



Ana Patrícia Cardoso Martins

Análise de Modelos Numéricos para a Simulação do Interior de uma Carruagem em Condições de Impacto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof.^a Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da
Silva Carvalho, Professora Auxiliar Convidada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade NOVA de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva
Arguente: Doutor João Filipe de Almeida Milho
Vogal: Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da Silva Carvalho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2016

Análise de Modelos Numéricos para a Simulação do Interior de uma Carruagem em Condições de Impacto

Copyright © Ana Patrícia Cardoso Martins, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Resumo

O presente trabalho consiste no estudo do interior de uma carruagem de comboio em situação de impacto, tendo como objectivo avaliar as lesões sofridas pelos passageiros em caso de acidente. O estudo será concretizado através da criação de um modelo numérico em elementos finitos do interior da carruagem que será analisado utilizando o *LS-DYNA*. Na construção do modelo é utilizada uma malha existente para a modelação das partes estruturais dos assentos e respectivas consolas de suporte, para os quais são definidos os modelos de materiais, propriedades das secções dos elementos, ligações e contactos entre partes e condições de fronteira do sistema. Os componentes do cenário são montados de forma a reproduzir um interior típico de carruagem de comboio, o *inline seating layout*. Nesse cenário é posicionado um modelo numérico em elementos finitos do ocupante com o objectivo de avaliar a resposta biomecânica do passageiro numa situação de colisão frontal de comboios.

As simulações realizadas são analisadas através da comparação dos índices de lesão obtidos em *LS-DYNA* com os valores medidos no ensaio experimental que se pretende reproduzir com o modelo computacional. Com o objectivo de validar o modelo numérico, são testadas alterações aos parâmetros definidos durante o processo de construção do cenário de forma a melhorar a correlação entre os resultados obtidos na simulação numérica e os valores medidos durante o ensaio experimental para os índices de lesão do ocupante.

Palavras-Chave: Segurança Passiva · Segurança Ferroviária · Elementos Finitos · Biomecânica do Impacto · *LS-DYNA*

Abstract

In the present work is analysed a railway vehicle interior layout during a crash accident, aiming to assess the injuries sustained by passengers in the event of a collision scenario. For this purpose, a finite element model for the coach interior is developed and implemented in the LS-DYNA code. An existing mesh is used to model the structural components of the seats and their cantilever beams, to which the material models, element section properties, constraints, contact between parts and boundary conditions are defined. The assembly components are configured in order to represent the inline seating layout, being a finite element model for the occupant positioned in order to evaluate the biomechanical response of the passenger during a train collision.

An evaluation of the simulations are made by comparing the results obtained in the LS-DYNA analysis with values measured during the experimental test that the numerical model is intended to reproduce. In order to validate the numerical model, changes to the input parameters are tested to improve the correlation between the results obtained in the numerical simulation and the values measured during the experimental test for occupant injury criteria.

Keywords: Passive Safety · Railway Safety · Finite Elements · Injury Biomechanics · *LS-DYNA*

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objectivos	1
1.2 Enquadramento Teórico	3
1.3 Organização do Trabalho	11
2 Regulamentação e Avaliação da Segurança Ferroviária	13
2.1 Legislação Europeia para os Estados-Membros da Comunidade	13
2.2 Evolução da Segurança na Rede Ferroviária Nacional	18
3 Biomecânica do Impacto	21
3.1 Dispositivos de Teste Antropomórficos - ATD	21
3.1.1 <i>Hybrid III</i>	22
3.1.2 Preparação e Posicionamento de ATD para Ensaios Dinâmicos	24
3.2 Índices de Lesão	25
3.2.1 Crânio e Cervical	25
3.2.2 Tórax	28
3.2.3 Membros Inferiores	29
3.3 Limites para os Índices de Lesão	29
4 Construção do Modelo Numérico	31
4.1 Descrição Geral do Cenário	31
4.2 Descrição dos Subconjuntos	32
4.2.1 Assento	34
4.2.2 Plataforma de Suporte	36
4.2.3 Modelo Numérico do Ocupante	36
4.3 Ligações	39
4.4 Definição de Contactos	40
4.5 Condições de Fronteira	43
4.6 Procedimento de Construção do Modelo Numérico	44

5	Análise e Validação de Resultados	47
5.1	Resultados de Referência	47
5.1.1	Ensaio Experimental	47
5.1.2	Modelo Numérico em MADYMO	49
5.2	Parâmetros Gerais da Análise	51
5.3	Análise Inicial e Alteração de Parâmetros	53
5.4	Resultados do Modelo Numérico em LS-DYNA	60
6	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	65
	Referências	67
	Anexos	69
A	Representações dos Subconjuntos	69
A.1	Partes dos Subconjuntos	69
A.2	Ligações entre Partes	71
A.3	Referenciais do Modelo de Ocupante	74
B	Índices de Lesão Experimentais e Numéricos	77
B.1	Simulação Numérica Inicial	77
B.2	Simulação Numérica com Alteração de Posição	82

Lista de Figuras

1.1	Emissões de gases com efeito de estufa na UE, por sector de transporte . . .	1
1.2	Cenário Experimental	3
1.3	Curva Força-Deslocamento com fases de absorção de energia	6
1.4	Simulação com modelo de ocupante do projecto TRAINCOL	7
1.5	Perfil de aceleração recomendado pelo projecto SAFETRAIN	8
1.6	Perfil de aceleração recomendado pelo projecto SAFEINTERIORS	9
1.7	Cenário SAFEINTERIORS do interior <i>inline seating layout</i>	10
1.8	Cenários de estudo do projecto SAFEINTERIORS	11
3.1	Modelos <i>Hybrid III</i>	23
3.2	Posição do ponto H	25
3.3	Relação entre o valor de HIC e a probabilidade de fractura	26
3.4	Movimentos básicos do pescoço	27
3.5	Cargas que actuam no pescoço	27
3.6	Compressão-extensão do pescoço	27
3.7	Limites para o índice de lesão da perna	30
4.1	Cenário do ensaio experimental	32
4.2	Cenário de Estudo	32
4.3	Medidas principais da disposição dos assentos	33
4.4	Sub-conjuntos do modelo	33
4.5	Medidas principais do subconjunto "assento"	34
4.6	Curva Tensão-Extensão do modelo de material *MAT_PIECEWISE_ELASTIC .	35
4.7	Medidas principais do subconjunto "plataforma de suporte"	36
4.8	Sistemas de coordenadas do ponto H do modelo de ocupante	38
4.9	Posição final do modelo de ocupante	39
4.10	Nós da plataforma utilizados no constrangimento	39
4.11	Perfil de aceleração	43
4.12	Diferentes posições da esfera nas análise de impacto com o assento	45
4.13	Etapas da construção do modelo numérico	46
5.1	Posições do modelo de ocupante durante a simulação em <i>MADYMO</i>	49
5.2	Quatro modos de energia zero para elementos de 8 nós com 1 ponto de integração	53
5.3	Posição da cabeça do modelo de ocupante no momento do impacto	54
5.4	Falha na ligação entre as partes 14 e 19 na simulação numérica inicial	54
5.5	Aceleração resultante e HIC obtidos nas análises iniciais	55
5.6	Posição final do modelo de ocupante	55

5.7	Primeira alteração à curva tensão-extensão do material *MAT_LOW_DENSITY_FOAM	57
5.8	Segunda alteração à curva tensão-extensão do material *MAT_LOW_DENSITY_FOAM	57
5.9	Resultado da alteração da formulação de <i>hourglass</i> na parte 50800010 . . .	59
5.10	Resultante da Aceleração	60
5.11	Posições do modelo de ocupante durante a simulação numérica e ensaio experimental	63
5.12	Posições do modelo de ocupante durante a simulação numérica com correcção de posição e ensaio experimental	64
A.1	Partes do subconjunto plataforma de suporte	69
A.2	Partes do subconjunto assento	70
A.3	Representação da ligação entre as partes 14 e 11	71
A.4	Representação da ligação entre as partes 15 e 14	71
A.5	Representação da ligação entre as partes 155 e 122	72
A.6	Representação da ligação entre as partes 155 e 120	72
A.7	Representação da ligação entre as partes 15 e 118	73
A.8	Representação da ligação entre as partes 13 e 119	73
A.9	Referenciais do modelo numérico de ocupante (vista de frente)	74
A.10	Referenciais do modelo numérico de ocupante (vista lateral)	75
B.1	Força de corte do pescoço	77
B.2	Força axial do pescoço	78
B.3	Momento flector do pescoço	78
B.4	Deslocamento do joelho direito	79
B.5	Deslocamento do joelho esquerdo	79
B.6	Força axial da tíbia direita (superior)	80
B.7	Força axial da tíbia esquerda (superior)	80
B.8	Força axial da tíbia direita (inferior)	81
B.9	Força axial da tíbia esquerda (inferior)	81
B.10	Resultante da aceleração com alteração de posição	82
B.11	Força de corte do pescoço com alteração de posição	82
B.12	Força axial do pescoço com alteração de posição	83
B.13	Momento flector do pescoço com alteração de posição	83
B.14	Deslocamento do joelho direito com alteração de posição	84
B.15	Deslocamento do joelho esquerdo com alteração de posição	84
B.16	Força axial da tíbia direita (superior) com alteração de posição	85
B.17	Força axial da tíbia esquerda (superior) com alteração de posição	85
B.18	Força axial da tíbia direita (inferior) com alteração de posição	86
B.19	Força axial da tíbia esquerda (inferior) com alteração de posição	86

Lista de Tabelas

2.1	Acidentes por categoria	19
2.2	Feridos graves por tipo de acidente	19
2.3	Mortos por tipo de acidente	20
2.4	N.º de feridos graves por categoria	20
2.5	N.º de mortos por categoria	20
3.1	Modelos de ATD por tipo aplicação	22
3.2	Instrumentos de medida da família de <i>dummies Hybrid III</i>	23
3.3	Dimensão e massa das partes da família de <i>dummies Hybrid III</i>	24
3.4	Valores críticos de intercepção	28
3.5	Limites para os índices de lesão	30
4.1	Sistemas de unidades coerentes	31
4.2	Características do material - partes 6921 e 6922	34
4.3	Composição das partes 6921 e 6922	34
4.4	Composição das partes do subconjunto "assento"	35
4.5	Características dos materiais do subconjunto "assento"	35
4.6	Composição das partes do subconjunto "plataforma de suporte"	36
4.7	Características dos materiais do subconjunto "plataforma de suporte"	36
4.8	Modelos de materiais do subconjunto "ocupante"	37
4.9	Composição do subconjunto "ocupante"	37
4.10	Coordenadas da posição do ponto H do modelo de ocupante	37
4.11	Ângulos de rotação para posicionamento do modelo de ocupante	38
4.12	Constantes para a definição das ligações	40
4.13	Contactos definidos entre partes	41
4.14	Factores de atrito utilizados na definição de contactos	43
5.1	Resultados do ensaio experimental	48
5.2	Desvios entre os resultados do ensaio E1 relativamente ao ensaio E2	49
5.3	Resultados da simulação numérica em <i>MADYMO</i>	50
5.4	Desvio relativo entre resultados do ensaio experimental e simulação numérica em <i>MADYMO</i>	50
5.5	Pontos das curvas tensão-extensão do material *MAT_LOW_DENSITY_FOAM	58
5.6	Resultados da simulação numérica em <i>LS-DYNA</i>	61
5.7	Alteração aos ângulos de rotação para posicionamento do modelo de ocupante	61
5.8	Resultados da simulação numérica em <i>LS-DYNA</i> com posição corrigida	62

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas

ATD	Dispositivo de Teste Antropomórfico
ATP	Protecção Automática dos Comboios
CIDAUT	<i>Fundación para la Investigación y Desarrollo en Automoción</i>
ERA	Agência Ferroviária Europeia
ETI	Especificações Técnicas de Interoperabilidade
FAC	<i>Femur Acceptability Criterion</i>
FRA	<i>Federal Railroad Administration</i>
HIC	<i>Head Injury Criterion</i>
ICS	Indicadores Comuns de Segurança
IMT	Instituto da Mobilidade e dos Transportes
LSTC	<i>Livermore Software Technology Corporation</i>
MCS	Métodos Comuns de Segurança
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
OCS	Objetivos Comuns de Segurança
ORE	<i>Organization of Research and Experiments</i>
PMR	Pessoas com Mobilidade Reduzida
PN	Passagem de Nível
RGS	<i>Railway Group Standard</i>
TCC	<i>Thoracic Compression Criterion</i>
TI	<i>Tibia Index</i>
UE	União Europeia
VC	<i>Viscous Criterion</i>

Símbolos

A_x	Aceleração na direcção x
A_y	Aceleração na direcção y
A_z	Aceleração na direcção z
C	Compressão instantânea
D	Deformação
E	Módulo de Young
E_T	Módulo tangente
F_x	Força na direcção x
F_y	Força na direcção y
F_z	Força na direcção z
F_{crit}	Força crítica para o cálculo do índice de lesão da tíbia
F_{int}	Força crítica para o cálculo do índice de lesão do pescoço
K	Módulo de compressibilidade geométrica
L_e	Comprimento característico do elemento
M_x	Momento flector na direcção x
M_y	Momento flector na direcção y
M_z	Momento flector na direcção z
M_{crit}	Momento flector crítico para o cálculo do índice de lesão da tíbia
M_{int}	Momento flector crítico para o cálculo do índice de lesão do pescoço
N_{ce}	Índice de Lesão do pescoço para o mecanismo de lesão compressão-extensão
N_{cf}	Índice de Lesão do pescoço para o mecanismo de lesão compressão-flexão
N_{te}	Índice de Lesão do pescoço para o mecanismo de lesão tracção-extensão
N_{tf}	Índice de Lesão do pescoço para o mecanismo de lesão tracção-flexão
V	Velocidade de deformação
Δt	Incremento de tempo
δ_x	Deslocamento na direcção x
μ	Coefficiente de atrito
ν	Coefficiente de Poisson
ω	Frequência natural
ρ	Densidade mássica
σ	Tensão
σ_c	Tensão de Cedência
ε	Extensão
b	Espessura inicial do tórax
c	Velocidade de propagação de onda
c_{shell}	Velocidade de propagação de onda em elementos <i>shell</i>
c_{solido}	Velocidade de propagação de onda em elementos sólidos

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Objectivos

Os transportes são uma das primeiras políticas comuns da actual União Europeia, essenciais para concretizar três das quatro liberdades fundamentais do mercado comum, estabelecido no Tratado de Roma em 1957: a livre circulação de pessoas, serviços e bens. O transporte ferroviário em particular, como o meio de transporte menos poluente entre os principais (mostrados na figura 1.1), tornou-se especialmente importante após a assinatura do Protocolo de Quioto em Dezembro de 1997 com o qual a União Europeia (UE) se comprometeu a reduzir as emissões de gás com efeitos de estufa, continuando a assumir a sua importância numa Europa que se quer cada vez mais independente das fontes de energia não renováveis, sobretudo do petróleo [1].

O esforço para reforçar o desenvolvimento do sistema ferroviário exige que seja criada legislação que não só promova a concorrência do sector mas também que garanta a segurança dos utilizadores da rede ferroviária. Para isso é necessário ter o profundo conhecimento de tudo o que envolve o fenómeno do acidente ferroviário.

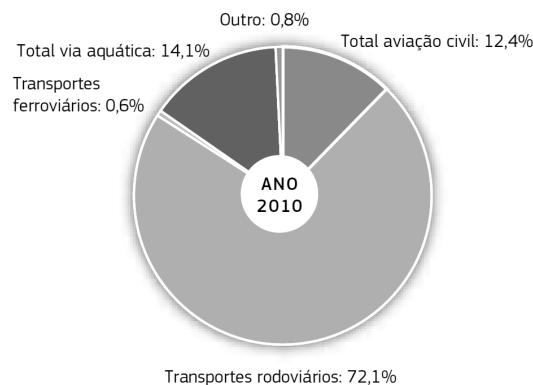


Figura 1.1: Emissões de gases com efeito de estufa na UE, por sector de transporte [1]

A segurança é, no geral, avaliada em duas perspectivas - a da segurança activa e a da segurança passiva - assim definidas [2]:

- "Segurança Activa: sistemas que reduzem a probabilidade de ocorrência de acidentes ou a sua gravidade;

- Segurança Passiva: sistemas que reduzem as consequências de um acidente, caso ocorra."

Os sistemas de segurança passiva não evitam a ocorrência de acidentes nem devem servir para compensar eventuais faltas nos sistemas de segurança activa, mas existem para reduzir as consequências na integridade física dos ocupantes quando todas as outras medidas tiverem falhado.

A segurança passiva pode ser abordada de três níveis diferentes. Em primeiro lugar, uma redução de lesões pode ser conseguida através da melhoria da resistência ao choque dos veículos. Isto inclui, em primeiro lugar o projecto de estruturas de absorção de energia. Em segundo lugar, o movimento dos ocupantes no caso de impacto pode ser controlado, por exemplo com sistemas de retenção, como o cinto de segurança que enfatizam este aspecto, mantendo o ocupante na área designada e conduzindo o movimento do ocupante com o do veículo. Em terceiro lugar, o impacto efectivo, ou seja, o contacto entre o corpo humano e seu ambiente, é dirigida por meio de absorção de energia e a distribuição da carga de impacto sobre uma área de contacto maior [3]. Porém, no caso do transporte ferroviário, não existem sistemas de retenção para controlar o movimento do ocupante na ocorrência de acidente, o que torna o projecto do interior das carruagens uma parte de grande importância no desenvolvimento de um comboio.

Num acidente ferroviário a colisão pode então ser dividida em duas fases - a colisão primária e a colisão secundária. Na primeira fase, a energia cinética inicial é progressivamente dissipada através da deformação plástica de partes estruturais da carruagem que resulta das forças de impacto geradas no momento da colisão. Nesta fase, os requisitos de projecto mais importantes envolvem a integridade estrutural do veículo por forma a manter o espaço de sobrevivência dos passageiros assim como a definição dos níveis aceitáveis para a desaceleração a que a carruagem irá estar sujeita. Na segunda fase, o ocupante, por não ter o seu movimento controlado por um sistema de retenção, vai ser projectado no sentido da velocidade inicial do comboio, ficando sujeito a uma variedade de contactos com os objectos e mobiliário interior do comboio que se designam de colisões secundárias. Para essa fase, importa que os regulamentos descrevam os requisitos relativos à disposição dos interiores das carruagens por forma a minimizar as lesões sofridas pelos passageiros no impacto com os elementos do interior.

No projecto de sistemas de segurança para veículos de qualquer tipo, é necessário conhecer a quantidade de aceleração ou força que o corpo ou qualquer parte do corpo pode suportar antes da ocorrência de uma lesão grave. Este é o estudo da tolerância humana ao impacto [4]. Para conhecer as forças e acelerações envolvidas num determinado cenário de acidente são elaborados ensaios experimentais que simulam esses mesmos cenários, nos quais são habitualmente utilizados modelos mecânicos do corpo humano que se designam por dispositivos de teste antropomórficos (ATD) ou *dummies*. No entanto, os elevados custos que estão associados a este tipo de ensaios levam as entidades envolvidas nos projectos a procurarem outras alternativas para avaliar a segurança dos mesmos.

Por outro lado, o desenvolvimento da tecnologia computacional sofreu grandes avanços nas últimas décadas permitindo-nos, nos dias de hoje, construir modelos numéricos detalhados desses cenários. Esses modelos, depois de devidamente validados pelos ensaios experimentais, podem ser reproduzidos diversas vezes, acrescentando factores de variabilidade e testando outras soluções para comparação de níveis de segurança com um custo financeiro incomparavelmente inferior.

Este trabalho surge com o objectivo de aplicar os métodos computacionais ao estudo das lesões sofridas pelos passageiros de um comboio numa situação de colisão. Para pro-

ceder a esse estudo, é construído um modelo numérico de um cenário usado no âmbito do projecto europeu SAFEINTERIORS [5], [6] tal como retratado na figura 1.2 para avaliar os fenómenos biomecânicos que ocorrem devido às colisões secundárias dos ocupantes da carruagem. O modelo numérico foi construído para ser analisado através do *LS-DYNA*, um programa de elementos finitos não-lineares adequado a análises dinâmicas pelo que é frequentemente utilizado em simulações de impacto. Os resultados obtidos para os índices de lesão dos passageiros serão comparados com os valores retirados do ensaio experimental para possível validação do modelo, mas também com os valores de um outro modelo numérico previamente validado utilizando o código *MADYMO* [7]. Neste último, o interior do comboio é modelado igualmente utilizando elementos finitos, usando-se, no entanto, um modelo dinâmico de corpos múltiplos (*multibody dynamics model*¹) para o ocupante.

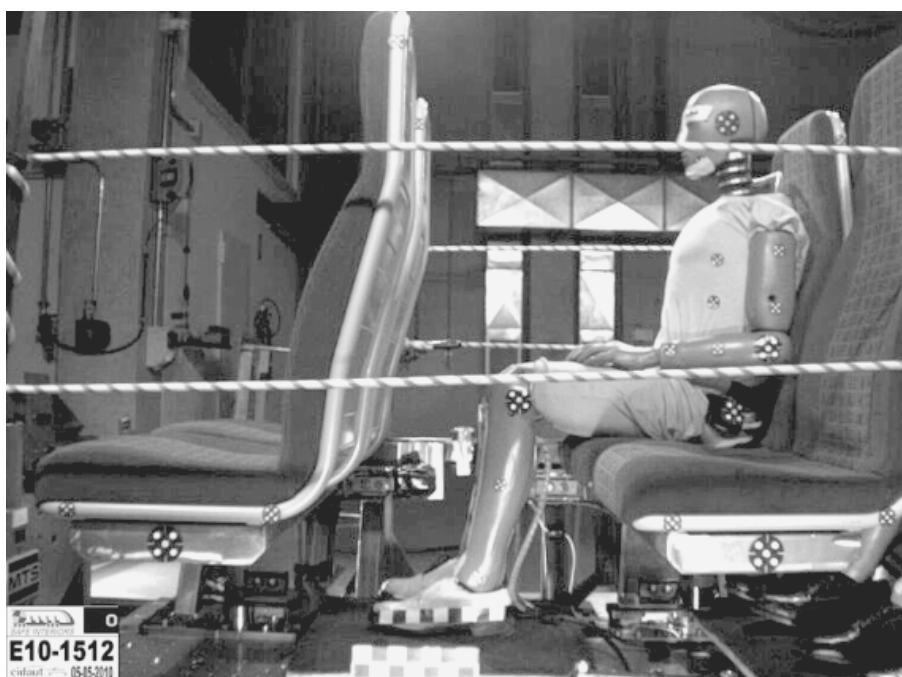


Figura 1.2: Cenário Experimental [6]

1.2 Enquadramento Teórico

A investigação na área da segurança passiva tem uma história relativamente recente apresentado uma relevância crescente com o desenvolvimento do sector dos transportes. Os meios de transporte cada vez mais velozes e acessíveis à população introduzem preocupações relativas à preservação da integridade física por parte dos seus ocupantes que até então não existiam.

Os primeiros estudos no tema foram elaborados no âmbito da aviação militar através da análise de acidentes aéreos e dos seus sobreviventes, assim como experiências realizadas com voluntários humanos e, posteriormente, com modelos substitutos do corpo

¹*multibody dynamics model* é definido como um modelo numérico constituído por corpos rígidos e/ou flexíveis ligados por juntas cinemáticas que restringem o movimento relativo entre os corpos, podendo ser actuados por forças, representando qualquer sistema mecânico desde pêndulos a veículos [8]

humano desenvolvidos para o efeito. Seguiu-se a indústria automóvel que, nos anos 50, como consequência de um grande aumento do número de feridos em acidentes rodoviários, desenvolve métodos de ensaios de colisões de veículos e análise de lesões e introduz a utilização da simulação numérica nesses estudos. Actualmente, os modelos matemáticos são largamente utilizados em ambas as indústrias e inúmeros trabalhos de investigação foram elaborados para melhorar componentes da segurança activa ou avaliar a segurança passiva.

Por outro lado, à indústria ferroviária sempre foram associados elevados níveis de segurança pelo que o interesse na sua análise e melhoria é mais recente, parte essencialmente dos estados e os estudos realizados são mais escassos. Nos Estados Unidos, o interesse pelo estudo da segurança no interior das carruagens de comboios surge com o desenvolvimento de infra-estruturas para o transporte ferroviário de alta velocidade. Prevendo um aumento das potenciais consequências em caso de acidente neste tipo de transporte, foram apoiadas várias iniciativas para estudar o fenómeno da colisão, garantir a protecção dos passageiros e tripulação e avaliar possíveis modificações à segurança em caso de colisão para o sistema convencional [9]. Nesse âmbito, Tyrell et al. [10] estudou as lesões sofridas pelos passageiros de comboio devido às colisões secundárias usando um modelo numérico implementado no *MADYMO*. Nesse estudo analisava a influência de factores como a disposição dos assentos, a existência de mesas, a utilização de cinto de segurança ou a carruagem em que viaja o ocupante (mais próxima ou mais afastada da zona de colisão) no valor dos índices de lesão. Os índices de lesão dos passageiros foram igualmente analisados no trabalho desenvolvido por Tyrell e Severson [11] que tinha como objectivo concreto o estudo do desempenho de um tipo de assento usado em comboios. Num outro projecto apoiado pela *Federal Railroad Administration (FRA)*, com o objectivo de avaliar a sobrevivência dos passageiros do sistema ferroviário Norte Americano de alta-velocidade em vários cenários de acidente, Simons e Kirkpatrick [12] analisaram, para cada um dos cenários, as deformações dos veículos, a dinâmica da colisão e o cálculo da resposta dos ocupantes ao impacto, usando o código *DYNA-3D* [13]. As investigações continuaram nos anos seguintes com trabalhos que procuravam aprofundar objectivos específicos como a validação e calibração dos modelos de computador para analisar a resistência ao choque dos veículos ferroviários de passageiros [14], a definição de um perfil de aceleração realista para um acidente, a resposta estrutural e correspondente nível de segurança dos ocupantes [15], a análise de diferentes configurações de interiores de comboios com vários modelos de ocupante para obtenção de resultados que servissem de base à elaboração de recomendações e regulamentação para a segurança no interior de comboios [16] ou a análise e desenvolvimento de sistemas de segurança passiva que garantam o espaço de sobrevivência e limitem as lesões sofridas pelo maquinista em caso de colisão [17].

A nível europeu, o estudo da segurança ferroviária teve o seu maior desenvolvimento após a formação da UE. Com o objectivo de criar um quadro legislativo comum aos países membros para a regulamentação do sistema ferroviário, a Comissão Europeia financia um conjunto de projectos, entre os quais:

- TRAINCOL - Advanced Design of Crash Fail-Safe Train Structures Under Service and Impact Conditions
- SAFETRAIN - Train Crashworthiness for Europe Railway Vehicle Design and Occupant Protection
- SAFEINTERIORS - Train Interior Passive Safety for Europe

O projecto TRAINCOL [18], [19] teve a duração de 48 meses com início em Março de 1991 e tinha como objectivo estudar o fenómeno de colisão de comboios e dessa forma contribuir para:

- "Uma melhor compreensão do fenómeno acidente, tal como aplicado aos comboios, usando testes experimentais à escala reduzida e à escala real.
- Uma utilização eficaz de métodos avançados de análise dinâmica e estrutural da colisão de comboios e situações de impacto.
- O desenvolvimento e aplicação de metodologias de projecto de carruagens de comboio, incluindo a análise de sensibilidades e técnicas de optimização para melhorar as estruturas existentes ou desenvolver estruturas novas.
- A melhoria da eficiência dos custos das fases de projecto com a diminuição dos ciclos de desenvolvimento.
- O desenvolvimento e produção de estruturas de segurança leves e anti-colisão usando dados das características de rigidez, colapso e absorção de energia das partes estruturais.
- A proposição de regulamentação mais avançada em matéria de segurança e integridade do equipamento ferroviário, incluindo a avaliação de lesões dos passageiros."

À época, as normas definiam apenas a resistência a cargas estáticas representativas das forças a que uma carruagem estava sujeita, ou ao efeito de colisões menores que seriam aplicadas aos tampões de choque ou aos engates. No entanto, estudos recentes, realizados pela *Organization of Research and Experiments (ORE)* faziam recomendações para a concepção das cabines relativamente ao seu comportamento dinâmico durante o impacto. Essas recomendações seriam desde logo adoptadas no Reino Unido através de requisitos específicos que indicavam que, para minimizar os efeitos de uma colisão de comboios, a estrutura das carruagens deveria ser projectada de forma a que a energia produzida pelo impacto fosse absorvida pela deformação controlada de uma área normalmente não utilizada pelos passageiros ou pela tripulação. Essa absorção ocorreria segundo as fases representadas no diagrama de força-deslocamento que se mostra na figura 1.3 [18].

Durante o projecto foram analisados dados de 52 acidentes ferroviários por forma a estabelecer as características, condições e consequências do acidente típico e concluiu-se a existência de três tipos principais de acidentes:

1. Colisão entre dois comboios (2/3 dos acidentes)
2. Colisão entre comboio e veículo rodoviário
3. Projecteis que atingem veículos ferroviários

Considerando que os acidentes que envolviam a colisão entre extremidades dos comboios eram os que contribuíam de forma mais significativa no número de lesões, foi neste tipo de acidentes que o estudo se centrou. Foram então elaboradas várias simulações numéricas com vista à análise e optimização estrutural das carruagens. Algumas dessas simulações puderam ser comparadas com testes experimentais a partes e componentes

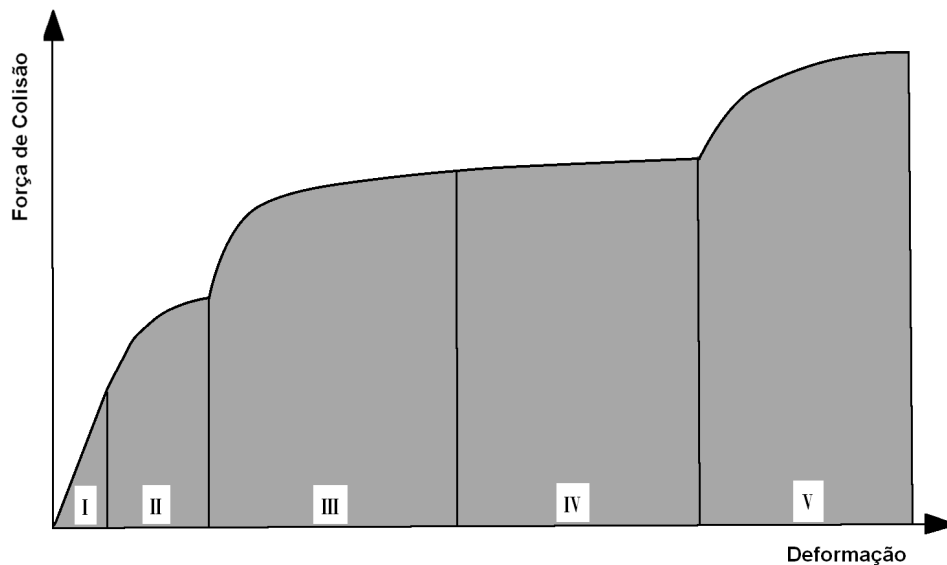


Figura 1.3: Curva Força-Deslocamento com fases de absorção de energia (adaptado de [18])

- Fase I:** Manobra de impacto sem dano
- Fase II:** Absorção de energia pelos sistemas associados aos acoplamentos e tampões de choque
- Fase III:** Absorção adicional de energia pela deformação dos acoplamentos e tampões de choque
- Fase IV:** Deformação progressiva da estrutura
- Fase V:** Deformação da carruagem na zona ocupada pelos passageiros

dos comboios realizados em França e em Portugal. Foram ainda realizadas algumas simulações numéricas com modelos de ocupante e de assentos usando um modelo dinâmico de corpos múltiplos representado na figura 1.4 [18]. Essas simulações permitiriam obter informações sobre as lesões da cabeça, peito e pernas sofridas pelos ocupantes devido ao impacto com o assento dianteiro. Seria ainda verificada a influência que a geometria do assento poderia ter na gravidade dessas mesmas lesões [18].

Ao projecto TRAINCOL seguiu-se o projecto SAFETRAIN [20], com início em Agosto de 1997 e igual duração (48 meses). O SAFETRAIN teve como objectivos a redução do número de mortos e feridos graves em acidentes ferroviários através da melhoria da segurança passiva dos comboios. Essa melhoria consistia no desenvolvimento de estruturas de impacto que se deformariam de forma controlada e progressiva em caso de impacto, mantendo o espaço de sobrevivência dos passageiros e limitando as acelerações por eles sentidas após a colisão. Para isso usou dados de 500 acidentes recolhidos por 12 empresas ferroviárias europeias entre 1991 e 1995. Com esses dados dividiu os acidentes nas três categorias mais frequentes:

1. Colisão entre dois comboios
2. Colisão entre um comboio e um veículo rodoviário numa passagem de nível
3. Colisão com um obstáculo de via

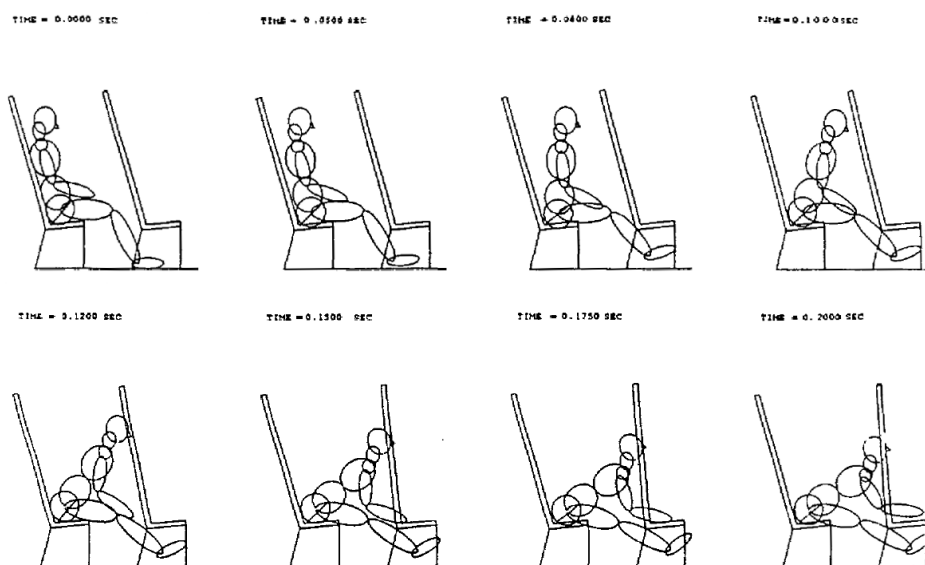


Figura 1.4: Simulação com modelo de ocupante do projecto TRAINCOL [18]

Para além disso, a análise dos dados dos acidentes resultou na adopção de três cenários de estudo:

- Cenário 1: Colisão entre dois comboios idênticos a 55km/h
- Cenário 2: Colisão entre um comboio e um veículo ferroviário equipado com tampões de choque a 36km/h
- Cenário 3: Colisão entre um comboio e um veículo rodoviário (simulado por um bloco rígido de $16,5\text{t}$) numa passagem de nível a 100km/h

No decorrer do projecto procedeu-se à execução de diversos testes experimentais para validação de modelos numéricos e posterior elaboração de recomendações relativas à integridade estrutural do comboio e manutenção do espaço de sobrevivência dos ocupantes. A realização desses testes permitiu determinar a curva de aceleração apropriada aos ensaios de colisão de comboios apresentada na figura 1.5. Para determinar as lesões sofridas pelos passageiros devido à colisão secundária deveria ser aplicado ao cenário de simulação numérica uma aceleração dentro dos limites apresentados no gráfico e uma variação de velocidade de 30km/h . Nas simulações numéricas realizadas pelo projecto foram utilizados os códigos *RADIOSS* [21] e *DYNA-3D* [13] entre os quais se verificou uma boa correlação dos resultados. As simulações numéricas aliadas aos testes experimentais permitiram definir um conjunto de limites para os índices de lesão recomendados para futuras normas.

