



Mariana Pereira dos Reis Cação Girão

O USO DA SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS NA DEFINIÇÃO DE FATORES DE AGRESSIVIDADE

THE USE OF HEAVY VEHICLE SIMULATION TO DEFINE AGGRESSIVENESS FACTORS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pela Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida

Coimbra, 6 de julho de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Mariana Pereira dos Reis Cação Girão

O USO DA SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS NA DEFINIÇÃO DE FATORES DE AGRESSIVIDADE

THE USE OF HEAVY VEHICLE SIMULATION TO DEFINE AGGRESSIVENESS FACTORS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pela Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 6 de julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão a todas as pessoas, que de alguma forma, contribuíram para a realização da presente dissertação.

À Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida, pela orientação prestada, pelos conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade e revisão do trabalho.

Aos Professores do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, que me ajudaram ao longo do meu percurso académico, transmitindo-me conhecimentos e pelos incentivos prestados.

Aos meus pais, por tornarem possível a realização de um curso superior. Em especial à minha mãe, Maria da Conceição, por todo o apoio, paciência e amor incondicional ao longo dos anos.

A todos os meus colegas e amigos, pela amizade e companheirismo que demonstraram nesta etapa da minha vida.

À minha melhor amiga, Sara Cruz, que me acompanha há 19 anos, a quem eu agradeço por estar sempre ao meu lado.

Ao meu namorado, Nuno Cação, pelo apoio e força transmitida.

RESUMO

O fluxo de tráfego de veículos pesados é um dos parâmetros que mais influencia o dimensionamento de pavimentos rodoviários. Em Portugal, esse fluxo é convertido num número equivalente de eixos-padrão, através de fatores de agressividade.

Contudo, os fatores de agressividade mantêm-se inalterados desde, pelo menos 1995, pelo que se apresentam alheios à evolução que se tem vindo a verificar relativamente à frota de veículos pesados de mercadorias. Adicionalmente, novas metodologias de dimensionamento têm surgido, as quais se baseiam em espectros de carga contruídos através de dados coletados em estações de pesagem dinâmica (WIM – *Weigh-in-motion*), dados estes que nem sempre estão disponíveis.

Com o intuito de superar a indisponibilidade de dados WIM, a presente dissertação avalia o uso da simulação de veículos pesados na definição dos fatores de agressividade. Para o efeito, analisaram-se os veículos que compõem o parque automóvel em Portugal, em termos de pesados de mercadorias. Posteriormente, os veículos que se verificaram ser os mais predominantes foram simulados para diferentes pesos de carga, obtendo-se as cargas aplicadas por cada pneu à estrutura do pavimento. Com essas cargas, calculou-se a agressividade para diferentes pesos de carga, construíram-se regressões e definiu-se uma metodologia que permite o cálculo da agressividade considerando apenas o número de veículos e o fator de carga. Em paralelo, usaram-se dados WIM e calculou-se a agressividade do tráfego coletado num ano. Finalmente, procedeu-se à validação da metodologia, através da comparação da agressividade simulada com a agressividade do tráfego coletado.

Do trabalho realizado concluiu-se que os fatores de agressividade determinados através de simulação de veículos eram bastante aproximados dos fatores de agressividade obtidos através dos dados de tráfego coletados. Assim sendo, é possível afirmar-se que a indisponibilidade dos dados WIM pode ser ultrapassada recorrendo à simulação de veículos pesados.

O mesmo trabalho permitiu também concluir que a definição de fatores de agressividade é influenciada por diversos parâmetros, dos quais apenas se considerou na presente dissertação o tipo de pneu e a área de contacto pneu-pavimento, o fator de carga e os mecanismos de deterioração.

Palavras-chave: dimensionamento de pavimentos, pavimentos rodoviários flexíveis, fatores de agressividade, espectros de carga, pesagem dinâmica (WIM – *Weigh-in-motion*), simulação de veículos pesados.

ABSTRACT

The traffic flow of heavy vehicles is one of the parameters that most influence the design of road pavements. In Portugal, this flow is converted into a number of equivalent standard axle load, through aggressiveness factors.

However, the aggressiveness factors have remained unchanged since at least 1995 and have therefore not kept pace with the evolution of the heavy goods vehicle fleet. In addition, new design methodologies have emerged, which are based on load spectra built through data collected in weigh-in-motion (WIM) stations. However, these data are not always available.

In order to overcome the unavailability of WIM data, the present dissertation evaluates the use of heavy vehicle simulation to define aggressiveness factors. For this purpose, the Portuguese heavy goods vehicles fleet was analyzed. Subsequently, the most representative fleet's vehicles were simulated for different load weights, obtaining the loads applied by each tyre to the pavement structure. With these loads, the aggressiveness was calculated for different load weights, regressions were constructed and a methodology was defined that allows the calculation of the aggressiveness considering only the number of vehicles and the load factor. In parallel, WIM data were used and the aggressiveness of the traffic collected in a year was calculated. Finally, the methodology was validated by comparing the simulated aggressiveness with the aggressiveness of the collected traffic.

