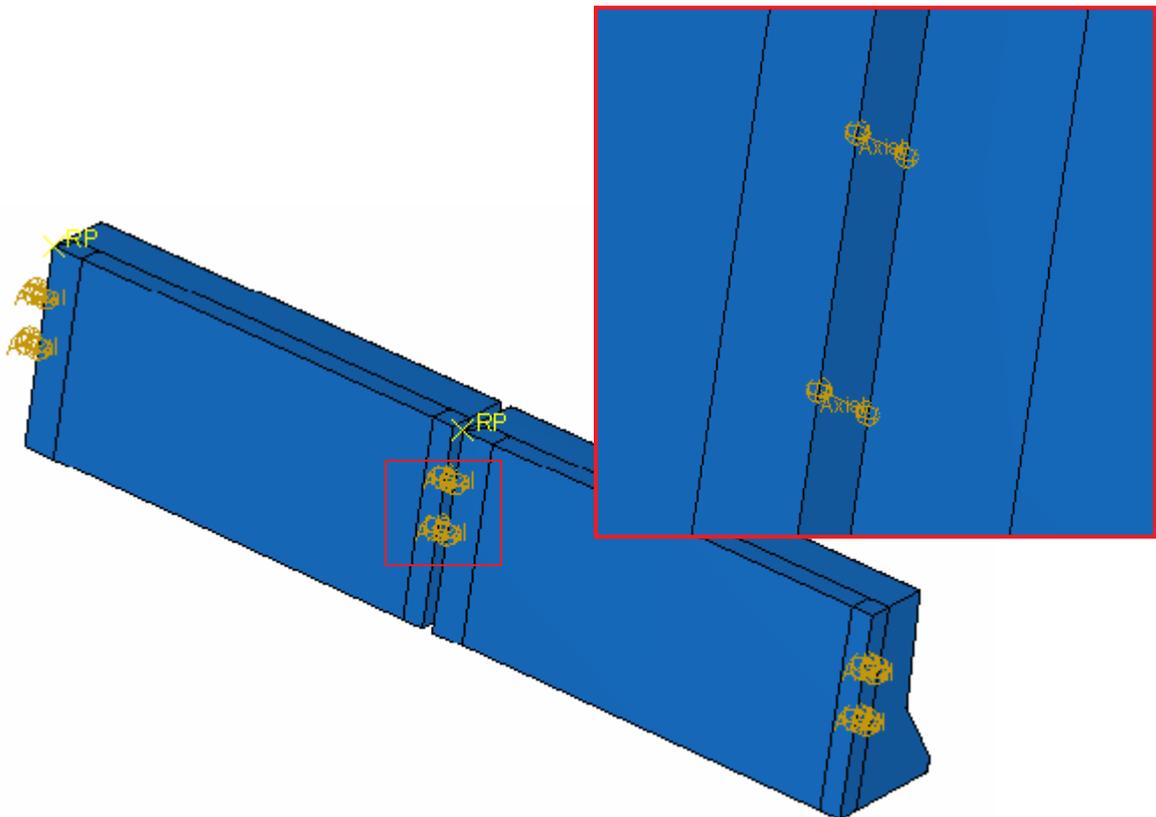


Figura VII. 25 – Pormenor da ligação entre as barreiras

Capítulo VIII

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações efectuadas respeitantes aos dois modelos: barreira encastrada e barreira articulada (sistema proposto).

Esta análise dos resultados incidirá sobre: o comportamento da barreira face ao choque de um pesado, nomeadamente ao nível da capacidade de deflexão do veículo e da absorção da energia da colisão, e o comportamento dum veículo ligeiro, referindo-se neste caso apenas a questão da variação da absorção de energia e ao valor do ASI entre os dois sistemas.

Serão realizados alguns cálculos de forma a confirmar os resultados das simulações e dimensionar, ainda que de uma forma muito simples, alguns elementos que constituem a barreira.

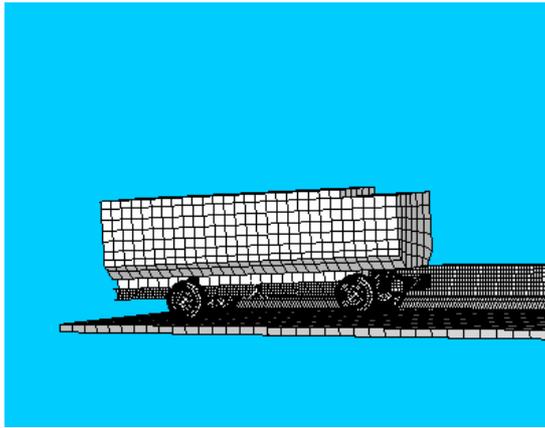
2 – Comportamento do Veículo Pesado

2.1 – Trajectória

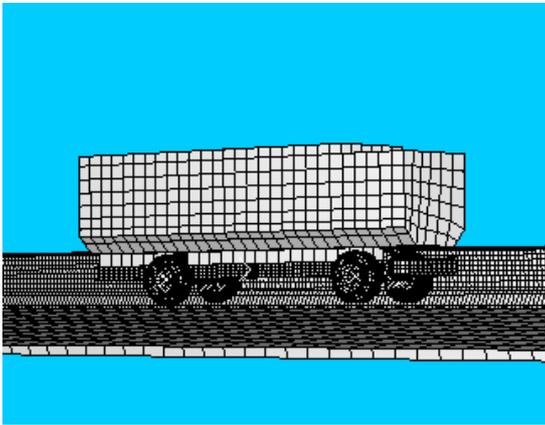
O comportamento do veículo é sem dúvida dos aspectos com maior relevância quando se estudam colisões com barreiras de segurança.

Este estudo compreende a realização de simulações recorrendo a dois modelos distintos de barreira, considerando-se como termo de comparação o sistema clássico de barreira encastrada.

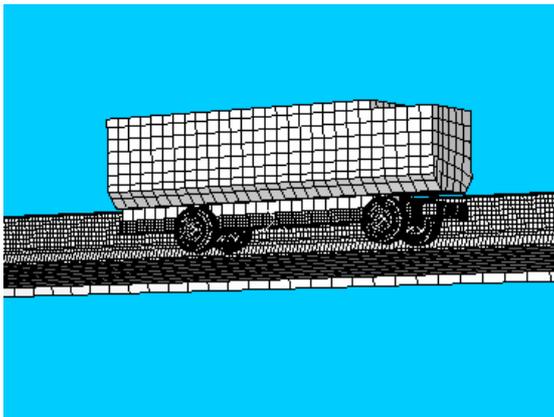
Na Figura VIII. 1 é possível observar a trajectória durante a colisão do veículo contra os sistema de barreira de segurança encastrada na base. Utilizou-se um vídeo da Delta-Block, de uma colisão de um veículo pesado contra uma barreira rígida, por forma comparar-se o comportamento do veículo modelado por elementos finitos.



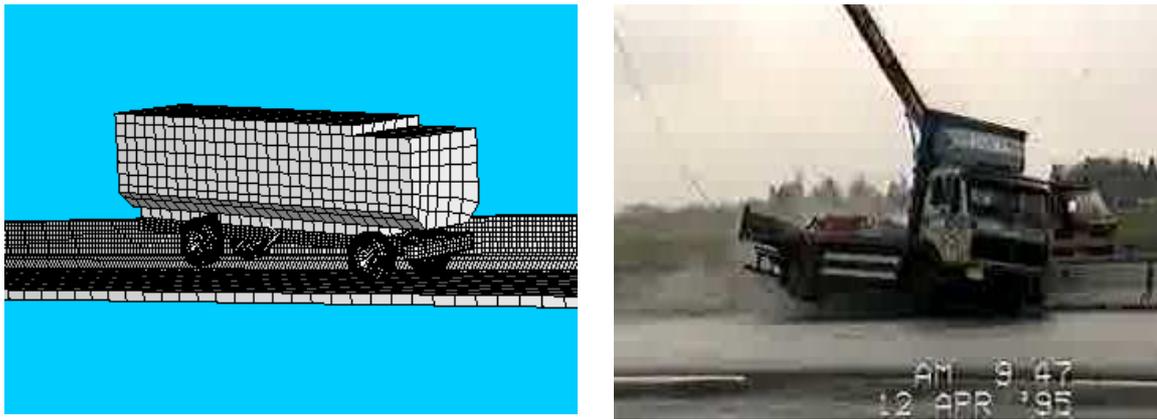
t = 0.000s



t = 0.280s



t = 0.370s



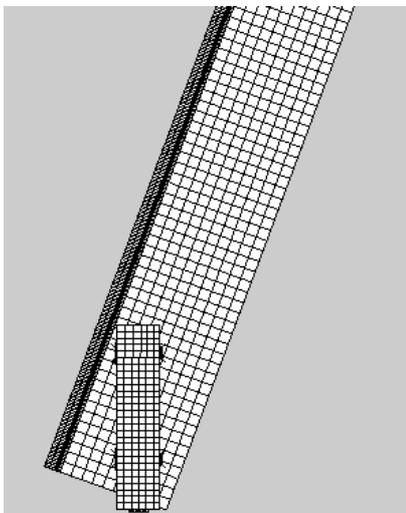
$t = 0.450s$

Figura VIII. 1 – Comportamento do veículo durante a simulação e o ensaio à escala real – barreira encastrada

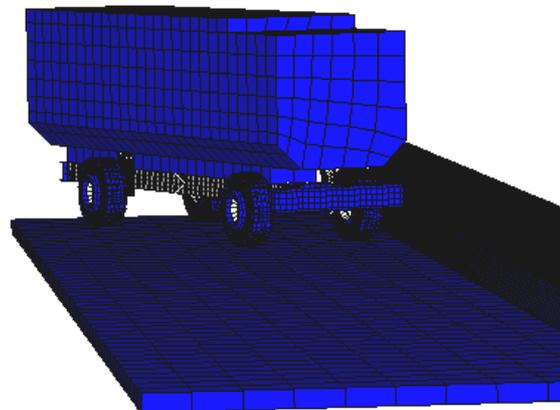
A trajetória do veículo modelo durante a colisão contra a barreira encastrada é repetida na Figura VIII. 2. agora com uma vista de cima e outra de frente.

Após sucessivas tentativas da simulação do contacto entre a roda traseira e a barreira, não foi possível chegar a um comportamento aceitável e próximo da realidade desta pequena parte do intervalo de colisão. Por esta razão decidiu-se aplicar uma força exterior capaz de equilibrar o veículo. Esta força só é aplicada na simulação do choque contra a barreira encastrada e limita-se a um intervalo muito curto e posterior à colisão da parte dianteira do veículo.