Posteriormente, em Julho de 2006, teve início o projecto *SAFEINTERIORS* [5] com a duração 42 meses. O projecto *SAFEINTERIORS* tinha como objectivos específicos [22]:

- "Reunir fabricantes europeus, operadores, fornecedores e instituições académicas envolvidos em actividades do transporte ferroviário para construir um projecto de pesquisa comum que contribuirá significativamente para reforçar a interoperabilidade e normalização em toda a comunidade ferroviária europeia;

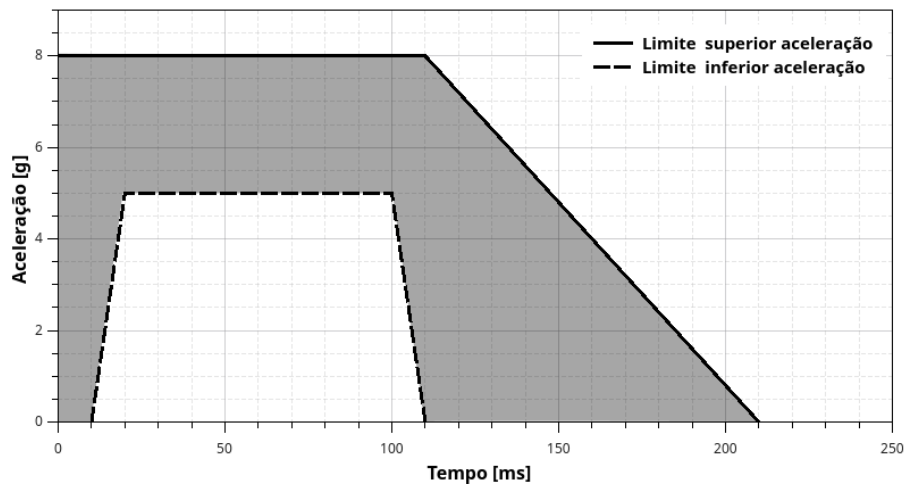


Figura 1.5: Perfil de aceleração recomendado pelo projecto SAFETRAIN

- Rever as práticas de desenvolvimento actuais e as conclusões de projectos anteriores relevantes em segurança passiva no interior de comboios, avaliar a compatibilidade com outros regulamentos relevantes, realizar uma análise de dados de acidentes existentes e seleccionar os perfis de aceleração necessários para analisar os interiores de veículos isolados das estruturas e dispositivos estruturais para controlar a energia durante o acidente.
- Identificar os índices de lesão relevantes para diferentes partes do corpo ocupante do veículo ferroviário tendo em conta os cenários de acidente e as disposições do interior do comboio seleccionados, identificar dispositivos de medição para quantificar lesões das partes do corpo relevantes para análise ocupante e definir os procedimentos de teste relevantes que podem ser usados durante o projecto de interiores e durante a validação de soluções de segurança passiva para o interior.
- Identificar as necessidades operacionais e comerciais. Definir as características interiores mais relevantes e definir os requisitos para a disposição dos interiores incluindo assentos, divisórias e outro equipamento interior relevante. Identificação de potencial para o uso de tecnologias emergentes e novos materiais. Desenvolver novas soluções de projecto, fabrico e sequência de ensaios a serem testadas e validadas.
- Avaliar os requisitos e procedimentos de validação e propor recomendações relativas às normas e regulamentos futuros.
- Explorar a adequação da aplicação das metodologias propostas para a segurança passiva no interior na adaptação de veículos ferroviários existentes.
- Avaliar o estado-da-arte das práticas de projecto do interior dos veículos ferroviários e identificar de lacunas nas práticas de projecto, incluindo uma definição clara das medidas ergonómicas e requisitos para Pessoas com Mobilidade Reduzida (PMR) e identificar outras funcionalidades do interior de veículos.
- Analisar as estatísticas de acidentes recolhidos pelos operadores ferroviários e outras agências europeias com o objectivo de seleccionar os riscos de acidentes representativos e identificar lesões das partes do corpo relevantes.

- Identificar as curvas de aceleração relevantes durante a colisão para serem usadas durante todo o projecto.
- Identificar novos e relevantes critérios de lesão para os ocupantes do veículo ferroviário com base em dados biomecânicos obtidos nos mais recentes trabalhos de investigação.
- Testar novos instrumentos de medição capazes de reproduzir o carregamento em *dummies* e sobre os elementos interior do veículo. Será avaliada a bio-fidelidade dos dispositivos utilizados para prever as lesões humanas em vários tipos de experiências simulando colisões reais de veículos.
- Testar novos procedimentos e métodos de ensaio e um programa de validação completo envolvendo a correlação entre os métodos experimentais e modelos computacionais.
- Recomendar novas especificações de projecto de equipamentos, mobiliário e disposição de interiores incluindo requisitos para PMR, com o objectivo de alcançar interiores com requisitos de sobrevivência melhorados.
- Avaliar e demonstrar a viabilidade de novos interiores através de novos e avançados procedimentos de teste.
- Identificar dados técnicos relevantes a fim de propor requisitos de segurança passiva para a disposição dos interiores e mobiliário."

Durante o projecto foram examinados os cenários de colisão de referência da norma em vigor, a EN 15227 [23], as categorias de veículos, as suas massas e variações de velocidade. Concluiu-se que era recomendável o uso de um perfil de aceleração único para o projecto, para o qual a disposição dos interiores e mobiliário podiam ser avaliados e a gravidade das lesões poderia ser reduzida. Nesse perfil, representado na figura 1.6, a aceleração deveria ser mantida numa faixa de valores entre os 5g e os 6g e a velocidade final deveria ter um valor mínimo de 5m/s e um máximo de 6m/s [24].

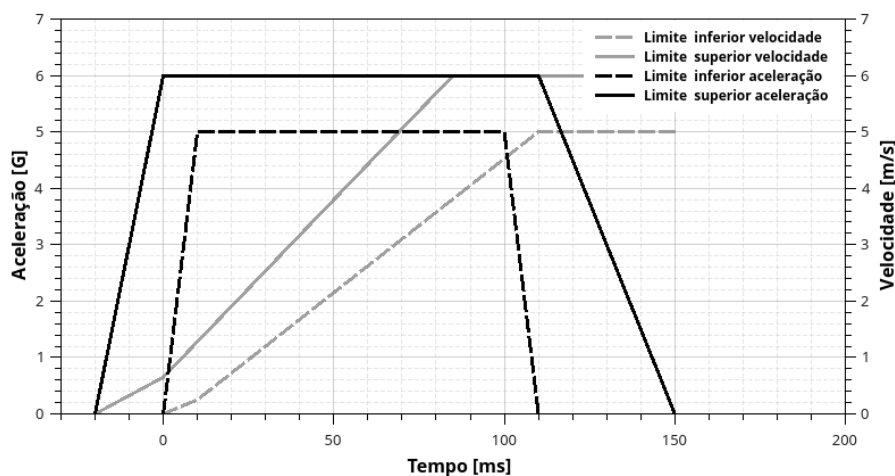


Figura 1.6: Perfil de aceleração recomendado pelo projecto SAFEINTERIORS (adaptado de [24])

Ainda na concretização do projecto foram realizadas simulações numéricas para vários interiores típicos de comboios, entre os quais o cenário de estudo do presente trabalho, o *inline seating layout*, representado na figura 1.7 [22]. Para esse cenário foi, no âmbito do projecto, realizado um ensaio experimental executado pela *Fundación para la Investigación y Desarrollo en Automoción* (CIDAUT), em Valladolid, Espanha, no qual foram obtidos os resultados que serviram de referência para possível validação do modelo estudado neste trabalho e que serão apresentados no capítulo 5.1.1.

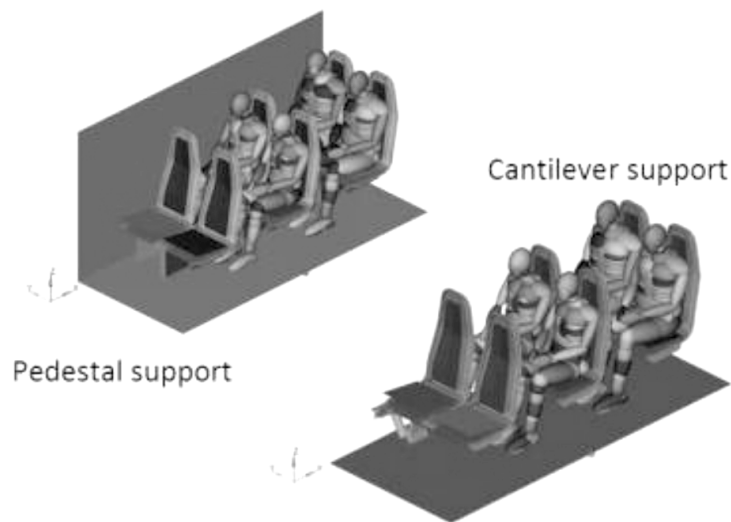


Figura 1.7: Cenário SAFEINTERIORS do interior *inline seating layout* [22]

Os restantes cenários estudados no projecto, representados na figura 1.8, pretendiam estimar os índices de lesão dando foco às zonas mais críticas do corpo para cada uma das disposições de interior [22]. No caso do cenário da figura 1.8a pretendia-se estudar concretamente as lesões cervicais sofridas pelos passageiros e a influência da altura do assento na gravidade dessas mesmas lesões. Para o caso do cenário representado na figura 1.8b, a maior preocupação consistia em analisar as lesões no abdómen dos passageiros variando parâmetros de projecto da mesa como a forma, o tamanho e a rigidez. Relativamente ao cenário da figura 1.8c, o estudo centrava-se igualmente nas lesões sofridas ao nível do tórax e abdómen dos passageiros, assim com a perda de espaço de sobrevivência após a colisão. Por sua vez, o cenário da figura 1.8d pretendia avaliar as lesões sofridas devido ao impacto com o poste de apoio, sobretudo na zona da cabeça.

Com base no SAFEINTERIORS outros trabalhos têm sido desenvolvidos com o objectivo de melhorar continuamente a segurança no interior dos comboios, como é o caso de [25] que apresenta os resultados dos índices de lesão obtidos para o cenário de estudo utilizando o *MADYMO* e comparando-os com os limites propostos pelo projecto SAFEINTERIORS ou de [26], [27] que utilizou a meta-modelação como processo de optimização do mesmo cenário com o objectivo de minimizar as lesões sofridas pelos ocupantes. Utilizando o *LS-DYNA*, Matsika et al. [28] analisou as lesões sofridas por PMR no interior de uma carruagem para os cenários *bay seating* com mesa fixa e em zona aberta com postes de apoio para lugares em pé.

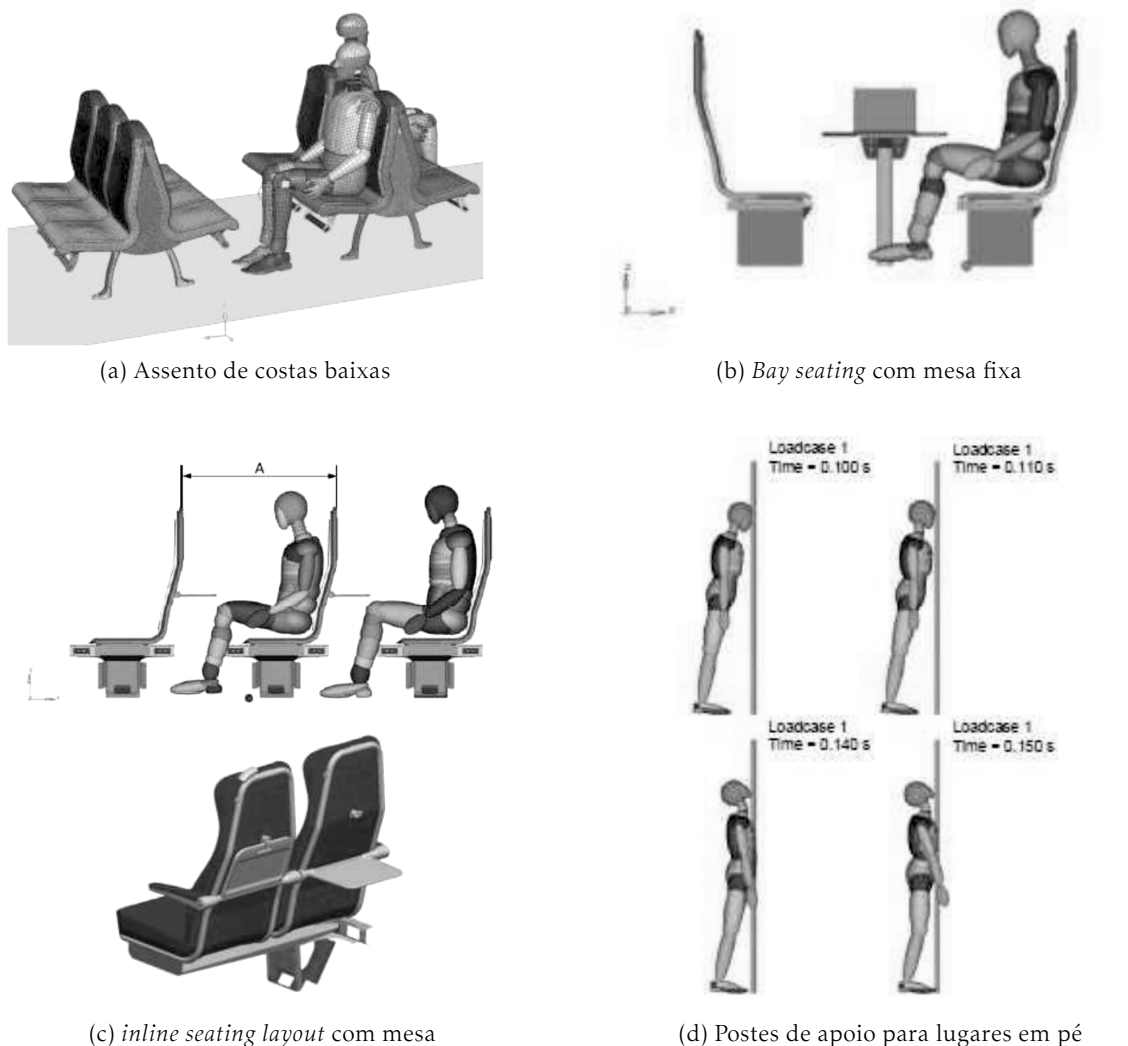


Figura 1.8: Cenários de estudo do projecto SAFEINTERIORS [22]

1.3 Organização do Trabalho

A estrutura desta dissertação foi construída de forma a dar a compreender as principais questões que envolvem o estudo da segurança passiva dos passageiros no interior de uma carruagem, dando destaque aos factores a ter em conta na construção e avaliação dos modelos numéricos elaborados para a realização desses estudos, não só em relação à teoria dos elementos finitos mas também em termos de legislação, biomecânica e modelos físicos e experimentais usados em investigação de acidentes ferroviários.

Desse modo, após a introdução inicia-se um capítulo no qual se abordam as directivas europeias que regulam o mercado do transporte ferroviário, nomeadamente as normas relativas à segurança. No mesmo capítulo é feita uma análise sobre a evolução da segurança do sistema ferroviário nacional nos últimos anos.

Segue-se, no terceiro capítulo da dissertação, uma explicação sobre a biomecânica do impacto, na qual se pretende dar a conhecer quais os tipos e formas de lesões no corpo humano causadas pelo impacto e como se avalia a gravidade de uma lesão através da

avaliação em determinadas partes do corpo das acelerações, velocidades, deslocamentos, forças e momentos durante a colisão secundária.

No quarto capítulo é apresentada a construção do modelo numérico usado para a analisar o cenário em estudo através do *LS-DYNA*. Nele se insere uma descrição dos componentes do cenário em termos de tipo de elementos, materiais e secções, assim como a disposição desses componentes no cenário, ligações e contactos entre os mesmos.

Os resultados obtidos no âmbito deste trabalho são descritos e comparados com os resultados de referência no capítulo cinco, no qual se descrevem igualmente alguns parâmetros gerais usados para efectuar a análise e também as alterações feitas com o objectivo de melhorar a qualidade dos resultados.

Por fim, no sexto e último capítulo da dissertação, são apresentadas as conclusões que se retiram deste estudo, assim como as propostas e sugestões para trabalhos futuros que possam vir a ser feitos nesta área ou em continuação deste estudo.

Capítulo 2

Regulamentação e Avaliação da Segurança Ferroviária

A construção de um mercado único europeu para a livre circulação de pessoas, bens e serviços levou desde cedo a União Europeia (UE) a procurar a criação de uma legislação comum para a regulação do sector dos transportes nos seus Estados-Membros. Relativamente ao transporte ferroviário em particular, numa fase inicial, o objectivo primordial dessa legislação era o de eliminar as disparidades de ordem fiscal e na intervenção dos Estados nos transportes e nos regimes sociais. Anos mais tarde, contudo, as directivas Europeias começam a apresentar disposições de ordem técnica para aproximar as leis nacionais que vigoram nos Estados-Membros da União relativamente ao sistema de transporte e infra-estruturas ferroviárias.

Na primeira parte deste capítulo será feita uma revisão do conteúdo das directivas existentes que regulam actualmente a segurança ferroviária na qual se descrevem, nomeadamente, os requisitos mínimos de segurança exigidos para as carruagens, os cenários de estudo e tipos de ensaios que devem ser realizados para verificação dos requisitos de segurança assim como os indicadores comuns que cada Estado-Membro deverá analisar para avaliar o desempenho dos seus caminhos-de-ferro em matéria de segurança.

Na segunda parte do capítulo, serão apresentados e brevemente discutidos alguns números relativos à segurança ferroviária a nível nacional, disponibilizados pela entidade competente, o Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT), em cumprimento das normas europeias abordadas, dando assim uma perspectiva geral da evolução da segurança no sistema ferroviário em Portugal na última década.

2.1 Legislação Europeia para os Estados-Membros da Comunidade

As divergências legislativas entre os Estados-Membros da União Europeia para a regulação do transporte ferroviário impediam a livre circulação de comboios no território comunitário, dificultando a criação de um espaço sem fronteiras na Europa. Para além disso, a especificidade das normas nacionais criavam entre as indústrias ferroviárias nacionais e os caminhos-de-ferro nacionais uma estreita relação que prejudicava a liberalização do mercado europeu dos transportes. Com a preocupação de construir um mercado europeu aberto e concorrencial, a UE publica, em Julho de 1996, a Directiva 96/48/CE

do Conselho relativa à interoperabilidade¹ do sistema ferroviário transeuropeu de alta velocidade [29], que harmonizava os requisitos técnicos essenciais que seriam aplicados ao mesmo. Dessa forma, um estado ficaria impedido de proibir a circulação de comboios de alta velocidade dentro do seu território que cumprissem o conjunto de especificações definidas pela directiva e designadas de Especificações Técnicas de Interoperabilidade (ETI). Posteriormente, com disposições semelhantes à anterior, foi elaborada a Directiva 2001/16/CE do Conselho, neste caso relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário convencional [30]. Verificou-se, porém, que as diferenças entre as especificações técnicas dos dois sistemas eram tão pouco significativas que não justificavam a existência duas directivas distintas. Procurando simplificar a legislação, em 2008 foram ambas revogadas para dar lugar a uma única, a Directiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário na Comunidade [31].

Por forma a facilitar a definição das ETI, o sistema ferroviário é dividido nos seguintes subsistemas [31]

- Subsistemas de carácter estrutural:
 - Infra-estrutura
 - Energia
 - Controlo-comando e sinalização
 - Material circulante

- Subsistemas de carácter funcional:
 - Exploração e gestão do tráfego
 - Manutenção
 - instrumentos telemáticos ao serviço dos passageiros e do transporte de mercadorias

A directiva determina que cada um destes subsistemas será objecto de uma (ou mais) ETI, podendo cada ETI dizer respeito a vários subsistemas. As ETI devem descrever os requisitos essenciais a aplicar aos subsistemas e às respectivas interfaces e estabelecer os parâmetros fundamentais indicados pela directiva para satisfazer os requisitos essenciais. Devem ainda determinar os componentes de interoperabilidade e as interfaces que devem ser objecto de especificações europeias, incluindo normas europeias, que são necessários para concretizar a interoperabilidade do sistema ferroviário transeuropeu de alta velocidade cumprindo os requisitos essenciais. Estabelece a directiva que a elaboração, revisão e actualização das ETI, que deverão ser publicadas pela Comissão no Jornal Oficial da União Europeia, será da competência de um organismo representativo comum, para o qual foi designada a Agência Ferroviária Europeia (ERA).

No âmbito deste trabalho, interessam particularmente os requisitos de segurança específicos do subsistema «material circulante», definido pela directiva da seguinte forma:

¹Capacidade do sistema ferroviário transeuropeu de alta velocidade para permitir a circulação segura e sem interrupção de comboios de alta velocidade que atinjam os níveis de desempenho especificados. Essa capacidade tem por base o conjunto das condições regulamentares, técnicas e operacionais a observar para satisfazer os requisitos essenciais [29].

"Material Circulante: Estrutura, sistema de comando e controlo de todos os equipamentos do comboio, dispositivos de captação da energia, equipamentos de tracção e de transformação da energia, de travagem, acoplamento, órgãos de rolamento (bogies, rodados, etc.) e a suspensão, as portas, as interfaces homem/máquina (maquinista, pessoal de bordo, passageiros, incluindo as necessidades das pessoas com mobilidade reduzida), dispositivos de segurança passivos ou activos, dispositivos necessários à saúde dos passageiros e do pessoal de bordo."

Como requisito específico de segurança a ter em conta na elaboração de ETI para o referido subsistema, a directiva determina que as estruturas do material circulante e das ligações entre os veículos devem ser projectadas por forma a protegerem as áreas destinadas aos passageiros e de condução em caso de colisão ou descarrilamento [31].

A ETI mais recente relativa a este subsistema foi publicada em Novembro de 2014 com o Regulamento (UE) n.º 1302/2014 da Comissão relativo à especificação técnica de interoperabilidade para o subsistema « material circulante — locomotivas e material circulante de passageiros » do sistema ferroviário da União Europeia. Relativamente à estrutura e partes mecânicas do material circulante, na secção dedicada à segurança passiva, o regulamento exige que a estrutura mecânica dos veículos deve assegurar a protecção dos ocupantes em caso de colisão:

- limitando a desaceleração
- preservando o espaço de sobrevivência e a integridade estrutural dos espaços ocupados
- reduzindo o risco de encavalitamento
- reduzindo o risco de descarrilamento
- limitando os efeitos do embate em obstruções da via

Indica ainda que se devem considerar os seguintes cenários de referência:

- Cenário 1: choque frontal de duas unidades idênticas
- Cenário 2: choque frontal com um vagão de mercadorias
- Cenário 3: choque com um veículo rodoviário de grandes dimensões numa passagem de nível
- Cenário 4: choque com um obstáculo baixo (p.ex., um automóvel numa passagem de nível, um animal, um bloco de pedra, etc.)

Os elementos de segurança passiva devem ser avaliados nas fases de concepção e desenvolvimento segundo as disposições da norma EN 15227:2008 [23]. Na norma são descritas com maior detalhe as condições que devem ser respeitadas para a realização de ensaios que reproduzam os cenários descritos assim como os requisitos necessários à validação do projecto. Esses requisitos são relativos apenas à estrutura do veículo e aos elementos mecânicos directamente relacionados com a absorção de energia em caso de colisão, assim como a preservação do espaço de sobrevivência dos ocupantes, deixando excluídas as indicações sobre o interior e limites para as lesões sofridas pelos passageiros. Sobre este assunto, no capítulo dos aspectos a considerar no processo de revisão ou

noutras actividades da agência, é feita no regulamento uma breve referência indicando que o interior dos veículos em interface com os passageiros e a tripulação deve garantir a protecção dos ocupantes em caso de colisão, fornecendo meios para [32]

- minimizar o risco de ferimentos causados por embate em mobiliário, objectos ou acessórios existentes no interior,
- minimizar os ferimentos que possam impossibilitar a fuga.

Informa também sobre os projectos de investigação lançados pela UE para avaliar o risco a nível de ferimentos para os passageiros em caso de ocorrência de um acidente ferroviário, tendo como objectivo a definição dos requisitos e os correspondentes procedimentos de avaliação de conformidade no que toca à organização do espaço interior e dos componentes dos veículos ferroviários [32].

Paralelamente à criação de regulamentação para as especificações técnicas e requisitos funcionais, a UE procurou também adoptar medidas que permitissem a supervisão da segurança no sistema ferroviário europeu. Em 2004 o Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia considera que apesar das ETI definirem níveis de segurança mínimos para os subsistemas seria igualmente importante estabelecer objectivos de segurança ao nível do sistema e assim como requisitos comuns que tratem em pormenor a regulamentação, gestão e supervisão da segurança. Foi então publicada a Directiva 2004/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à segurança ferroviária. A directiva esclarece, no seu primeiro artigo, que os objectivos da mesma são garantir a promoção e o reforço da segurança dos caminhos-de-ferro comunitários e melhorar o acesso ao mercado da prestação dos serviços ferroviários mediante [33]

- a) A harmonização da estrutura de regulamentação dos Estados-Membros;
- b) A definição das responsabilidades dos diversos intervenientes;
- c) O desenvolvimento de objectivos comuns de segurança e de métodos comuns de segurança tendo em vista uma maior harmonização das normas nacionais;
- d) A exigência da criação, em todos os Estados-Membros, de uma autoridade responsável pela segurança e de um organismo para proceder a inquéritos sobre acidentes e incidentes;
- e) A definição de princípios comuns de gestão, de regulamentação e de supervisão da segurança ferroviária.

A mesma directiva define:

- "Objectivos Comuns de Segurança (OCS): níveis de segurança que devem, no mínimo, ser alcançados pelas diversas partes do sistema ferroviário (nomeadamente, o sistema ferroviário convencional, o sistema ferroviário de alta velocidade, os túneis ferroviários de grande extensão ou as linhas utilizadas exclusivamente para o transporte de mercadorias) e pelo sistema no seu conjunto, expressos em critérios de aceitação de riscos";
- "Métodos Comuns de Segurança (MCS): métodos que serão desenvolvidos para descrever os modos de avaliação dos níveis de segurança e de consecução dos OCS e do cumprimento de outros requisitos de segurança".

É também estabelecido um conjunto de indicadores comuns de segurança (ICS) a fim de avaliar se o sistema dá cumprimento aos OCS e facilitar o acompanhamento do desempenho dos caminhos-de-ferro em matéria de segurança. Cada Estado-Membro deverá criar uma autoridade nacional responsável pela regulamentação e supervisão da segurança ferroviária. Compete a essa autoridade a elaboração de um relatório anual sobre as actividades do ano anterior e envia-lo à ERA. O relatório deverá incluir, entre outras, informações sobre a evolução da segurança ferroviária, incluindo uma síntese dos ICS a nível do Estado-Membro composta por:

1) Indicadores relativos a acidentes

1. Número total e relativo (por comboio.kilómetro) de acidentes e repartição pelos tipos de acidentes seguintes:
 - colisões de comboios, incluindo colisões com obstáculos dentro do gabarito,
 - descarrilamentos de comboios,
 - acidentes em passagens de nível, incluindo acidentes que envolvam peões,
 - acidentes com pessoas provocados por material circulante em movimento, com excepção dos suicídios,
 - suicídios,
 - incêndios no material circulante,
 - outros.
2. Número total e relativo (por comboio.kilómetro) de feridos graves e de mortos por tipo de acidente, discriminados pelas seguintes categorias:
 - passageiros (igualmente por referência ao número total de passageiros.kilómetro),
 - empregados, incluindo o pessoal dos empreiteiros,
 - utilizadores de passagens de nível,
 - pessoas não autorizadas em instalações ferroviárias,
 - outros.

2) Indicadores relativos a incidentes e casos de quase acidente

1. Número total e relativo (por comboio.kilómetro) de carris partidos, deformações da via e falhas na sinalização.
2. Número total e relativo (por comboio.kilómetro) de sinais transpostos em situação de perigo.
3. Número total e relativo (por comboio.kilómetro) de rupturas de rodas e eixos do material circulante em serviço.

3) Indicadores relativos às consequências dos acidentes

1. Custo total e relativo (por comboio.kilómetro), em euros, de todos os acidentes, devendo, se possível, ser calculados e incluídos os seguintes custos:
 - mortos e feridos,
 - indemnizações por perdas ou danos nos bens dos passageiros, do pessoal ou de terceiros, incluindo os danos causados ao ambiente,

- substituição ou reparação do material circulante e das instalações ferroviárias danificados,
 - atrasos, perturbações e reencaminhamento do tráfego, incluindo despesas suplementares com pessoal e lucros cessantes.
2. Número total e relativo (por referência ao número de horas de trabalho efectuadas) de horas de trabalho do pessoal e dos empreiteiros perdidas devido a acidentes.
- 4) Indicadores relativos à segurança técnica da infra-estrutura e à sua implementação
 1. Percentagem de vias equipadas com um sistema de protecção automática dos comboios (ATP) em serviço, percentagem de comboios.kilómetro usando sistemas ATP operacionais.
 2. Número de passagens de nível (total e por quilómetro de linha). Percentagem de passagens de nível com protecção automática ou manual.
 - 5) Indicadores relativos à gestão da segurança.
 - 6) Definições.

No seu estatuto de Estado-Membro da União Europeia, Portugal cumpre a directiva elaborando anualmente o relatório de segurança ferroviária, último dos quais será analisado na próxima secção deste capítulo.

2.2 Evolução da Segurança na Rede Ferroviária Nacional

De acordo com a directiva 2004/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, os Estados-Membros da União deverão nomear uma Autoridade Nacional de Segurança Ferroviária à qual se atribui a tarefa de elaborar, anualmente, um relatório que deverá incluir dados sobre a evolução do desempenho em matéria de segurança nos caminhos-de-ferro nacionais.

No caso de Portugal, o quadro de competências de Autoridade Nacional de Segurança Ferroviária foi atribuído ao Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT). Do relatório produzido pelo IMT referente ao ano de 2014, que analisa os ICS no período entre os anos 2005 e 2014, importa destacar os dois pontos do indicador comum de segurança relativo a acidentes - os números totais e relativos de acidentes e de mortos e feridos graves discriminados nas suas categorias [34].

Os números relativos a acidentes indicam que nos últimos 10 anos se verificaram 19 colisões de comboios com obstáculos dentro do gabarito, 7 dos quais ocorreram no ano de 2014 (tabela 2.1). Dessas colisões resultaram 4 feridos graves, não se registando qualquer vítima mortal (tabelas 2.2 e 2.3) [34].

No entanto, como se apresenta na tabela 2.4, contam-se 39 feridos graves entre os passageiros no ano de 2014 e, nos últimos 10 anos, 4 passageiros perderam a vida (tabela 2.5) [34]. Estes números alertam para a importância do estudo da segurança dos passageiros no interior das carruagens, sobretudo quando estão envolvidas grandes desacelerações e não apenas nos casos descritos pelas ETI que visam manter o espaço de sobrevivência dos ocupantes.