From the work carried out, it was concluded that the aggressiveness factors determined through vehicle simulation were quite close to the aggressiveness factors obtained through traffic data collected. Therefore, it can be stated that the unavailability of the WIM data can be overcome by using heavy vehicle simulation.

The same work also allowed us to conclude that the definition of aggressiveness factors is influenced by several parameters, of which only the tyre type and the tire-pavement contact area, the load factor and the deterioration mechanisms were considered in the present dissertation.

Keywords: pavement design, flexible road pavement, aggressiveness factors, axle load spectra, weigh-in-motion, heavy vehicle simulation.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do Tema	1
1.2 Objetivos e metodologia	1
1.3 Estrutura do trabalho	2
2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS – a ação do tráfego	4
2.1 Considerações iniciais.....	4
2.2 A ação do tráfego	5
2.2.1 Introdução	5
2.2.2 Tipos de veículos	5
2.2.3 Carga útil	10
2.2.4 Parque automóvel em Portugal	11
2.3 Metodologia de dimensionamento correntemente utilizada	17
2.3.1 Introdução	17
2.3.2 Pré-dimensionamento	17
2.3.3 Análise estrutural do pavimento	19
2.3.4 Previsão do desempenho e cálculo do dano	21
2.4 MEPDG.....	22
2.4.1 Descrição	22
2.4.2 Espectros de carga	24
2.4.3 Estações de medição – WIM	26
2.5 Fatores de agressividade	29
2.6 Simulação de veículos pesados	35
3 CASO DE ESTUDO	36
3.1 Considerações iniciais.....	36
3.2 Análise do tráfego numa estação WIM.....	36
3.3 Simulação de veículos pesados	41
3.4 Fatores de agressividade	46
3.4.1 Dados WIM	49
3.4.2 Simulação de veículos	50
3.5 Análise de resultados.....	52
3.5.1 Dados WIM	52
3.5.2 Simulação de veículos	53
3.5.3 Fadiga vs. Deformação permanente	54
3.5.4 Dados WIM vs. Simulação de veículos	54

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	55
4.1 Conclusões	55
4.2 Trabalho Futuro.....	56
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A	A-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Organigrama do dimensionamento de pavimentos flexíveis (Baptista, 1999).....	4
Figura 2.2 - Classificação dos veículos automóveis (Lima e Quaresma, 1999).....	6
Figura 2.3 - Peso máximo por eixo para as diversas subclasses de pesados (adaptado de Pais e Pereira, 2016).....	7
Figura 2.4 - Média da percentagem de veículos pesados em circulação entre 2010 e 2015 (INE @ 2016).....	8
Figura 2.5 - Conceito modular (Åkerman e Jonsson, 2007).....	10
Figura 2.6 - Número total de veículos pesados (INE @ 2016).....	12
Figura 2.7 - Percentagem por tipo de veículos (INE @ 2016).....	12
Figura 2.8 – Percentagem dos dois tipos de veículos predominantes por configuração dos eixos (INE @ 2016).....	13
Figura 2.9 – Percentagem dos dois tipos de veículos predominantes por capacidade de carga (INE @ 2016).....	13
Figura 2.10 - Peso bruto dos veículos por capacidade de carga (INE @ 2016).....	14
Figura 2.11 – Carga útil dos veículos por capacidade de carga (INE @ 2016).....	14
Figura 2.12 - Percentagem de veículos/km que circulam vazios (Eurostat @ 2017).....	15
Figura 2.13 – Fator de carga para o camião de dois eixos (Eurostat @ 2017).....	16
Figura 2.14 - Fator de carga para o veículo articulado de 2+2 eixos (Eurostat @ 2017).....	16
Figura 2.15 - Fator de carga para o veículo articulado de 2+3 eixos (Eurostat @ 2017).....	17
Figura 2.16 - Esquematisação do rodado padrão pelos métodos de dimensionamento da Shell e Nottingham (Branco <i>et al.</i> 2011).....	20
Figura 2.17 - Exemplo da modelação da área de contacto retangular (adaptado de COST 334, 2001).....	21
Figura 2.18 - Esquematisação das extensões obtidas no <i>software</i> BISAR.....	21
Figura 2.19 – Organigrama da metodologia do dimensionamento de pavimentos rodoviários (Simões <i>et al.</i> 2013).....	24
Figura 2.20 - Variação do espectro de carga por eixo: (a) eixo simples, classe F e (b) eixo duplo, classe H (Romanoschi <i>et al.</i> 2011).....	25
Figura 2.21 - Distribuição mista bimodal (Haider e Harichandran, 2009).....	26
Figura 2.22 – Esquema do sistema piezoelétrico (Mimbela e Klein, 2000).....	28
Figura 2.23 – Equipamentos CAV (Ascendi).....	28