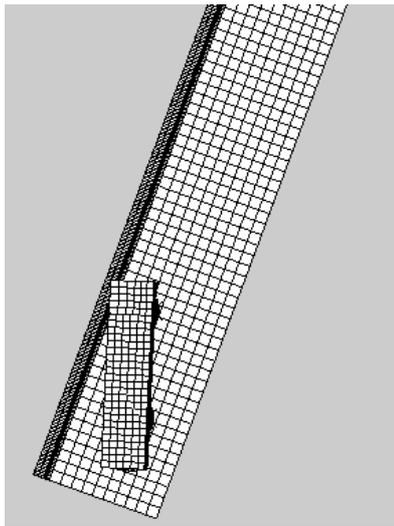
Vista de cima



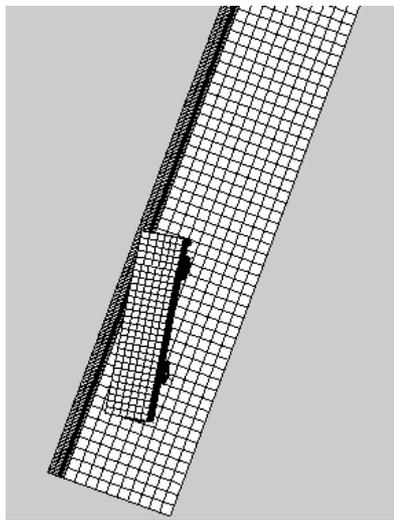
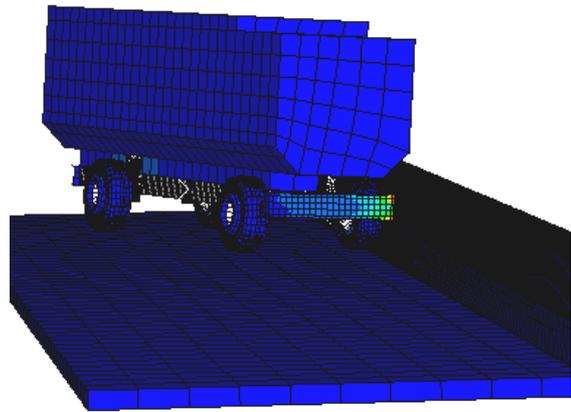
Vista de frente



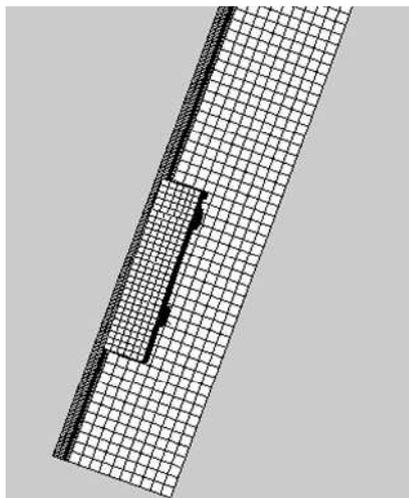
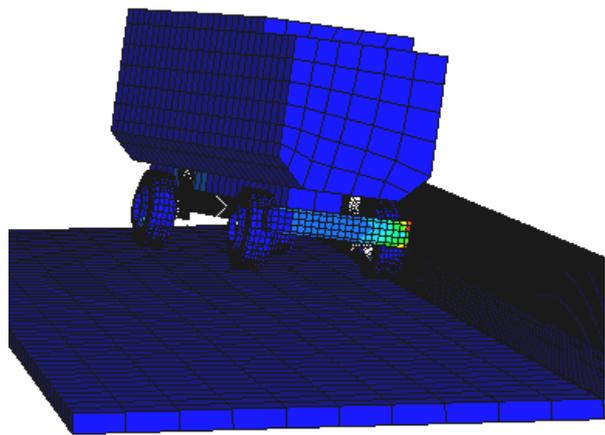
$t = 0.000s$



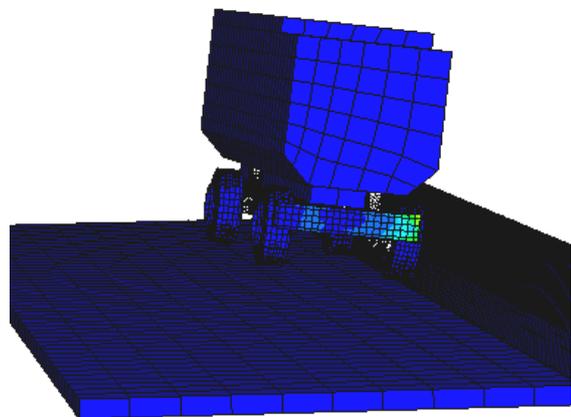
$t = 0.103s$



$t = 0.206s$



$t = 0.309s$



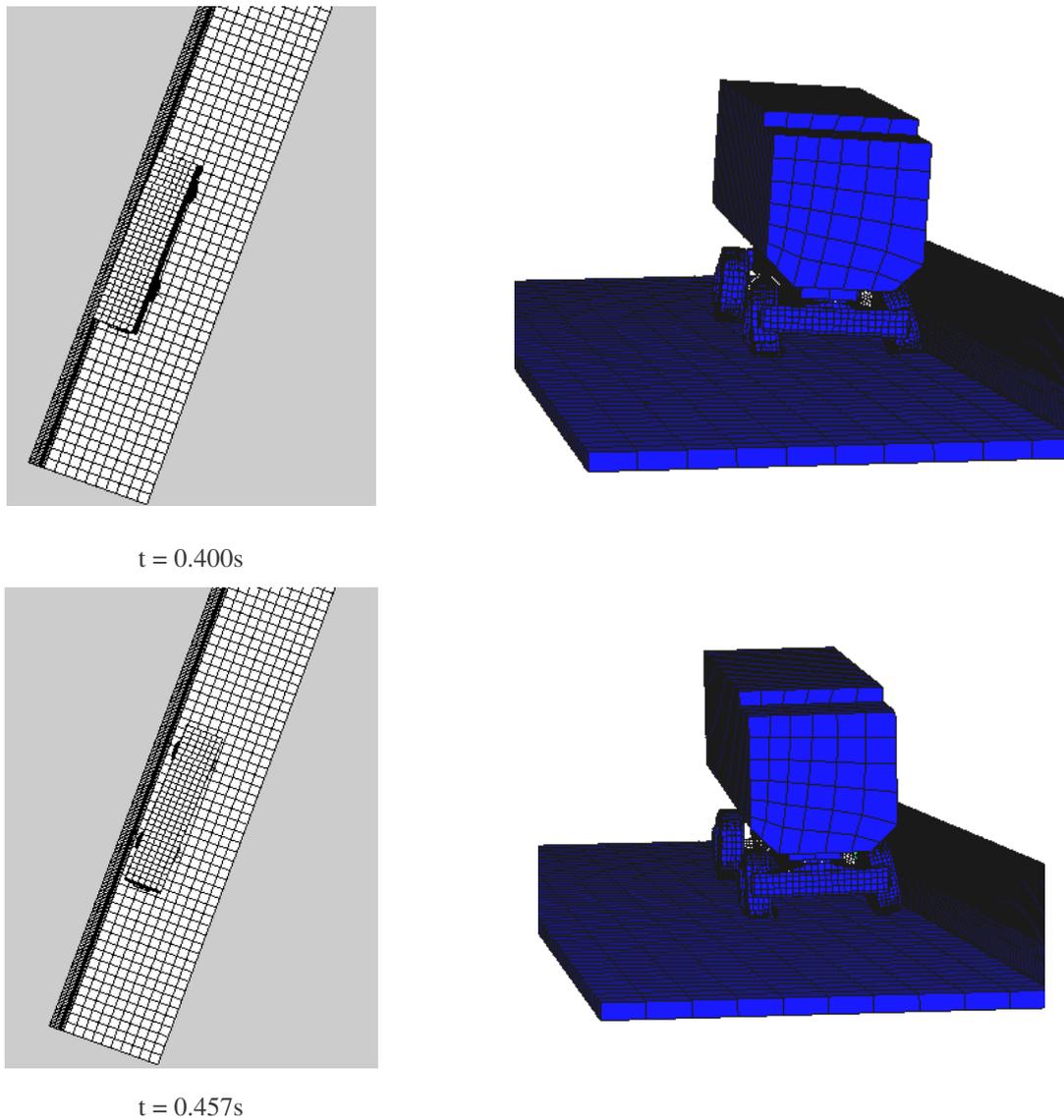


Figura VIII. 2 – Comportamento do veículo durante a simulação – barreira encastrada

Na Figura VIII. 3 é mostrado o campo de tensões geradas no pára-choques durante a colisão. Este elemento é determinante durante a primeira parte da colisão absorvendo uma parte significativa da energia cinética. No caso particular da barreira encastrada este aspecto toma uma magnitude ainda maior do que no sistema de barreira articulada (proposto).

Quando se iniciou este estudo foram realizadas simulações usando um pára-choques modelado com materiais de comportamento elástico-linear, procedimento que se abandonou uma vez que a energia absorvida durante o impacto era restituída após a separação, afastando o veículo da barreira de uma forma brusca.

Outro dispositivo bastante marcante na colisão de veículos é o binómio suspensão/pneu. Também neste capítulo foi necessário introduzir algumas modificações face aos modelos iniciais caracterizados por veículos com eixos rígidos e pneus maciços modelados com

materiais elástico-lineares. A Figura VIII. 4 mostra o funcionamento da suspensão e a deformação do pneu.

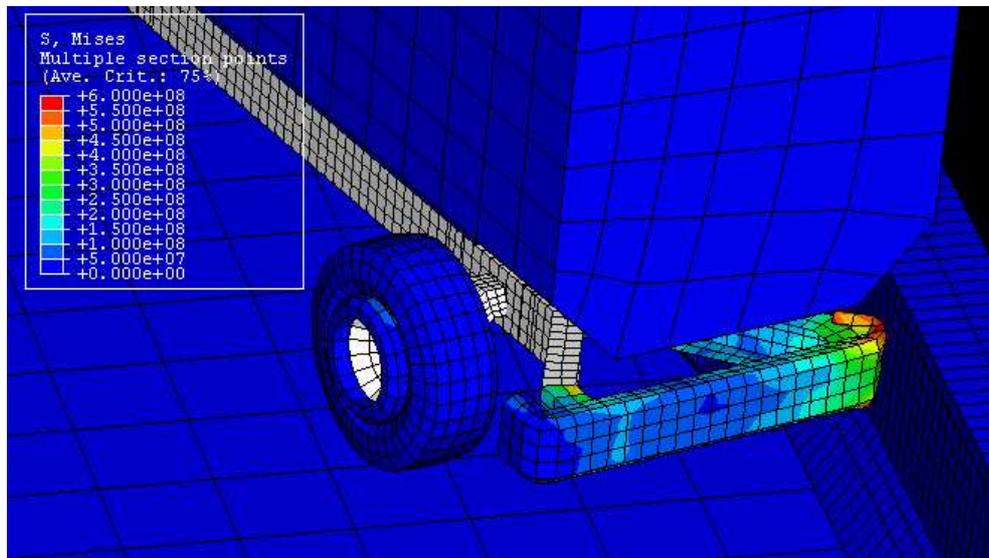


Figura VIII. 3 – Tensões instaladas no pára-choques na zona contacto com a barreira ($t=0.091s$)

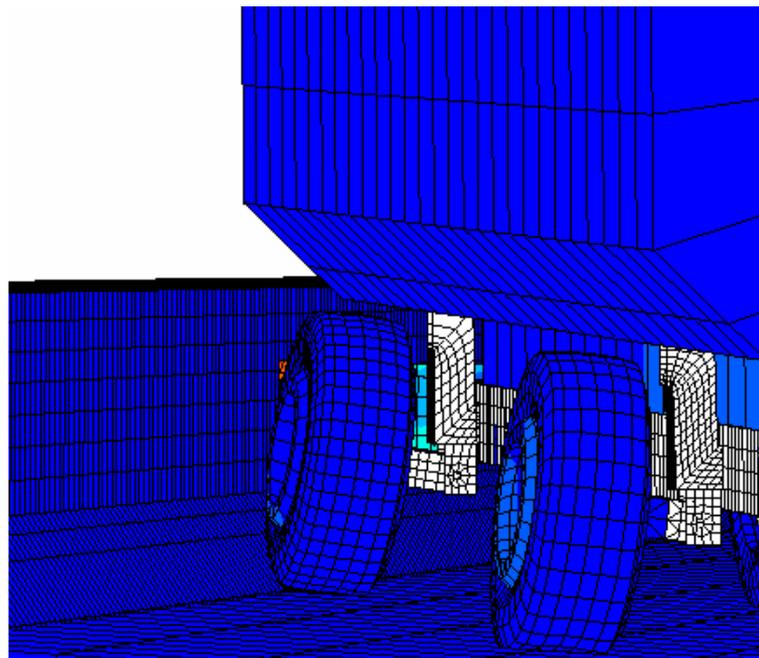
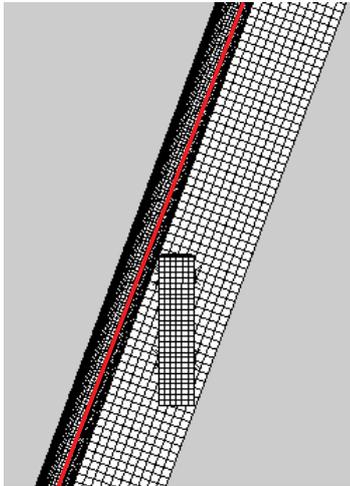


Figura VIII. 4 - Aspecto geral do funcionamento da suspensão e da deformação do pneu

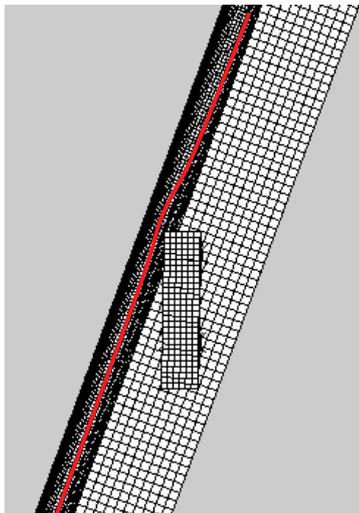
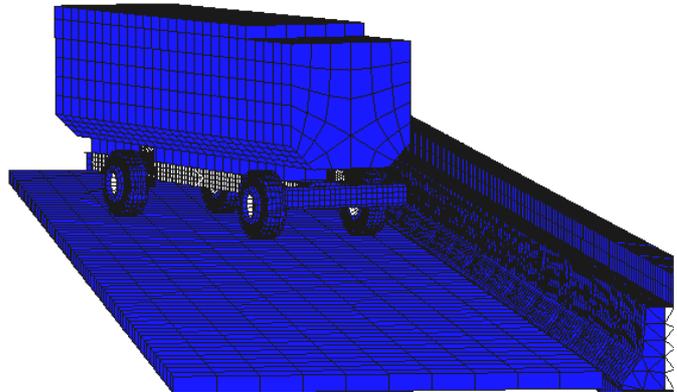
No caso do estudo do comportamento da barreira proposta utilizou-se o mesmo modelo de veículo. Na Figura VIII. 5 é possível observar o seu comportamento durante a colisão com este tipo de barreira.