Tabela 2.1: Acidentes por categoria[34]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Colisões de comboios ^a	1	3	3	0	0	2	1	1	1	7
Descarrilamentos de comboios	1	9	3	3	1	3	2	0	4	3
Acidentes em PN ^b	22	22	27	20	15	14	7	11	12	9
Acidentes com pessoas causados por material circulante em movimento ^c	65	55	56	49	27	22	17	23	31	31

^a Incluindo colisões com obstáculos dentro do gabarito

^b Incluindo acidentes envolvendo peões

^c Com a exceção de suicídios

Tabela 2.2: Feridos graves por tipo de acidente [34]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Colisões de comboios ^a	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0
Descarrilamentos de comboios	0	0	1	2	4	0	0	0	0	0
Acidentes em PN ^b	13	15	9	8	10	5	3	3	5	5
Acidentes com pessoas causados por material circulante em movimento ^c	36	29	22	23	23	13	13	7	9	16

^a Incluindo colisões com obstáculos dentro do gabarito

^b Incluindo acidentes envolvendo peões

^c Com a exceção de suicídios

Tabela 2.3: Mortos por tipo de acidente [34]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Colisões de comboios ^a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Descarrilamentos de comboios	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0
Acidentes em PN ^b	11	18	20	15	17	11	4	8	10	4
Acidentes com pessoas causados por material circulante em movimento ^c	36	35	35	26	15	11	10	16	16	15

^a Incluindo colisões com obstáculos dentro do gabarito

^b Incluindo acidentes envolvendo peões

^c Com a exceção de suicídios

Tabela 2.4: N.º de feridos graves por categoria [34]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Passageiros	7	8	5	6	4	3	2	3	3	39
Trabalhadores	0	2	2	2	2	2	0	0	0	0
Utilizadores de PN	15	9	8	10	5	3	3	5	5	5
Pessoas não autorizadas	22	12	18	20	7	8	5	7	5	7
Outros	0	2	1	1	0	0	0	1	1	0

Tabela 2.5: N.º de mortos por categoria [34]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Passageiros	0	0	1	3	0	1	0	0	0	0
Trabalhadores	2	1	5	1	1	1	0	0	0	0
Utilizadores de PN	11	18	20	15	17	11	4	8	10	4
Pessoas não autorizadas	33	34	32	23	14	9	10	16	16	15
Outros	0	2	1	1	0	0	0	1	1	0

Capítulo 3

Biomecânica do Impacto

A biomecânica consiste na aplicação dos princípios da mecânica aos sistemas biológicos. Um dos campos dessa ciência é a biomecânica do impacto, que surge com o objectivo de estudar as lesões sofridas pelo corpo humano em situações extremas como os acidentes automóveis ou de aviação, a fim de conceber os mecanismos necessários para minimizar ou eliminar os potenciais riscos de lesão [4]. Os principais objectivos de pesquisa na biomecânica do impacto são:

1. Identificação e explicação dos mecanismos de lesão
2. Quantificação da resposta mecânica das partes do corpo ao impacto
3. Determinação dos níveis de tolerância ao impacto
4. Análise dos dispositivos e técnicas para avaliar os sistemas de prevenção de segurança

Neste capítulo serão descritos os modelos do corpo humano usados para estudar as lesões sofridas pelos ocupantes de um comboio numa situação de colisão frontal, assim como os métodos para quantificar os riscos de lesão envolvidos e avaliar os níveis de segurança do cenário de estudo, o *inline seating layout*.

3.1 Dispositivos de Teste Antropomórficos - ATD

Para estudar a resposta biomecânica¹ a diversas situações é necessário elaborar uma série de ensaios que envolvem modelos do corpo humano. Nos diversos estudos realizados ao longo da história da biomecânica foram usados modelos diversos como voluntários humanos, cadáveres humanos, animais, modelos mecânicos ou matemáticos. Como seria de esperar, os procedimentos realizados em voluntários humanos não podem de forma alguma causar danos ou sofrimento ao ser humano, pelo que a sua aplicabilidade se resume a situações em que as cargas aplicadas são muito limitadas e não a testes de impacto. A vantagem da utilização de voluntários consiste na inclusão do estudo da resposta muscular ao estímulo; Os cadáveres, por outro lado, apesar da antropometria idêntica à do ser humano vivo, não têm a tonicidade muscular que pode variar a resposta biomecânica. Os ensaios em animais permitem avaliar as diferenças entre o estudo de corpos vivos e

¹ alteração no tempo da posição ou forma (devido à deformação) do corpo humano, parte do corpo ou tecido e alterações fisiológicas relacionadas com essas alterações mecânicas [35].

cadáveres que possibilitam uma melhor interpretação dos estudos em cadáveres humanos. No entanto, devido às diferenças no tamanho, forma e estrutura entre animais seres humanos tornam muito difícil a extrapolação de resultados[35].

Nos ensaios em que se pretende simular condições reais de acidente, aos quais estão associadas grandes cargas durante o impacto, são normalmente utilizados modelos mecânicos denominados Dispositivos de Teste Antropomórficos (ATD). Os Dispositivos de Teste Antropomórficos, também conhecidos por *dummies* são construídos de forma a simular o corpo humano em termos de tamanho, forma, massa, distribuição de massa, rigidez e absorção e dissipação de energia, por forma a serem utilizados e apresentarem respostas semelhantes ao corpo humano em testes de impacto. Os *dummies* estão equipados com instrumentos que permitem medir forças, acelerações e momentos durante os ensaios para serem relacionados com a probabilidade da ocorrência de lesões através dos índices de lesão, e existem em vários modelos classificados de acordo com o tamanho, a idade, o sexo e a direcção de impacto [4], apresentando-se na tabela 3.1 os modelos de ATD adequados aos diversos tipos de ensaio [3]. Para a elaboração deste estudo foi utilizado o *Hybrid III* percentil 50 masculino cujas características serão seguidamente descritas, assim como os procedimentos necessários ao seu posicionamento no cenário de estudo.

Tabela 3.1: Modelos de ATD por tipo aplicação [3]

Aplicação	Modelo ATD
Impacto frontal	família <i>Hybrid III</i> , <i>THOR</i>
Impacto lateral	<i>EuroSID</i> , <i>EuroSID2</i> , <i>SID</i> , <i>SID-HIII</i> , <i>SID IIs</i> , <i>BioSID</i> , <i>WorldSID</i>
Impacto traseiro	<i>BioRID</i> , <i>RID2</i>
Peão	<i>POLAR</i>
Criança	P0, P3/4, P3, P6, P10, Q- <i>dummies</i> , CRABI

3.1.1 *Hybrid III*

Os modelos de ATD mais utilizados em ensaios de impacto frontal são os da família *Hybrid III*. Deste grupo, incluído em normas Europeias e Norte Americanas, fazem parte os adultos 5th *percentil female*, 50th *percentil male*, 95th *percentil female*, representados na figura 3.1 e as crianças de 6, 12 e 18 meses e de 3, 6 e 10 anos. As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, o conjunto de instrumentos [36] existentes nalguns dos referidos *dummies* e as suas dimensões [37].

No ensaio experimental foi usado um *dummy* do modelo 50th *percentil male* sentado numa fila de assentos para quantificar os índices de lesão e averiguar se estavam abaixo dos limites e dois *dummies* do modelo 95th *percentil male* sentados numa outra fila de assentos para verificar o projecto da estrutura e fixação dos assentos à consola. Nas simulações realizadas em *LS-DYNA* será usado um modelo numérico do ATD *Hybrid III* 50th *percentil male* para validar o modelo numérico quanto à sua resposta biomecânica. Este último representa a estrutura física de um adulto médio do género masculino definida com base em dados antropomórficos da população dos Estados Unidos da América [4].

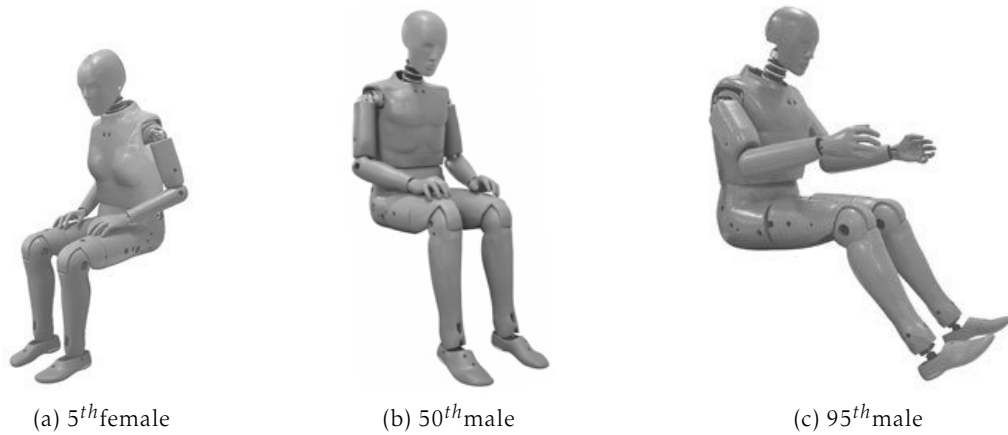

 Figura 3.1: Modelos *Hybrid III*

 Tabela 3.2: Instrumentos de medida da família de *dummies Hybrid III* (adaptado de [36])

	3Y	6Y	10Y	5 th female	50 th male	95 th male
Cabeça						
Acc. (A_x, A_y, A_z) ^a	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Pescoço						
Cabeça/C1 (F_x, F_y, F_z) ^b	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Cabeça/C1 (M_x, M_y, M_z) ^c	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
C7/T1 ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$) ^{b,c}	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Ombro						
Clavícula (F_x, F_y, F_z) ^b	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Tórax						
Coluna (A_x, A_y, A_z) ^a	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Coluna (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y) ^{b,c}	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Esterno (δ_x) ^d	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Esterno (A_x) ^a	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não
Abdómen						
Lombar (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y) ^{b,c}	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Pélvis						
Acc. (A_x, A_y, A_z) ^a	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Membros Inferiores						
Fémur (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y) ^{b,c}	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Tíbia-Fémur (δ_x) ^d	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Joelho (F_z) ^b	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Tíbia ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$) ^{b,c}	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim

^a A_x, A_y, A_z - Aceleração nas direcções $x, y, e z$

^b F_x, F_y, F_z - Força nas direcções $x, y, e z$

^c M_x, M_y, M_z - Momento flector nas direcções $x, y, e z$

^d δ_x - Deslocamento na direcção x

Tabela 3.3: Dimensão e massa das partes da família de *dummies Hybrid III* (adaptado de [37])

	5 th female	50 th male	95 th male
Dimensão [mm]			
Altura sentado	812	907	971
Nádega ao joelho	521	589	638
Joelho ao chão	464	544	595
Ombro ao Cotovelo	305	366	382
Cotovelo à ponta do dedo	400	465	502
Altura em pé	1513	1751	1864
Massa [kg]			
Cabeça	3,67	4,54	4,94
Pescoço	0,77	1,54	2,04
Tronco	24,09	40,23	52,89
Membros Superiores	4,81	8,53	10,91
Membros Inferiores	13,38	23,36	31,72
Total	46,72	78,20	102,5

3.1.2 Preparação e Posicionamento de ATD para Ensaios Dinâmicos

A resposta biomecânica do impacto do ocupante está dependente e é extremamente sensível à variação das condições nas quais são realizados os ensaios de colisão, nomeadamente à posição que o passageiro ocupa no assento. Para que os resultados dos vários testes possam ser comparados entre si, os parâmetros e procedimentos de ensaio devem estar o mais possível normalizados. Nesse âmbito, o *Railway Group Standard* (RGS) tem em vigor a norma GM/RT2100 [38] com indicações sobre a preparação e posicionamento de ATD para ensaios dinâmicos. Quanto ao posicionamento, a norma fornece, entre outras, as seguintes indicações:

- a) O ATD deve ser colocado no assento o mais próximo possível da posição desejada de modo que o seu plano de simetria corresponda ao plano de simetria do assento do lugar em questão.
- b) As mãos do ATD devem estar pousadas sobre as coxas com os cotovelos a tocar no banco de trás.
- c) As pernas devem ser estendidas ao máximo e depois baixadas até que os calcanhares toquem no chão. Os pés devem ser empurrados 10 mm para trás e ajustados de modo que o pé fique plano ao chão. Os calcanhares devem ser ajustados para que tenham a mesma posição longitudinal. A distância que separa os joelhos deve ser 170 mm.

A mesma norma refere ainda que o *dummy* deverá ter a temperatura estabilizada entre os 19° e os 26° medidos e registados em intervalos de tempo não superiores aos 10 minutos. As distâncias do centro de gravidade da cabeça e do ponto H (representado na figura 3.2) a um ponto de referência situado na estrutura fixa do assento devem ser medidas e registadas nas direcções longitudinal, lateral e vertical [38].

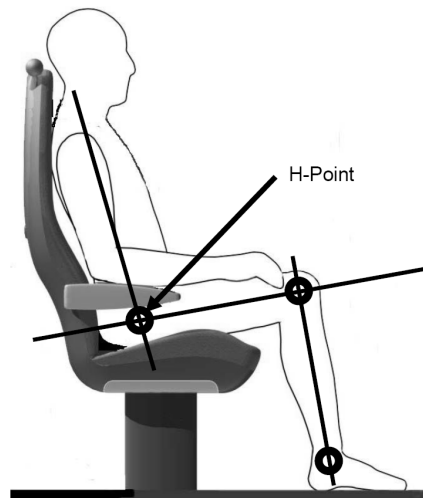


Figura 3.2: Posição do ponto H (H-point) [38]

3.2 Índices de Lesão

Uma lesão no corpo humano ocorre se a resposta biomecânica for de natureza tal que o sistema biológico se deforma para além do limite recuperável, resultando no dano das estruturas anatómicas [35]. Um índice de lesão define-se como uma função que relaciona parâmetros físicos (como a aceleração ou a força) com a gravidade de uma lesão específica [3], sendo esses parâmetros determinados em ensaios realizados com ATD. O risco efectivo de lesão é estimado através de funções que relacionam valor do critério com a probabilidade de ocorrência da lesão.

Existem diversos índices de lesão para cada uma das diferentes partes do corpo. Nesta parte do capítulo serão introduzidos os índices de lesão que serviram para avaliar a segurança dos ocupantes no cenário em estudo.

3.2.1 Crânio e Cervical

Pela sua correlação com a causa de morte, a cabeça é considerada a parte mais crítica no estudo das lesões em caso de acidente. Para avaliar a probabilidade de um passageiro sofrer uma lesão é utilizado o critério denominado *Head Injury Critirion* (HIC). Este critério é calculado pela fórmula

$$HIC = \max \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \quad (3.1)$$

em que

t_1 e t_2 são os tempos inicial e final (em segundos) entre os quais a aceleração é medida

$a(t)$ corresponde à resultante da aceleração medida em g no centro de gravidade da cabeça

Essa aceleração é calculada pela expressão

$$a(t) = \sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2} \quad (3.2)$$

Sendo

$a_x(t)$ a aceleração segundo a direcção do eixo X

$a_y(t)$ a aceleração segundo a direcção do eixo Y

$a_z(t)$ a aceleração segundo a direcção do eixo Z

Neste cálculo são comumente considerados dois intervalos de tempo ($t_2 - t_1$) de referência - $36ms$ e $15ms$ - e as notações para o critério são então HIC_{36} e HIC_{15} . A variabilidade da anatomia humana não permite definir um valor preciso para prever a ocorrência de fractura devido ao impacto frontal. No entanto, alguns estudos realizados com cadáveres permitiram obter dados estatísticos que relacionam o valor do HIC com a probabilidade de ocorrência de fractura através do gráfico representado na figura 3.3 [39].

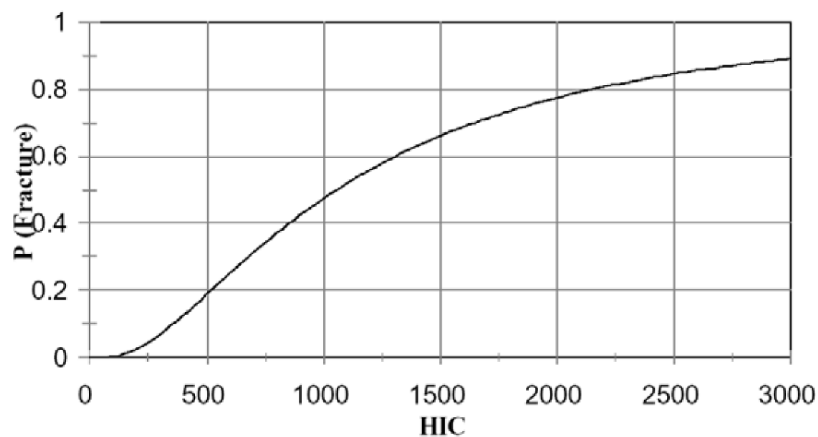


Figura 3.3: Relação entre o valor de HIC e a probabilidade de fractura [39]

No caso do pescoço, as lesões sofridas devido ao impacto não são habitualmente a causa de morte, podendo, no entanto, causar danos de longo prazo ou até mesmo permanentes, como a paraplegia ou quadraplegia.

As lesões são classificadas de acordo com o movimento do pescoço e a força que actua na cervical. A mobilidade do pescoço é descrita segundo quatro movimentos básicos: flexão, extensão, flexão lateral e rotação axial, representados na figura 3.4 [40]. Na figura 3.5 encontram-se representadas as possíveis cargas que actuam na cervical [41].

Numa situação de impacto frontal consideram-se quatro mecanismos principais de lesão do pescoço que resultam desses movimentos e forças sobre a cervical:

- Tensão-extensão,
- Tensão-flexão,
- Compressão-extensão,
- Compressão-flexão.

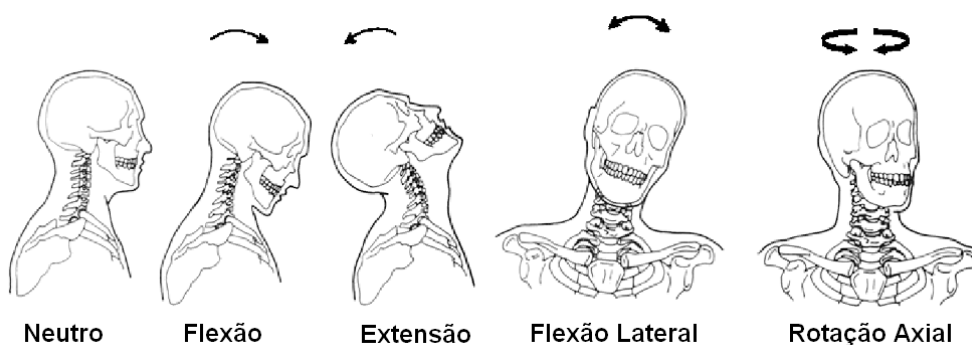


Figura 3.4: Movimentos básicos do pescoço (adaptado de [40])

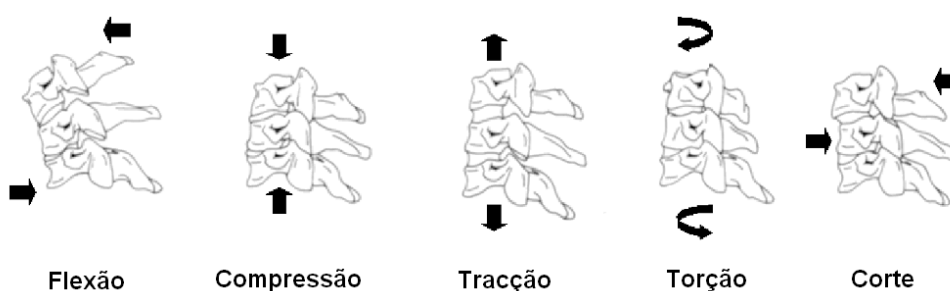


Figura 3.5: Cargas que actuam no pescoço (adaptado de [41])

Na figura 3.6 apresenta-se, a título de exemplo, o mecanismo de lesão devido à compressão-extensão da cervical, que ocorre tipicamente numa situação de impacto frontal na qual o passageiro não tem o movimento do tronco restringido pelo cinto de segurança [42]. Nesta situação a lesão traduz-se na fractura das estruturas superiores das regiões superior e inferior do pescoço. A compressão da cervical é causada pela inércia do corpo que se movimenta na direcção da cabeça.

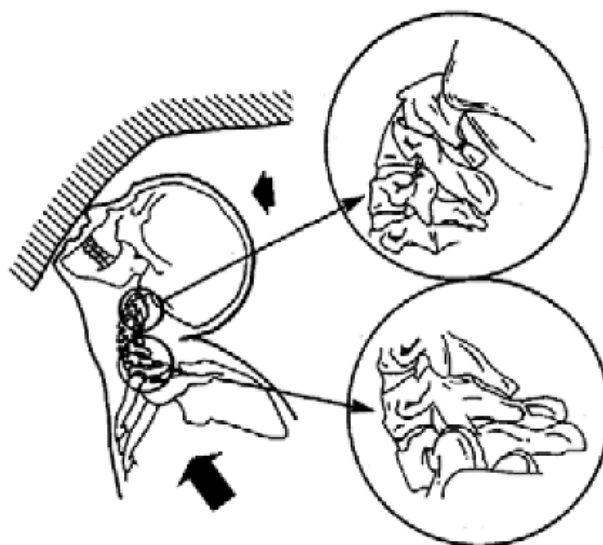


Figura 3.6: Compressão-extensão do pescoço (adaptado de [42])

O critério usado para avaliar as lesões ocorridas no pescoço, proposto pela *US National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) combina as forças axiais e momentos flectores através da fórmula

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad (3.3)$$

onde

F_z é a força axial

M_y é o momento flector

F_{int} e M_{int} são valores críticos de intercepção

Os valores críticos de intercepção foram estabelecidos e validados para os diferentes modelos de ATD e alguns dos seus valores, propostos pela NHTSA podem ser consultados na tabela 3.4 [38], [43]. O critério pode assumir quatro formas diferentes:

- N_{te} no caso da combinação de tracção e extensão;
- N_{tf} no caso da combinação de tracção e flexão;
- N_{ce} no caso da combinação de compressão e extensão;
- N_{cf} no caso da combinação de compressão e flexão.

Tabela 3.4: Valores críticos de intercepção [38], [43]

Modelo ATD	N_{te}		N_{tf}		N_{ce}		N_{cf}	
	F_{int} [N]	M_{int} [N.m]	F_{int} [N]	M_{int} [N.m]	F_{int} [N]	M_{int} [N.m]	F_{int} [N]	M_{int} [N.m]
<i>Hybrid III 50th</i>	6806	135	6806	310	6160	135	6160	310
<i>Hybrid III 5th</i>	4287	67	4287	155	3880	67	3880	155
<i>Hybrid III 6 YO</i>	2800	37	2800	93	2800	37	2800	93
<i>Hybrid III 3 YO</i>	2120	27	2120	68	2120	27	2120	68

3.2.2 Tórax

Para avaliar possíveis lesões no tórax serão utilizados dois critérios. O primeiro, o *Thoracic Compression Criterion* (TCC), consiste na atribuição de um limite máximo para o valor de compressão do peito, onde a compressão é definida pela quantidade de deformação dividida pela espessura do tórax. Testes com animais mostraram que o TCC não reflecte devidamente a probabilidade de lesão para impactos a velocidade elevada. Em situações com compressão máxima constante e velocidades de impacto diferentes, as lesões são mais graves para as velocidades mais elevadas. É necessário um menor valor de compressão para produzir níveis de lesão semelhantes quando a velocidade de impacto é aumentada [35]. Isto leva-nos à utilização do segundo critério, denominado *Viscous*

Criterion (VC), que relaciona o valor de compressão instantânea com a velocidade de deformação através da expressão

$$VC = V(t) \times C(t) = \frac{d[D(t)]}{dt} \times \frac{D(t)}{b} \quad (3.4)$$

sendo

V a velocidade de deformação [m/s]

C a compressão instantânea

D a deformação

b a espessura inicial do tórax

3.2.3 Membros Inferiores

A análise a nível dos membros inferiores será feita usando critérios para o estudo das lesões do fémur e da tíbia. No caso do fémur, foi utilizado o *Femur Acceptability Criterion* (FAC), que limita o valor da força de compressão transmitida ao fémur (em kN) que atua num período de tempo (medido em ms).

Para a tíbia foi utilizado o *Tibia Index* (TI) que calcula a probabilidade de fractura através da fórmula

$$TI = \frac{F}{F_{crit}} + \frac{M}{M_{crit}} \quad (3.5)$$

em que

F é a força axial na tíbia

F_{crit} é o valor de força crítico obtido para o cálculo do TI

M é o momento flector na tíbia

M_{crit} é o valor de momento flector crítico obtido para o cálculo do TI

No tipo de cenário em estudo, para um modelo de ocupante *Hybrid III 50th percentil male* são tomados os valores de $240N \cdot m$ para o momento flector crítico, M_{crit} , e $12kN$ para a força crítica, F_{crit} [38].

3.3 Limites para os Índices de Lesão

Nos estudos de protecção dos passageiros no transporte ferroviário os valores obtidos limites para os índices de lesão são divididos em três categorias: a dos ferimentos ligeiros, graves e críticos. Considera-se um ferimento ligeiro aquele que requer no limite algum tipo de tratamento hospitalar. O ferimento grave, por sua vez, pode implicar consequências de longo prazo enquanto que o crítico está associado a um sério risco de morte. Um valor limite de índice de lesão é definido de modo a que para um determinado valor do critério considerado, o risco de sofrer ferimentos não excede uma probabilidade de 50%. Os limites para os índices de lesão a considerar nesses estudos para o adulto médio são apresentados na tabela 3.5 segundo as referidas categorias [44].

Tabela 3.5: Limites para os índices de lesão (adaptado de [44])

Região do Corpo	Índice de Lesão	Limite do Índice			
		Ligeiro	Grave	Crítico	
Cabeça	Resultante da Aceleração (3ms)	784,8	–	2158,2	[m/s ²]
	HIC ₁₅	150	500	1000	
Pesçoço	Força Axial	2770	–	4170	[N]
	Força de corte	1900	–	3100	[N]
	Momento Flector	47	57	135	[N.m]
Tórax	N _{ij}	–	0,5	1,0	
	Deformação do tórax	42	53	75	[mm]
Membros Inferiores	VC	0,40	0,50	1,00	
	Deslocamento do joelho	–	16	–	[mm]
Membros Inferiores	Carga uniaxial fémur	4000	7600	10000	[N]
	TI	1,00	1,30	–	
	Carga axial tibia	4000	8000	–	[N]

Considera-se ainda um índice de lesão para a perna que consiste na combinação dos índices do fémur e da tibia e cujos limites se encontram representados no gráfico da figura 3.7 [38].

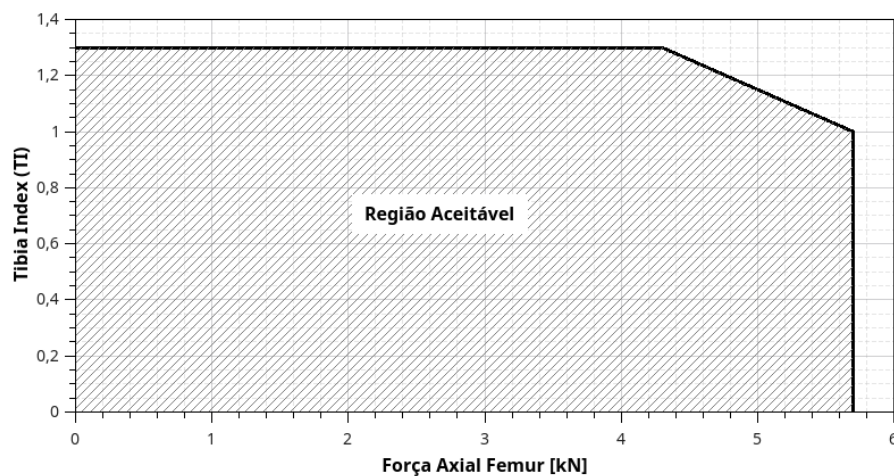


Figura 3.7: Limites para o índice de lesão da perna (adaptado de [38])

Capítulo 4

Construção do Modelo Numérico

Neste capítulo serão descritos os principais elementos que foram utilizados na construção do modelo numérico para proceder a análise do mesmo através do *LS-DYNA*, assim como o procedimento seguido e as análises efectuadas para verificar a correcta definição do cenário. Inclui-se uma descrição das partes que formam o cenário de estudo, a posição e montagem dos mesmos, o tipo de materiais e elementos que os constituem e as condições a que foram sujeitos. Na construção do modelo procurou-se corresponder o mais possível aos parâmetros utilizados e fenómenos observados durante o ensaio experimental, tendo sido usada a malha de nós e elementos utilizada na simulação numérica realizada com o código *MADYMO* [25] para a modelação das partes.

A elaboração do ficheiro a executar com o *LS-DYNA* não permite declarar unidades para cada grandeza introduzida, pelo que cabe ao utilizador garantir que os parâmetros são escritos segundo um sistema de unidades coerente. Na tabela 4.1 são apresentados alguns sistemas de unidades sugeridos pelo *LS-DYNA* [45]. Entre esses, foi escolhido o sistema $mm - ms - kg - kN$ para que as partes modeladas tivessem as mesmas unidades do modelo de ocupante disponibilizado pelo *LS-DYNA* [46].

Tabela 4.1: Sistemas de unidades coerentes

unidade	sistemas		
	A	B	C
comprimento	metro	milímetro	milímetro
tempo	segundo	segundo	milisegundo
massa	quilograma	tonelada	quilograma
força	Newton	Newton	quiloNewton

4.1 Descrição Geral do Cenário

O modelo numérico em estudo foi construído de acordo com o cenário do modelo experimental do *inline seating layout* [6] representado na figura 4.1 que se pretende comparar para validação dos resultados. Esse cenário, que replica uma disposição típica do interior de uma carruagem, é composto por duas filas de assentos, tendo cada fila dois lugares conforme representado na figura 4.2. No lugar da segunda fila junto à parede é posicionado o modelo numérico do ocupante conforme as disposições apresentadas no capítulo 3.1.2.

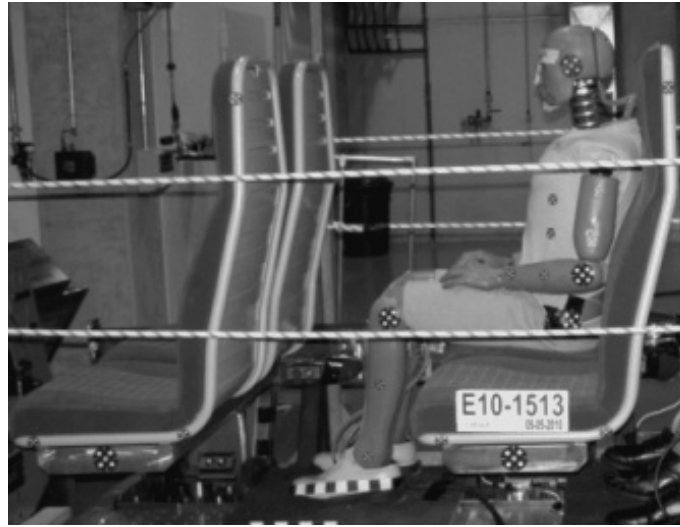


Figura 4.1: Cenário do ensaio experimental [6]

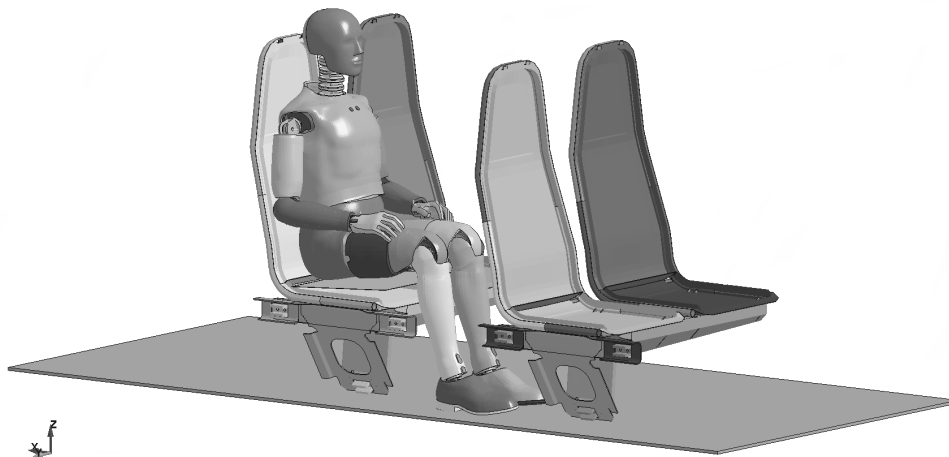


Figura 4.2: Cenário de Estudo

Os dois bancos de cada fila estão montados numa plataforma de suporte, que por sua vez se encontra fixa à parede e ao piso da carruagem. Igualmente em conformidade com o modelo experimental, os bancos são montados com uma distância em si de 508mm (fig. 4.3a) enquanto as filas são colocadas à distância relativa de 950mm (fig. 4.3b), que corresponde a uma configuração de carruagem de primeira classe.

4.2 Descrição dos Subconjuntos

Nesta segunda parte do capítulo será feita uma descrição mais pormenorizada das várias partes que constituem o cenário do modelo numérico. Para isso, o modelo será dividido nos subconjuntos representados nas figuras 4.4a "Assento", 4.4b "Plataforma de Suporte" e 4.4c "Modelo Numérico do Ocupante". Para cada um dos referidos subconjuntos serão enunciadas características como o número de partes, nós e elementos, dimensões principais e propriedades dos materiais e secções.