Figura 2.24 - Análise do dano para eixos múltiplos (Huang, 2004).....	34
Figura 2.25 – Valores médios do coeficiente k para todos os tipos de eixos e de roda (Pais e Pereira, 2016).....	34
Figura 2.26 - <i>Software TruckSIM</i> [®]	35
Figura 3.1 - Localização do sublanço entre Fagilde e Mangualde.....	37
Figura 3.2 – Percentagem de veículos pesados por eixo (Este – Oeste).....	38
Figura 3.3 - Percentagem de veículos pesados por eixo (Oeste – Este).....	38
Figura 3.4 – Peso bruto de cada veículo registado.....	39
Figura 3.5 – Cargas por eixo do camião de dois eixos (F1).....	39
Figura 3.6 – Cargas por eixo do veículo articulado de quatro eixos (H3).....	40
Figura 3.7 – Cargas por eixo do veículo articulado de cinco eixos (H5).....	40
Figura 3.8 – Histogramas das cargas por eixos para o camião F1.....	41
Figura 3.9 - Histogramas das cargas por eixos para o veículo articulado H3.....	41
Figura 3.10 - Histogramas das cargas por eixos para o veículo articulado H5.....	41
Figura 3.11 - Configuração do veículo articulado H5.....	42
Figura 3.12 – Pneus considerados nos veículos simulados.....	42
Figura 3.13 – Simulação de cargas do veículo articulado H5.....	43
Figura 3.14 - Regressão linear para o camião F1.....	45
Figura 3.15 – Regressão linear para o veículo articulado H3.....	45
Figura 3.16 – Regressão linear para o veículo articulado H5.....	46
Figura 3.17 – Cargas por eixo do veículo articulado H5 quando totalmente carregado – peso bruto = 40 t (Glaeser, 2010).....	46
Figura 3.18 – Esquema da estrutura do pavimento.....	47
Figura 3.19 – Áreas de contacto para os veículos simulados e respetivas respostas do pavimento.....	48
Figura 3.20 – Modelação da área de contacto.....	49
Figura 3.21 – Regressão exponencial para o camião F1.....	50
Figura 3.22 – Regressão exponencial para o veículo articulado H3.....	51
Figura 3.23 – Regressão exponencial para o veículo articulado H5.....	51

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Peso máximo para diversos tipos de veículos pesados (Decreto Lei nº 133/2010).....	8
Quadro 2.2 - Dimensões máximas (Decreto Lei nº 133/2010).....	9
Quadro 2.3 – Densidade de mercadorias comuns (OCDE, 2011).....	11
Quadro 2.4 - Percentagem do tráfego na via mais solicitada (JAE, 1995).....	18
Quadro 2.5 – Caracterização do tráfego (JAE, 1995).....	19
Quadro 2.6 - Fatores de agressividade para cada subclasse (Lima e Quaresma, 1999).....	31
Quadro 2.7 – Fator de agressividade para cada classe e para o tráfego de veículos pesados em geral (Lima e Quaresma, 1999).....	31
Quadro 3.1 – Cargas por eixo para o caminhão F1.....	43
Quadro 3.2 – Cargas por eixo para o veículo articulado H3.....	44
Quadro 3.3 – Cargas por eixo para o veículo articulado H5.....	44
Quadro 3.4 - Propriedades das camadas do pavimento.....	47
Quadro 3.5 – Fatores de agressividade com áreas de contacto rectangulares.....	52
Quadro 3.6 – Fatores de agressividade para o eixo-padrão.....	52
Quadro 3.7 – Fatores de agressividade para a lei da potência à quarta.....	52
Quadro 3.8 – Fatores de agressividade em função dos fatores de carga dos dados WIM.....	53
Quadro 3.9 – Fatores de agressividade em função dos fatores de carga do Eurostat.....	53
Quadro A.1 – Dados de tráfego coletados na estação WIM.....	A-1

SIMBOLOGIA

A – área de contato da roda com o pavimento

E_m – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa

f – coeficiente de equivalência entre o dano no pavimento provocado pela passagem de um eixo-padrão e o dano provocado por um eixo de peso P

k_s – depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento

L – distância do rodado de eixo simples

n – vida útil de projeto

N_{80} – número de passagem de um eixo-padrão de 80 kN

N_{pes} – número total de veículos pesados

p – pressão de contato de um pneu de um veículo

P – peso dos eixos

r – raio do rodado

t – taxa de crescimento anual

V_b - % volumétrica de betume no volume total

α – fator de agressividade

ε – extensão

TMDAp – Tráfego médio diário anual de veículos pesados

ABREVIATURAS

AASHO – American Association of State Highways Officials

AASTHO - American Association of State Highway and Transportation Officials

BISAR - Bitumen Stress Analysis in Roads

CAV – Contagem e Classificação Automática de Veículos

EMS – European Modular System

EUA – Estados Unidos da América

INE – Instituto Nacional de Estatística

IP – Infraestruturas de Portugal

JAЕ – Junta Autónoma de Estradas

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MACOPAV - Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