Vista de cima

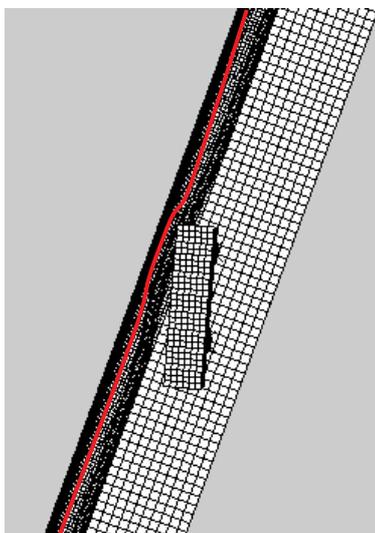
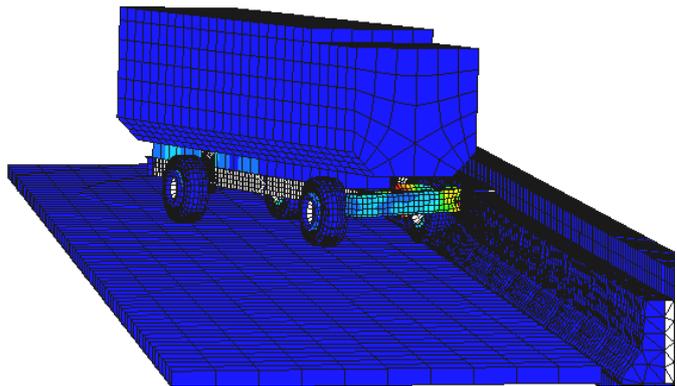


$t = 0.000s$

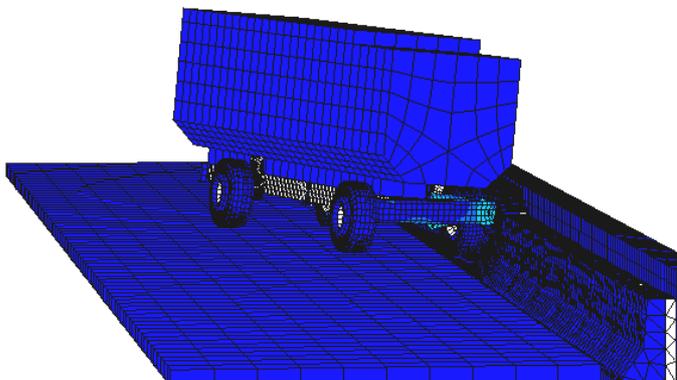
Vista de frente

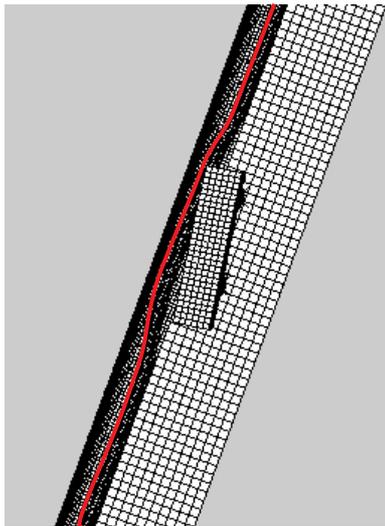


$t = 0.103s$

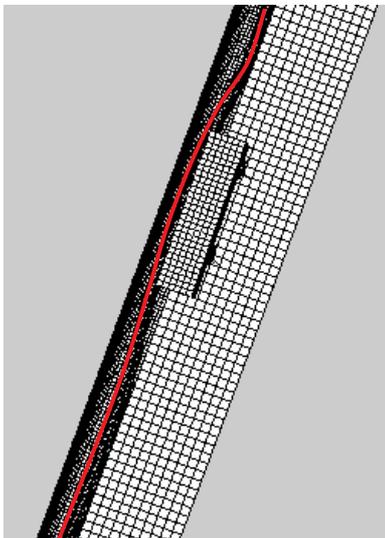
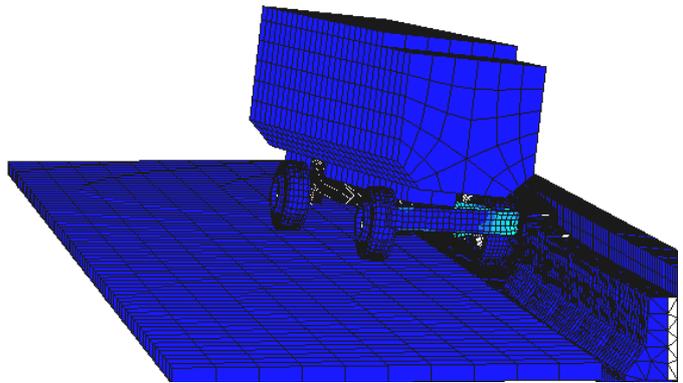


$t = 0.206s$

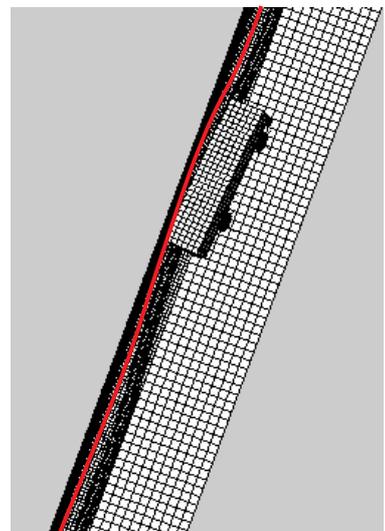
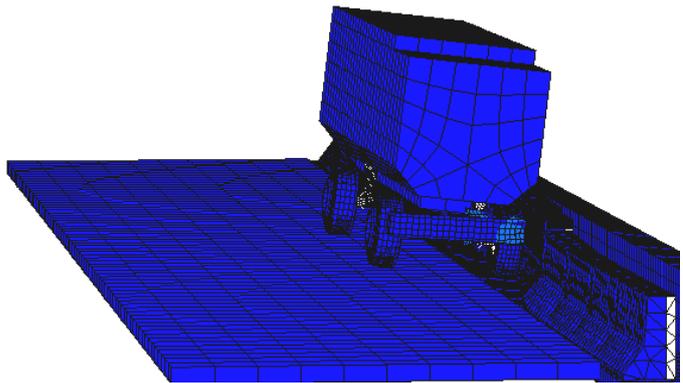




$t = 0.309s$



$t = 0.400s$



$t = 0.507s$

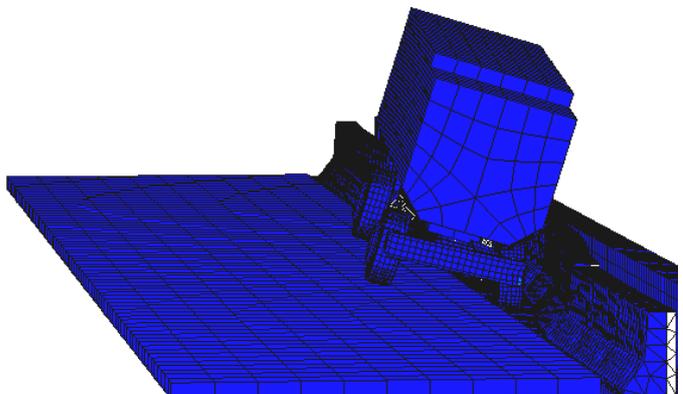


Figura VIII. 5 - Comportamento do veículo durante a simulação – barreira proposta

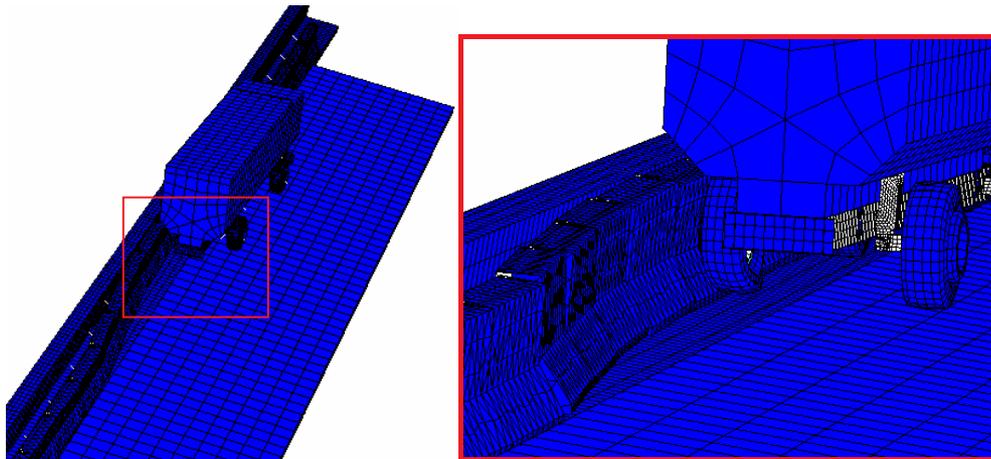


Figura VIII. 6 – Aspecto geral da deformação da barreira

O comportamento do veículo durante a colisão contra a barreira proposta vai implicar um maior tempo de contacto com a barreira e um ângulo de saída menor. Esta situação favorece a permanência do veículo próximo da barreira, reduzindo o risco de invasão das vias adjacentes.

Refira-se ainda que, o veículo embate contra a barreira com o pára-choques no instante 0.05s, que o movimento conjunto veículo-barreira até ao embate com a barreira oposta demora 0.22s e que a roda traseira embate contra a barreira no instante 0.57s. Este choque roda-barreira encastrada ocorre no instante 0.30s. Devido a este facto o movimento de guinada é menos brusco na colisão contra a barreira proposta.

Através da Figura VIII.7 é possível observar a deformação da barreira proposta, constatando-se que, durante a colisão mobilizaram-se 12 blocos e que 5 dos quais ficaram encostados à barreira oposta.