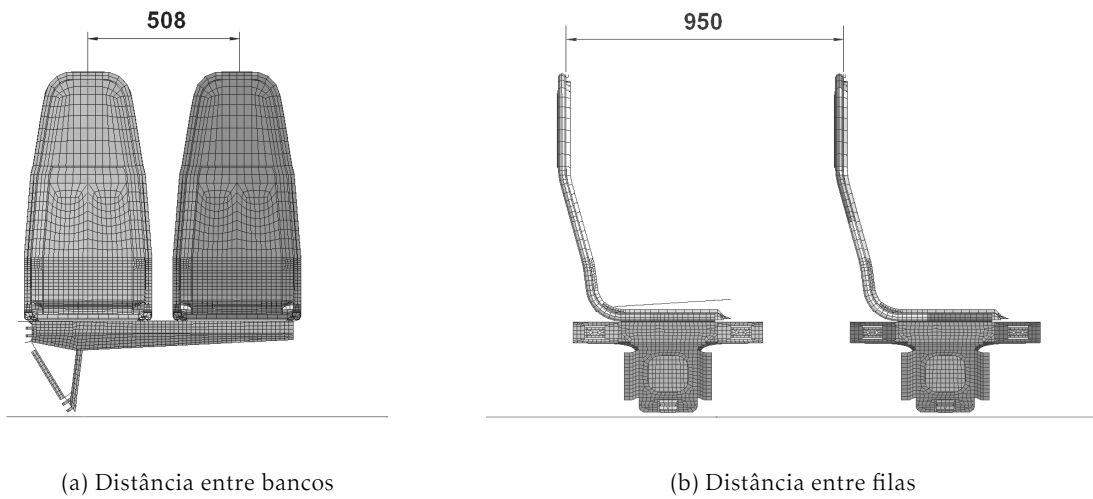


Figura 4.3: Medidas principais da disposição dos assentos (em *mm*)

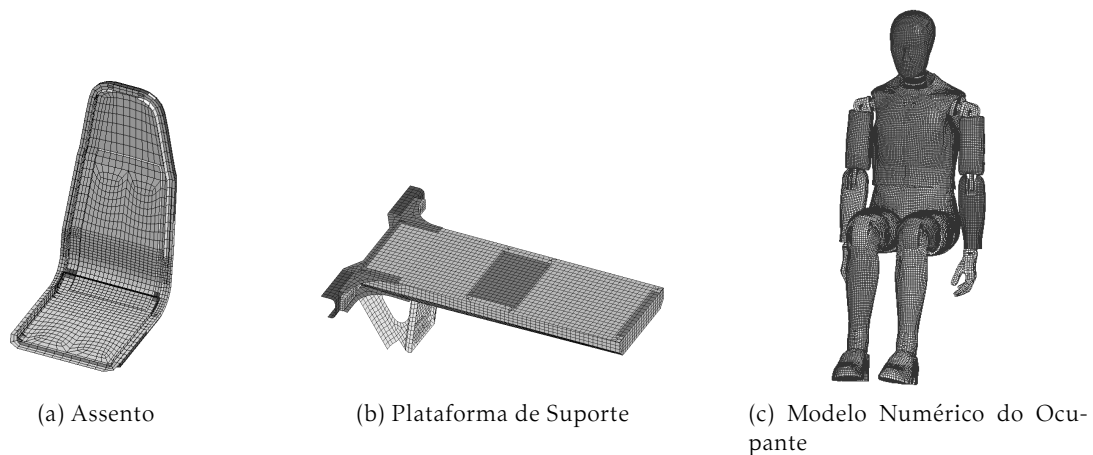


Figura 4.4: Sub-conjuntos do modelo

Para além das que serão enumeradas nos respectivos subconjuntos, foram ainda utilizadas duas partes para a execução da análise - um plano que define a fronteira entre a parte não estrutural do assento (a parte almofadada, não modelada) necessário para restringir a cinemática do ocupante e um plano que constitui o piso da carruagem. Por se tratarem de partes suplementares que não são objecto de estudo, os dois planos foram construídos utilizando o modelo de material rígido **MAT_RIGID* com as características apresentadas na tabela 4.2 e composto por elementos do tipo *shell*. Essas características são exigidas pelo *LS-DYNA*, mesmo no caso de materiais rígidos, para que seja possível a determinação dos parâmetros de interface entre as superfícies quando o corpo rígido interage com outra parte numa definição de contacto [47], [48]. A escolha deste tipo de material determina que o programa passe a considerar cada uma das partes como um corpo rígido, o que, relativamente aos corpos deformáveis, tem um custo computacional muito inferior. Outras informações sobre estas partes encontram-se resumidas na tabela 4.3.

Tabela 4.2: Características do material - partes 6921 e 6922

MID ^a	ρ [kg/mm ³]	E [GPa]	ν
21	8×10^{-6}	210	0,3

^a Identificação do material no código

Tabela 4.3: Composição das partes 6921 e 6922

Plano	PID ^a	N.º de elementos	N.º de nós	Espessura dos elementos [mm]
Piso	6921	3510	3640	1
Assento	6922	400	441	10

^a Identificação da parte no código

4.2.1 Assento

O subconjunto Assento, representado na figura 4.5, foi construído utilizando 8 partes diferentes com as características apresentadas na tabela 4.4. Em cada uma das partes, representadas na figura A.2 (anexo A.1), foram utilizados elementos do tipo *shell* de quatro nós com a formulação Belytschko-Lin-Tsay e o modelo de material *MAT_PIECEWISE_ELASTIC. Este modelo de material representa o comportamento de uma material elasto-plástico com encruamento linear com a curva tensão-extensão representada na figura 4.6. Esta curva é definida por duas rectas pelo que é necessário especificar o declive da recta na zona de deformação elástica, o módulo de Young (E), o declive da recta na zona de deformação plástica, E_T e a tensão limite de elasticidade, σ_c . As especificações definidas para os materiais do assento encontram-se resumidas na tabela 4.5.

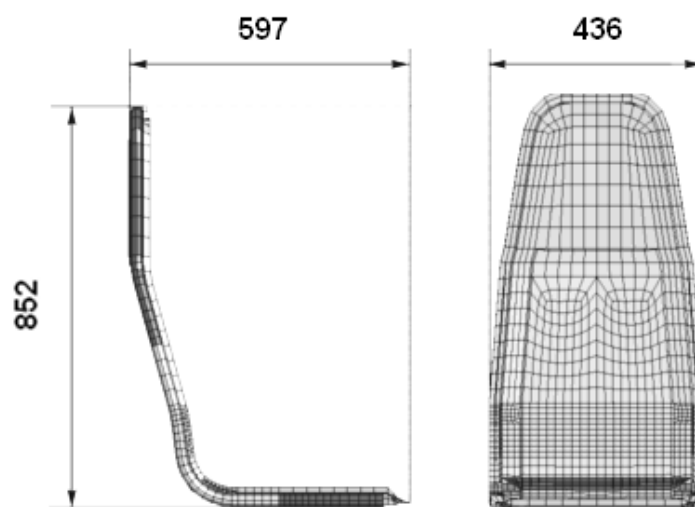


Figura 4.5: Medidas principais do subconjunto "assento" (em *mm*)

Tabela 4.4: Composição das partes do subconjunto "assento"

Parte	PID ^a	MID ^b	N.º de elementos	N.º de nós	Espessura dos elementos [mm]
Tube21	11	11	576	600	2,2
Tube4	12	12	416	432	4,3
Back3	13	13	158	222	3,0
Back1	14	14	1272	1332	0,9
Pan1	15	15	910	963	1,0
Pan15	16	16	78	112	2,0
TopTab2	19	19	4	12	2,0
Back15	21	20	66	100	1,8

^a Identificação da parte no código

^b Identificação do material no código

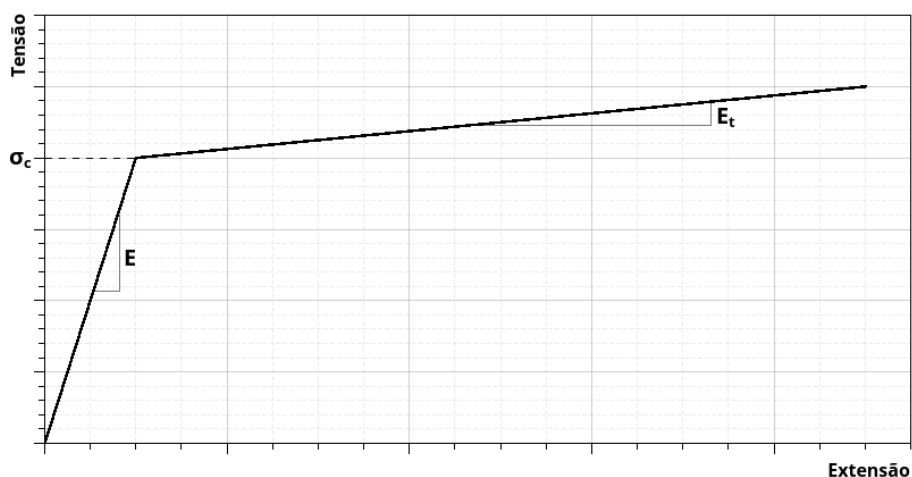


Figura 4.6: Curva Tensão-Extensão do modelo de material *MAT_PIECEWISE_ELASTIC

Tabela 4.5: Características dos materiais do subconjunto "assento"

MID ^a	ρ [kg/mm ³]	E [GPa]	ν	σ_c [GPa]	E_T [GPa]
11	$7,89 \times 10^{-6}$	210	0,3	0,292	2,5
12	$7,89 \times 10^{-6}$	90	0,3	0,250	2,5
13	$8,00 \times 10^{-6}$	210	0,3	0,292	1,5
14	$7,89 \times 10^{-6}$	190	0,3	0,260	0,5
15	$1,38 \times 10^{-5}$	205	0,3	0,300	2,5
16	$7,89 \times 10^{-6}$	205	0,3	0,292	0,5
19	$7,89 \times 10^{-6}$	205	0,3	0,292	0,5
20	$7,89 \times 10^{-6}$	205	0,3	0,292	0,5

^a Identificação do material no código

4.2.2 Plataforma de Suporte

À semelhança do subconjunto anterior, a plataforma de suporte, representada na figura 4.7, foi modelada utilizando elementos do tipo *shell* com a formulação Belytschko-Lin-Tsay e o modelo de material elasto-plástico *MAT_PIECEWISE_ELASTIC. Os detalhes sobre as partes e materiais deste subconjunto podem ser consultados nas tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente. As partes que constituem a plataforma de suporte podem ser identificadas na figura A.1 disponível no anexo A.1

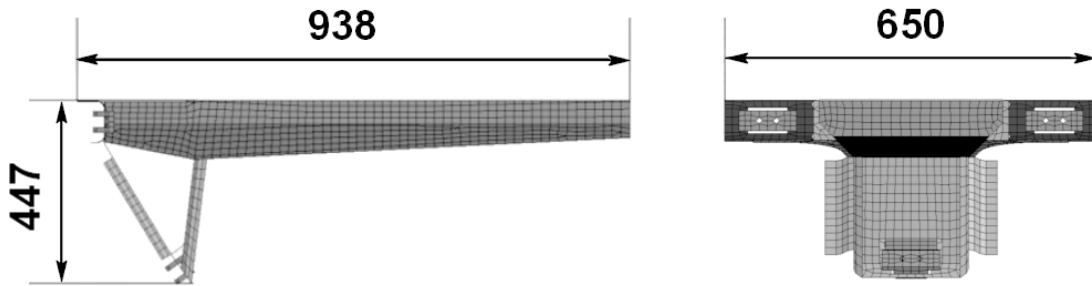


Figura 4.7: Medidas principais do subconjunto "plataforma de suporte" (em mm)

Tabela 4.6: Composição das partes do subconjunto "plataforma de suporte"

PID ^a	MID ^b	N.º de elementos	N.º de nós	Espessura dos elementos [mm]
118	8	3114	3205	1,0
119	8	1046	1284	2,0
120	8	806	938	3,0
122	8	204	258	4,0
155	8	408	417	1,0

^a Identificação da parte no código

^b Identificação do material no código

Tabela 4.7: Características dos materiais do subconjunto "plataforma de suporte"

MID ^a	ρ [kg/mm ³]	E [GPa]	ν	σ_c [GPa]	E_T [GPa]
8	$7,8 \times 10^{-6}$	206	0,3	0,355	0,3

^a Identificação do material no código

4.2.3 Modelo Numérico do Ocupante

Nas análises foi utilizado um modelo numérico do ATD *Hybrid III* desenvolvido e distribuído pela *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC) para os utilizadores do *LS-DYNA*. Estes modelos estão disponíveis em vários perfis e nas categorias *Rigid*, *Fast* e *Detailed*. Nas simulações realizadas optou-se por um modelo detalhado do *Hybrid III*

percentil 50 na versão denominada LSTC.NAC_H350TH_130528_BETA composto pelos materiais apresentados na tabela 4.8 e os elementos, nós e partes descritos na tabela 4.9.

Tabela 4.8: Modelos de materiais do subconjunto "ocupante"

Materiais	
*MAT_ELASTIC	101
*MAT_RIGID	86
*MAT_NULL	26
*MAT_BLATZ-KO_RUBBER	23
*MAT_VISCOELASTIC	16
*MAT_LOW_DENSITY_FOAM	14
*MAT_VISCOUS_FOAM	2
*MAT_SPRING_ELASTIC	1

Tabela 4.9: Composição do subconjunto "ocupante"

Elementos	
<i>Shell</i>	226452
<i>Solid</i>	225638
<i>Beam</i>	256
<i>Discrete</i>	1
Nós	292233
Partes	367

O posicionamento do *dummy* foi feito segundo os procedimentos sugeridos em [46] e tendo em conta as normas apresentadas no capítulo 3.1.2, procurando aproximar o mais possível a posição do modelo numérico à posição do modelo experimental. Para atingir a posição pretendida, o modelo numérico de ATD permite operações de translação e rotação globais tendo como referência um sistema de coordenadas com origem no seu ponto H, representado na figura 4.8, e operações de rotação através de um conjunto de juntas que simulam as articulações existentes no corpo humano. Na tabela 4.10 apresentam-se as coordenadas finais do ponto H após as operações globais de translação assim como as rotações em torno dos eixos do referencial presente no mesmo.

Tabela 4.10: Coordenadas da posição do ponto H do modelo de ocupante

Posição do ponto H [mm]			Operações de Rotação Global [°]		
<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	eixo <i>xx</i>	eixo <i>yy</i>	eixo <i>zz</i>
265	1021	500	0	-15	180

A tabela 4.11 apresenta os valores finais dos ângulos resultantes das operações de rotação das juntas efetuadas para posicionar as partes do modelo numérico de acordo com a posição do modelo experimental, sendo a posição final do ATD apresentada na figura 4.9.

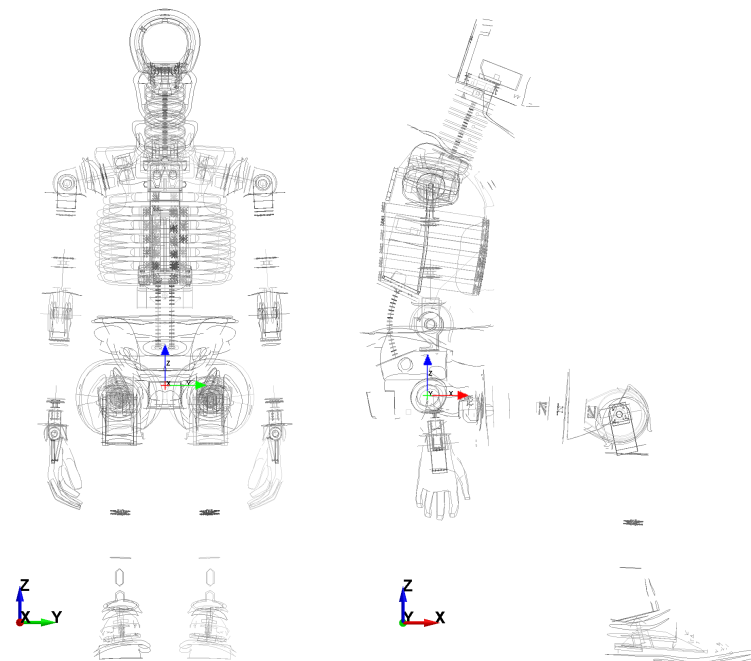


Figura 4.8: Sistemas de coordenadas do ponto H do modelo de ocupante

Tabela 4.11: Ângulos de rotação para posicionamento do modelo de ocupante

Parte	Ângulo de Rotação	Eixo	Figura ^a
Pescoço/Cabeça	-5 °	X1	A.9
Perna esquerda (superior)	-7 °	X2	A.9
Perna esquerda (inferior)	-2 °	-	-
Pé esquerdo	11 °	X3	A.9
Perna direita (superior)	7 °	-	-
Perna direita (inferior)	2 °	X4	A.9
Pé direito	-11 °	-	-
Ombro esquerdo	-9 °	-	-
Braço esquerdo (superior)	-7 °	-	-
Cotovelo esquerdo	-24 °	X5	A.9
Braço esquerdo (inferior)	-82 °	-	-
Pulso esquerdo	-40 °	-	-
Mão esquerda	-15 °	-	-
Ombro direito	9 °	X6	A.9
Braço direito (superior)	7 °	X7	A.10
Cotovelo direito	24 °	-	-
Braço direito (inferior)	82 °	X8	A.9
Pulso direito	40 °	X9	A.9
Mão direita	15 °	X10	A.10

^a Consultar anexo A.3

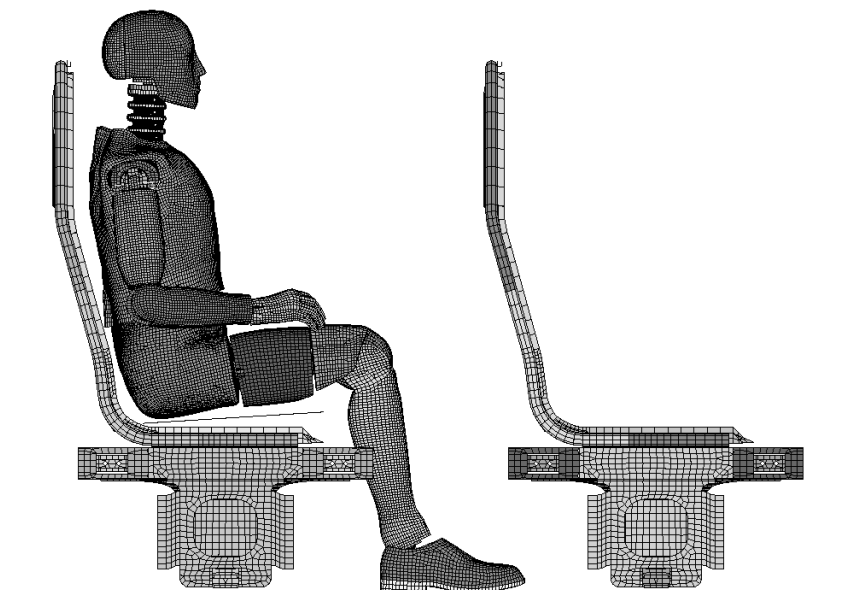


Figura 4.9: Posição final do modelo de ocupante

4.3 Ligações

Na definição do cenário foi necessário definir ligações dentro dos subconjuntos assento e plataforma de suporte e entre os mesmos. Foi igualmente necessário garantir a fixação do subconjunto "plataforma de suporte" à parte 6922, correspondente ao piso da carruagem. Nesta última, uma vez que o piso foi definido como uma parte rígida, optou-se pela utilização do constrangimento `*CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET`. Dessa forma, o conjunto de pontos escolhidos, representados na figura 4.10, é assumido pelo programa como fazendo parte do corpo rígido e as coordenadas desses nós são actualizadas de acordo com o movimento do corpo rígido [45].

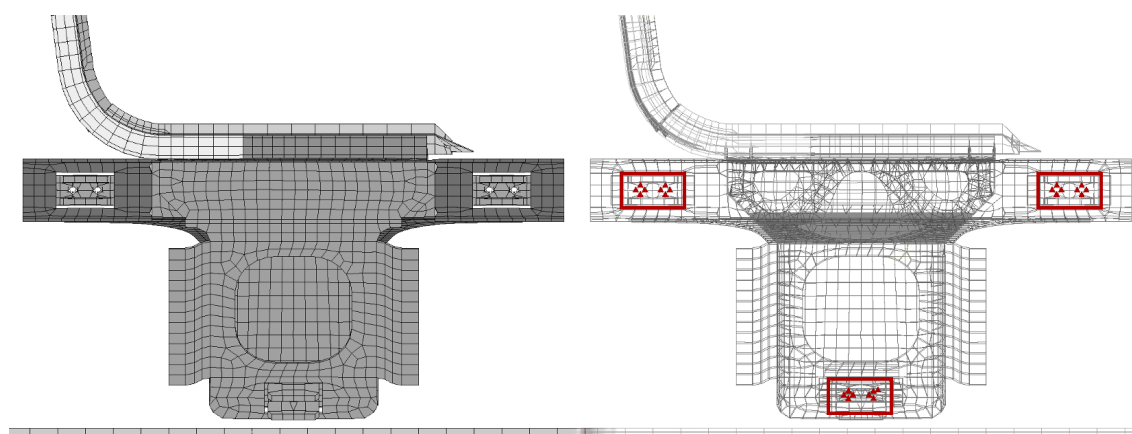


Figura 4.10: Nós da plataforma utilizados no constrangimento

Nas restantes ligações foi utilizado o comando `*CONSTRAINED_SPOTWELD` que simula os efeitos de uma ligação soldada utilizando para isso um elemento *beam* rígido que une

o par de nós definido pelo utilizador, criando entre ambos uma dependência em termos de rotação e deslocamento. A ligação falha (e o constrangimento é retirado) quando

$$\left(\frac{|f_n|}{S_n}\right)^n + \left(\frac{|f_s|}{S_s}\right)^m \geq 1 \quad (4.1)$$

Em que

S_n Força normal de falha da ligação soldada

S_s Força de corte de falha da ligação soldada

Os valores das constantes S_n e S_s , assim como os dos expoentes m e n , são introduzidos pelo utilizador para cada par de nós definido. A tabela 4.12 resume os valores usados na definição das ligações entre as partes de um assento, as partes de uma plataforma de suporte e entre um assento à respectiva plataforma de suporte.

Tabela 4.12: Constantes para a definição das ligações

Partes Ligadas ^a	S_n [kN]	S_s [kN]	m	n	Representação ^b
14 [A] - 11 [A]	2,5	10	2	2	figura A.3
15 [A] - 14 [A]	3,32	3,32	2	2	figura A.4
155 [P] - 122 [P]	50	50	2	2	figura A.5
155 [P] - 120 [P]	50	50	2	2	figura A.6
15 [A] - 118 [P]	50	50	2	2	figura A.7
13 [A] - 119 [P]	50	50	2	2	figura A.8

^a [A]-Assento [P]-Plataforma de suporte

^b Consultar anexo A.2

4.4 Definição de Contactos

A definição de contactos tem como função a identificação das partes entre as quais o programa deve procurar por interpenetrações, por forma a aplicar um algoritmo que, ao detectar a penetração, aplique uma força no sentido de a eliminar [49].

Tal como na definição das ligações, foram implementados contactos ao nível dos subconjuntos e entre os mesmos. Na tabela 4.13 encontram-se resumidas as definições dos contactos entre as partes introduzidos na construção do modelo.

Os contactos utilizados foram do tipo *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, sendo a opção *AUTOMATIC* recomendada para a análise de colisões pois determina que o contacto é não-orientado, o que significa que as penetrações podem ser detectadas de ambos os lados do elemento *shell*, projectando as superfícies de contacto a partir da direcção normal ao plano médio do elemento, nos dois sentidos. A distância da superfície de contacto ao plano médio do elemento é definida pelo parâmetro *contact thickness* e tem, por defeito, metade do valor da espessura do elemento. O tipo *SURFACE_TO_SURFACE* aplica o algoritmo de contacto em duas fases - numa primeira, é verificada a penetração de nós definidos como *slave* através das superfícies definidas como *master*; de seguida, é verificada a penetração de nós *master* através da superfície *slave* [50], [51]. Esta dupla

Tabela 4.13: Contactos definidos entre partes

Contactos			
Entre partes da estrutura ^a		Entre partes do ocupante e partes da estrutura ^a	
15 [A]	11 [A]	Cabeça	11[A] 14[A]
15 [A]	12 [A]	Braços	11[A] 14[A] 15[A]
14 [A]	11 [A]	Antebraços	11[A] 14[A] 15[A]
14 [A]	12 [A]	Mãos	11[A] 14[A]
15 [A]	14 [A]	Joelhos	11[A] 14[A] 15[A] 118[P] 120[P]
155 [P]	122 [P]	Pernas (sup)	6922[a]
155 [P]	120 [P]	Pernas (inf)	14[A] 15[A]
15 [A]	118 [P]	Pés	120[P] 6921[p]
13 [A]	119 [P]		

^a [A]-Assento [P]-Plataforma de suporte [a]-Plano assento [p]-Plano piso

verificação torna pouco provável a ocorrência de penetrações não detectadas pelo algoritmo, com a desvantagem de duplicar o custo computacional do algoritmo de contacto relativamente ao caso em que é feita apenas a primeira fase de verificação.

A aplicação da força resistente à penetração é feita usando o método da penalidade, que consiste em adicionar um elemento mola entre o nó e a superfície de contacto. A força seria então dada pela fórmula

$$F = lk \tag{4.2}$$

sendo

l distância penetrada

k rigidez da mola

Para este método, o *LS-DYNA* permite três formulações diferentes [47]

1. *Standart Penalty Formulation*
2. *Soft Constraint Penalty Formulation*
3. *Segment-Based Penalty Formulation*

As formulações diferem entre si na forma como determinam a rigidez da mola introduzida entre o nó e a superfície de contacto. Na generalidade dos contactos definidos foi utilizada a *Standart Penalty Formulation* que calcula, para os elementos *shell*, k da forma

$$k = \frac{f_s KA}{\max(shell\ diagonal)} \tag{4.3}$$

onde

f_s é um factor de escala (de valor recomendado 0.1)

K é o módulo de compressibilidade geométrica

A é a área do elemento

Neste caso, o valor da rigidez é portanto influenciado pelas características dos materiais das partes em contacto e pela dimensão dos segmentos [52]. Isto torna a formulação adequada para superfícies de contacto cujas propriedades sejam da mesma ordem de grandeza, mas inapropriada quando usada entre materiais de características muito divergentes.

Nalguns contactos, tais como os definidos entre a cabeça e partes do assento ou entre as mãos e partes do assento, como será discutido posteriormente no capítulo 5.3, foi necessário optar pela *Segment-Based Penalty Formulation*, que se implementa atribuindo o valor 2 ao parâmetro *SOFT* na definição do contacto. Nesta formulação, k é dado por

$$k = 0,5 \times SLSFAC \times SF \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) \left(\frac{1}{\Delta t_c(t)} \right)^2 \quad (4.4)$$

em que

$SLSFAC$ é um factor de escala, com o valor recomendado de 0,1

SF é um factor de escala, com o valor recomendado de 1

m_1 e m_2 são as massas dos segmentos *master* e *slave*, sendo igual à massa do elemento no caso de elementos *shell* ou 1/2 da massa do elemento no caso de elementos sólidos

Δt_c é o incremento de tempo

Como se pode notar, ao contrário do que acontece com a formulação *standard*, este método calcula a rigidez com base no valor das massas dos elementos e do incremento de tempo da análise, sendo por isso uma opção para a definição dos contactos quando estão envolvidos materiais muito diferentes. Devem ainda ser referidas duas outras particularidades que distinguem esta formulação da anterior:

- O contacto é definido pela procura de penetrações entre segmentos (e não entre nó e segmento)
- As penetrações iniciais são eliminadas, uma vez que a distância usada no cálculo da força resulta da diferença entre o valor da distância no momento do cálculo e o valor da penetração inicial [53].

No caso da componente tangencial, a força de contacto é determinada calculando a força de atrito máxima, F_{max} pela relação entre o coeficiente de atrito, μ , e a força normal, f_n , através da formulação de Coulomb [47]:

$$F_{max} = \mu |f_n| \quad (4.5)$$

O factor de atrito revelou-se um parâmetro determinante sobretudo nos contactos definidos entre o plano de assento e a parte superior das pernas do modelo de ocupante e entre os seus pés e o plano do piso, devido à sua influência na cinemática do ocupante. Para o factor de atrito, verificou-se que os valores utilizados no modelo numérico em *MADYMO*, apresentados na tabela 4.14 se adequavam à simulação feita com o código do *LS-DYNA*, evitando desta forma a realização de análises para a afinação deste parâmetro.

Tabela 4.14: Factores de atrito utilizados na definição de contactos

Partes em contacto ^a		μ
Pernas (sup)	6922[a]	0,1
Pés	6921[p]	0,6
Restantes contactos		0,3

^a [a]-Plano assento [p]-Plano piso

4.5 Condições de Fronteira

Para representar o movimento da carruagem e reproduzir o ensaio experimental foi necessário impor restrições ao deslocamento do sistema limitando-o a uma direcção. Nesse sentido, foram impostos à parte 6921 (piso da carruagem) constrangimentos ao movimento de translação segundo as direcções globais y e z e ao movimento de rotação segundo os eixos x , y e z . Por se tratar de um corpo rígido, esses constrangimentos são introduzidos com a definição do material. Por partilharem o mesmo material, esses constrangimentos são igualmente impostos ao plano do assento (parte 6922).

O perfil de aceleração usado no ensaio experimental para simular a colisão de comboios resulta de um estudo que teve em conta os acidentes mais relevantes da indústria ferroviária, sendo por isso representativo de uma situação real. Nesse perfil, a aceleração deverá ser mantida numa faixa de valores entre os 5g e os 6g pelo que no ensaio procurou impor uma aceleração 5,5g a que corresponde uma variação máxima de velocidade de $5,5ms^{-1}$, como representado na figura 4.11.

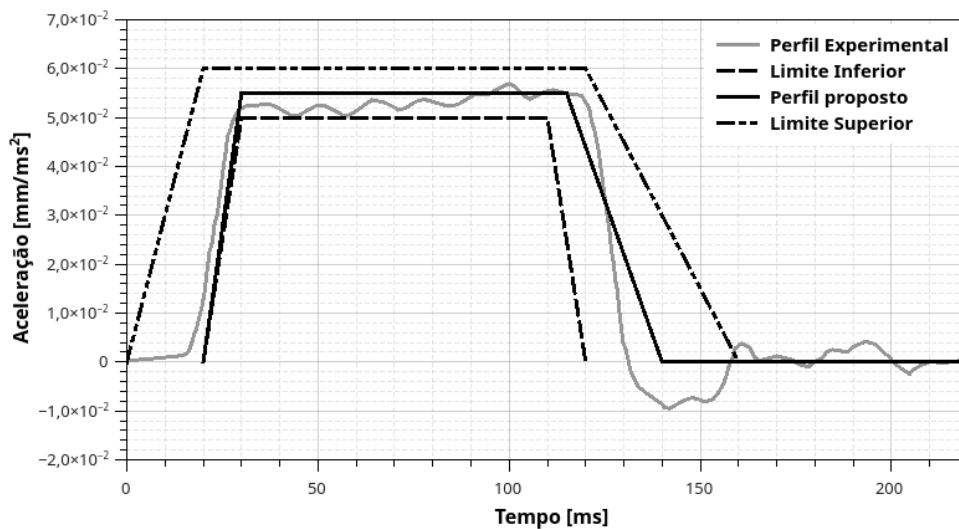


Figura 4.11: Perfil de aceleração

Porém, o ensaio experimental está sujeito a alguma variabilidade pelo que a aceleração efectiva não corresponde ao perfil composto por linhas rectas, mas ao perfil mais irregular igualmente representado no gráfico da figura 4.11. Na simulação numérica foi usado o perfil de aceleração efectiva medida por acelerómetros durante o ensaio experimental. Essa aceleração foi imposta às partes com as identificações 6921 (plano do piso) e 6922 (plano do assento) usando o comando *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID. Os subconjuntos plataforma de suporte, por estarem unidos ao piso, acompanham o seu mo-

vimento. O mesmo acontece às partes que constituem os subconjuntos do assento, uma vez que foram definidas ligações entre estes e as plataformas de suporte.

Para introduzir a aceleração da gravidade foi utilizado o comando `*LOAD_BODY_Z`, que é definida pelo utilizador e aplicada a todo o sistema.

4.6 Procedimento de Construção do Modelo Numérico

Na construção do modelo numérico a ser analisado em *LS-DYNA*, que inclui a definição de parâmetros e montagem das partes descritas anteriormente, foi seguido um conjunto de etapas segundo uma ordem específica nas quais se incluem igualmente algumas análises de verificação da correcta construção do modelo. O processo de construção iniciou-se com modelação, definição de tipo e características de elementos, materiais e contactos de cada subconjunto. Após esta etapa foi feita, para cada subconjunto, uma análise de verificação que consistiu na verificação dos modos de vibração de cada um desses subconjuntos. Pretendia-se com isso verificar a possível existência de partes soltas dentro do subconjunto que indicassem incorrecções na definição das ligações. Caso se verificasse a existência de falhas nas ligações, eram feitas as alterações necessárias aos parâmetros de ligação e realizava-se novamente a análise, processo repetido até que todas as ligações estivessem correctamente definidas. Verificada a correcta definição das ligações entre as partes de cada subconjunto foi feita a montagem de dois subconjuntos "assento" ao "subconjunto plataforma de suporte", que constituíam a primeira fila de assentos. Foi então posicionada uma nova fila de assentos às distâncias anteriormente descritas e ambas as filas foram ligadas ao plano do piso. Seguiu-se a execução de nova análise dos modos de vibração para verificação das ligações após a qual se realizou uma outra análise com o objectivo de averiguar, neste caso, a correcta definição dos contactos entre as partes que constituem cada subconjunto, assim como as ligações entre os diferentes subconjuntos. Esta simulação consistiu numa análise de impacto de uma esfera rígida de 80kg (peso aproximado do ocupante) à qual foi imposta uma velocidade de 5m/s no sentido de colidir com o assento dianteiro. Foram realizadas várias simulações para diferentes zonas de impacto entre a esfera e o assento representadas na figura 4.12. À semelhança da análise de modos de vibração, este segundo conjunto de simulações foi repetida até que todas as definições de ligações e contactos estivessem correctamente implementadas.

As possíveis incorrecções nas ligações e contactos poderiam ser igualmente ser verificadas após a inclusão do ocupante através da realização da análise completa do modelo numérico. No entanto, as simulações com o ocupante previam-se bastante mais demoradas do que as análises que não incluíssem o mesmo optando-se por isso pela realização dos testes referidos anteriormente, agilizando desta forma a construção do cenário em estudo.

Verificada a correcta definição das ligações e contactos foram impostas as condições de fronteira ao sistema, seguindo-se a introdução do plano do assento e do *dummy*, o seu posicionamento e a definição de contactos entre o ATD e as restantes partes do modelo.

Com a realização desta última etapa conclui-se a construção do modelo numérico que, neste ponto, se encontrava pronto para a realização das simulações que permitiram obter os resultados da análise nos quais se incluem os índices de lesão. Os parâmetros gerais introduzidos para a realização da simulação completa, assim como as alterações implementadas para a melhorar a correlação de valores com o ensaio experimental e os resultados finais obtidos serão o assunto abordado no capítulo 5.