MEPDG – Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide

NCHRP – Nacional Cooperative Highway Research Program

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

PAV – Pesagem Automática e dinâmica de Veículos

PSI – Pavement Serviceability Index

UE – União Europeia

UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute

WAVE - Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe

WIM – Weigh-in-Motion

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Tema

Os pavimentos rodoviários têm uma enorme importância no desenvolvimento social e económico de uma região. Como tal, é fundamental que se apresentem em bom estado durante o seu período de vida útil, oferecendo aos utentes boas condições de segurança e comodidade durante a sua utilização.

Uma vez que o estado de conservação dos pavimentos rodoviários é bastante influenciado pelo tráfego de veículos pesados, maioritariamente de mercadorias, o seu dimensionamento deveria acompanhar a evolução que se tem vindo a verificar ao longo dos anos relativamente ao parque automóvel. Isto é, a frota de camiões tem sofrido alterações significativas, nomeadamente no que diz respeito aos veículos predominantes e características dos pneus e rodados.

Em Portugal, os pavimentos rodoviários são dimensionados de acordo com o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, que data de 1995 – MACOPAV (1995). Através deste manual, são utilizados fatores de agressividade que convertem os fluxos de tráfego de pesados em passagens equivalentes de um eixo-padrão.

Devido aos fatores de agressividade se manterem inalterados desde então, os mesmos não acompanharam a evolução do tráfego referida, pelo que se encontram desatualizados. Deste modo, é importante estabelecer uma metodologia possível de estimar os fatores de agressividade atendendo às alterações das indústrias e políticas de transportes.

Para o efeito, foi necessário conhecer as cargas por eixo dos diferentes tipos de veículos, possíveis de obter através de dados de pesagem dinâmica (WIM – *Weigh-in-motion*) ou por simulação de veículos.

1.2 Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como principal objectivo, avaliar o uso da simulação de veículos pesados na definição de fatores de agressividade, simulando os veículos pesados de mercadorias mais predominantes em Portugal, para diferentes pesos de carga. Paralelamente, pretende-se

calcular a agressividade de tráfego coletado num ano. Os resultados obtidos nas duas metodologias serão posteriormente analisados e comparados, com o intuito de verificar se a simulação de veículos consegue ultrapassar uma possível indisponibilidade de dados coletados.

Numa primeira fase das metodologias foi necessário proceder à:

- Filtragem dos dados de tráfego coletados num ano, considerando apenas os veículos alvo do presente estudo e restringindo a gama de pesos por eixo a valores admissíveis para os mesmos veículos (dados WIM);
- Definição das características da via, do procedimento da operação e da configuração dos veículos a simular (simulação de veículos);
- Obtenção das cargas por eixo para diferentes pesos dos veículos (simulação de veículos);

Posteriormente, procedeu-se à:

- Modelação das áreas de contacto para cada pneu;
- Utilização de um *software* de cálculo da resposta estrutural do pavimento;
- Obtenção das extensões de fadiga e de deformação permanente;

Por fim, para as duas metodologias efetuou-se o:

- Cálculo dos fatores de agressividade.

Depois de determinada a agressividade do tráfego para as duas metodologias, efetuou-se uma comparação dos valores alcançados, tornando-se possível validar a primeira metodologia.

1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação encontra-se organizada em quatro capítulos. No primeiro, no qual se insere este ponto, é feito um enquadramento do tema em estudo, são definidos os objectivos do trabalho e é apresentada a organização do mesmo.

No segundo capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura que sustenta a compreensão e elaboração do trabalho. Primeiramente, são analisados os tipos de veículos considerados no dimensionamento de pavimentos e suas características, bem como a eficiência relativamente à carga por eles transportada. De seguida, descreve-se a metodologia de dimensionamento correntemente utilizada em Portugal que se divide em três etapas fundamentais: o pré-dimensionamento, a análise estrutural de um pavimento e por fim a previsão do desempenho e cálculo do dano. Posteriormente, apresenta-se um novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários que estabelece uma nova abordagem para considerar dados de tráfego coletados em estações de pesagem dinâmica (WIM). Finalmente, são analisados trabalhos já realizados no âmbito da definição de novos fatores de agressividade e apresenta-se a metodologia na qual se baseia a presente dissertação, nomeadamente a simulação de veículos pesados.