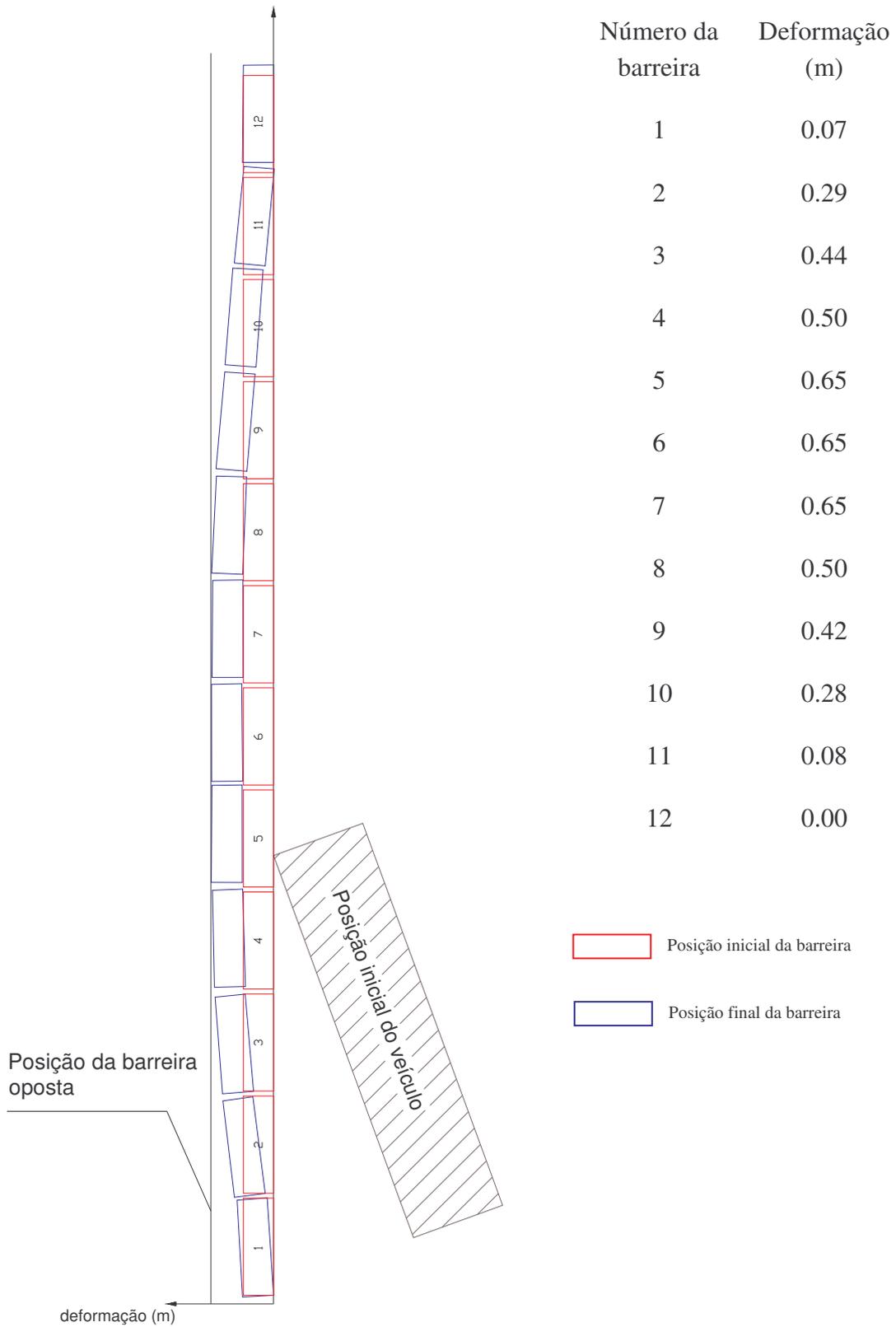


Figura VIII. 7 – Deformação da barreira proposta

2.2 – Velocidades

As velocidades segundo os eixos 1 (normal à barreira) e 3 (paralelo à barreira) assumem uma importância elevada, visto estarem relacionadas com a energia cinética e as desacelerações sofridas pelos veículos.

Os Gráficos VIII.1 e VIII.2 mostram a variação da velocidade no tempo para as duas simulações (barreira encastrada e proposta), sendo as componentes normal e longitudinal referenciadas com os índices que o esquema abaixo evidencia.

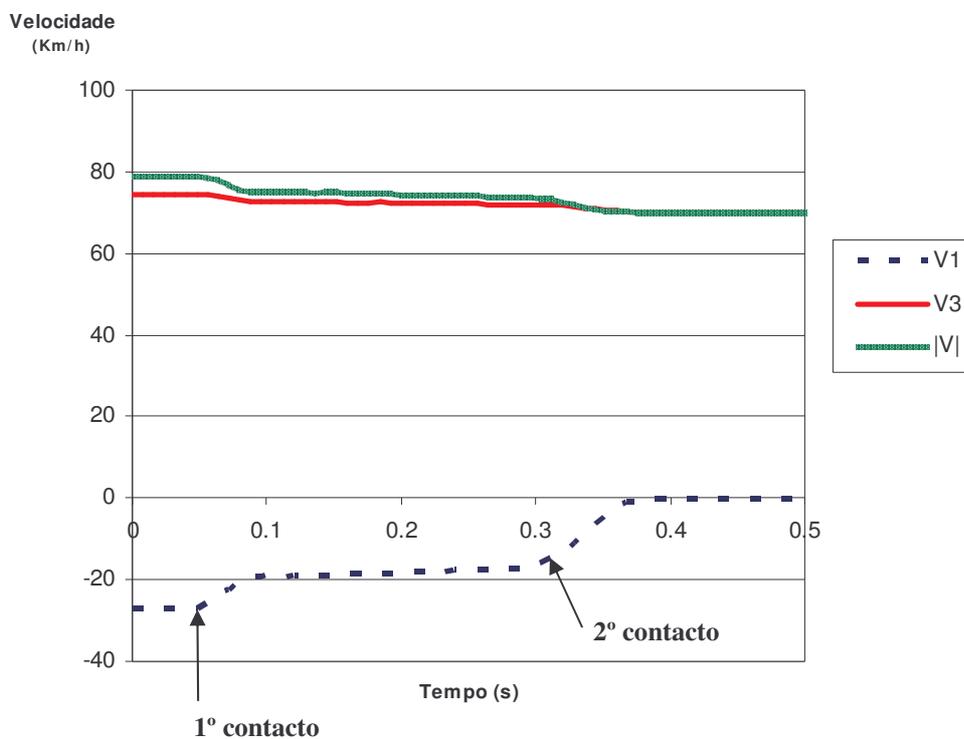
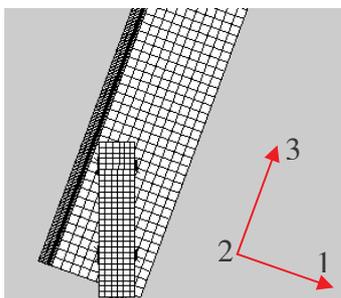


Gráfico VIII. 1 - Velocidade do veículo – barreira encastrada

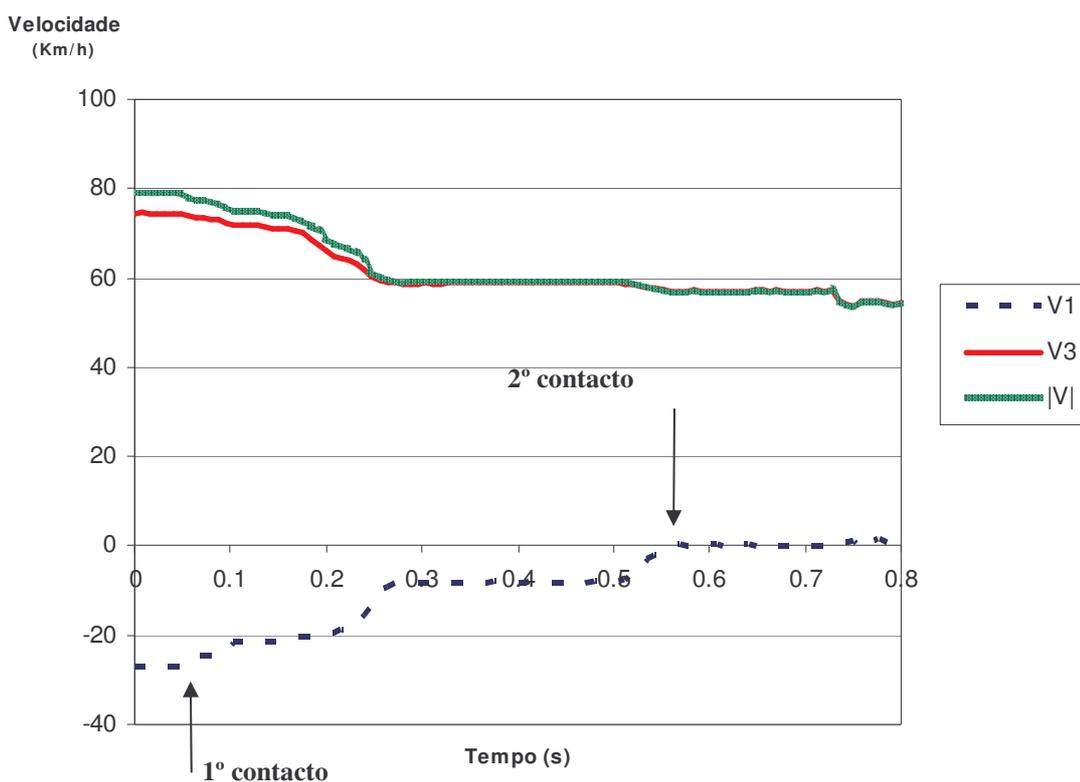


Gráfico VIII. 2 - Velocidade do veículo – sistema proposto

Conforme genericamente se descreve no ponto VI.1 o processo de colisão de um veículo com um sistema de segurança desenvolve-se em duas fases, notando-se contudo, que as mesmas não estão rigidamente definidas, i.e., o processo de translação/deformação (fase 2) da barreira não ocorre só após o rotação do veículo (fase 1), mas sim durante.

No caso da barreira encastrada a translação da barreira não existe (só a rotura da própria barreira poderia ser equacionada), verificando-se que o veículo anula a sua componente da velocidade normal à barreira mais rápido [0.05 - 0.37]s do que um veículo embatendo contra um sistema de barreira proposto [0.05 – 0.58]s.

Em termos absolutos a velocidade final do veículo após deixar a barreira é de 57 Km/h no sistema proposto e de 74 Km/h no sistema encastrado. A vantagem de ter uma velocidade final menor, prende-se com o facto de no caso de ocorrer uma segunda colisão com outros veículos (que circulem na mesma faixa), a gravidade da mesma ser inferior.

2.3 – Acelerações

Embora a questão da aceleração (desaceleração) não seja o factor relevante no estudo do comportamento dos veículos pesados, far-se-á uma análise da mesma.

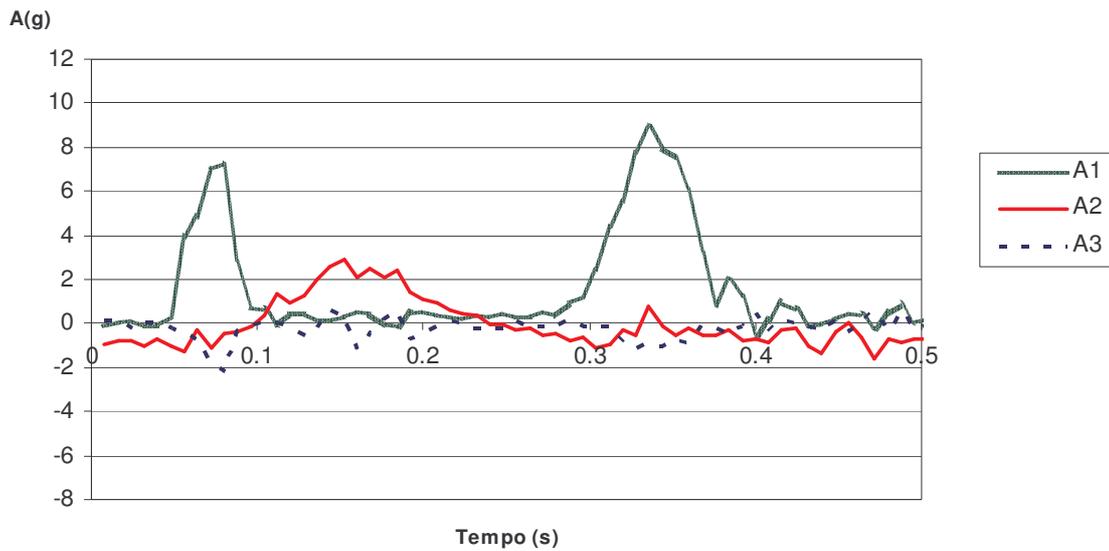


Gráfico VIII. 3 – Acelerações - sistema encastrado

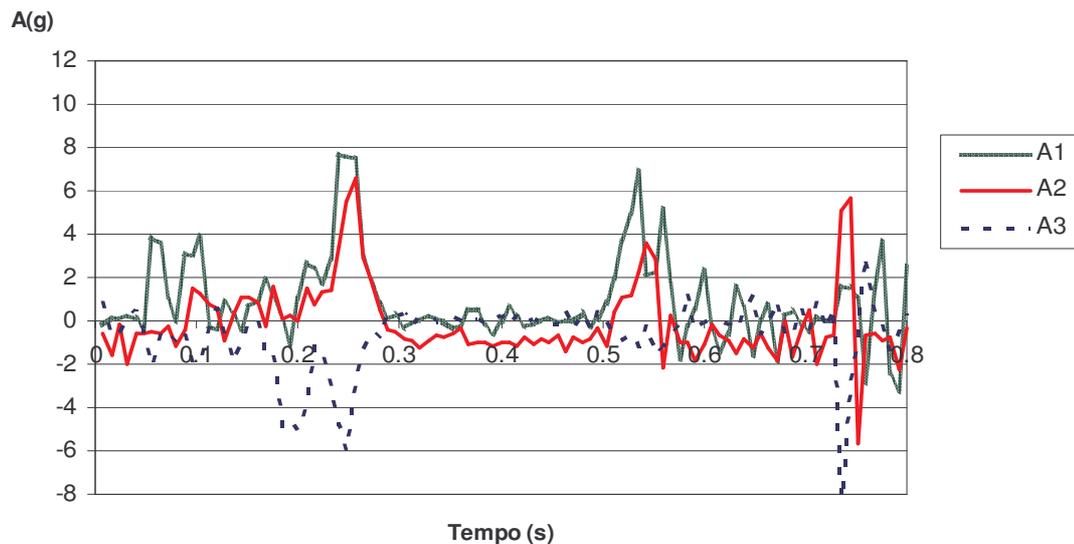


Gráfico VIII. 4 – Acelerações – sistema proposto

Em termos genéricos os valores máximos das acelerações obtidas não são muito diferentes entre os dois sistemas. Considerando apenas a componente normal à barreira, o valor máximo da aceleração atingido no caso da barreira proposta é de aproximadamente 8g enquanto que na barreira encastrada é de 9g.