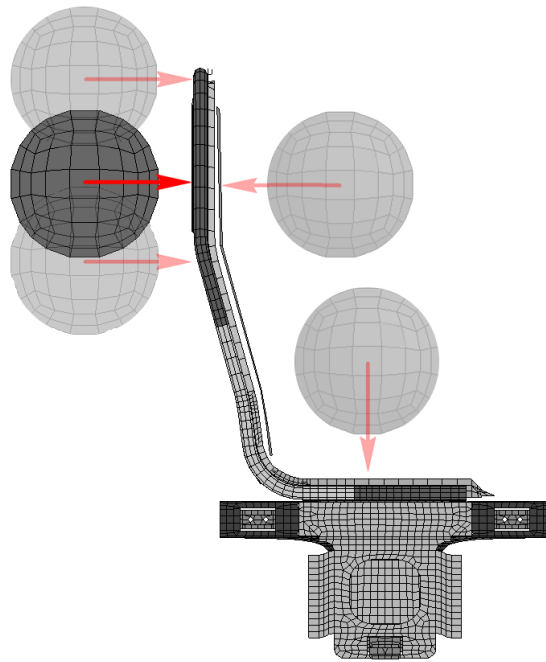


Figura 4.12: Diferentes posições da esfera nas análise de impacto com o assento

As várias etapas seguidas na construção do modelo numérico encontram-se esquematizadas no fluxograma da figura 4.13.

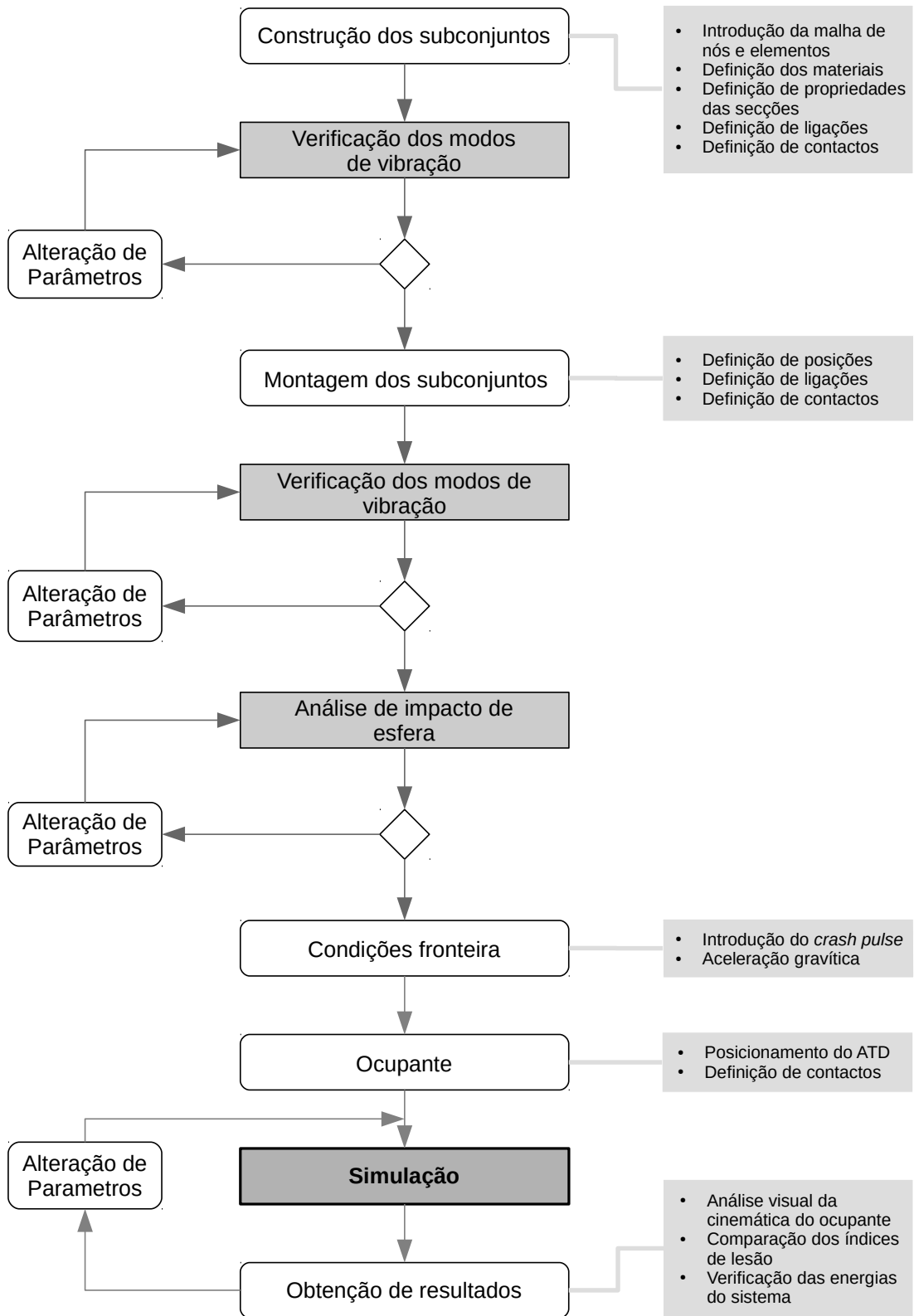


Figura 4.13: Etapas da construção do modelo numérico

Capítulo 5

Análise e Validação de Resultados

Na primeira parte deste capítulo serão apresentados os resultados de referência obtidos em ensaios anteriores ao presente estudo. São esses ensaios que servirão de orientação na construção e alteração de parâmetros da análise.

Após a construção do cenário, antes de proceder à execução da análise em *LS-DYNA*, existem ainda alguns parâmetros que devem ser especificados ou verificados não para as partes em concreto mas como definições gerais da análise. São esses parâmetros que são descritos e explicados na segunda parte deste capítulo dedicado à análise e validação de resultados.

Na terceira parte serão relatados os resultados das primeiras análises feitas ao cenário em estudo, assim como os procedimentos realizados e alterações efectuadas na tentativa de melhorar os resultados obtidos nessas análises.

Por fim, na última parte do capítulo, são apresentados os resultados obtidos na melhor das análises, resultados esses que, na mesma parte do capítulo, serão também comparados às medições feitas no ensaio experimental.

5.1 Resultados de Referência

As vantagens da utilização dos métodos numéricos estão constantemente dependentes da validação prática dos modelos que pretendem reproduzir. Para isso, é necessário realizar ensaios experimentais cujos resultados sirvam de guia para a alteração de parâmetros do modelo numérico assim como de comparação para avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelos métodos computacionais.

Nesta parte do capítulo são apresentados os resultados dos ensaios experimentais elaborados para o cenário em estudo e também os resultados do modelo numérico testado em *MADYMO*, sendo ambos valores de referência no desenvolvimento deste estudo.

5.1.1 Ensaio Experimental

Para a obtenção de dados experimentais foram realizados, nas mesmas condições, os ensaios E1 e E2 cujos resultados se apresentam na tabela 5.1 juntamente com os respectivos limites para os índices de lesão [6]. Considerando que não é de forma alguma aceitável, em termos de projecto, ter como referência valores para índices de lesão que possam resultar na morte dos passageiros que viajam no interior do comboio, os resultados dos ensaios experimentais são comparados aos limites graves desses índices, caso existam, ou

então aos limites dos ferimentos ligeiros, caso não exista o limite grave para o índice de lesão em questão [25].

Relativamente a esses limites é possível desde logo verificar pelos dados apresentados na tabela 5.1 que não são excedidos em nenhum dos índices de lesão, tanto no primeiro como no segundo ensaio, confirmando o facto do transporte ferroviário ser, de uma forma geral, bastante seguro para os ocupantes.

Tabela 5.1: Resultados do ensaio experimental [6]

Região do Corpo	Índice de Lesão	Ensaio		Limite		
		E1	E2			
Cabeça	Resultante da Aceleração (3ms)	482	561	784,8	[m/s ²]	
	HIC ₁₅	256,8	268,7	500		
Pescoço	Força Axial	1070	850	2770	[N]	
	Força de corte	1270	1300	1900	[N]	
	Momento Flector	42,9	46,2	57	[N.m]	
Tórax	Deformação do tórax	0	0	53,0	[mm]	
	VC	0	0	0,50		
	Deslocamento do	D	5,4	4	16,0	[mm]
	joelho	E	8,7	13,5	16,0	[mm]
Membros Inferiores*	Carga uniaxial fémur	D	2380	2450	7600	[N]
		E	1980	2480	7600	[N]
	TI	D	0,24	0,16	1,30	
		E	0,42	0,70	1,30	
	Carga axial tibia	D	1360	450	8000	[N]
		E	1000	560	8000	[N]

* D-Direito; E-Esquerdo

Um outro aspecto que importa analisar é o das diferenças de valores entre os dois ensaios realizados. Apesar de todos os esforços feitos e de terem sido adoptadas as melhores práticas no sentido de manter inalteradas as condições em que se realizaram os dois ensaios, as ligeiras variações na posição do modelo de ocupante e pequenas oscilações na curva de aceleração impossíveis de controlar podem resultar nas diferenças de valores entre os dois ensaios que se observam na tabela 5.1 [6]. Isto permite-nos realçar a importância da precisão do posicionamento do *dummy* tanto nos ensaios experimentais como nos numéricos, assim como a sensibilidade do sistema a este factor. Essas diferenças, não sendo expressivas em índices como a resultante da aceleração, HIC, força de corte e momento flector do pescoço e deformação do tórax, atingem, por outro lado, uma diferença próxima de 20% na força axial do pescoço no segundo ensaio relativamente ao primeiro, como se pode observar na tabela 5.2. No caso dos membros inferiores, as maiores divergências registam-se na determinação do índice da tibia (TI) cujos resultados para as pernas esquerda e direita são obtidos com diferenças de 67% e 33%, respectivamente, assim como da carga axial da tibia com desvios de 67% para a perna direita e 44% para a perna esquerda. Outro desvio significativo diz respeito ao deslocamento do joelho esquerdo cujas medições apresentam uma diferença de 55% entre os dois ensaios.

Tabela 5.2: Desvios entre os resultados do ensaio E1 relativamente ao ensaio E2

Região do Corpo	Índice de Lesão	Ensaio			Desvio Relativo		
		E1	E2				
Cabeça	Resultante da Aceleração (3ms)	482	561	[m/s ²]	16	%	
	HIC ₁₅	256,8	268,7		5	%	
Pescoço	Força Axial	1070	850	[N]	21	%	
	Força de corte	1270	1300	[N]	2	%	
	Momento Flector	42,9	46,2	[N.m]	8	%	
Tórax	Deformação do tórax	0	0	[mm]	0	%	
	VC	0	0		0	%	
Membros Inferiores*	Deslocamento do joelho	D	5,4	4	[mm]	26	%
		E	8,7	13,5	[mm]	55	%
	Carga uniaxial fémur	D	2380	2450	[N]	3	%
		E	1980	2480	[N]	25	%
	TI	D	0,24	0,16		33	%
		E	0,42	0,70		67	%
Carga axial tibia	D	1360	450	[N]	67	%	
	E	1000	560	[N]	44	%	

* D-Direito; E-Esquerdo

5.1.2 Modelo Numérico em MADYMO

Também no que diz respeito à análise realizada no *MADYMO* se verifica pelos dados da tabela 5.3 que nenhum dos limites para os índices de lesão foi excedido [6], indo ao encontro das conclusões retiradas do ensaio experimental. Para além disso, os índices de lesão da cabeça e momento flector do pescoço foram apurados com um desvio relativo próximo dos 10%. Para outros índices de lesão do pescoço os desvios entre resultados são de cerca de 20%, tendo sido obtidos para índices relativos aos membros inferiores alguns desvios inferiores aos 10%. Estes resultados permitiram validar o modelo numérico em *MADYMO* representado na figura 5.1 [6]. É de salientar que os valores dos ensaios experimentais de referência, segundo os quais foram calculados os desvios relativos apresentados na tabela 5.4, dizem respeito ao resultado mais distante do obtido numericamente, assumindo assim o maior erro para o modelo [6], [54].

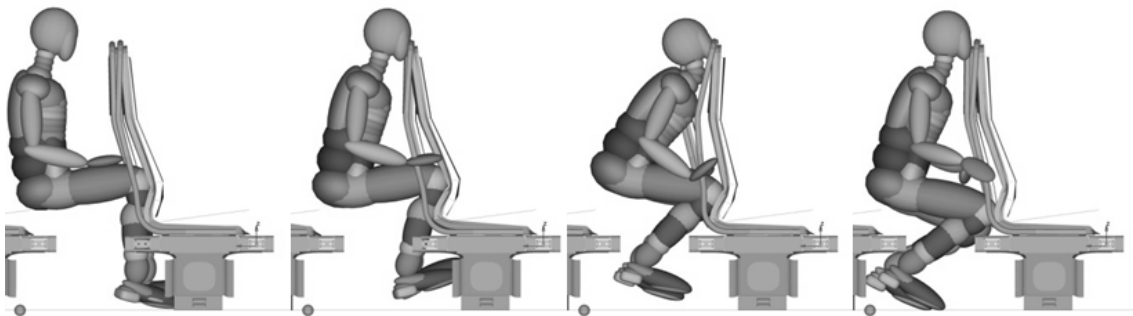


Figura 5.1: Posições do modelo de ocupante durante a simulação em *MADYMO* [6]

Tabela 5.3: Resultados da simulação numérica em *MADYMO* [6]

Região do Corpo	Índice de Lesão	Valor			
		MADYMO	Limite		
Cabeça	Resultante da Aceleração (3ms)		498	784,8	[m/s ²]
	HIC ₁₅		150	500	
Pescoço	Força Axial		1030	2770	[N]
	Força de corte		1614	1900	[N]
	Momento Flector		41,0	57	[N.m]
	N _{ij}		0,43	0,50	
Tórax	Deformação do tórax		0,186	53	[mm]
	VC		0,354	0,50	
Membros Inferiores*	Deslocamento do joelho	D	13,4	16,0	[mm]
		E	11,1	16,0	[mm]
	Carga uniaxial fémur	D	2901	7600	[N]
		E	2320	7600	[N]
	TI	D	0,90	1,30	
		E	0,70	1,30	
	Carga axial tibia	D	696	8000	[N]
		E	776	8000	[N]

* D-Direito; E-Esquerdo

Tabela 5.4: Desvio relativo entre resultados do ensaio experimental e simulação numérica em *MADYMO*

Índice de Lesão		Simulação Numérica	Ensaio Experimental		Desvio Relativo
Cabeça					
Aceleração Resultante (3ms)		50,78	57,2	[G]	-11 %
HIC ₁₅		238,6	268,7		-11 %
Pescoço					
Força de Corte		1614	1300	[N]	24 %
Força Axial		1030	850	[N]	21 %
Momento Flector (Max)		41,0	46,2	[N.m]	-11 %
Membros Inferiores*					
Força Axial Fémur	D	2320	2450	[N]	-5 %
	E	2901	2480	[N]	17 %
Deslocamento do Joelho	D	11,1	4,0	[mm]	178 %
	E	13,4	13,5	[mm]	-1 %
Força Axial Tibia	D	-776	-450	[N]	72 %
	E	-696	-550	[N]	27 %
TI	D	0,70	0,16		678 %
	E	0,90	0,70		350 %

* D-Direito; E-Esquerdo

5.2 Parâmetros Gerais da Análise

Em análises dinâmicas, o *LS-DYNA* utiliza um método de integração explícito pelo que a sua estabilidade está dependente do incremento de tempo (Δt). A utilização do método das diferenças finitas centrais implica que o incremento de tempo crítico da análise está limitado pela frequência natural (ω) mais alta do elemento, respeitando a condição

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \quad (5.1)$$

Durante a solução, o programa percorre todos os elementos deformáveis do modelo para determinar o seu valor escolhendo o valor mínimo de entre todos esses elementos [47].

$$\Delta t^{n+1} = a \cdot \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N\} \quad (5.2)$$

onde

N é o número de elementos

a é um factor de escala

Para garantir a estabilidade do método de integração explícito, é recomendado atribuir ao factor de escala o valor de 0,9, valor esse que não foi alterado para o cálculo da presente análise.

Cada um desses valores de incremento de tempo corresponde ao valor crítico calculado pela condição de Courant-Friedrichs-Lewy que define que o incremento de tempo explícito deve ser menor que o tempo necessário por uma onda à velocidade do som para percorrer o elemento. Essa condição é descrita pela fórmula

$$\Delta t_{crit} = \frac{L_e}{c} \quad (5.3)$$

em que

L_e corresponde ao comprimento característico do elemento

c corresponde à velocidade de propagação da onda

No caso dos elementos sólidos de 8 nós, o comprimento característico é da forma

$$L_e = \frac{v_e}{A_{e\max}} \quad (5.4)$$

sendo

v_e é o volume do elemento

$A_{e\max}$ é a área da maior face do elemento

Por outro lado, para os elementos *shell* de 4 nós o comprimento característico é calculado por

$$L_e = \frac{A_s}{\max(L_1, L_2, L_3, L_4)} \quad (5.5)$$

sendo

A_s a área do elemento

$\max(L_1, L_2, L_3, L_4)$ o comprimento do maior dos lados que definem o elemento

As velocidades de propagação da onda, para os casos de elementos sólidos, c_{solido} , e $shell$, c_{shell} , são dados por

$$c_{solid} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad c_{shell} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu)\rho}} \quad (5.6)$$

onde

E é o módulo de Young

ν é o coeficiente de Poisson

ρ é a densidade

Nas análises realizadas, o menor incremento de tempo crítico calculado, que deveria ser usado na simulação, pertencia a elemento *beam* do subconjunto do modelo do ocupante que servia de ligação entre duas partes do tórax e tinha o valor de $9,5059 \times 10^{-5} ms$. No entanto, na análise foi mantido um cartão de comando existente no código do *dummy* que definia um valor mínimo para o incremento de tempo de $5,555 \times 10^{-4} ms$, ao qual é aplicado o factor de escala de 0,90 e se obtém o incremento de tempo global inicial da análise de $4,9995 \times 10^{-4} ms$. No caso dos elementos terem um incremento de tempo crítico inferior ao definido, é-lhes atribuída uma massa que faça o valor crítico corresponder ao valor definido. No entanto, a alteração da massa do sistema afecta o resultado final da análise pelo que deve ser feita a verificação da percentagem de massa adicionada e a sua influência no resultado.

O aumento do valor incremento de tempo é uma preocupação comum em integrações explícitas, às quais estão associadas longos tempos de análise, com o objectivo de reduzir esses mesmos tempos. Pelo mesmo motivo, procura-se, sempre que possível, optar por elementos de integração reduzida que requerem menores recursos computacionais. No entanto, na ocorrência de grandes deformações, os elementos *shell* de 4 nós e os elementos sólidos (à excepção dos tetraedros) com um só ponto de integração estão sujeitos a sofrer deformações específicas que para as quais a tensão é nula e portanto não geram energia de deformação, sendo por isso chamados modos de energia zero. Nestes casos, uma vez que neste modo deixa de ter rigidez, o elemento torna-se incapaz de resistir à deformação. Em malhas menos refinadas, o modo de energia zero pode propagar-se pela malha produzindo resultados inválidos [55] e, nalguns casos, elementos de volume negativo [56]. Existem 12 modos de energia zero (*hourglassing modes*) para elementos sólidos, quatro dos quais representados na figura 5.2, e 5 para os elementos *shell* de integração reduzida [57].

Contudo, se a redução do tempo de análise for significativa, é possível utilizar este tipo de elementos com integração reduzida, desde que sejam tomadas medidas para controlar e avaliar as energias associadas a estes modos de deformação. Esse controlo passa por adicionar um amortecimento viscoso ou pequena rigidez elástica capaz de resistir ao *hourglassing* mas tendo um efeito insignificante sobre os modos globais estáveis [47]. No *LS-DYNA* o controlo do *hourglass* pode ser feito de forma geral através do comando `*CONTROL_HOURGLASS` Alternativamente, pode ser atribuído a uma parte em particular,

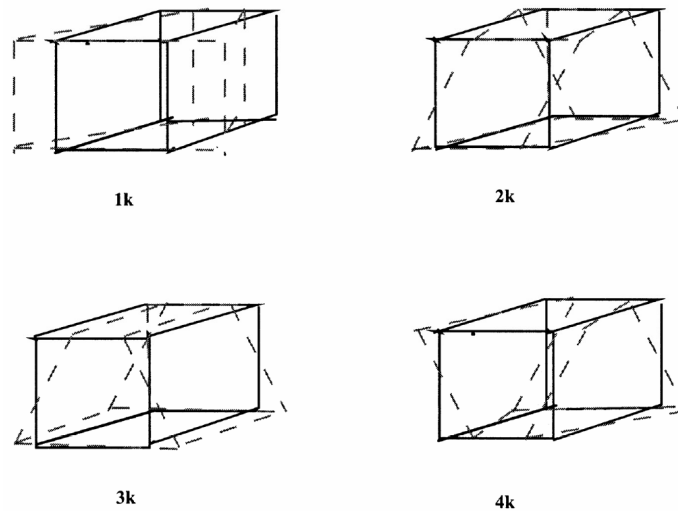


Figura 5.2: Quatro modos de energia zero para elementos sólidos de 8 nós com 1 ponto de integração [57]

adicionando o comando `*HOURGLASS` no qual se define a formulação e os parâmetros desejados e utilizando a sua identificação no parâmetro `HGID` do cartão de definição da parte, sendo que este último, existindo, se sobrepõem à definição geral de *hourglass*. No presente caso de estudo, diversas partes que compõem o subconjunto do modelo numérico do ocupante tinham definições próprias para os parâmetros de controlo de *hourglass*. As partes constituintes dos restantes subconjuntos, no entanto, estavam inicialmente abrangidas pelo comando geral de controlo dos modos de energia zero. Esse comando implementava o controlo do tipo 1 com um coeficiente de 0,1. O controlo do tipo 1 implementa uma formulação viscosa *standard* do *LS-DYNA* que corresponde ao algoritmo menos dispendioso, mas que geralmente não é o mais eficaz [58].

5.3 Análise Inicial e Alteração de Parâmetros

As primeiras análises efectuadas permitiram desde logo identificar alguns problemas que requeriam algumas alterações ao modelo para a realização de novas análises:

- Elementos *shell* com volume negativo
- Valor elevado de energia de *hourglass*
- Valores dos índices de lesão sem correspondência com os resultados experimentais
- Falha na ligação entre duas partes no decorrer da análise
- Contacto entre a cabeça do modelo de ocupante e o assento dianteiro não ocorria no local próprio

Numa avaliação visual observou-se que o posicionamento do modelo numérico de ATD deveria ser rectificado, tendo em conta que não correspondia devidamente ao observado no ensaio experimental. Como se pode verificar na figura 5.3, a zona da cabeça

que entra em contacto com o banco da frente no momento do impacto deveria ser superior à que se demonstrava. A rectificação da posição passou pela alteração do plano do assento (parte 6922) descendo-o ligeiramente e mudando o ângulo que fazia com o plano horizontal.

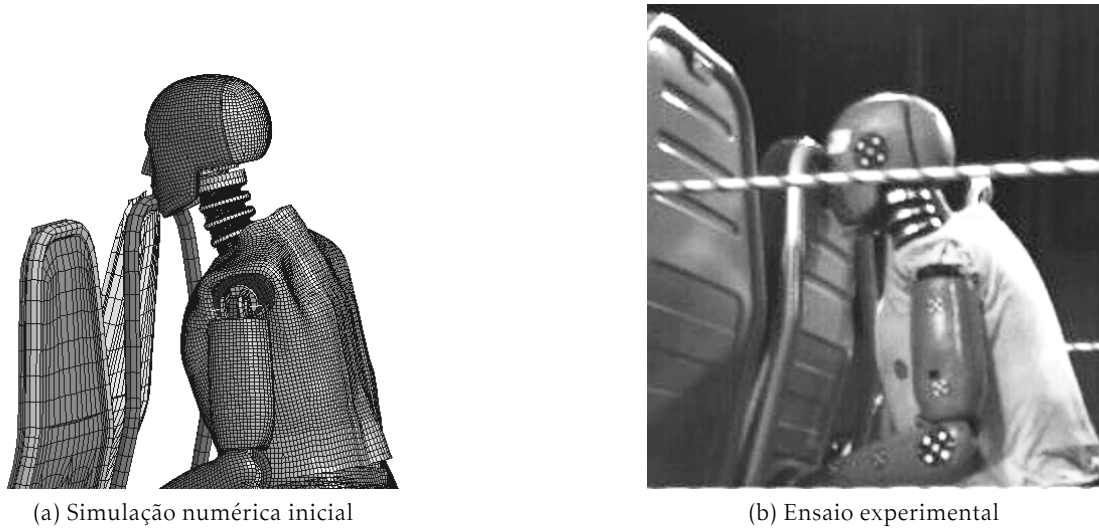


Figura 5.3: Posição da cabeça do modelo de ocupante no momento do impacto

Na nova configuração a zona de impacto foi corrigida mas um outro problema surgia. Esse problema relacionava-se com a definição dos parâmetros de ligação entre as partes 14 e 19, uma vez que a mesma ligação falha e as partes se soltam indevidamente, como se observa na figura 5.4.

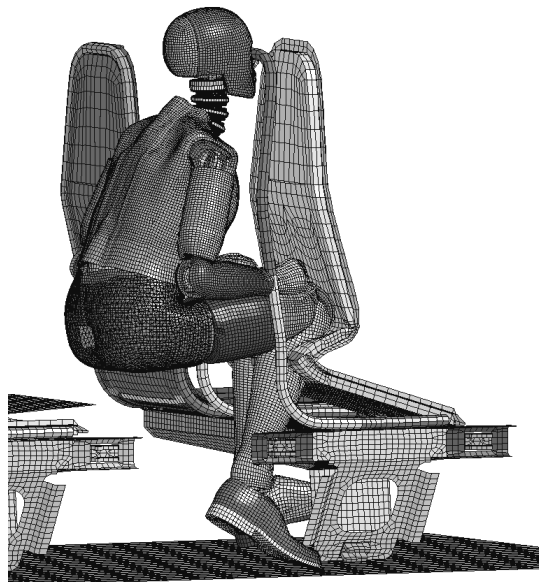


Figura 5.4: Falha na ligação entre as partes 14 e 19 na simulação numérica inicial

Para evitar penetrações iniciais, uma ligeira distância tinha sido deixada entre o ATD e o plano do assento. No entanto, verificou-se que durante a análise, quando por acção da

gravidade o *dummy* atingia o plano do assento, ocorriam uma série de pequenos ressaltos que tinham uma ligeira influência na posição de contacto entre a cabeça e o assento dianteiro e na aceleração da mesma. Para além disso, o HIC, um dos índices de lesão mais importantes da análise, representado no gráfico da 5.6, estava longe dos valores obtidos nos ensaios experimentais. Para corrigir a situação, optou-se por iniciar a curva de aceleração (*crash pulse*) apenas após 75ms de análise, estando o ocupante, durante esse período de tempo, sujeito apenas à acção da gravidade, dando dessa forma oportunidade ao passageiro para ocupar a sua posição no assento. A posição final obtida é mostrada na figura 5.6a e comparada com a posição do ATD experimental na figura 5.6b.

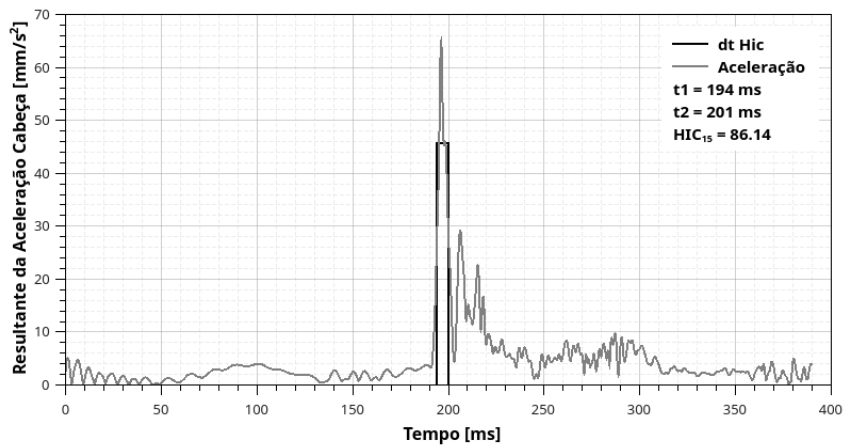


Figura 5.5: Aceleração resultante e HIC obtidos nas análises iniciais

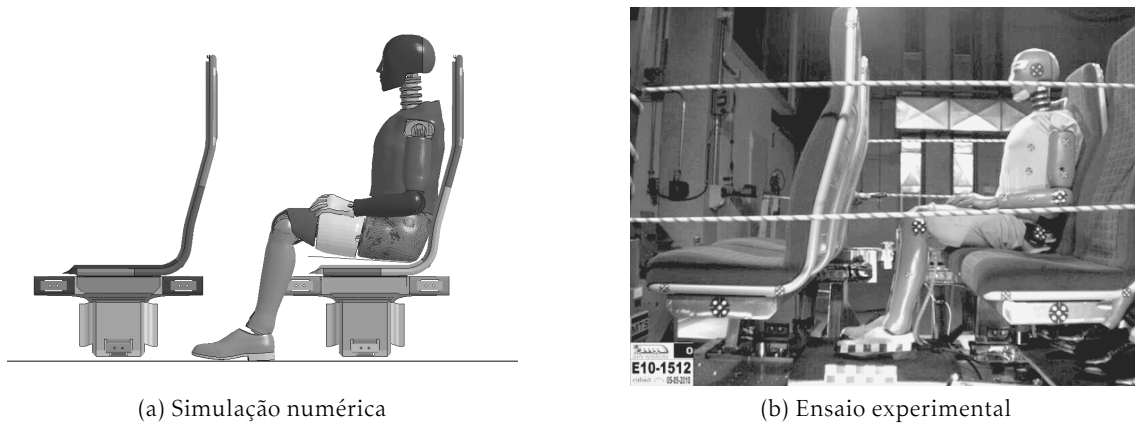


Figura 5.6: Posição final do modelo de ocupante

Após a correcção do posicionamento do *dummy*, constatou-se que em ambas as simulações, os primeiros elementos com volume negativo apareceram ao milissegundo 132,5 da análise e pertenciam a uma das partes que constituem a perna esquerda do modelo numérico do ocupante. Até ao final da simulação, mais elementos foram calculados como tendo volume negativo, distribuídos por ambas as pernas, braços, mãos e tronco do ATD, contando-se no total 207 elementos nesta situação. Esses elementos não faziam a análise terminar precocemente apenas por terem sido definidos os parâmetros NFAIL1=1 e NFAIL4=1 no cartão de comando *CONTROL_SHELL. Esses parâmetros indicam ao pro-

grama que deve eliminar os elementos *shell* de integração reduzida e completa, imprimindo uma mensagem sempre que estes apresentem grandes distorções, impedindo-os de causar instabilidades que resultem numa terminação em erro da análise [45].

Por fim, o valor da energia de *hourglass* era de aproximadamente 25% da energia interna do sistema, quando não deveria ser superior aos 5% da mesma, sendo este valor admitido neste tipo de simulações [56].

Numa tentativa de evitar o aparecimento do cálculo de volumes negativos em elementos foi testado o método proposto por [59]. No seu trabalho, o autor fazia a simulação em *LS-DYNA* de um acidente automóvel no qual utilizava um modelo numérico de ocupante semelhante ao usado no presente modelo. No entanto, no modelo do autor o *dummy* tinha o seu movimento guiado pelo cinto de segurança e o problema de volumes negativos estava limitado a um contacto entre o pé e o chão do cenário. Para resolvê-lo, o autor fez algumas mudanças nas propriedades dos elementos com material nulo que partilhavam nós com as partes que apresentavam problemas, aumentado o valor do módulo de Young do material das partes (passando de $0,4\text{kg/mm}^3$ para 10kg/mm^3) e alterando também a espessura dos elementos (de $0,01\text{mm}$ para 1mm). O mesmo método foi testado no modelo em estudo usando, numa primeira abordagem, os valores utilizados em [59], com a diferença de, neste caso, serem alterados elementos de várias partes do *dummy*. Contudo o procedimento revelou-se ineficaz neste caso, com os primeiros elementos negativos a surgir aos 3ms da análise que terminava em erro aos $12,5\text{ms}$ devido a um volume negativo num elemento sólido de uma das partes da perna do ATD, com um total de 119 elementos *shell* igualmente com volume negativo e uma energia de *hourglass* superior à energia interna do sistema. Outras análises foram feitas usando o mesmo método com diferentes valores e com os mesmos valores com um incremento de tempo inferior sem que no entanto se verificassem melhorias.

Foi de seguida testada uma outra abordagem na qual se procurava aumentar a rigidez dos elementos que se mostravam instáveis [60]. Nesses elementos era usado o modelo de material **MAT_LOW_DENSITY_FOAM*, habitualmente utilizado para modelar espumas altamente compressíveis de baixa densidade [48]. Na definição de materiais deste modelo é introduzido um conjunto de pontos para caracterizar a curva de tensão-extensão que foi alterada conforme se mostra na figura 5.7. Como se pode verificar, a curva inicial estava apenas definida até um valor máximo de compressão de 90%. Se durante a análise o material for sujeito a valores superiores de compressão, o programa irá extrapolar os valores de tensão-extensão com base no último declive da curva definido. Por esse motivo, foram introduzidos valores altos de tensão para os valores de extensão mais próximos de 1. Porém, este método não teve o resultado desejado e a análise terminou aos $232,7\text{ms}$ ($157,7\text{ms}$)¹ devido a volumes negativos em elementos sólidos.

Considerou-se então que a curva se alterava de forma demasiado acentuada para os valores mais altos de deformação. Foi por isso criada uma nova curva na qual se aumentava a tensão para valores mais baixos de deformação e com um declive menos acentuado para os valores mais altos relativamente à primeira alteração (figura 5.8). Os valores introduzidos para a definição das três curvas podem ser consultados na tabela 5.5.

Com a nova curva a análise terminava no tempo definido e número de elementos negativos diminui para 157. No entanto, era calculado um HIC de 402 e a energia de *hourglass* era de cerca de 36% da energia interna do sistema, o que invalidava a análise.