No terceiro capítulo, é apresentado o caso de estudo. Numa primeira fase, é feita uma análise e filtragem dos dados de tráfego coletados numa estação WIM e são simulados os veículos pesados de mercadorias considerados no trabalho, de onde resultam valores das cargas por eixo. Seguidamente, define-se a estrutura do pavimento a considerar no trabalho e calcula-se a resposta da mesma. Por fim, calculam-se os fatores de agressividade e analisam-se os resultados obtidos.

No quarto e último capítulo, apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos no âmbito da presente dissertação.

2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS – a ação do tráfego

2.1 Considerações iniciais

O dimensionamento de pavimentos rodoviários tem como intuito evitar a ocorrência de degradações estruturais, nas camadas do pavimento e da fundação, durante o período de vida útil.

Tal como em todas as estruturas de Engenharia Civil, para o dimensionamento de pavimentos rodoviários é necessário proceder às seguintes etapas: definição das ações; seleção dos materiais; pré-dimensionamento; análise de tensões e deformações; verificação da estrutura adotada e análise económica.

Na Figura 2.1 encontra-se representado o organigrama de dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis.

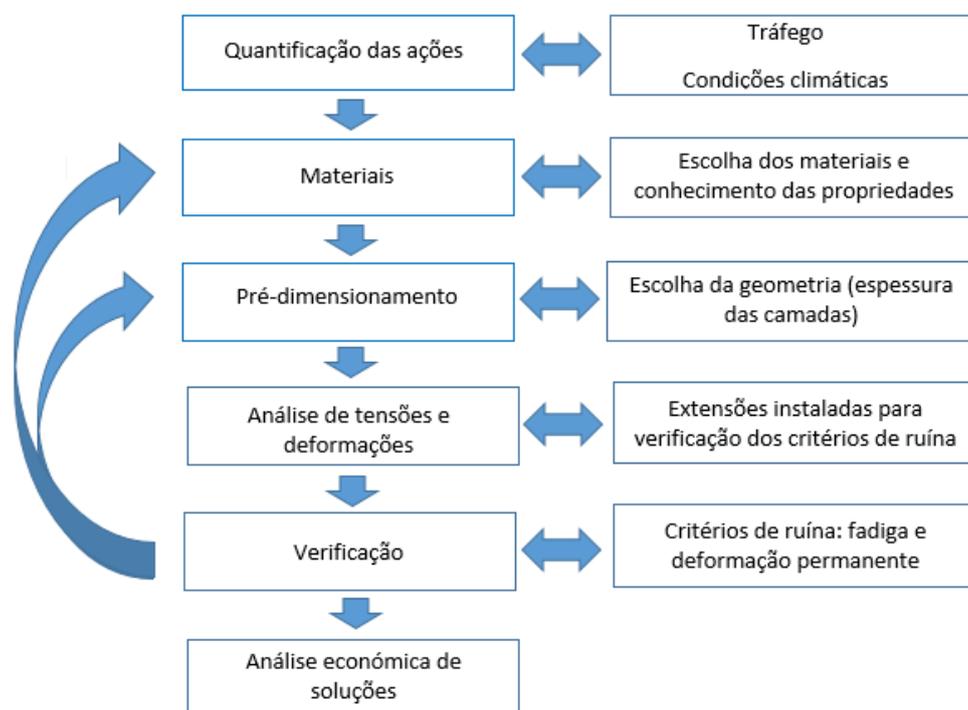


Figura 2.1 - Organigrama do dimensionamento de pavimentos flexíveis (Baptista, 1999)

De acordo com a Figura 2.1, as ações de extrema importância para o dimensionamento dos pavimentos rodoviários são o tráfego e as condições climáticas, uma vez que estas influenciam bastante o comportamento estrutural dos pavimentos. Contudo, no âmbito desta dissertação, apenas serão considerados os efeitos do tráfego.

2.2 A ação do tráfego

2.2.1 Introdução

Como referido, neste trabalho considera-se apenas a ação que o tráfego rodoviário exerce nos pavimentos. Como tal, tornou-se pertinente conhecer, primeiramente, os tipos de veículos em circulação e suas características, nomeadamente a classificação, dimensão e pesos por eixos, bem como a eficiência desses mesmos veículos, relativamente à carga transportada, isto é, saber se os veículos circulam totalmente carregados em peso ou em volume.

Com o intuito de perceber a situação do tráfego em Portugal, foram analisados os dados facultados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) e pelo Eurostat.

2.2.2 Tipos de veículos

O tráfego rodoviário é composto por uma vasta gama de veículos bem como diversos tipos de eixos. Em Portugal, a Junta Autónoma de Estradas (JAE), atual Infraestruturas de Portugal (IP), organizou os diversos tipos de veículos em onze categorias de “a” a “k”, como indica a Figura 2.2.