Da observação dos gráficos é possível identificar o primeiro contacto com a barreira no instante 0,05s e verificar que as acelerações obtidas são cerca do dobro no sistema encastrado face ao proposto, caracterizando claramente a diferença de rigidez entre os sistemas.

No caso do sistema proposto é fácil identificar o momento quando a barreira embate contra a que se encontra do outro lado e se anula o espaço entre ambas – instante 0.27s. É neste instante que se obtém o valor máximo da aceleração no caso da barreira proposta e marca o fim da primeira fase de deformação segundo o Gráfico VI.1.

No sistema de barreira encastrada a aceleração máxima é obtida no instante de embate da roda traseira com a barreira.

2.4 – Energia Cinética

Durante as colisões de veículos contra barreiras o fenómeno da transferência/dissipação de energia entre o veículo e as barreiras é de importância capital. Por esta razão analisar-se-á a evolução da energia cinética para as duas simulações.

Para um ensaio TB61, considerando os sumariados em VI.3.2, a energia cinética inicial do veículo é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} \cdot 16000 \cdot \left[80 \times \frac{1000}{3600} \right]^2 = 3950.6 \text{ KJ}$$

ou, na direcção normal:

$$E_{cNormal} = \frac{1}{2} m(V \times \text{sen}(20))^2 = \frac{1}{2} \cdot 16000 \cdot \left[27.4 \times \frac{1000}{3600} \right]^2 = 462.1 \text{ KJ}$$

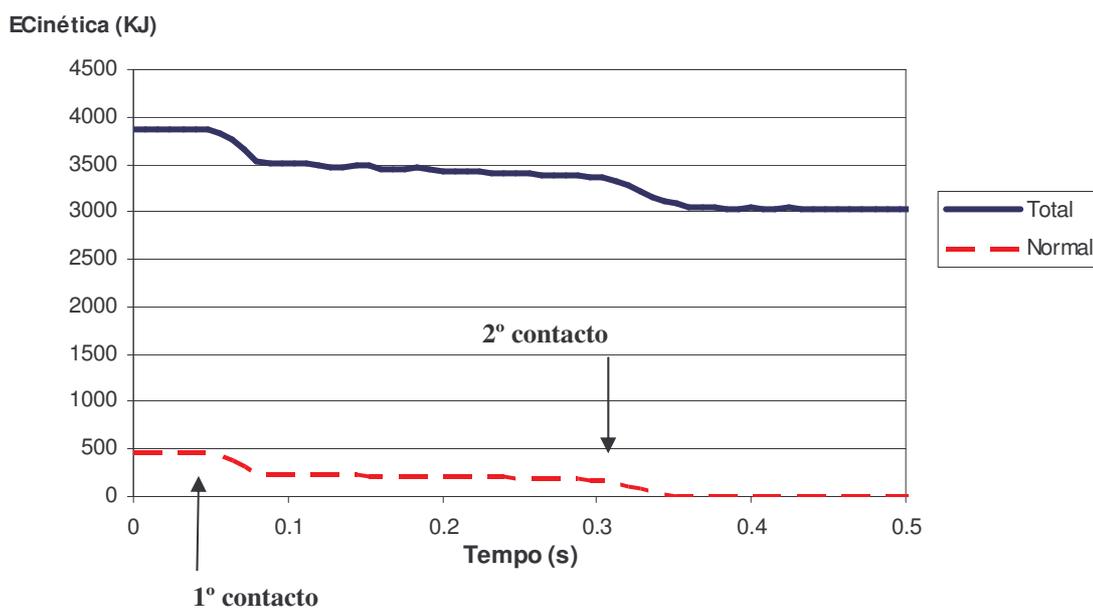


Gráfico VIII. 5 – Energia cinética do veículo – barreira encastrada

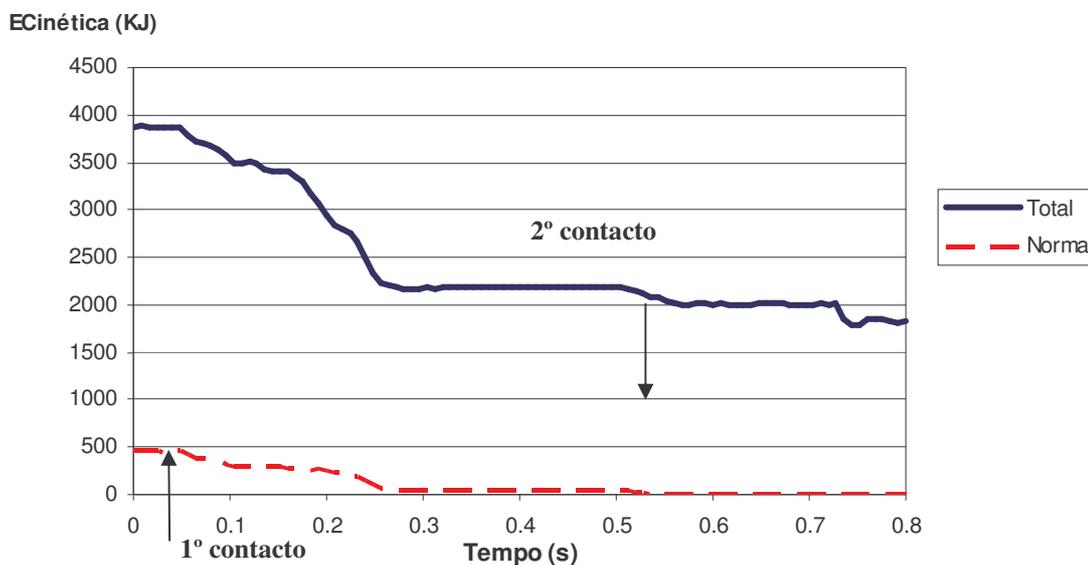


Gráfico VIII. 6 – Energia cinética do veículo – sistema proposto

Da análise dos gráficos da energia cinética é possível observar que, a variação de energia na direcção normal à barreira, entre os instantes 0.0s e 0.2s, é mais acentuada na barreira encastrada, devido à sua maior rigidez.

Em termos globais a variação da energia cinética é menor no sistema proposto, contribuindo bastante o menor valor da velocidade final no sentido paralelo à barreira, factor bastante importante que aliado a um ângulo de saída menor, reduz bastante a possibilidade de ocorrência de uma segunda colisão, como se referiu no ponto 2.2.

2.5 – Cabos

O Sistema de Barreira proposto possui dois cabos de aço que unem os blocos de barreira - Figura VIII. 8. A ligação entre os cabos e os blocos é conseguida através de uma peça - Figura VIII. 9, na qual o cabo é inserido e apertado com uma cunha metálica Figura VIII. 10.

Portanto, quanto mais tensionado estiver o cabo maior será a aderência entre o mesmo e a cunha. Deste modo os blocos serão progressivamente “colados” ao cabo e deslocados, no máximo, até chocarem com a barreira oposta.

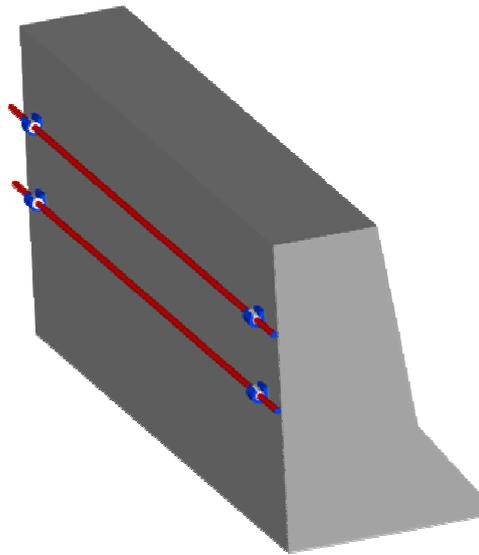


Figura VIII. 8 - Vista geral do bloco com os 2 cabos

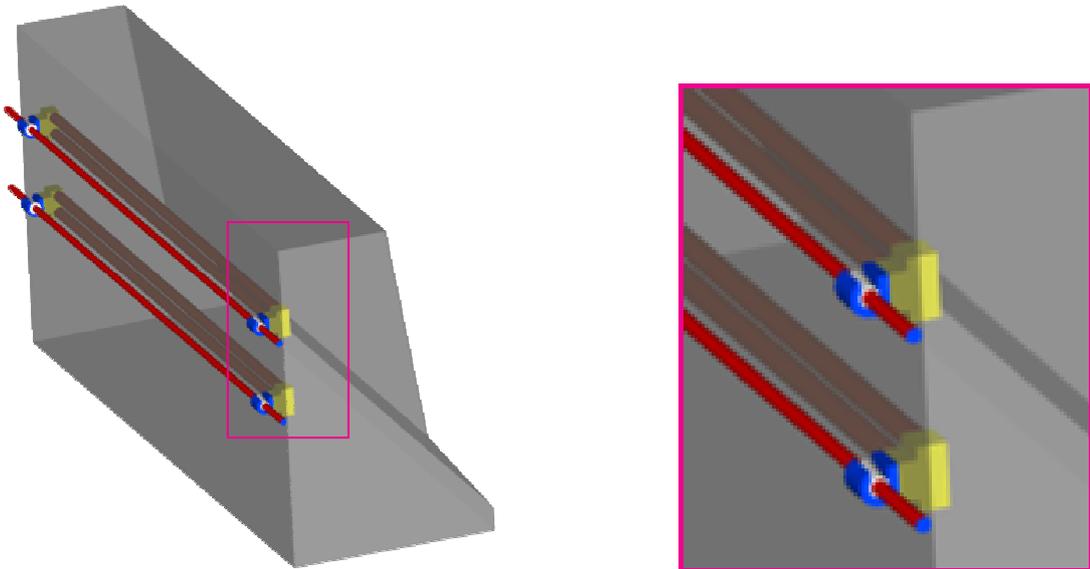


Figura VIII. 9 - Pormenor dos varões de aço interiores e das peças de ligação

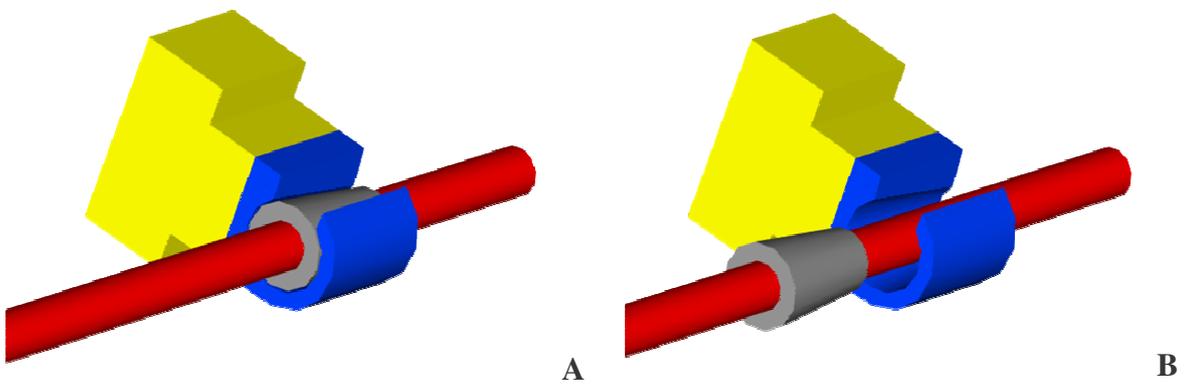


Figura VIII. 10 - Pormenor da cunha apertada (A) e solta (B)