¹O valor mais alto refere-se ao tempo efectivo da análise em *LS-DYNA*. O menor valor corresponde à subtração dos 75ms de posicionamento do ATD ao tempo efectivo da análise para melhor relação com os instantes do ensaio experimental

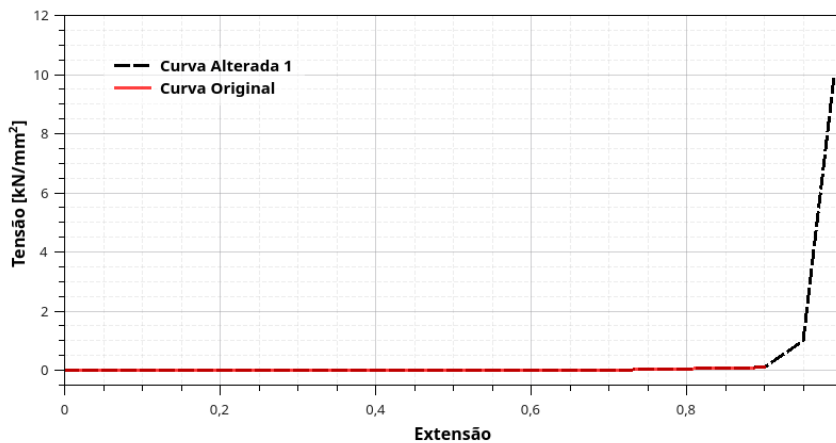


Figura 5.7: Primeira alteração à curva tensão-extensão do material *MAT_LOW_DENSITY_FOAM

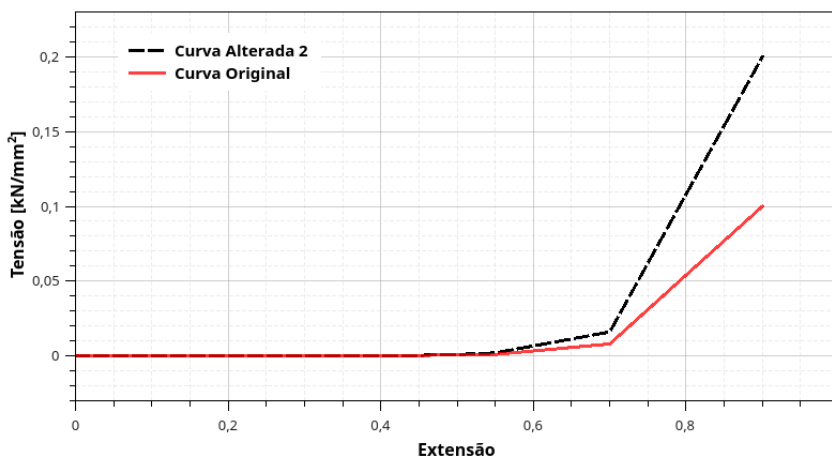


Figura 5.8: Segunda alteração à curva tensão-extensão do material *MAT_LOW_DENSITY_FOAM

Tornou-se claro que para conseguir análises com resultados aceitáveis seria necessário, em primeiro lugar, encontrar uma forma de controlar os modos de energia zero. Numa primeira fase, procurou-se alterar a formulação de controlo de *hourglass* para algumas partes em particular, como as que tinham elementos que apresentassem volumes negativos ou as partes do ocupante que tinham contactos definidos com os outros subconjuntos. Essas alterações, por si só, faziam variar muito pouco o resultado final da análise e tinham pouco peso na diminuição final da energia de *hourglass*. Foi por isso necessário adoptar um novo método, tendo sido seguida a seguinte abordagem:

1. Foram retirados os controlos de *hourglass* particulares das partes que os tinham definidos
2. Foram escritos seis ficheiros de análise, cada um com uma formulação diferente para o controlo de *hourglass* definido como parâmetro geral para todas as partes
3. Para cada análise, foram traçados os gráficos da energia de *hourglass* de cada uma das partes que apresentava modos de energia zero, como por exemplo os gráficos da figura 5.9

Tabela 5.5: Pontos para a definição das curvas tensão-extensão do material *MAT_LOW_DENSITY_FOAM

ε	Curva		
	Original	Alterada 1	Alterada 2
	σ [kN/mm ²]	σ [kN/mm ²]	σ [kN/mm ²]
0,000	0,00	0,00	0,00
0,350	$1,17 \times 10^{-4}$	$1,17 \times 10^{-4}$	$1,17 \times 10^{-4}$
0,400	$2,00 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-4}$
0,450	$3,70 \times 10^{-4}$	$3,70 \times 10^{-4}$	$3,70 \times 10^{-4}$
0,500	$6,00 \times 10^{-4}$	$6,00 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-4}$
0,550	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$
0,700	$8,00 \times 10^{-3}$	$8,00 \times 10^{-3}$	$16,00 \times 10^{-3}$
0,900	0,10	0,10	0,20
0,950	—	1,00	—
0,990	—	10,0	—

4. Para cada uma das partes, verificou-se qual a formulação de *hourglass* que apresentava melhores resultados (menor valor de energia de *hourglass*)
5. Foi escrito um novo ficheiro no qual para cada parte se definia a melhor formulação de *hourglass* encontrada e foi realizada a análise desse ficheiro

As seis formulações testadas correspondem a controlos de *hourglass* do tipo 1 a 6 definidos no cartão de comando *HOURGLASS do LS-DYNA. Esses tipos de controlo de *hourglass* são baseados nas seguintes formulações:

Tipo 1: Formulação viscosa *standard* do LS-DYNA

Tipo 2: Formulação viscosa Flanagan-Belytschko

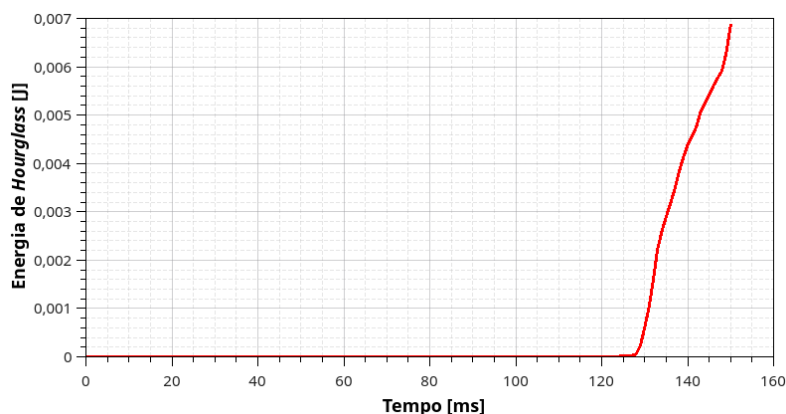
Tipo 3: Formulação viscosa Flanagan-Belytschko com integração exacta de volume para elementos sólidos

Tipo 4: Formulação rígida Flanagan-Belytschko

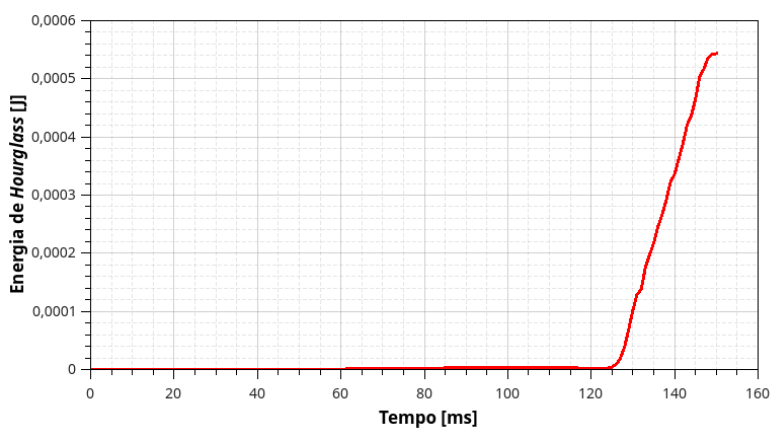
Tipo 5: Formulação rígida Flanagan-Belytschko com integração exacta de volume para elementos sólidos

Tipo 6: Formulação co-rotacional Belytschko-Bindeman para elementos sólidos 2D e 3D.

Com esta abordagem foi possível, desde logo, diminuir significativamente a energia de *hourglass* da análise. Notou-se que, se algumas das partes tinham um controlo de *hourglass* adequado a este tipo de análise, outras, como é o caso da parte com o ID 50800010, podiam ter uma grande redução neste tipo de energia. A parte 50800010 é uma das partes que constituem a perna direita do modelo de ocupante e, não tendo definido um controlo específico, é abrangida pela formulação geral de controlo de *hourglass*, neste caso do tipo 1 com coeficiente 0,1. No entanto, como se mostra na figura 5.9, com uma formulação do tipo 4 essa energia podia ser reduzida para menos de 10% do seu valor.



(a) Formulação do tipo 1



(b) Formulação do tipo 4

Figura 5.9: Resultado da alteração da formulação de *hourglass* na parte 50800010

No total, foram revistas as formulações de *hourglass* de 97 partes, tendo a maioria sofrido alterações no tipo de controlo. Com isso foi possível reduzir a energia de *hourglass* de 25% para cerca de 2,9% da energia interna do sistema, abaixo dos 5% admitidos para este tipo de simulação [56].

No entanto, a alteração do tipo de formulação da energia de *hourglass* não garantiu por si só a melhoria da análise no seu todo. Com as novas formulações, a análise terminava aos 278,5ms (203,5ms) com erro devido ao cálculo de volume negativo num elemento *solid* pertencente a uma parte da cabeça do *dummy* e o HIC obtido era de 397.3. Para eliminar esse problema, foi usado o parâmetro SOFT=2 na definição dos contactos entre a cabeça e as partes do assento. Com o objectivo de aproximar os valores dos índices de lesão aos obtidos experimentalmente e diminuir o número de ocorrências de elementos com volume negativo foram ainda testadas outras alterações aos parâmetros dos diversos contactos. A análise com melhor correspondência de valores foi conseguida utilizando o parâmetro SOFT=2 também para os contactos entre mãos e assento, atribuindo o valor 2 para o parâmetro SFSF (*scale factor for slave surface thickness*) nos contactos entre pernas e assento, pernas e plataforma de suporte e mãos e assento, assim como o valor 0,5 ao parâmetro SFS (*scale factor on default slave penalty stiffness*) nos contactos entre mãos e assento. Os resultados dessa análise serão apresentados no sub-capítulo seguinte.

5.4 Resultados do Modelo Numérico em LS-DYNA

Para proceder à simulação de 465ms (390ms) foram necessárias 27 horas de tempo de análise utilizando 8 CPU i7-3820 de 3,60GHz.

Os resultados obtidos na análise, apresentados na tabela 5.6, são comparados aos valores dos índices de lesão medidos no primeiro ensaio experimental, uma vez que a curva de aceleração utilizada na construção do modelo numérico corresponde igualmente à medida no primeiro ensaio. À semelhança do que aconteceu com o ensaio experimental e a simulação numérica em *MADYMO*, também os resultados da análise em *LS-DYNA* apresentam valores para os índices de lesão abaixo dos limites considerados. Relativamente à proximidade dos resultados obtidos em *LS-DYNA* com os verificados experimentalmente, observa-se que os desvios para os diferentes índices de lesão apresentam comportamentos um pouco irregulares. O índice de lesão da cabeça é calculado com elevada precisão, apresentando um desvio relativo praticamente nulo. No caso dos índices de lesão do pescoço, os desvios variam entre os 27% e os 80%. Para os membros inferiores, os piores resultados verificam-se para a força uniaxial do fémur esquerdo e para a força de compressão da parte inferior da tibia esquerda. Por outro lado a uniaxial do fémur direito, o deslocamento do joelho direito e a compressão da parte superior da tibia esquerda constituem uma boa aproximação aos valores experimentais.

Tabela 5.6: Resultados da simulação numérica em *LS-DYNA*

Índice de Lesão		Simulação Numérica	Ensaio Experimental		Desvio Relativo
Cabeça					
HIC ₁₅		256,2	256,8		-0,2 %
Pescoço					
Força de Corte (Max)		1,97	1,27	[kN]	55 %
Força de Corte (Min)		-0,07	-0,05	[kN]	40 %
Força de Tracção		0,87	0,60	[kN]	45 %
Força de Compressão		-0,21	-1,07	[kN]	-80 %
Momento Flector (Max)		20,9	42,9	[N.m]	-51 %
Momento Flector (Min)		-20,5	-16,2	[N.m]	27 %
Membros Inferiores*					
Força de Tracção Fémur	D	0,135	0,14	[kN]	-3,5 %
	E	0,19	0,07	[kN]	171 %
Força de Compressão Fémur	D	-2,87	-2,38	[kN]	20,6 %
	E	-4,45	-1,98	[kN]	125 %
Deslocamento do Joelho	D	-5,7	-5,4	[mm]	5,5 %
	E	-12,4	-8,7	[mm]	42,5 %
Compressão Tibia (sup)	D	-1,52	-1,05	[kN]	44,8 %
	E	-0,83	-0,82	[kN]	1,2 %
Compressão Tibia (inf)	D	-1,86	-1,36	[kN]	36,8 %
	E	-2,87	-1,0	[kN]	187 %

* D-Direito; E-Esquerdo

Para além da correspondência entre os valores máximo dos resultados, é possível verificar a evolução da aceleração da cabeça do ocupante ao longo do tempo de análise

através do gráfico da figura 5.10 na qual se pode igualmente observar que os picos das curvas do ensaio experimental e da simulação numérica coincidem de forma bastante precisa no tempo.

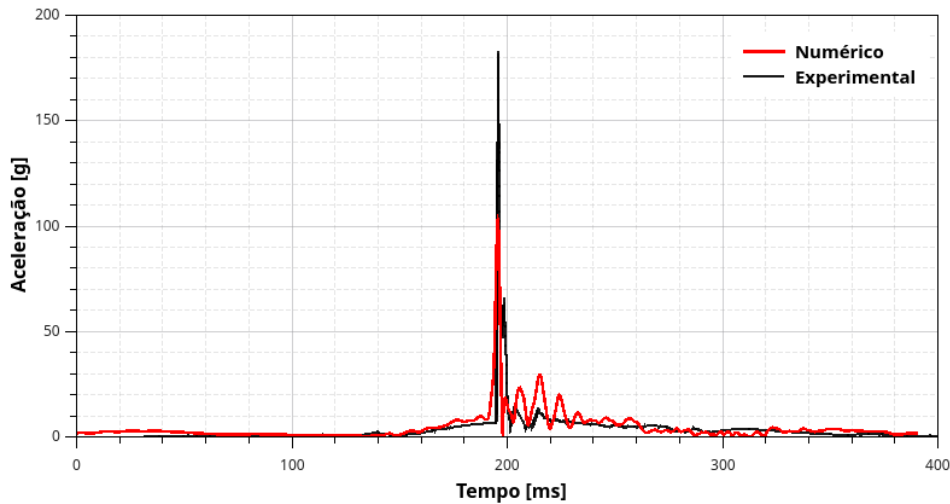


Figura 5.10: Resultante da Aceleração

É também possível, por outro lado, avaliar a qualidade dos resultados obtidos através da correspondência entre a cinemática do ocupante no interior do comboio no ensaio experimental e na simulação numérica durante o período de tempo considerado. Na figura 5.11 podemos comparar o deslocamento do ocupante em quatro fases diferentes da aceleração simulação efectuada, sendo possível notar a correlação para cada instante entre os resultados da análise numérica e os resultados do ensaio experimental. Alguma divergência verifica-se, contudo, no caso do movimento das mãos e antebraços que se afastam de forma evidente relativamente ao movimento observado durante os ensaios experimentais. Para melhorar a correspondência da cinemática das mãos e antebraços, à posição do ocupante foram implementadas as alterações descritas na tabela 5.7.

Tabela 5.7: Alteração aos ângulos de rotação para posicionamento do modelo de ocupante

Parte	Ângulo de Rotação	Eixo	Figura ^a
Pescoço/Cabeça	-2 °	X1	A.9
Cotovelo esquerdo	-28 °	X5	A.9
Braço esquerdo (inferior)	-84 °	-	-
Pulso esquerdo	-44 °	-	-
Cotovelo direito	28 °	-	-
Braço direito (inferior)	84 °	X8	A.9
Pulso direito	44 °	X9	A.9

^a Consultar anexo A.3

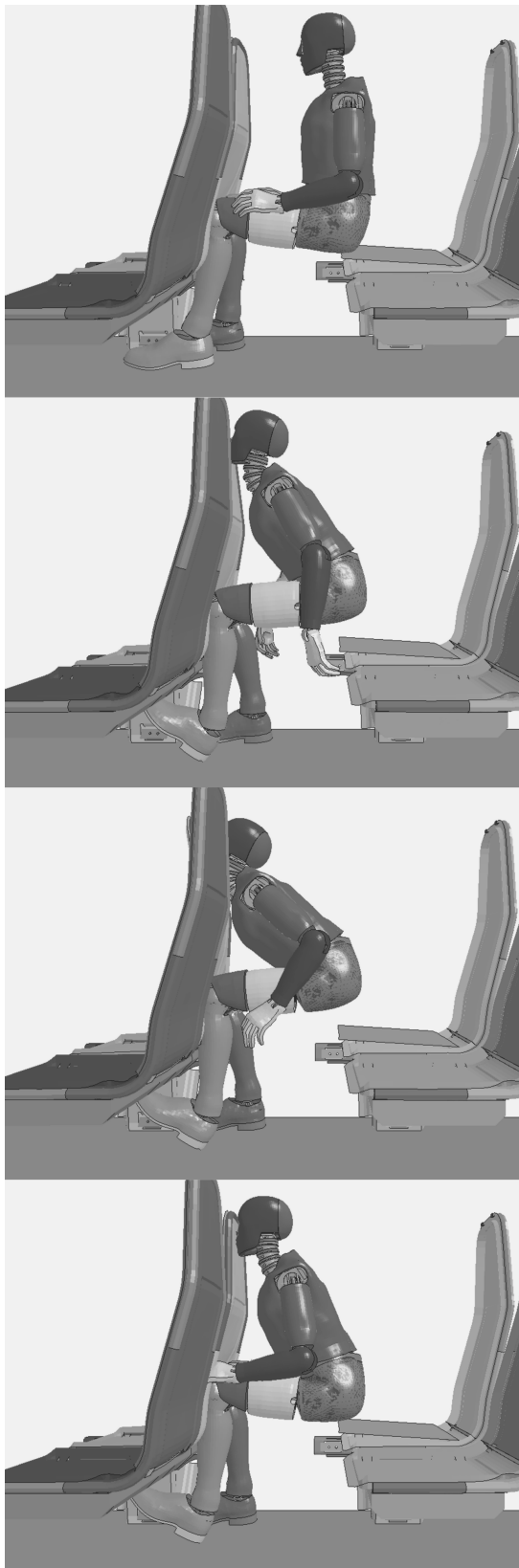
Estas alterações ao posicionamento produziram algumas alterações aos resultados dos índices de lesão que se apresentam na tabela 5.8, tendo-se verificado melhoria na correlação de resultados para alguns índices de lesão e maiores divergências para outros. Em termos de cinemática do ocupante, as melhorias consideráveis podem ser observadas na figura 5.12.

Os gráficos dos índices de lesão ao longo da análise, tanto no caso da análise inicial como para a análise com a alteração de posição podem ser consultados nos anexos B.1 e B.2, respectivamente.

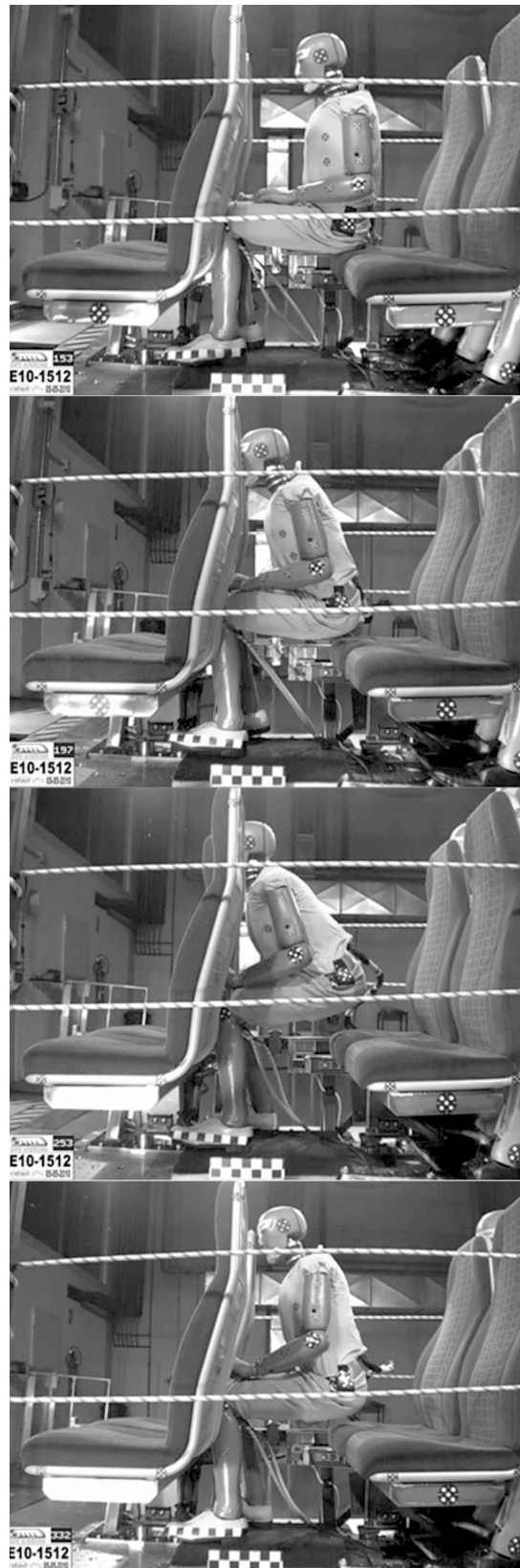
Tabela 5.8: Resultados da simulação numérica em *LS-DYNA* com posição corrigida

Índice de Lesão		Simulação Numérica	Ensaio Experimental		Desvio Relativo
Cabeça					
HIC ₁₅		272,3	256,8		6,2 %
Pescoço					
Força de Corte (Max)		1,85	1,27	[kN]	46 %
Força de Corte (Min)		-0,13	-0,05	[kN]	160 %
Força de Tracção		1,08	0,60	[kN]	80 %
Força de Compressão		-0,60	-1,07	[kN]	-44 %
Momento Flector (Max)		37,8	42,9	[N.m]	-11,9 %
Momento Flector (Min)		-19,7	-16,2	[N.m]	21,6 %
Membros Inferiores*					
Força de Tracção Fémur	D	0,22	0,14	[kN]	57 %
	E	0,29	0,07	[kN]	314 %
Força de Compressão Fémur	D	-2,94	-2,38	[kN]	24,1 %
	E	-4,18	-1,98	[kN]	111 %
Deslocamento do Joelho	D	-5,3	-5,4	[mm]	-1,85 %
	E	-11,4	-8,7	[mm]	31 %
Compressão Tíbia (sup)	D	-1,41	-1,05	[kN]	34,3 %
	E	-0,81	-0,82	[kN]	-1,2 %
Compressão Tíbia (inf)	D	-1,75	-1,36	[kN]	28,7 %
	E	-2,94	-1,0	[kN]	194 %

* D-Direito; E-Esquerdo



(a) Simulação numérica



(b) Ensaio experimental

Figura 5.11: Posições do modelo de ocupante durante a simulação numérica e ensaio experimental



Figura 5.12: Posições do modelo de ocupante durante a simulação numérica com correcção de posição e ensaio experimental

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

No desenvolvimento deste trabalho foi construído o modelo numérico do interior de uma carruagem de comboio que permitisse reproduzir um ensaio experimental realizado com a finalidade de prever as lesões sofridas pelos passageiros em caso de acidente. A análise desse modelo através do código *LS-DYNA* permitiu verificar a existência de uma boa correlação entre os valores medidos no ensaio experimental e os obtidos através do modelo computacional para o HIC, o índice de lesão mais importante no estudo da segurança nos transportes e com o qual se relaciona mais directamente a probabilidade de sobrevivência dos passageiros. Nesse sentido, este trabalho junta-se a diversos outros na confirmação da viabilidade dos métodos computacionais e importância que os mesmos assumem no estudo da segurança nos transportes.

No entanto, alguns dos índices de lesão apresentam ainda algum desvio relativamente aos resultados experimentais que poderia ser melhorado no âmbito de trabalhos futuros. Neste trabalho, foram testadas algumas alterações de parâmetros com vista à melhoria da correspondência entre resultados. Porém, essas alterações eram escolhidas com base no resultado de alterações anteriores e por vezes, quando era necessário aplicar um conjunto de várias alterações, os resultados tornavam-se difíceis de prever. Seria por isso interessante procurar uma forma metódica para abordar o problema de implementação das alterações com o objectivo de melhorar a correlação entre os resultados, minimizando o desvio relativo entre os índices numéricos e experimentais.

A impossibilidade de testar de forma mais precisa o efeito da alteração de certos parâmetros deve-se, em parte, aos tempos de análise necessários para efectuar a simulação de cada implementação. Por outro lado, foi necessário direccionar grande parte do tempo e esforço dispendidos neste trabalho para a adaptação do modelo numérico de ocupante disponibilizado pelo *LS-DYNA* ao tipo de ensaio que se pretendia realizar. Nesse aspecto, este estudo poderá servir de orientação a trabalhos futuros nomeadamente para a análise de métodos para minimizar a ocorrência de volumes negativos e diminuição da energia de *hourglass* neste tipo de modelo numérico de ocupante.

A elaboração dos estudos propostos permitiria conhecer a melhor forma para construir cenários facilitando a análise de alterações. Dessa forma seria possível avaliar, por exemplo, a influência de factores como a distância entre filas de assentos ou características materiais dos componentes que constituem os bancos na gravidade das lesões sofridas pelos ocupantes em caso de acidente. Poderiam igualmente ser testadas diferentes configurações para a disposição dos assentos no interior do comboio.

Para além do modelo numérico do ATD utilizado neste estudo, o *LS-DYNA* disponibiliza uma variedade de modelos de ocupantes que poderiam ser utilizadas no mesmo cenário em trabalhos posteriores. Particularmente, poderia ser feito o estudo das lesões sofridas caso o ocupante tivesse uma diferente estatura física, incluindo a estatura de crianças, utilizando para isso os modelos *Hybrid III 95th percentil male*, *5th percentil female* e *6-year-old child*. Poderiam ainda ser utilizados as versões *rigid* e *fast* do modelo *Hybrid III 50th percentil male* com o objectivo de estudar as diferenças em termos de resultado das lesões e dessa forma avaliar a vantagem que se pode obter na utilização dessas versões de modelo numérico de ocupante.

Por outro lado, no sentido de tirar melhor partido do método dos elementos finitos na análise do interior da carruagem, sugere-se para trabalho futuro um estudo para verificação das deformações sofridas pelos bancos e restante estrutura dos assentos durante o impacto, podendo ser avaliada a introdução de novos materiais e/ou reconfigurar a estrutura e tipo de fixação da mesma à carruagem.

Não ignorando o facto de que o objectivo final deste tipo de investigação é sempre a melhoria da segurança dos passageiros propõe-se ainda o estudo da utilização de dispositivos nos bancos que permitam reduzir a gravidade de lesões sofridas em caso de acidente.

A aceitação geral do facto do transporte ferroviário ser relativamente seguro leva a que o estudo, investigação, desenvolvimento e inovação na segurança passiva no interior dos comboios sejam muitas vezes negligenciados. Essa aceitação é desde logo assumida a nível do Conselho Europeu que nas directivas Europeias relativas à segurança do transporte ferroviário Europeu não impõe normas específicas à segurança passiva no interior das carruagens. As ETI definem com precisão os critérios de segurança passiva para o exterior das carruagens. No entanto, a integridade estrutural do comboio e a manutenção do espaço de sobrevivência dos ocupantes não garantem, por si só, a integridade física e sobrevivência dos mesmos. Apesar dos estudos não preverem a morte dos passageiros no caso de estudo, a dificuldade na evacuação dos feridos juntamente com o tempo decorrido até à prestação dos primeiros socorros às vítimas podem reduzir as probabilidades de sobrevivência mesmo para as lesões que, noutra situação, não seriam avaliadas como críticas. A última nota dirige-se assim à proposta de melhoria das directivas existentes para que a falha legislativa actual não tenha como consequência a perda de vidas no futuro.

Referências

- [1] Comissão Europeia, *Compreender as políticas da união europeia: Transportes*, 2014.
- [2] Comissão das Comunidades Europeias, *Decisão da comissão 2008/232/CE relativa à especificação técnica de interoperabilidade para o subsistema «material circulante» do sistema ferroviário transeuropeu de alta velocidade*, 2008.
- [3] K. Schmitt, P. F. Niederer, M. H. Muser e F. Walz, *Trauma Biomechanics - Accidental Injury in Traffic and Sports*, Springer, ed. Berlin: Springer, 2004.
- [4] N. Yoganandan, A. M. Nahum e J. W. Melvin, *Accidental Injury - Biomechanics and Prevention*, T. M. C. of Wisconsin Inc on behalf of Narayan Yoganandan, ed. Springer, 2015.
- [5] SAFEINTERIORS, *Train Interior Passive Safety for Europe*, T. I. P. S. for Europe, ed. European Project TST5-CT-2006-031260, 2006.
- [6] M. Carvalho, J. Milho e J. Ambrosio, “Virtual testing of the layout 1.1 – inline seating in the reference configuration”, *Project Report Workpackage No. 5.4.1, SAFEINTERIORS - Train Interior Passive Safety for Europe*, 2010.
- [7] TNO Automotive:MADYMO, *MADYMO Manuals, Version 6.2*, T. M. BV, ed. Delft, 2004.
- [8] P. Nikravesh, *Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems*, Prentice-Hall, ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1988.
- [9] R. A. Galganski, “Collision avoidance and accident survivability volume 3: Accident survivability”, U.S. Department of Transportation/FRA, 1993.
- [10] D. C. Tyrell, K. J. Severson e B. P. Marquis, “Analysis of occupant protection strategies in train collisions”, *Crashworthiness and Occupant Protection in Transportation Systems*, 1995.
- [11] D. Tyrell e K. Severson, “Crashworthiness testing of amtrak’s traditional coach seat - safety of high-speed ground transportation systems”, U.S. Department of Transportation/FRA, 1996.
- [12] J. W. Simons e S. W. Kirkpatrick, “High-speed passenger train crashworthiness and occupant survivability”, *International Journal of Crashworthiness*, nº 4:2, pp. 121–132, 1998. doi: 10.1533/cras.1999.0095.
- [13] J. Hallquist, *Preliminary Users Manual for DYNA3D and DYNAP (Nonlinear Dynamic Analysis of Solids in Three Dimensions)*, L. L. N. Laboratory, ed. Berkeley, CA, 1976.
- [14] D. Tyrell, K. Severson e A. B. Perlman, “Single passenger rail car impact test, volume I: Overview and selected results”, U.S. Department of Transportation/FRA, 2000.

- [15] C. VanIngen-Dunn, “Single passenger rail car impact test volume II: Summary of occupant protection program”, U.S. Department of Transportation/FRA, 2000.
- [16] C. VanIngen-Dunn, “Commuter rail seat testing and analysis of facing seats”, U.S. Department of Transportation/FRA, 2003.
- [17] A. Prabhakaran, S. P. Singh e A. R. Vithani, “Prototype design of a collision protection system for cab car engineers”, U.S. Department of Transportation/FRA, 2013.
- [18] M. S. Pereira e R. Loureiro, “TRAINCOL advanced design of crash fail-safe train structures under service and impact conditions”, European Community, Synthesis Report, 1995.
- [19] TRAINCOL, *Advanced Design of Crash Fail-Safe Train Structures Under Service and Impact Conditions*, A. D. of Crash Fail-Safe Train Structures Under Service e I. Conditions, eds. European Project Contract nº BE-3385-89, 1991.
- [20] SAFETRAN, *Train Crashworthiness for Europe: Railway Vehicle Design and Occupant Protection*, T. C. for Europe: Railway Vehicle Design e O. Protection, eds. European Project nº BE-96-3092, 1997.
- [21] RADIOSS Input Manual, *Version 4.2*, Mecalog, ed. Paris, 2000.
- [22] R. Palacin, “SAFEINTERIORS train interior passive safety for europe publishable final activity report”, UNEW, Publishable Final Activity Report, 2010.
- [23] EN15227:2008, *Railway applications - crashworthiness requirements for railway vehicle bodys*.
- [24] SAFEINTERIORS – Train Interior Passive Safety for Europe, *Pulse Construction*, S. -. T. I. P. S. for Europe, ed. Project Report Workpackage No 2.5.2, 2008.
- [25] M. Carvalho, J. Ambrosio e J. Milho, “Implications of the inline seating layout on the protection of occupants of railway coach interiors”, *International Journal of Crashworthiness*, nº 16:5, pp. 557–568, 2011. doi: 10.1080/13588265.2011.611399.
- [26] M. Carvalho, J. Ambrosio e J. Milho, “Identification of the optimal railway vehicle interior model for passive safety improvement”, *Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2016.
- [27] M. Carvalho, J. Milho, J. Ambrosio e N. Ramos, “Railway occupant passive safety improvement by optimal design”, *International Journal of Crashworthiness*, 2016. doi: 10.1080/13588265.2016.1221332.
- [28] E. Matsika, E. Chirwa e Q. Peng, “Kinematics and injury risk of a wheelchair occupant in a railway vehicle crash”, *International Journal of Crashworthiness*, pp. 446–456, 2014. doi: 10.1080/13588265.2014.910337.
- [29] Conselho da União Europeia, *Directiva 96/48/CE do conselho relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário europeu de alta velocidade*, 1996.
- [30] Conselho da União Europeia, *Directiva 2001/16/CE do parlamento europeu e do conselho relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário europeu convencional*, 2001.
- [31] Conselho da União Europeia, *Directiva 2008/57/CE do parlamento europeu e do conselho relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário na comunidade*, 2008.