Para efeitos de dimensionamento dos pavimentos, apenas é considerado o efeito provocado pelo tráfego de veículos pesados, categorias f, g, h, i, j e k, uma vez que as cargas por eixo dos veículos ligeiros apresentam um efeito desprezável.

CATEGORIA	SILHUETAS	DESCRIÇÃO
a		Velocípedes sem motor auxiliar
b		Velocípedes com motor auxiliar
Velocípedes		Categorias a + b
c		Motociclos com ou sem "side car"
d		Automóveis com ou sem reboque, incluindo os veículos comportando o máximo de 9 lugares
e		Camionetas até 3 000 kg de carga com ou sem reboque
Ligeiros		Categorias c + d + e
f		Camhões de mais de 3 000 kg de carga sem reboque
g		Camhões com um ou mais reboques
h		Tratores com semi-reboque Tratores com semi-reboque e um ou mais reboques Tratores com um ou mais reboques
i		Autocarros e trolleybus
j		Tratores agrícolas
k		Tratores sem reboque ou semi-reboque e veículos especiais (cilindros, bulldozers, ...)
Pesados		Categorias f + g + h + i + j + k
Motorizados		Ligeiros + pesados
Total geral		Velocípedes + ligeiros + pesados
Mercadorias		Categorias e + f + g + h

Figura 2.2 - Classificação dos veículos automóveis (Lima e Quaresma, 1999)

Os veículos pesados podem ser divididos em diversas subclasses, de acordo com o arranjo dos eixos, como ilustra a Figura 2.3.

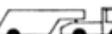
Classes dos veículos		Peso máximo por eixo (t)					
		1º eixo	2º eixo	3º eixo	4º eixo	5º eixo	6º eixo
F1		7,6	12,2				
F2		7,6	10,2	10,2			
F3		10,2	10,2	12,2			
F4		10,2	10,2	10,2	10,2		
G1		7,6	12,2	8,2	8,2		
G2		7,6	12,2	8,2	8,2	8,2	
G3		7,6	10,2	10,2	8,2	8,2	
H1		7,6	12,2	10,2			
H2		7,6	10,2	10,2	10,2		
H3		7,6	12,2	10,2	10,2		
H4		7,6	10,2	10,2	10,2	10,2	
H5		7,6	12,2	8,2	8,2	8,2	
H6		7,6	10,2	10,2	8,2	8,2	8,2
I1		7,6	12,2				
I2		7,6	10,2	10,2			

Figura 2.3 - Peso máximo por eixo para as diversas subclasses de pesados (adaptado de Pais e Pereira, 2016)

Através dos dados facultados pelo INE, foi possível elaborar o gráfico apresentado na Figura 2.4 onde se constata que a maioria dos veículos pesados, em Portugal, é de transporte de mercadorias. Como tal, na presente dissertação apenas esses veículos serão considerados.

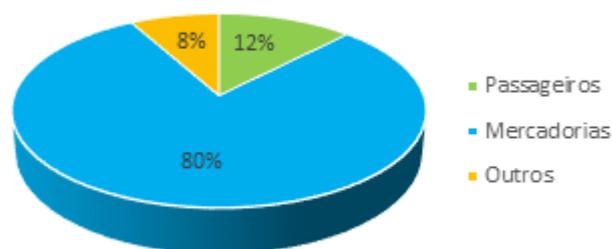


Figura 2.4 - Média da percentagem de veículos pesados em circulação entre 2010 e 2015 (INE @ 2016)

Para uma correta avaliação do efeito que os veículos pesados exercem sobre os pavimentos, é importante conhecer algumas das suas características.

Relativamente às cargas por eixos dos veículos pesados, estas dependem essencialmente do tipo de veículo e do tipo de carga. Em Portugal, o regulamento que impõe as características relativas aos pesos máximos dos veículos pesados é o Decreto-lei nº 133/2010, cujos alguns valores se apresentam no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Peso máximo para diversos tipos de veículos pesados (Decreto Lei nº 133/2010)

Tipo de veículos	Peso máximo (t)
A motor	
De 2 eixos	19
De 3 eixos	26
De 4 ou mais eixos	32
Autocarros articulados de 3 eixos	28
Autocarros articulados de 4 ou mais eixos	32
Conjunto trator - semi-reboque	
De 3 eixos	29
De 4 eixos	38
De 5 ou mais eixos	40
De 5 ou mais eixos transp. um contentor ISO de 40 pés	44
Conjunto motor - reboque	
De 3 eixos	29
De 4 eixos	37
De 5 ou mais eixos	40
De 5 ou mais eixos transp. dois contentores ISO de 20 pés	44
De 5 ou eixos que efetuam o transporte de material lenhoso	60
Reboques	
De 1 eixo	10
De 2 eixos	18
De 3 ou mais eixos	20