Através do programa ABAQUS definiu-se que, dos conectores 28, 29, 30, 31 e 34 (numeração no programa) – Figura VIII. 11 seriam obtidos os valores da força axial instalada durante a simulação. Só se escolheram estes conectores, visto serem os mais solicitados. Os conectores do tipo AXIAL foram os usados para simular o cabo (ver Capítulo VII)

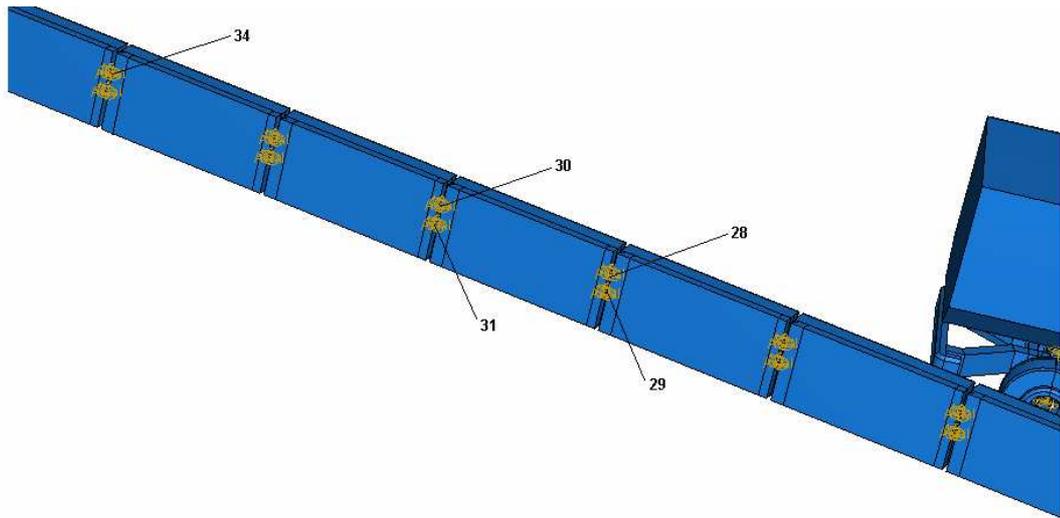


Figura VIII. 11 – Numeração dos conectores

Os resultados obtidos foram os expressos no Gráfico VIII. 7.

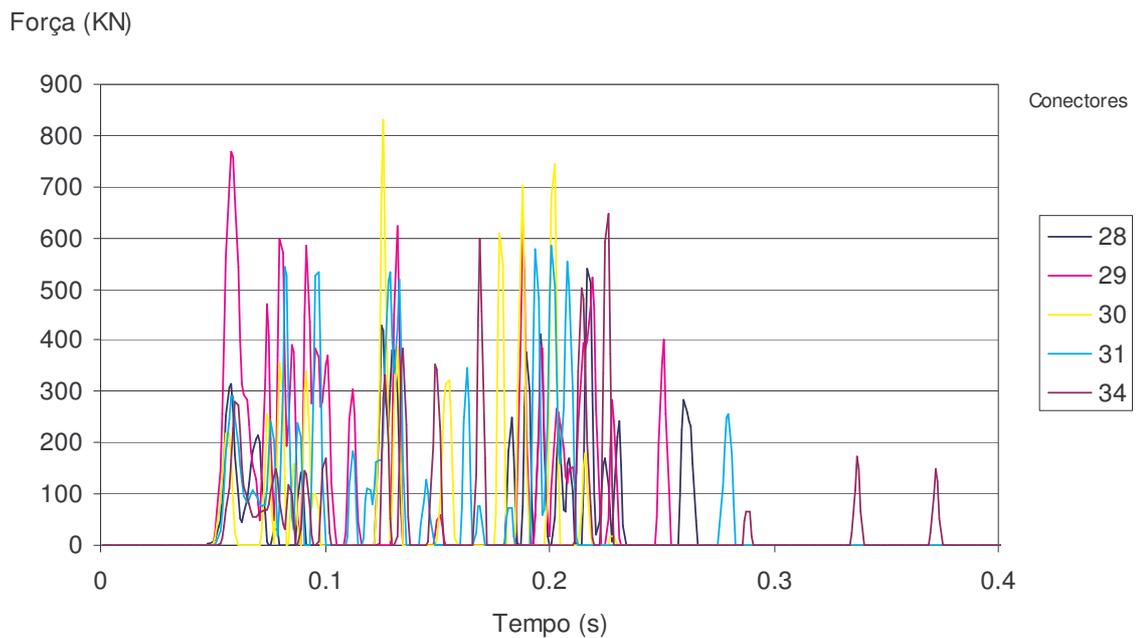


Gráfico VIII. 7 - Força nos conectores (cabo)

A força máxima atingida foi obtida no conector 30 com um valor de aproximadamente 800 KN.

Para este valor de 800 KN escolheu-se um cabo do tipo B 6×37 (37mm) com uma tensão de rotura de 1570 MPa [17].

2.6 – Elemento de ligação do cabo à barreira

Para o dimensionamento da peça de ligação do cabo à barreira, admitiu-se como força máxima verificada nos cabos o valor de 800 KN.

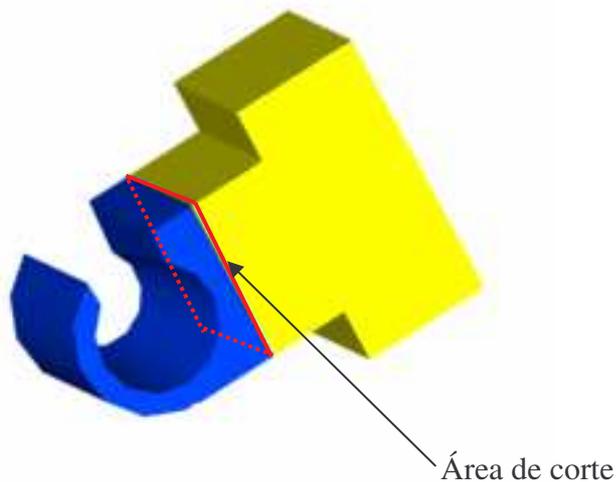


Figura VIII. 12.- Definição da área de corte

Dimensionamento

Características do material:

Designação: Aço Fe510 – classificação REAE

E=200 GPa

$f_{yd}=275$ Mpa

$\frac{F_{cabo}}{A_{corte}} \leq \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$, para um valor de $F_{cabo}=800$ KN, obtém-se uma área de corte de 7×7 cm².

Naturalmente que esta peça necessitaria de outro cuidado no seu dimensionamento, nomeadamente ao nível da gola de encaixe da cunha. Não é, no entanto, objecto deste trabalho o estudo pormenorizado do sistema, apenas se pretendendo testar a sua viabilidade em termos de engenharia.

2.7 – Reforço estrutural entre elementos de ligação

A ligação entre elementos far-se-á com recurso a varão nervurado embebido na barreira - Figura VIII. 13. Estes elementos permitem que no bloco de barreira não se instalem tensões elevadas que levariam à fissuração do betão. Funcionam assim como imanes de esforços.

Dimensionamento

Características do material:

Designação: A500

E=200 GPa

$f_{syk}=500$ Mpa

$\frac{F_{cabo}}{A_{varão}} \leq \frac{f_{syk}}{1.15}$, para um valor de $F_{cabo}=800$ KN, obtém-se uma área de varão de 18.4 cm².

Admitindo que parte dos esforços serão absorvidos pelo betão, apenas se reforçariam os blocos com 2 varões de Ø32mm (16.1 cm²).

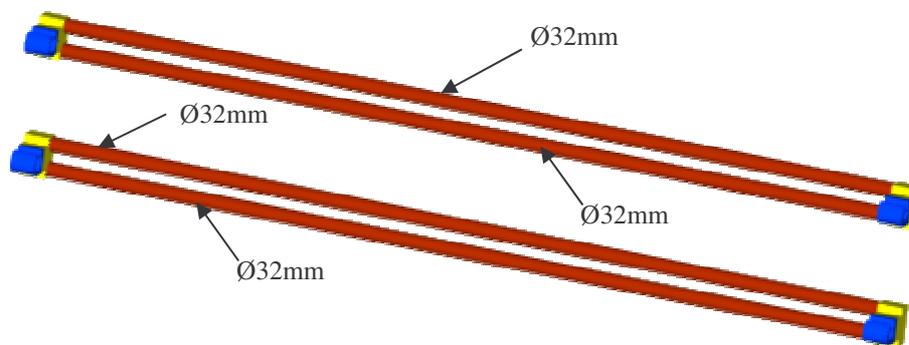


Figura VIII. 13 - Varões de ligação entre elementos de fixação dos cabos

Em relação à verificação estrutural dever-se-ia fazer uma verificação, quanto à capacidade do pavimento face à sollicitação dos blocos ao nível da base. Esta verificação é bastante

importante uma vez que o sistema de barreira proposto deposita grande parte do seu desempenho (em especial para os pesados) o travamento ao nível da base.

3 – Efeito sobre os veículos ligeiros

O efeito sobre os ligeiros, nomeadamente as desacelerações sofridas pelos ocupantes, é um dos parâmetros a ter em conta no dimensionamento de sistemas de segurança rodoviária.

Para verificar o nível de amortecimento produzido por um sistema de segurança deste tipo face ao sistema convencional, realizaram-se duas simulações recorrendo a um veículo com 900 Kg de massa, animado com uma velocidade de 100Km/h e colidindo com a barreira segundo um ângulo de 20° - ensaio TB11 segundo a norma EN 1317.

As Figuras VIII.14 e VIII.15 mostram os modelos para as simulações das colisões entre o veículo ligeiro e os dois tipos de barreiras.

De salientar que na modelação do veículo ligeiro não se teve o mesmo tipo de cuidado dispensado ao veículo pesado, uma vez que apenas se pretendia ter uma ideia da diferença entre os sistemas.