-
- [32] Comissão Europeia, *Regulamento (UE) 1302/2014 da comissão relativa à especificação técnica interoperabilidade para o subsistema «material circulante - locomotivas e material circulante de passageiros» do sistema ferroviário da união europeia*, 2014.
- [33] Comissão Europeia, *Directiva 2004/49/CE do parlamento europeu e do conselho relativa à segurança dos caminhos-de-ferro da comunidade*, 2004.
- [34] Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P., *Relatório anual de segurança*, 2014.
- [35] J. S. H. M. Wismans, E. G. Janssen, M. Beusenberg, W. P. Koppens e H. A. Lupker, *Injury Biomechanics*. Eindhoven University of Technology, 1994.
- [36] H. Mertz, “Accidental injury - biomechanics and prevention”, em, N. AM e M. JW, eds. New York: Springer, 2002, cap. Anthropomorphic test devices, pp. 66–84.
- [37] T. Shams, N. Rangarajan, K. Higuchi, J. Keller e M. Haffner, “Performance of the TAD-50M in vehicle barrier tests and comparison with hybrid III”, em *Paper 96-S10-O-07 presented at the 15th ESV conference*, Melbourne, mai. de 1996.
- [38] Railway Group Standard, *GM/RT2100 requirements for rail vehicle structures*, 2012.
- [39] Hertz, “A note on the head injury criterion (HIC) as a predictor of the risk of skull fracture”, em *37th Annual Proceedings of the AAAM*, 1993.
- [40] A. Sances, J. Myklebust, D. Maiman, S. Larson e J. Cusick, “The biomechanics of spinal injuries”, *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 11, pp. 1–76, 1984.
- [41] J. McElhaney, R. Nightingale, B. Winkelstein, V. Chancey e B. Myers, “Accidental injury - biomechanics and prevention”, em, N. AM e M. JW, eds. New York: Springer Verlag, 2002, cap. Biomechanical aspects of cervical trauma.
- [42] W. Goldsmith e A. Ommaya, “The biomechanics of impact trauma”, em, B. Aldman e A. Chapon, eds. Elsevier Science Publishers Amsterdam, 1984, cap. Head and neck injury criteria and tolerance levels, pp. 149–187.
- [43] NHTSA, *FMVSS 208 regulatory impact analysis. national highway traffic safety administration*, 1984.
- [44] SAFEINTERIORS – Train Interior Passive Safety for Europe, “Identify suitable criteria”, SAFEINTERIORS – Train Interior Passive Safety for Europe, Report, 2008.
- [45] Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA keyword user’s manual volume I*, 2014.
- [46] S. Guha, *LSTC_NCAC hybrid III 50th dummy positioning & post-processing*, 2014.
- [47] J. O. Hallquist, *Ls-dyna theory manual*, 2006.
- [48] Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA keyword user’s manual volume II material models*, 2014.
- [49] LS-DYNA Support, *How contact works*, <http://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/how-contact-works>, Consultado em 5/07/2016.
- [50] LS-DYNA Support, *Contact types*, www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types, Consultado em 5/07/2016.
- [51] LS-DYNA Support, *Contact overview*, <http://www.dynasupport.com/howtos/contact/contact-overview>, Consultado em 5/07/2016.
-

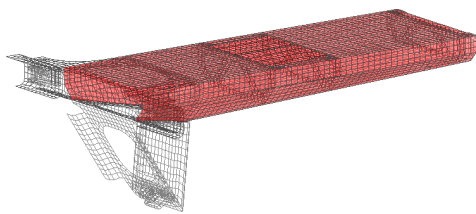
- [52] LS-DYNA Support, *Contact stiffness calculation*, <http://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-stiffness-calculation>, Consultado em 5/07/2016.
- [53] LS-DYNA Support, *Soft option*, <http://www.dynasupport.com/howtos/contact/soft-option>, Consultado em 5/07/2016.
- [54] M. Carvalho e J. Milho, “Backrest table design for railway coach interior occupant protection”, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, J. Kruijs, Y. Tsompanakis e B. Topping, eds., 2015. doi: 10.4203/ccp.108.128.
- [55] Abaqus 2016 Online Documentation, *Getting started with abaqus/CAE*, <http://50.16.225.63/v2016/books/gsa/default.htm?startat=ch12.html>, Consultado em 19/07/2016.
- [56] T. A. Burkhart, D. M. Andrews e C. E. Dunning, “Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: A review with recommendations associated with the modeling of bone tissue”, *Journal of Biomechanics*, 2013.
- [57] D. Flanagan e T. Belytschko, “A uniform strain hexahedron and quadrilateral with orthogonal hourglass control”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 17, pp. 679–706, 1981.
- [58] LS-DYNA Support, *Hourglass*, <http://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>, Consultado em 19/07/2016.
- [59] M. Lin e C. Chang, “Usage of LSTC_NCAC hybrid III 50th dummy in frontal occupant simulation”, *13th International LS-DYNA Users Conference*, 2014.
- [60] S. Bala, *Best practices for modeling recoverable low density foams - by example*, www.d3view.com/best-practices-for-modeling-recoverable-low-density-foams-by-example, Consultado em 18/04/2016.

Anexos

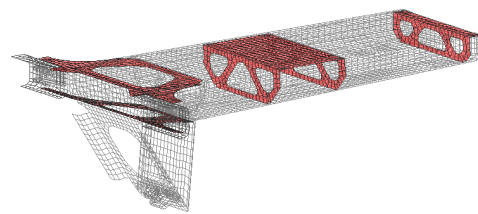
Anexo A

Representações dos Subconjuntos

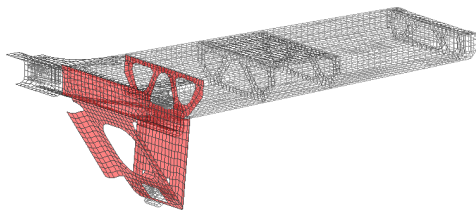
A.1 Partes dos Subconjuntos



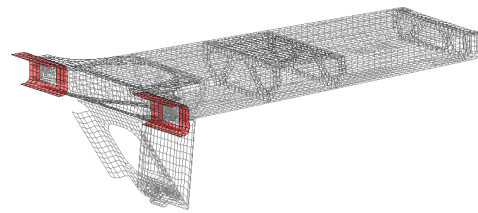
(a) Parte 118



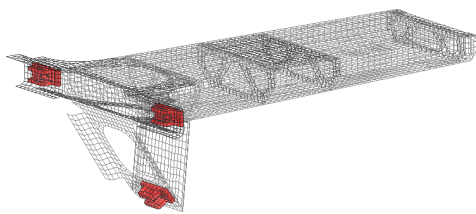
(b) Parte 119



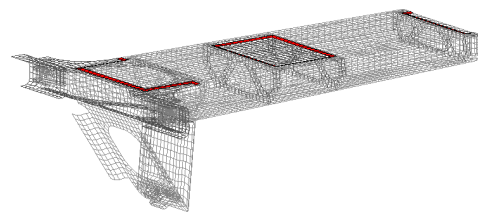
(c) Parte 120



(d) Parte 122

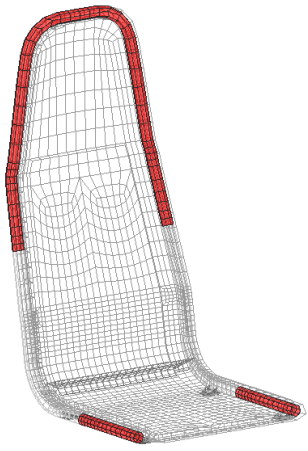


(e) Parte 155

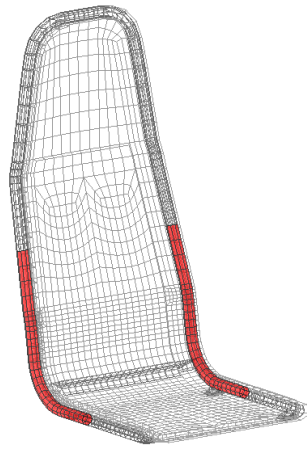


(f) Parte 6820

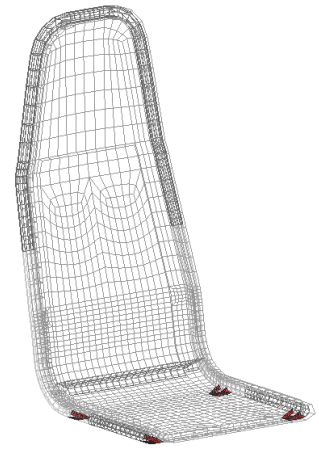
Figura A.1: Partes do subconjunto plataforma de suporte



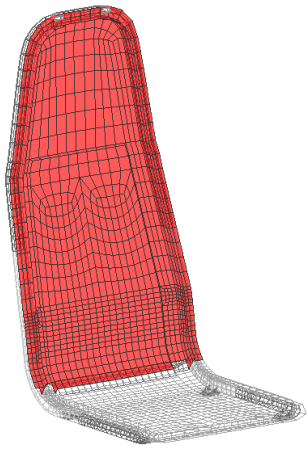
(a) Parte 11



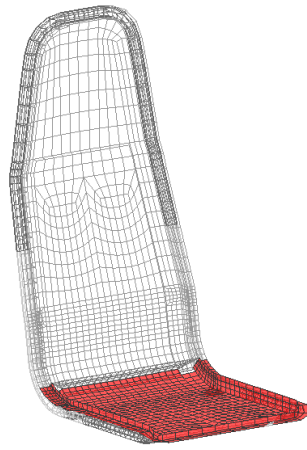
(b) Parte 12



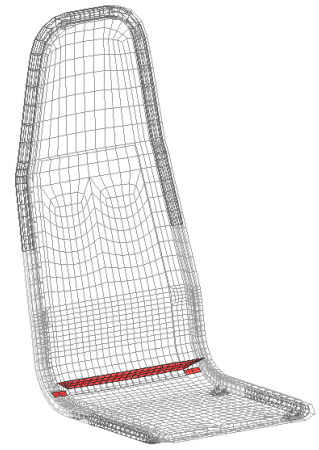
(c) Parte 13



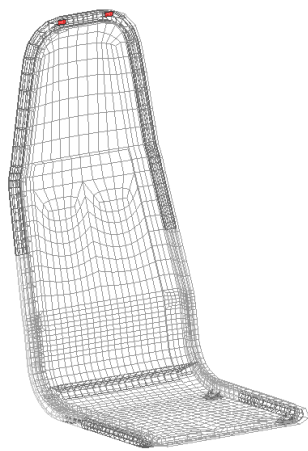
(d) Parte 14



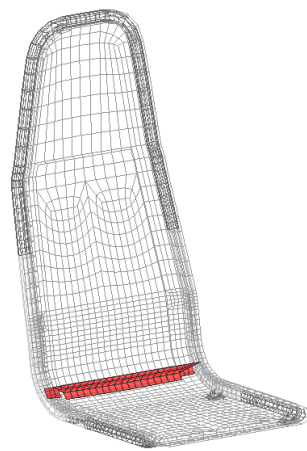
(e) Parte 15



(f) Parte 16



(g) Parte 19



(h) Parte 21

Figura A.2: Partes do subconjunto assento

A.2 Ligações entre Partes

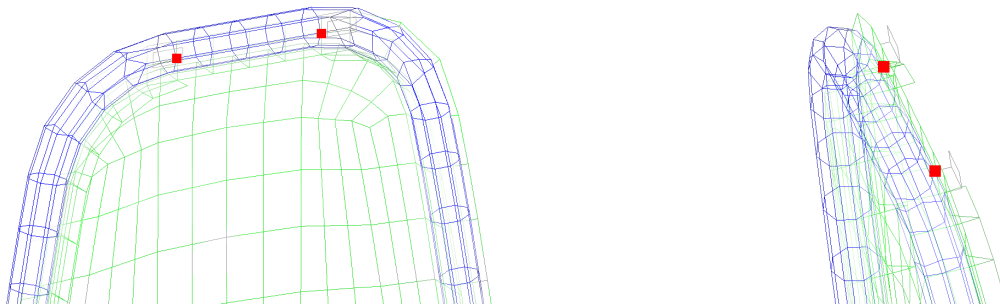


Figura A.3: Representação da ligação entre as partes 14 e 11

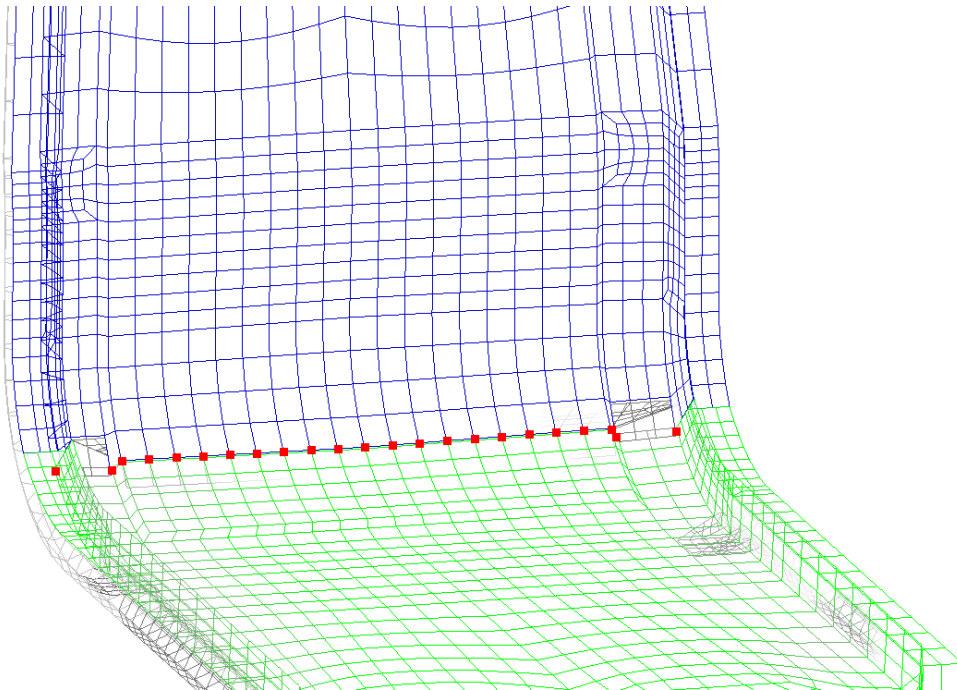


Figura A.4: Representação da ligação entre as partes 15 e 14

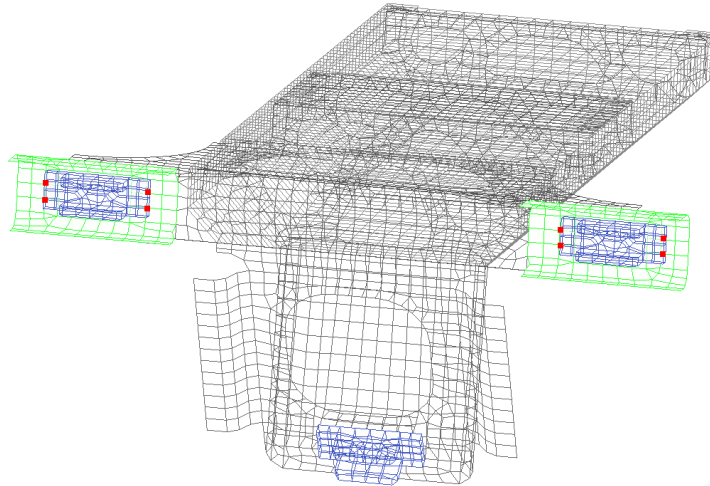


Figura A.5: Representação da ligação entre as partes 155 e 122

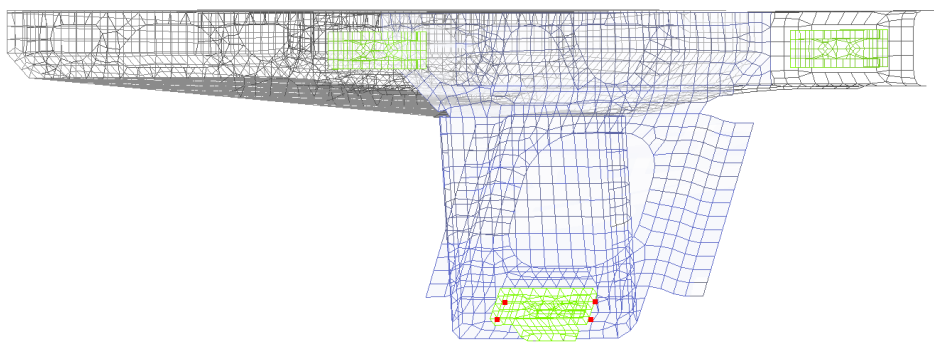


Figura A.6: Representação da ligação entre as partes 155 e 120

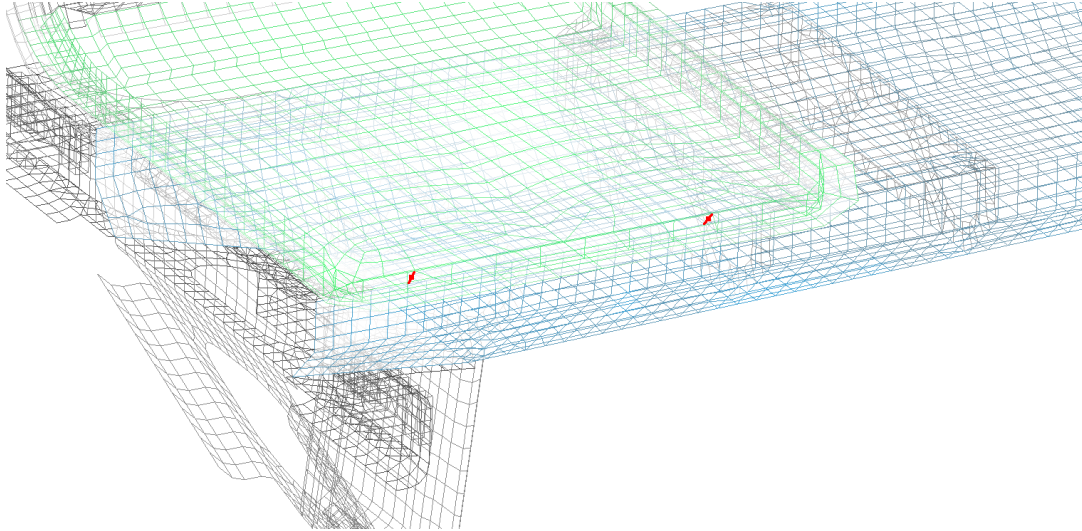


Figura A.7: Representação da ligação entre as partes 15 e 118

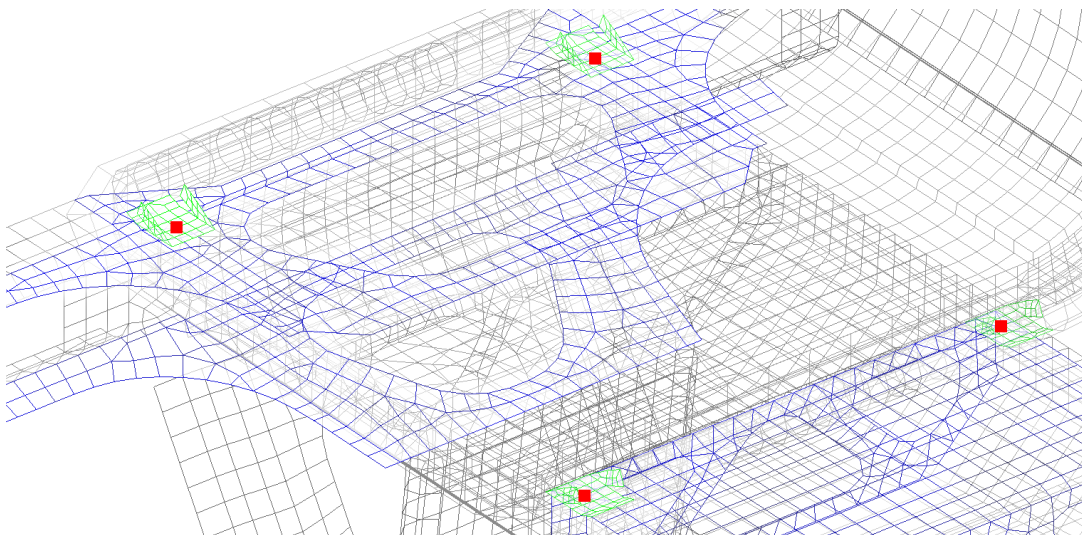


Figura A.8: Representação da ligação entre as partes 13 e 119

A.3 Referenciais do Modelo de Ocupante

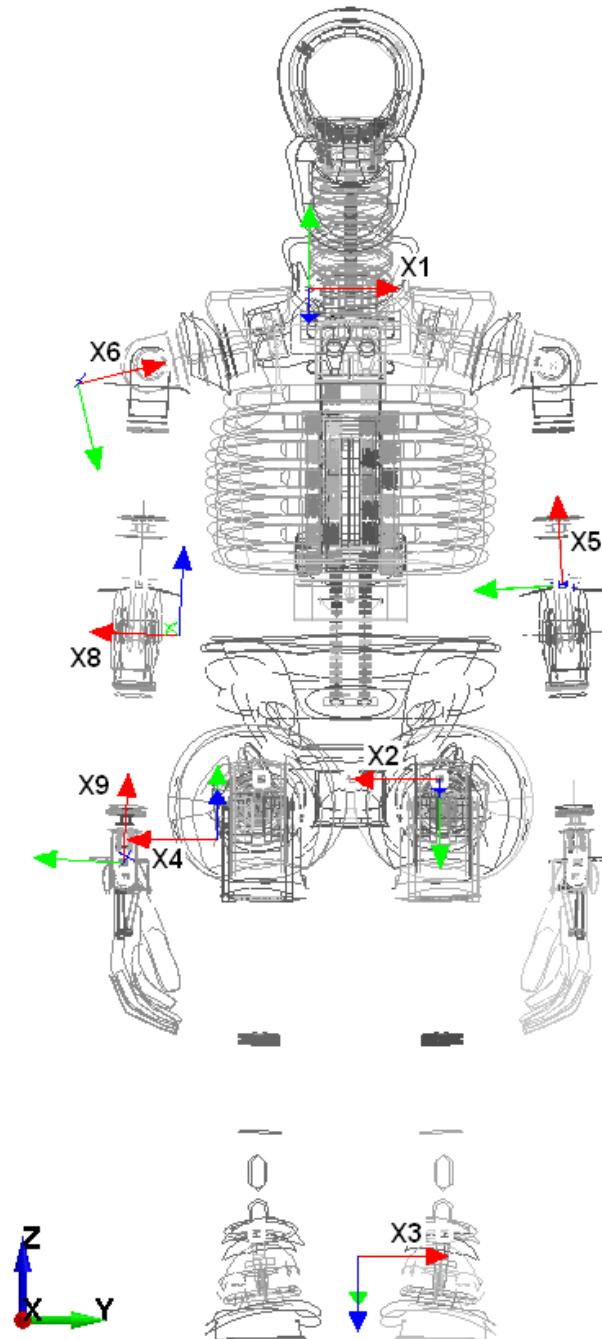


Figura A.9: Referenciais do modelo numérico de ocupante (vista de frente)

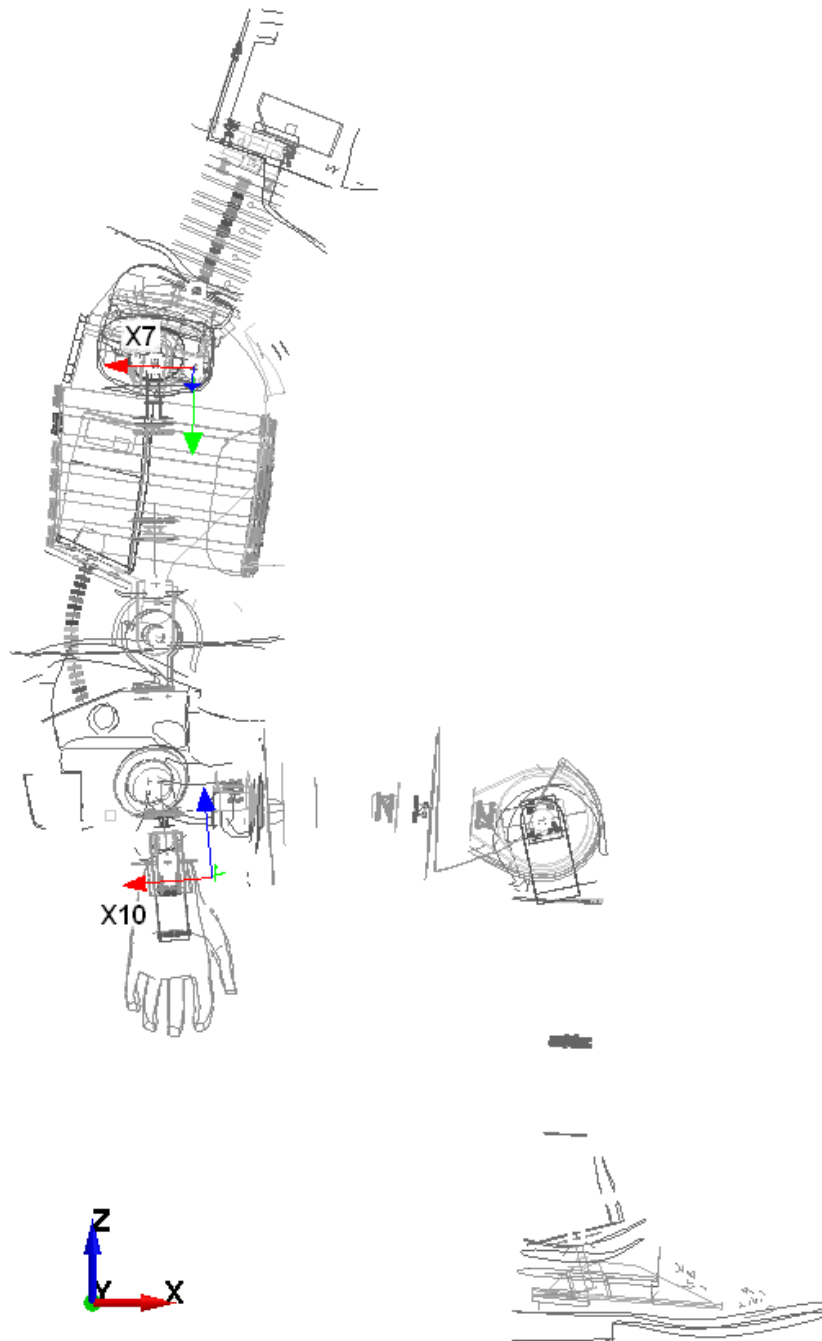


Figura A.10: Referenciais do modelo numérico de ocupante (vista lateral)

Anexo B

Índices de Lesão Experimentais e Numéricos

B.1 Simulação Numérica Inicial

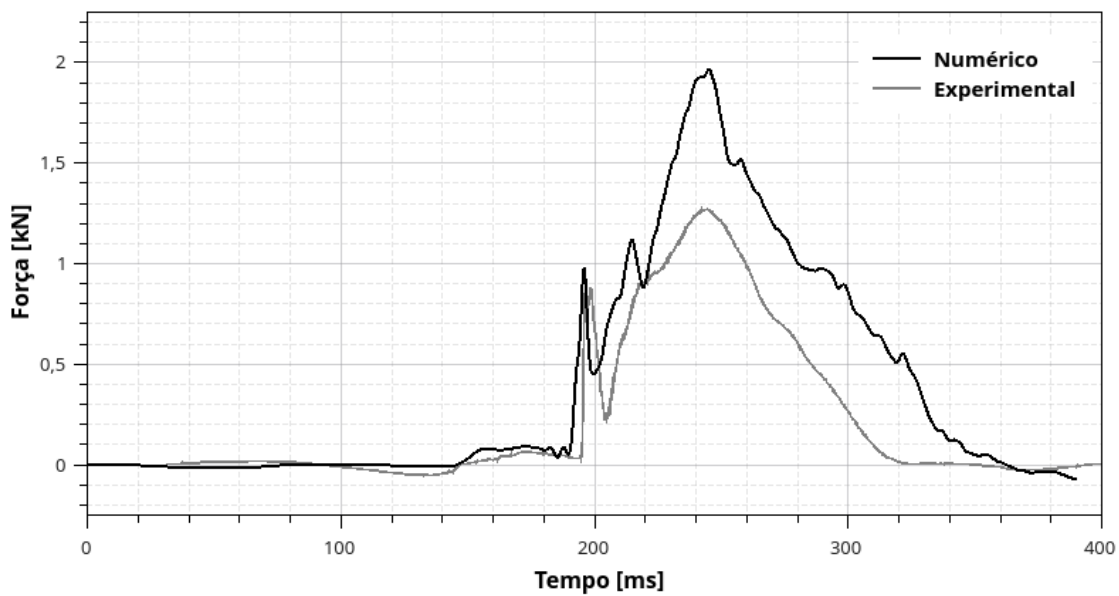


Figura B.1: Força de corte do pescoço

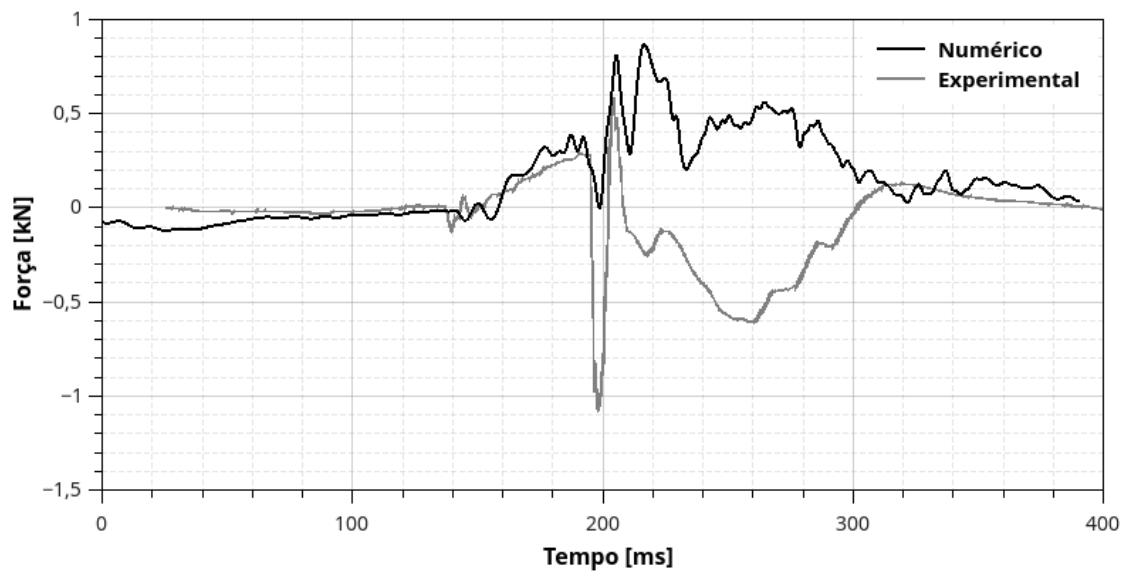


Figura B.2: Força axial do pescoço

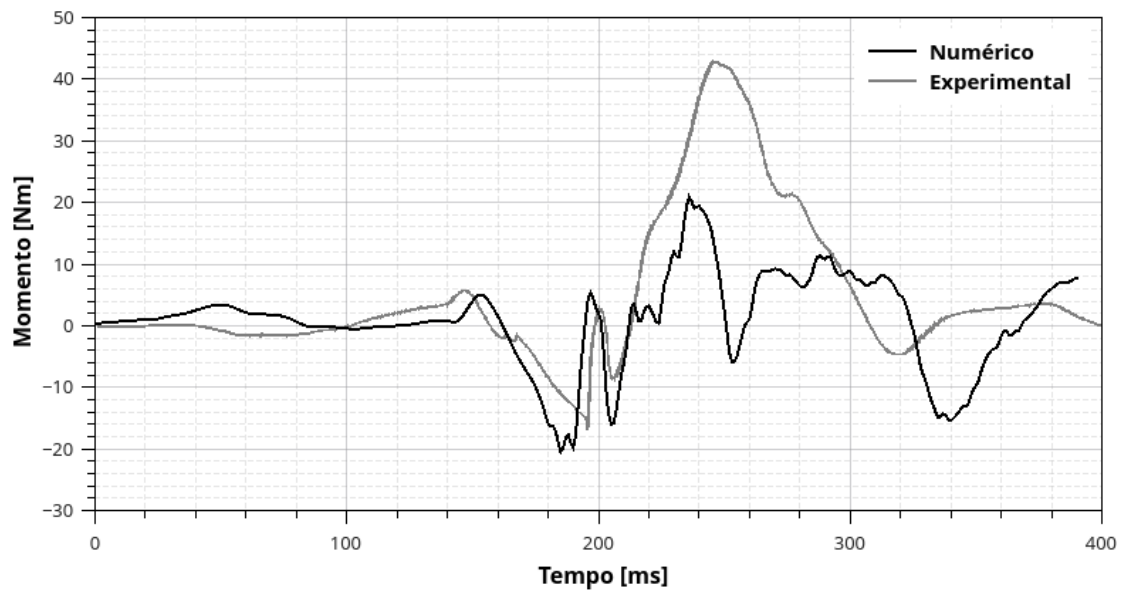


Figura B.3: Momento flector do pescoço

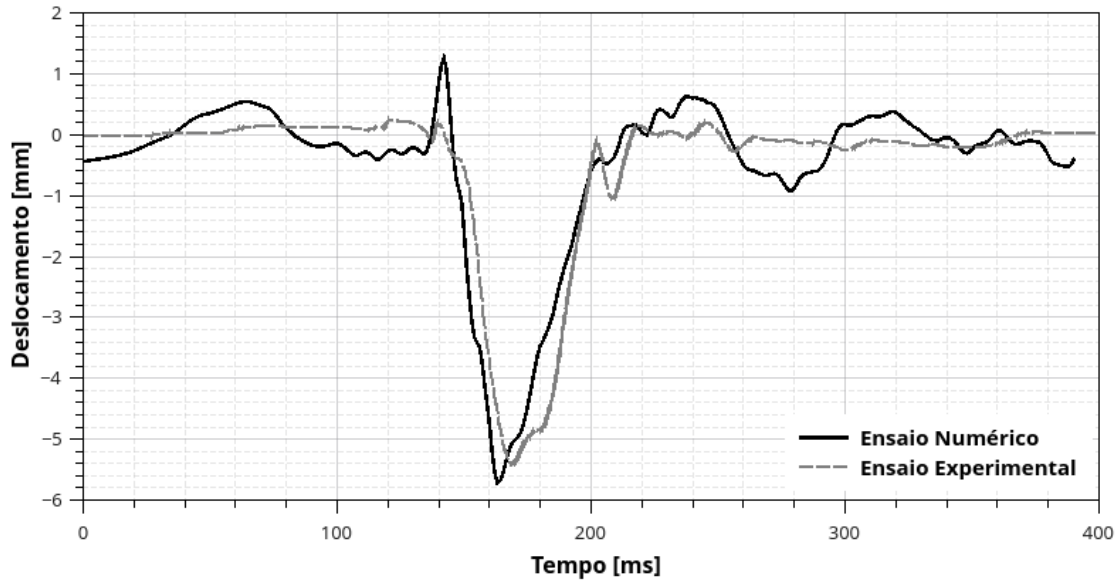


Figura B.4: Deslocamento do joelho direito

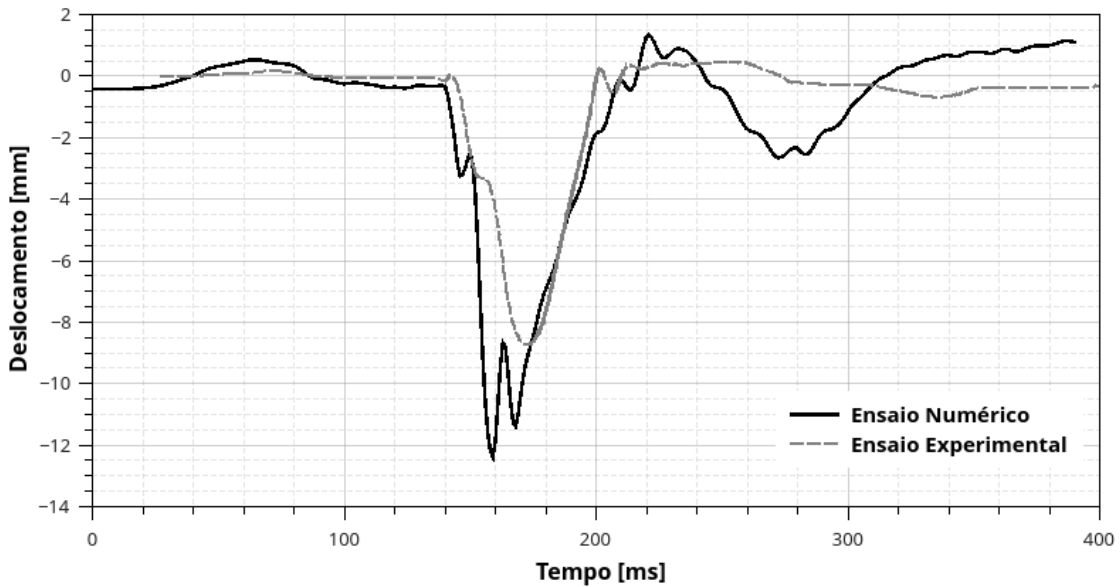


Figura B.5: Deslocamento do joelho esquerdo

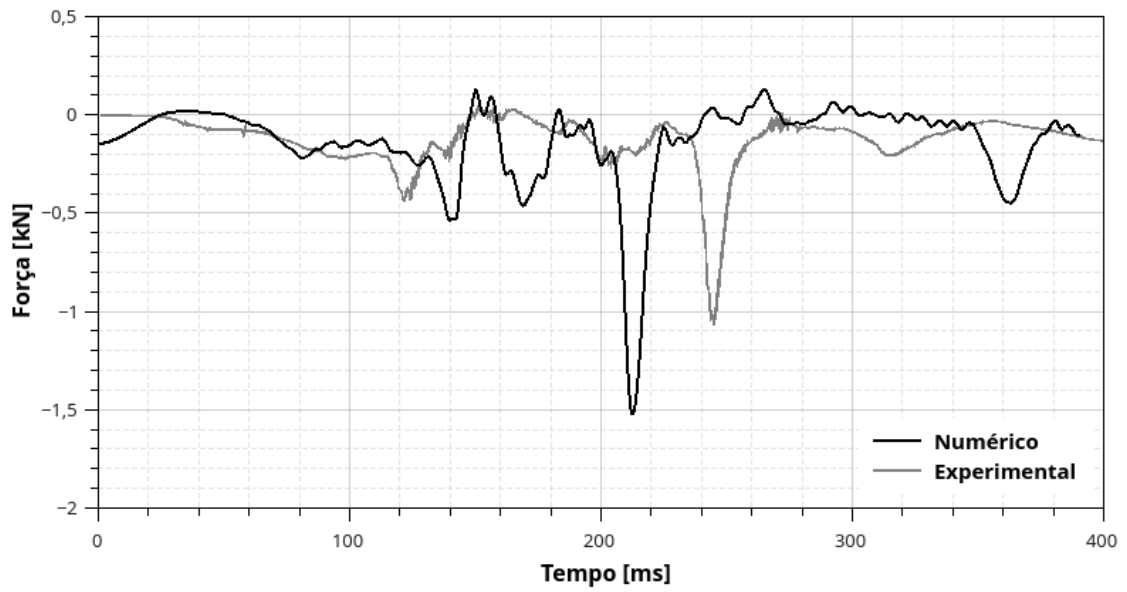


Figura B.6: Força axial da tíbia direita (superior)