O Decreto-lei nº 133/2010 apresenta também as dimensões máximas para os veículos pesados como indica o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Dimensões máximas (Decreto Lei nº 133/2010)

Características	Tipo de veículos	Dimensões (m)
Comprimento	Veículo a motor (2 ou mais eixos)	12
	Reboque (um ou mais eixos)	12
	Veículo articulado (três ou mais eixos)	16,5
	Conjunto veículo a motor-reboque	18,75
	Máquinas com motores rebocáveis	20
	Veículo a motor com semi-reboque	25,25
Largura	Todos os veículos	2,55
	Veículos de transporte condicionado	2,6
	Máquinas com motores rebocáveis	3
Altura	Veículos e seus reboques	4
	Máquinas com motores rebocáveis	4,5

As dimensões máximas dos veículos pesados, que realizam o transporte internacional de mercadorias na União Europeia (UE), são estabelecidas na Diretiva 96/53/CE. Esta Diretiva estabelece que o comprimento máximo para os veículos articulados e para os comboios rodoviários é de 16,5 m e 18,75 m, respetivamente, e limita o peso bruto máximo dos mesmos em 40 ou 44 t.

Apesar da Diretiva 96/53/CE estabelecer as dimensões e pesos máximos dos veículos na UE, tais regulamentações podem variar entre os Estados Membros como se pode verificar no Fórum Internacional de Transportes (ITF @ 2017).

Uma vez que na Suécia e na Finlândia são permitidos veículos mais longos, a Diretiva 96/53/CE implementou o Sistema Modular Europeu (EMS). O EMS consiste num “conceito modular” que permite combinações de unidades de carga existentes (módulos) em combinações de veículos mais longos e por vezes mais pesados (Åkerman e Jonsson, 2007). Através do “conceito modular” torna-se possível minimizar o número de movimentos de transporte de três para dois veículos (Burgess *et al.* 2010), como indica a Figura 2.5.

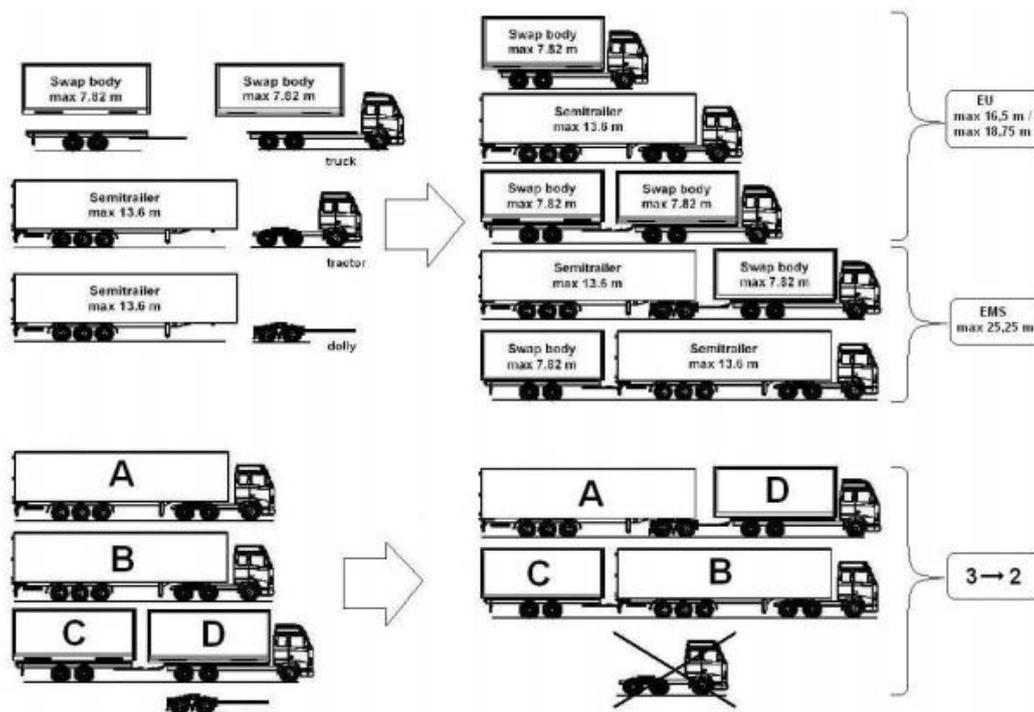


Figura 2.5 - Conceito modular (Åkerman e Jonsson, 2007)

Com o intuito de verificar os benefícios do conceito modular, alguns estudos têm sido realizados. Tais estudos apontam para uma melhoria da segurança, uma redução nas emissões de gases com efeitos de estufa e um insignificante aumento do desgaste das estradas (Burgess *et al.* 2010). Verweij *et al.* (2010) concluíram também que o uso do conceito modular, na Europa, traduzia-se num impacto social e económico positivo, embora fosse necessário considerar cuidadosamente o impacto nas infraestruturas.