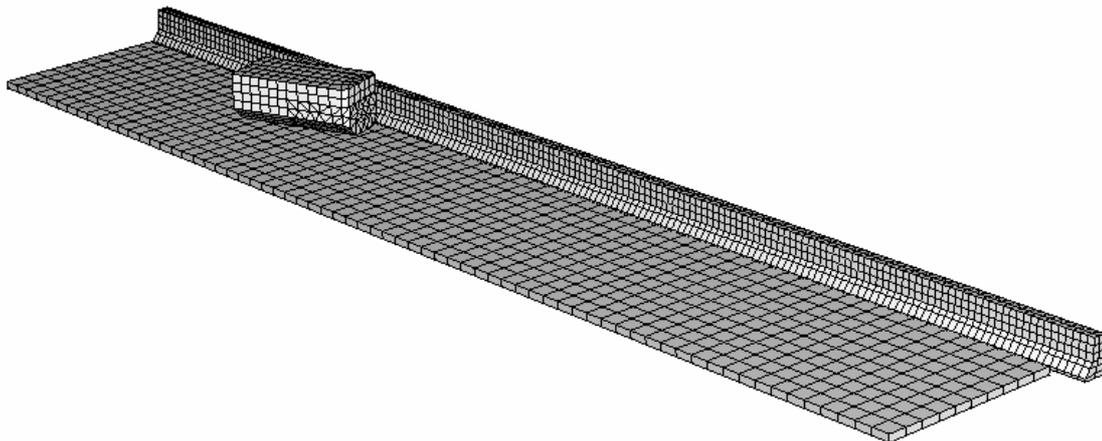


Figura VIII. 14 – Malha do modelo para a simulação da colisão contra a barreira encastrada

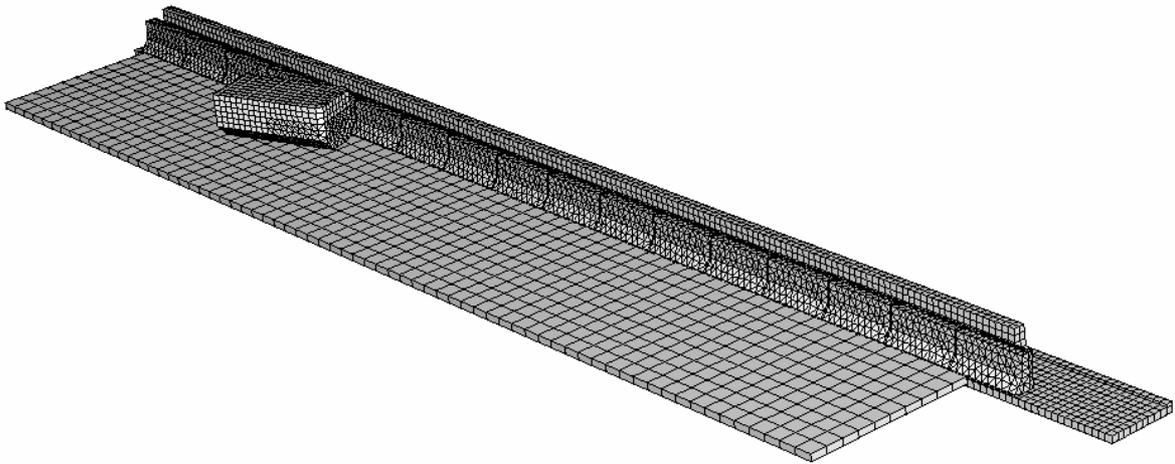


Figura VIII. 15 – Malha do modelo para a simulação da colisão contra a barreira proposta

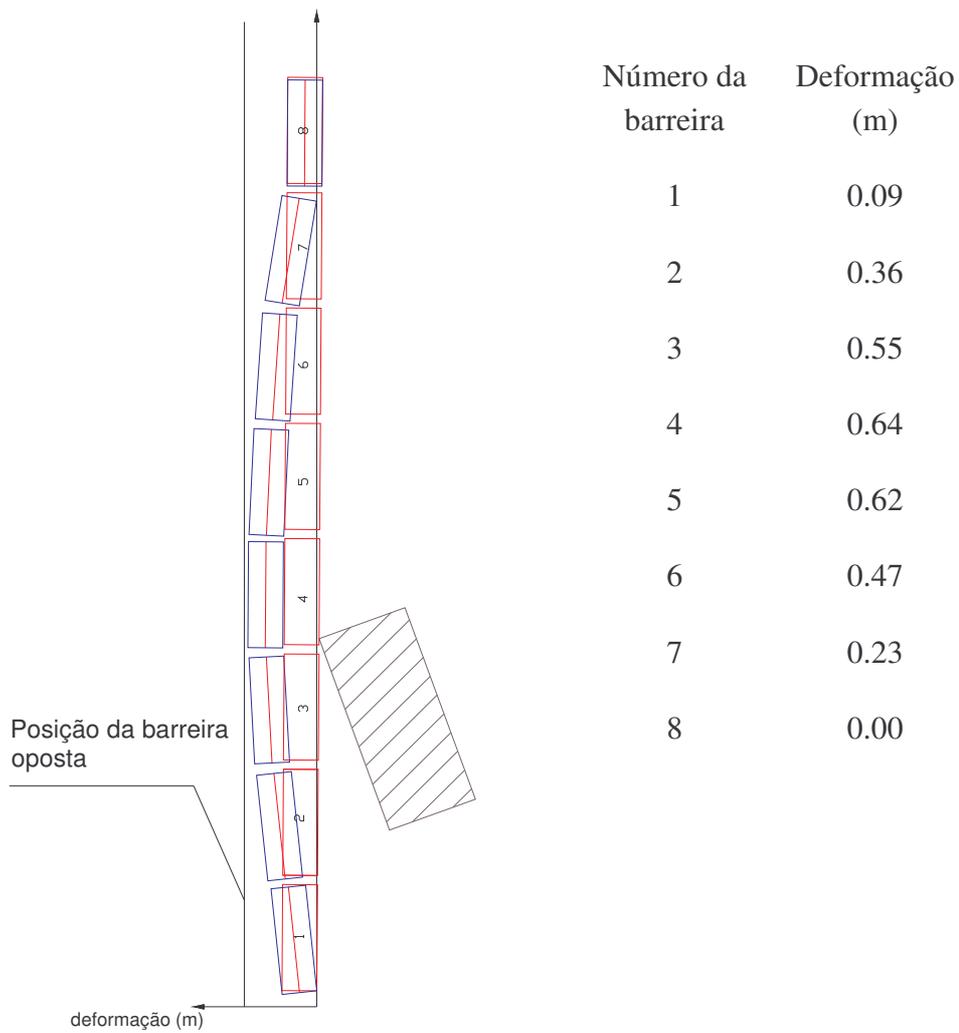


Figura VIII. 16 – Deformação da barreira proposta

3.1 – Energia Cinética

Para um ensaio TB11 a energia cinética inicial do sistema é dada por:

$$E_C = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \cdot 900 \cdot \left[100 \times \frac{1000}{3600} \right]^2 = 347.2 \text{ KJ (40.6 KJ – direcção normal)}$$

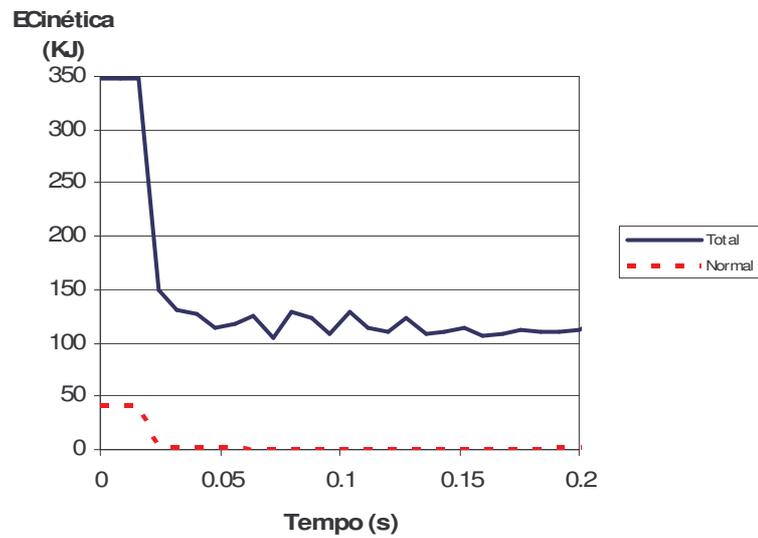


Gráfico VIII. 8 - Energia Cinética – barreira encastrada

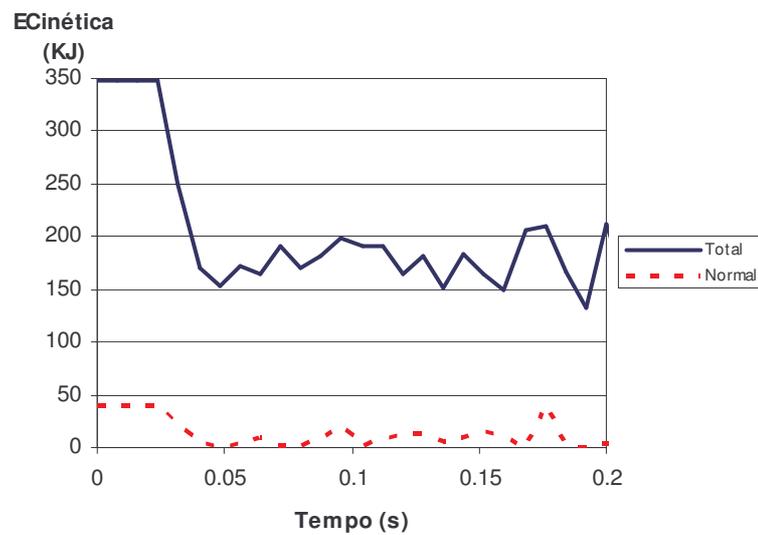


Gráfico VIII. 9 - Energia Cinética – barreira proposta

Pela observação dos gráficos facilmente se compreende que a variação de energia cinética total do veículo é maior no caso da barreira encastrada, o que origina acelerações maiores, aumentando desta forma a probabilidade de os ocupantes do veículo sofrerem lesões com maior gravidade. No caso da barreira proposta, a anulação da energia cinética na direcção normal à barreira é atingida no dobro do tempo face ao sistema encastrado.

3.2 – Acelerações

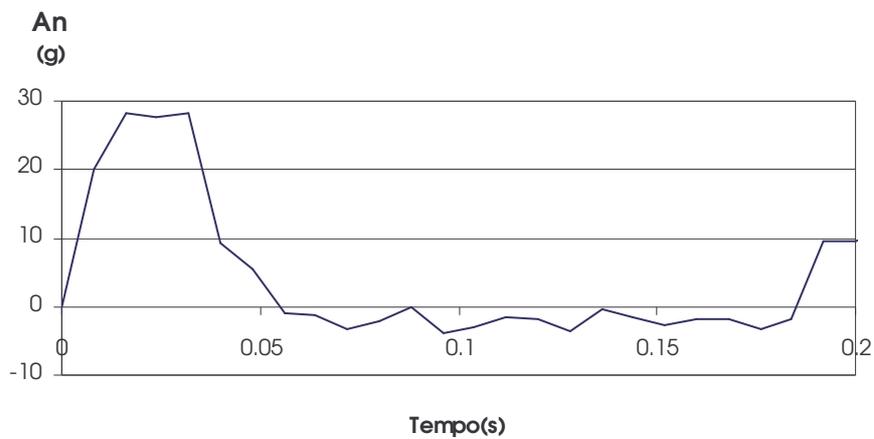


Gráfico VIII. 10 - Barreira encastrada

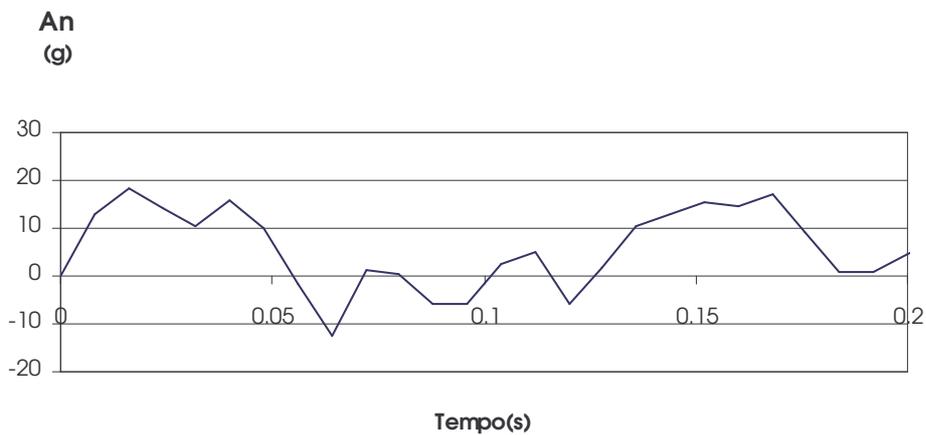


Gráfico VIII. 11 - Barreira proposta

Os Gráficos VIII.10 e VIII.11 mostram a diferença que existe durante a colisão de um veículo contra uma barreira encastrada e uma barreira proposta. Numa colisão contra uma barreira encastrada a desaceleração é bastante superior (29g) face à mesma colisão contra

um sistema de barreira articulado (19g). Para os ocupantes estas diferenças são bastante significativas e podem por vezes fazer a diferença entre a vida e a morte.

3.3 – Valor de ASI

No que diz respeito ao ASI os Gráficos VIII.12 e VIII.13 traduzem, considerando apenas a direcção normal à barreira, os valores obtidos das simulações.