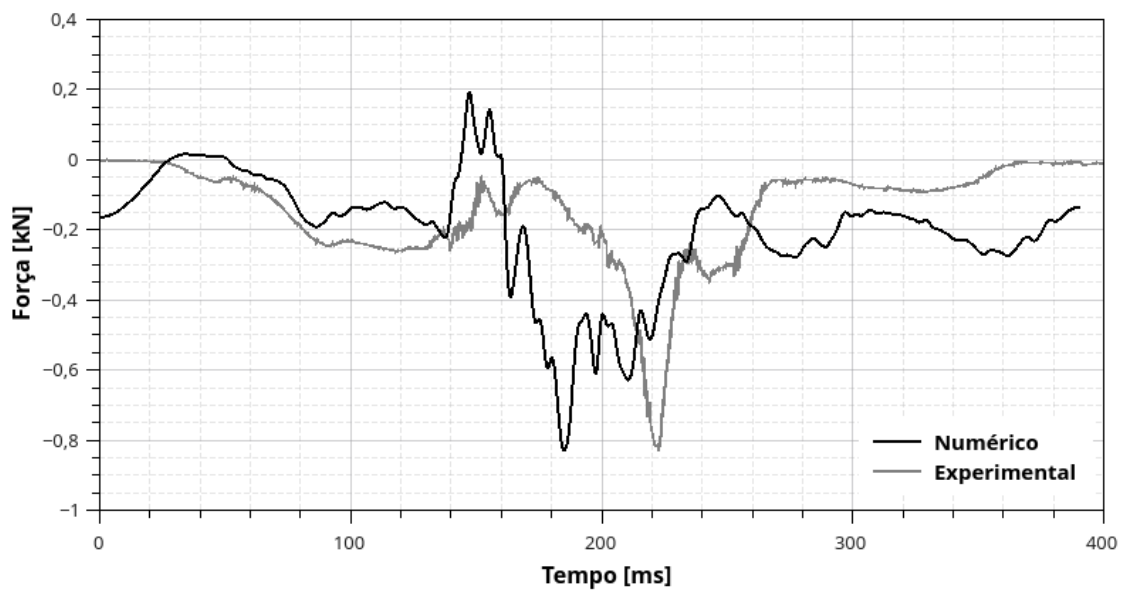


Figura B.7: Força axial da tíbia esquerda (superior)

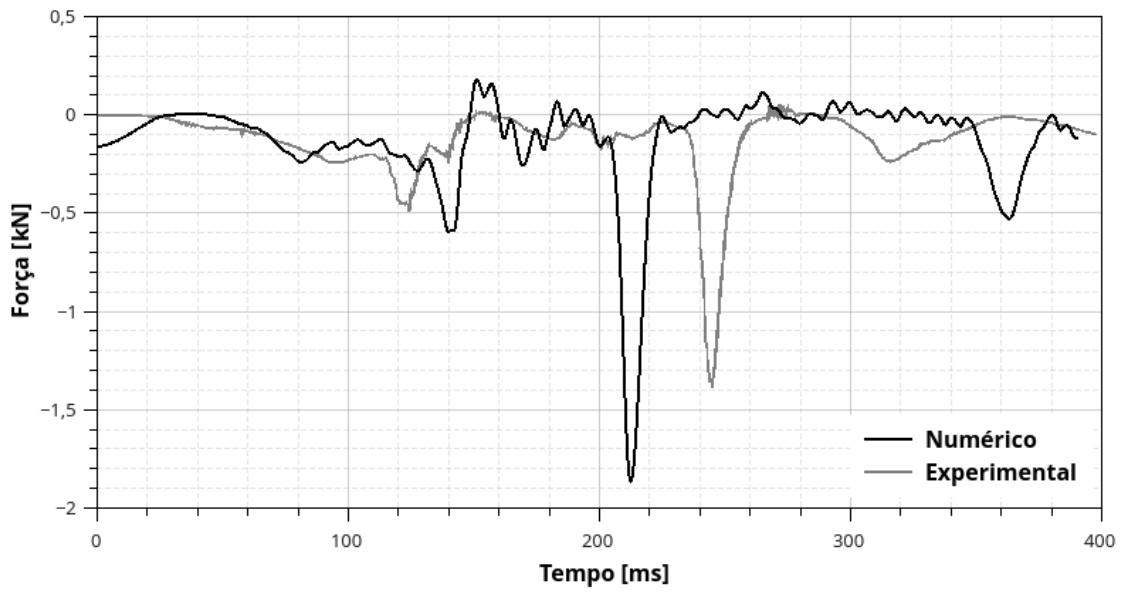


Figura B.8: Força axial da tíbia direita (inferior)

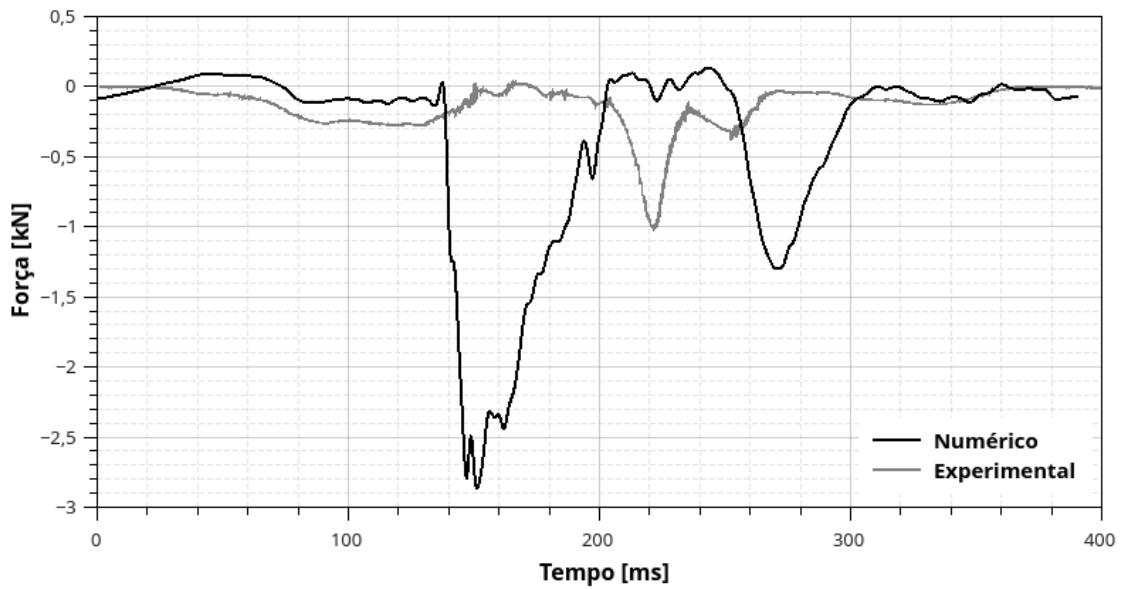


Figura B.9: Força axial da tíbia esquerda (inferior)

B.2 Simulação Numérica com Alteração de Posição

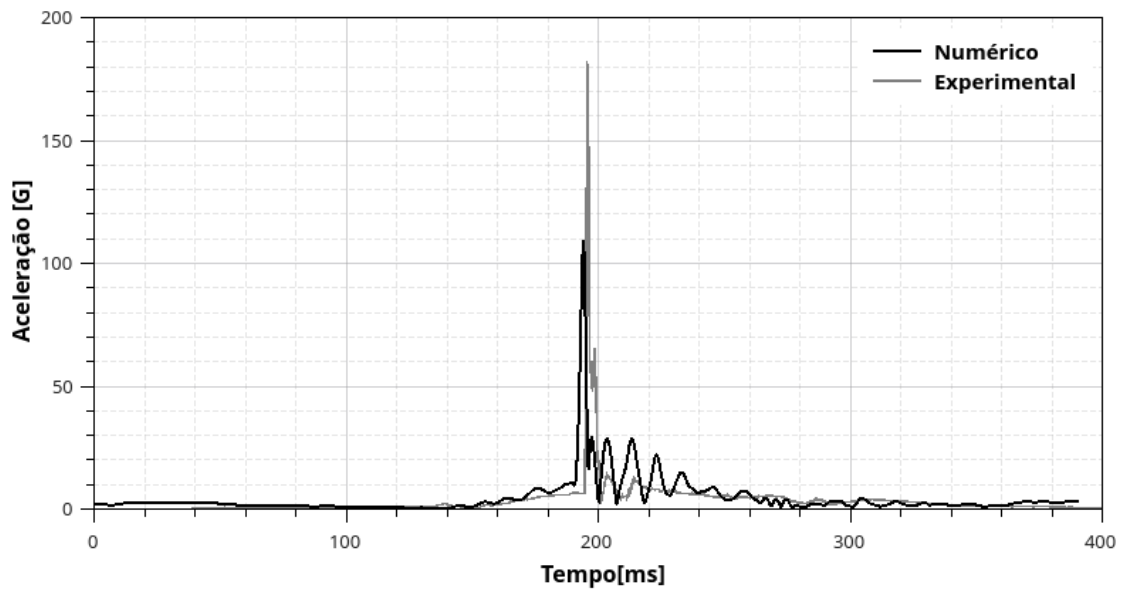


Figura B.10: Resultante da aceleração com alteração de posição

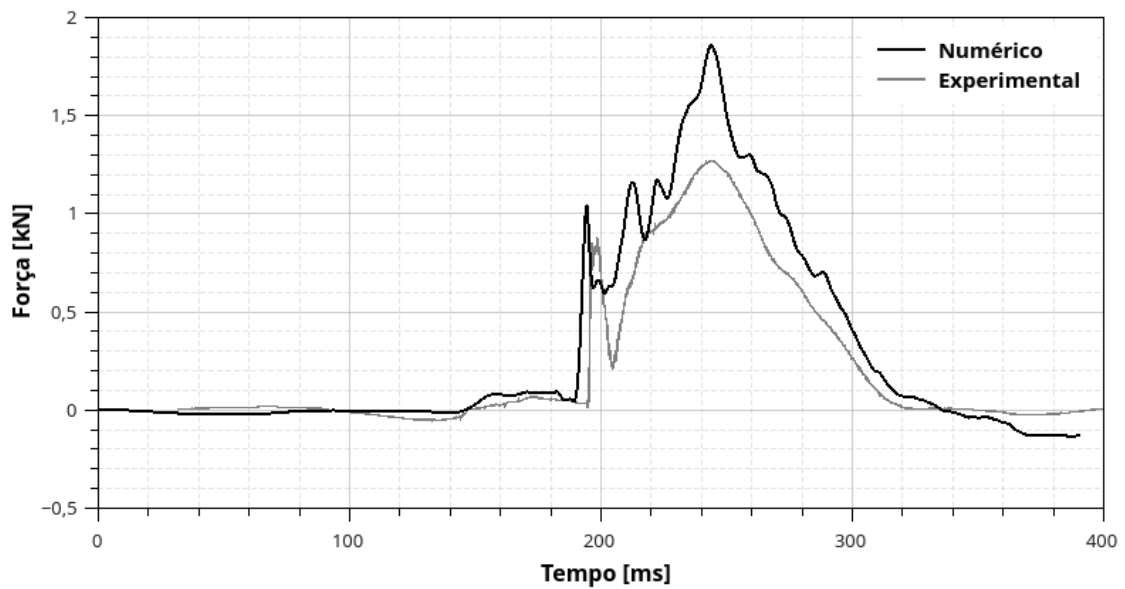


Figura B.11: Força de corte do pescoço com alteração de posição

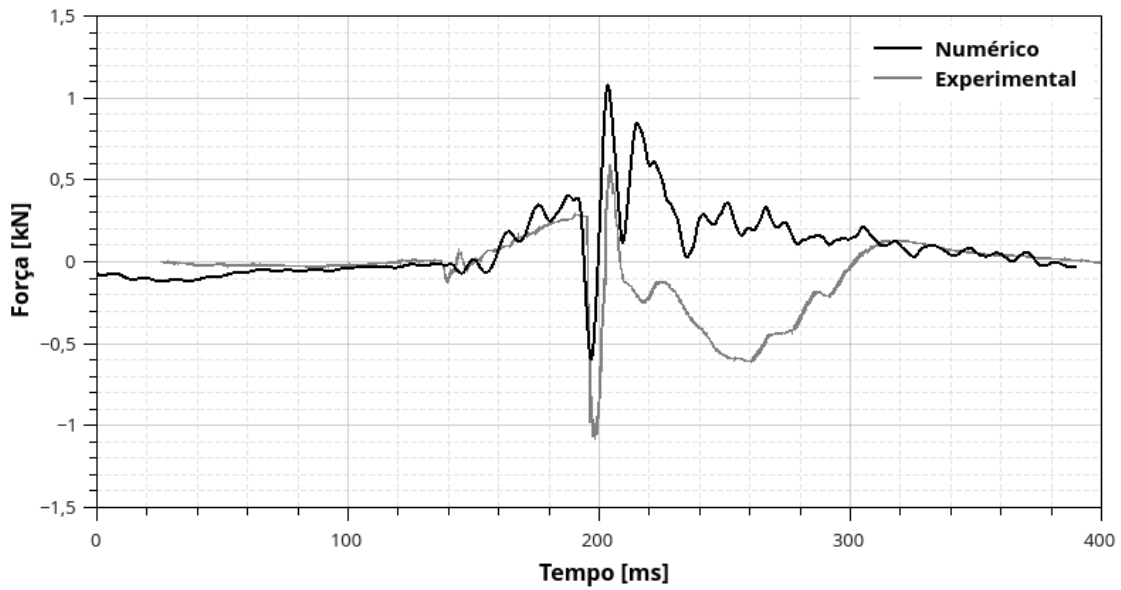


Figura B.12: Força axial do pescoço com alteração de posição

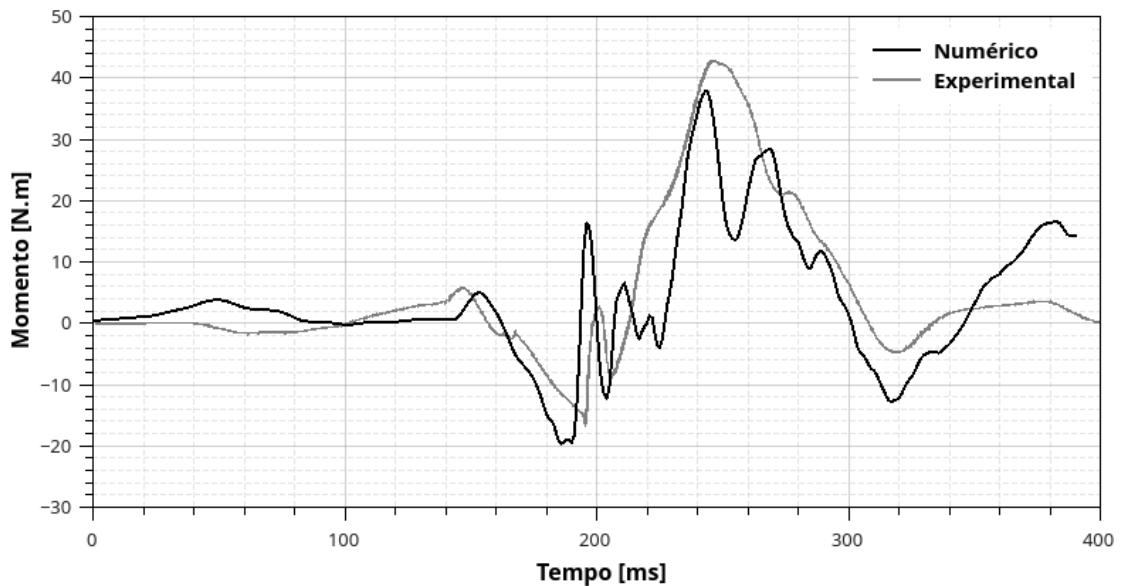


Figura B.13: Momento flector do pescoço com alteração de posição

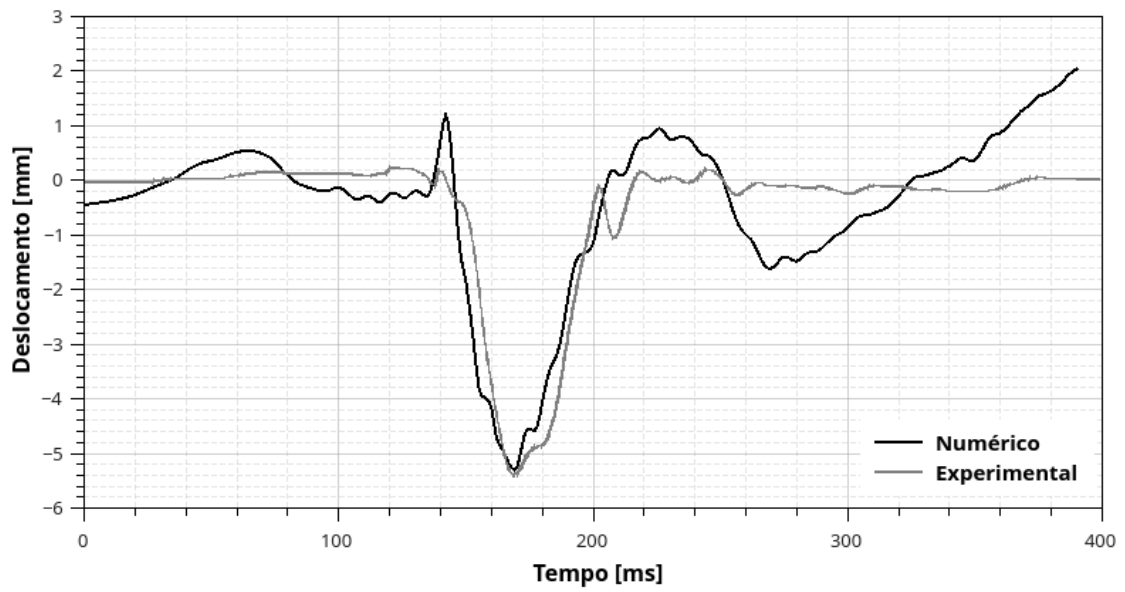


Figura B.14: Deslocamento do joelho direito com alteração de posição

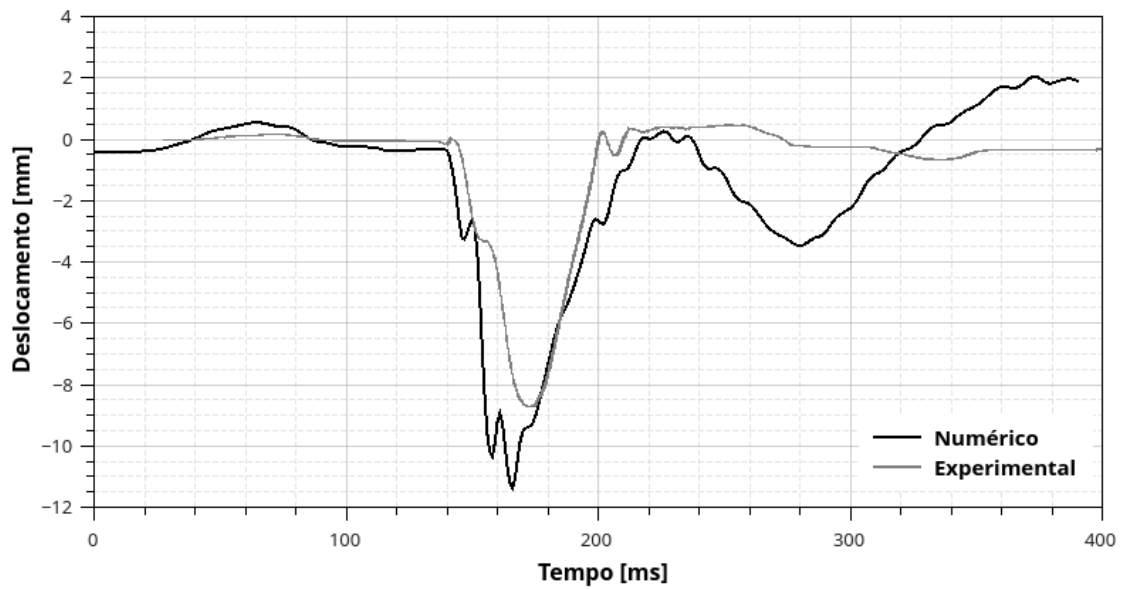


Figura B.15: Deslocamento do joelho esquerdo com alteração de posição

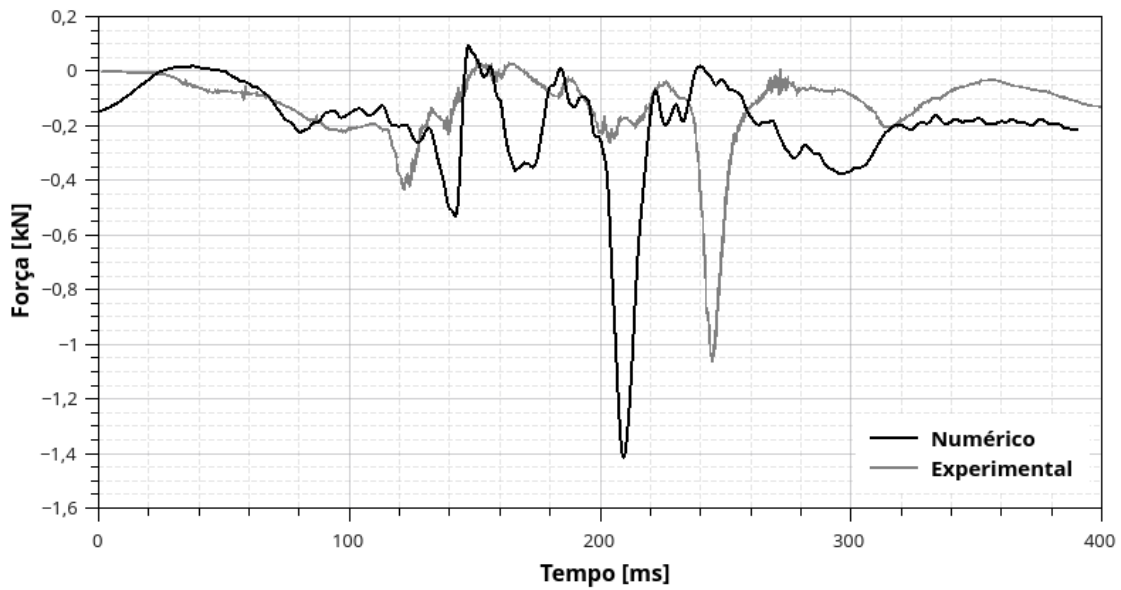


Figura B.16: Força axial da tíbia direita (superior) com alteração de posição

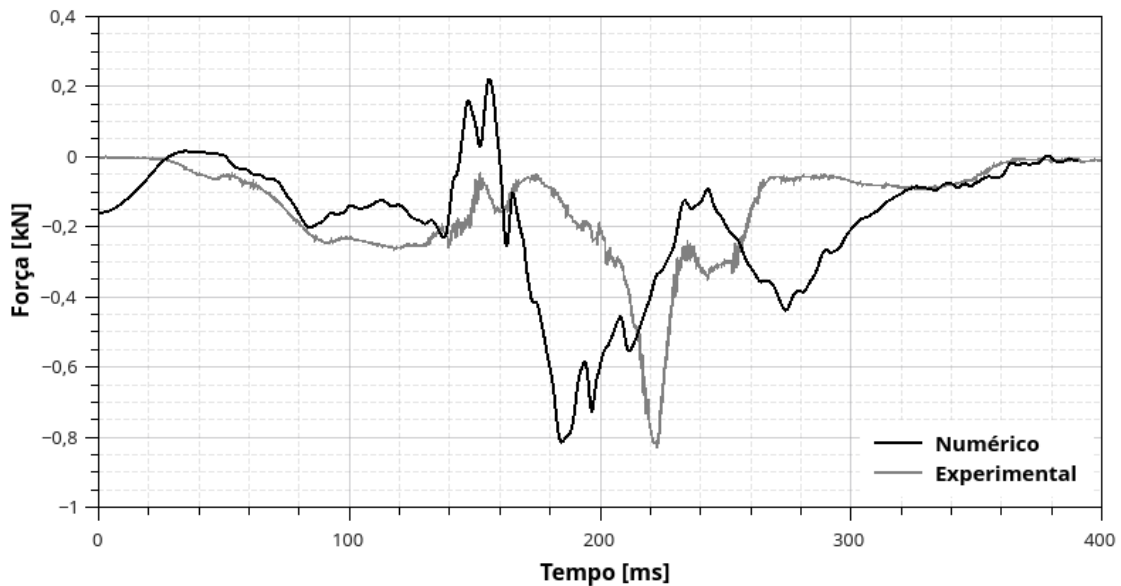


Figura B.17: Força axial da tíbia esquerda (superior) com alteração de posição

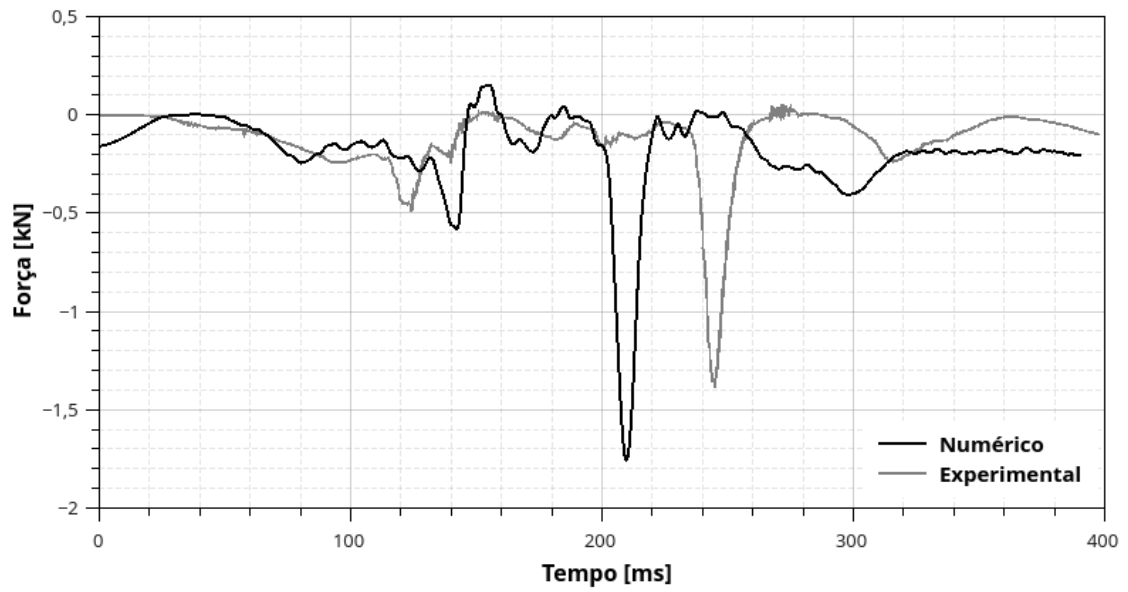


Figura B.18: Força axial da tíbia direita (inferior) com alteração de posição

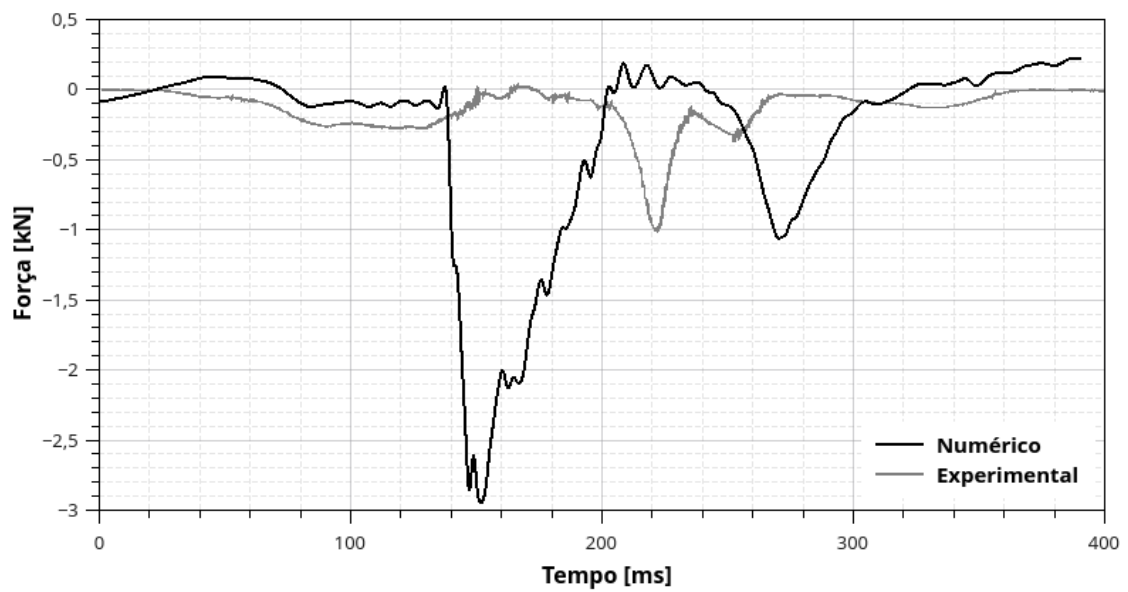


Figura B.19: Força axial da tíbia esquerda (inferior) com alteração de posição