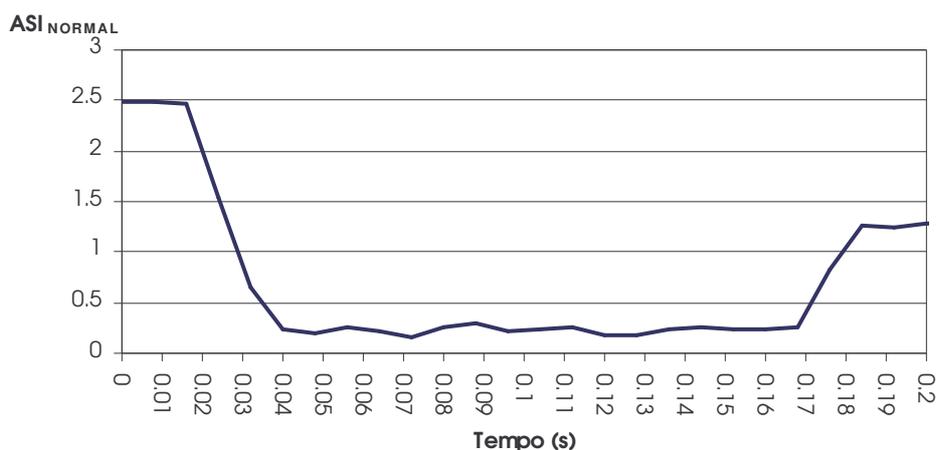


Gráfico VIII. 12 – Valores de ASI_{normal} – Barreira encastrada

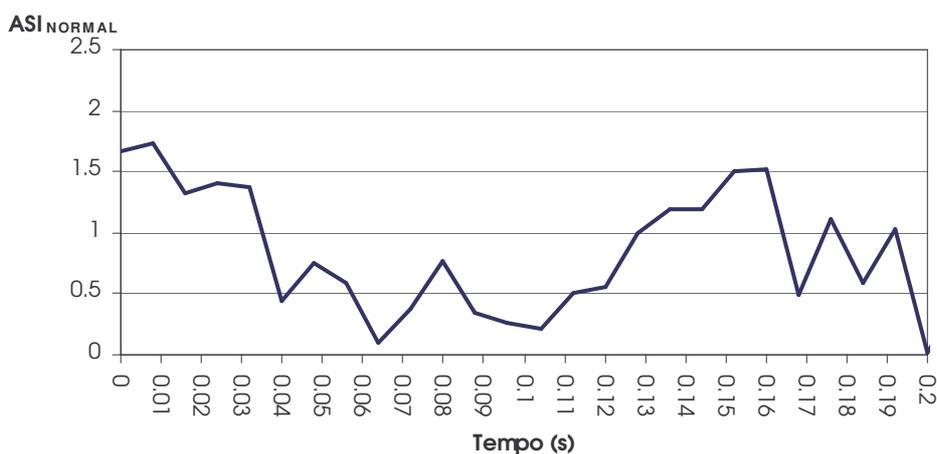


Gráfico VIII. 13 – Valores de ASI_{normal} – Barreira proposta

No caso da barreira encastrada o valor máximo do ASI é de 2.5, o que segundo [7], causaria a morte dos ocupantes do veículo. Por outro na colisão contra a barreira proposta o valor máximo obtido para o ASI é de 1.7, originando lesões moderadas nos ocupantes.

O valor de ASI obtido (1.7) não respeita o limite de 1.0 que se propôs no capítulo VI, essencial para o sistema ser classificado de H3 (nível A); contudo, ressalva-se o facto de o modelo utilizado para simular o veículo ligeiro ser bastante simplificado, (corpo homogéneo – material elástico-linear) o que não traduz verdadeiramente a realidade do impacto.

4 – Tempo de processamento

Neste tipo de simulações numéricas o tempo de processamento depende em grande medida do tamanho e número dos elementos, das características dos materiais, da formulação utilizada no contacto e da capacidade de processamento do computador. Na Tabela VIII. 1 é apresentado um resumo com os dados relativos ao processamento e tempo gasto. Esta dissertação teve uma afectação de tempo da ordem dos 70% para processamento.

Tabela VIII. 1 – Dados relativos ao tempo de processamento

	<i>Simulação</i>			
	Pesado/Barreira encastrada	Pesado/Barreira proposta	Ligeiro/Barreira encastrada	Ligeiro/Barreira proposta
Tipo de processador	Pentium 4 - 2.80 Ghz			
Números elementos do modelo	19811	39389	3536	22155
Tempo de incrementação inicial (s)	3.2×10^{-6}	3.3×10^{-6}	4.1×10^{-6}	7.8×10^{-6}
Tempo de incrementação mínimo (s)	1.6×10^{-6}	3.0×10^{-6}	3.8×10^{-6}	7.4×10^{-6}
Tempo de processamento (h)	13	40	1	5

Capítulo IX

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

1 - Conclusões

Depois da exposição detalhada do trabalho realizado, efectuada nos capítulos anteriores, em particular os dedicados às simulações numéricas, apresentam-se neste ponto as principais conclusões extraídas.

Face à importância que as barreiras de segurança assumem no panorama da segurança rodoviária, pode-se afirmar que, esta atitude de indiferença demonstrada pelas Autoridades portuguesas tenderá a mudar num futuro próximo, visto o problema das barreiras de segurança se estender para além das populares (baratas) barreiras metálicas em dupla onda.

Em termos normativos registam-se avanços significativos, nomeadamente por parte da Europa e U.S.A.; contudo, ainda há bastante trabalho a fazer no âmbito da classificação quantitativa e qualitativa da severidade das colisões. Foi apresentada neste trabalho uma metodologia que relaciona os índices de severidade com uma escala qualitativa, que servirá como base para desenvolvimentos futuros.

O sistema de barreira alternativo aos convencionais procura traduzir o conceito teórico da absorção de energia em duas fases, respeitando as exigências dos veículos ligeiros e as dos pesados. Demonstrou-se de uma maneira geral que o sistema funciona para as solicitações de um veículo pesado de 16ton, tendo-se efectuado algumas verificações nomeadamente ao nível das ligações e dos cabos. No que respeita aos veículos ligeiros apenas se verificou que existe um amortecimento da colisão quando comparado com o choque contra uma barreira encastrada, no entanto, não se quantificou o valor do ASI, indispensável para a classificação da barreira com H3 segundo a EN 1317.

Apesar das fortes limitações imposta à análise, em particular no que respeita aos meios informáticos, tentou-se provar que o modelo é viável e poderá servir como base a um sistema de barreira de segurança.

Este método de análise numérica das colisões não pretende substituir os ensaios de colisão; contudo, servirá para afinar os protótipos de barreiras antes de se ir para a pista, com vantagens económicas evidentes.

2 – Desenvolvimentos Futuros

Não se pretendeu com este trabalho desenvolver detalhadamente um sistema de barreira de modo a ser comercializado. Exploraram-se conceitos e ideias que, caso existam condições, poderão ser aprofundados.

Ao nível da modelação do veículo pesado a mesma carece de alguns detalhes, que poderão ser determinantes no comportamento do veículo, em particular, no que se refere à suspensão, o pára-choques e a própria rigidez do chassi. A utilização de veículos com massa superior permitiria verificar a capacidade estrutural e funcional para os níveis mais elevados, segundo a EN 1317.

A verificação cuidada a nível da severidade da colisão envolvendo um veículo ligeiro, exigiria uma modelação do veículo bastante mais cuidada.

No que concerne à massa dos blocos é sugerido que se experimentem outros tipo de betão com densidades diferentes. Quanto ao espaçamento entre as fiadas de blocos seria interessante realizar simulações com diferentes espaçamentos e também recorrendo ao enchimento da parte posterior com materiais não compactáveis, como é o caso do seixo rolado. Não esquecendo que, seja qual for a solução, terão de se procurar verificar as exigências dos ligeiros e pesados simultaneamente.

O próprio sistema de barreira proposto carece de alguns pormenores, como é o caso do preenchimento dos espaços de 5 cm entre os blocos, a verificação cuidada das ligações entre os elementos, a análise à rotura do betão da barreira, drenagem pluvial, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Anónimo, 2000. *Norma Europeia NP EN 1317-1, Sistemas de Segurança Rodoviária – Parte 1: Terminologia e critérios gerais para métodos de ensaio*, Instituto Português da Qualidade.
- [2] Anónimo, 1998. *European Standard EN 1317-2, Road Restraint Systems – Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers*, European Committee for Standardization.
- [3] <http://www.roadstothefuture.com>
- [4] <http://www.oecd.org>
- [5] Vilela, Paulo 2003. *A Sinistralidade Rodoviária – Dados Estatísticos – sua relação com as barreiras de segurança*, Seminário sobre Segurança Rodoviária - Porto, Betafiel, Portugal
- [6] Ross, H. E.; Zimmer, R. A.; Michie, J. D. 1993. *NCHRP Report 350: Recommend Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*, Transportation Research Board/National Research Council, National Academy Press, USA.
- [7] Shojaati, M. 2003. *Correlation between injury risk and impact severity index ASI*, 3rd Swiss Transport Research Conference, ETH Zurich, Suíça.
- [8] França, Adalberto 2003. *As Guardas de Segurança na fase de projecto das estradas – Regras, Disposições, Normas*, Seminário sobre Segurança Rodoviária - Porto, Betafiel, Portugal.
- [9] <http://www.iveco.com.br>
- [10] Gan, M.; Antonelli, V. *Tilting Bird, Design of a composite safety fence*, Centre of Lightweight Structures TUD-TNO, The Netherlands.
- [11] Westerberg, Christian 2002. *Finite element simulation of crash testing of self-piercing rivet joints, peel specimen*, Master's Dissertation, Lund University, Sweden.
- [12] ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.4, HTML Documentation
- [13] ABAQUS/CAE User's Manual, Version 6.4, HTML Documentation
- [14] ABAQUS Example Problem Manual, Version 6.4, HTML Documentation
- [15] Reid, J. D. 2000. *Designing for critical impact point on a new bullnose guardrail system*, International Journal of Crashworthiness, Vol.5 N°2, 141-152.
- [16] Waner, C.; Smith, G.; Jones, M.; Germane G. 1983. *Friction Application in Accident Reconstruction*, SAE Paper 830612.
- [17] Farinha, B.; Correia dos Reis, A. 1998. *Tabelas Técnicas*, Edições Técnicas E.P.L.

BIBLIOGRAFIA

Ambrósio, J. A. C. 2003. *Contact and impact models for vehicle crashworthiness simulation*, International Journal of Crashworthiness, Vol.8 N°1, 73-86.

Anónimo, 2004. *Road Restraint Systems, Terminology, method and criteria for computer simulation of road restraint systems*, Swedish National Road Administration (SNRA).

Jiang, T.; Grzebieta, R.H.; Zhao, X.L. 2004. *Predicting impact loads of a car crashing into a concrete road safety barrier*, International Journal of Crashworthiness, Vol.9 N°1, 45-63.

Johnston, G.; Perry, I. 2004. *Computerised simulation of car and 4WD impacts into alternative median barrier profiles using the DyMesh collision algorithm with the HVE simulation environment*, TRL, Limited.

Yonten, K.; Manzari, M.T.; Marzougui, D.; Eskandarian, A. 2005. *An assessment of constitutive models of concrete in crashworthiness simulation of roadside safety structures*, International Journal of Crashworthiness, Vol.10 N°1, 5-19

MacDonald, D. J., Kirk, A. R. 2001. *Precast concrete barrier crash testing*, Federal Highway Administration, USA.

Tabiei, Ala; Wu, J. 2000. *Validated crash simulation of the most common guardrail system in the USA*, International Journal of Crashworthiness, Vol.5 N°2, 153-168.

Uddin, W.; Hackett, R. M. 1999. *Tree-dimensional finite element modelling of vehicle crashes against road safety barriers*, International Journal of Crashworthiness, Vol.4 N°4, 407-417

Whitworth, H. A.; Bendidi, R.; Marzougui, D.; Reiss, R. 2003. *Finite element modelling of crash performance of roadside barriers*, International Journal of Crashworthiness, Vol.9 N°1, 35-43.

Wu, W.; Thomson, R. 2004. *Compatibility between passenger vehicles and road barriers during oblique collisions*, International Journal of Crashworthiness, Vol.9 N°3, 245-253.