2.2.3 Carga útil

Para obter as cargas por eixo de veículos pesados de mercadorias é importante conhecer a eficiência desses transportes relativamente à carga útil transportada, que deveria ser igual à carga máxima, quer em termos de massa, quer em termos de volume.

A carga útil é limitada em peso ou em volume, e é a densidade da carga que determina qual será o caso (OCDE, 2011). O Quadro 2.3 apresenta valores de densidade de algumas mercadorias mais comuns.

Quadro 2.3 – Densidade de mercadorias comuns (OCDE, 2011)

Mercadorias	Densidade (t/m ³)
Água, leite, cerveja, etc.	1
Combustível, óleo, álcool, etc.	0,6-0,8
Terra	1,3-2,0
Betão	2,2
Tijolos	1,9
Ligas metálicas	2,7
Aço	7,9
Madeira (seca)	0,5-0,9
Borracha	1,2
Caixas de cerveja com 20 garrafas vazias (0,3mx0,3mx0,4m) pesam 10 kg	0,3
Caixas de cerveja com 20 garrafas cheias (mesmo tamanho, mas 20 kg)	0,6
Refrigeradores	0,13
Nove automóveis de passageiros, 1,5 t cada, num transportador de 100 m ³	0,135
Itens despachados únicos (parcelas)	0,15
Espuma de plástico	0,04

Na Europa, os veículos articulados possuem uma capacidade volúmica de 100 m³ e um peso máximo que ronda as 26 t. Dividindo 26 t por 100 m³, obtém-se a densidade de carga (0,26 t/m³) que carregou na totalidade o veículo tanto em volume como em peso. Contudo, quando a densidade é inferior a 0,26 t/m³ a carga útil é limitada pelo volume, não atingindo o peso máximo permitido.

Segundo a OCDE (2011), a maioria dos transportes rodoviários de mercadorias é limitada pela capacidade de volume em vez da capacidade de carga útil. Na Europa, os veículos de mercadorias utilizam cerca de 80% do volume e apenas 60% do peso.

De forma a melhorar a eficiência do transporte rodoviário de mercadorias é possível aumentar o fator de carga¹ e reduzir as viagens sem carga. Estes dois indicadores da utilização da capacidade de carga podem ser conseguidos através de consolidação das cargas e de ferramentas avançadas com informação a tempo real - OCDE (2011).

2.2.4 Parque automóvel em Portugal

Além da necessidade de conhecer as características dos pesados de mercadorias é também importante perceber quais as configurações dos veículos pesados mais comuns na rede rodoviária nacional. Como tal, considerou-se pertinente elaborar alguns gráficos que

¹ Fator de carga é a relação entre a carga média útil, quando carregado, e a carga máxima útil, expressa em termos de massa ou volume.

demonstram a evolução dos veículos pesados por género e capacidade de carga, recorrendo a dados estatísticos sobre transporte rodoviário de mercadorias, facultados anualmente pelo INE.

De notar que os dados a seguir apresentados, da Figura 2.6 à Figura 2.11, estão compreendidos entre os anos 1998 e 2015 embora não contemplem os anos entre 2000 e 2003, uma vez que, nesse período, os dados relativos ao transporte por conta própria não foram recolhidos pelo INE.

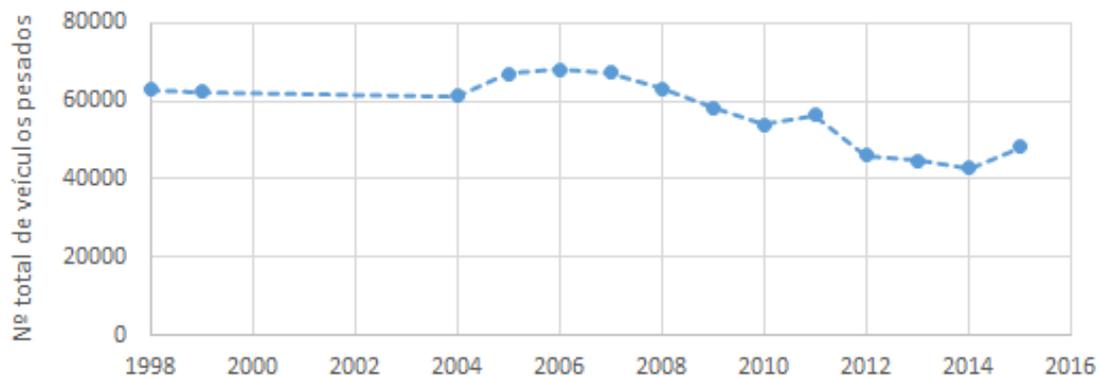


Figura 2.6 - Número total de veículos pesados (INE @ 2016)

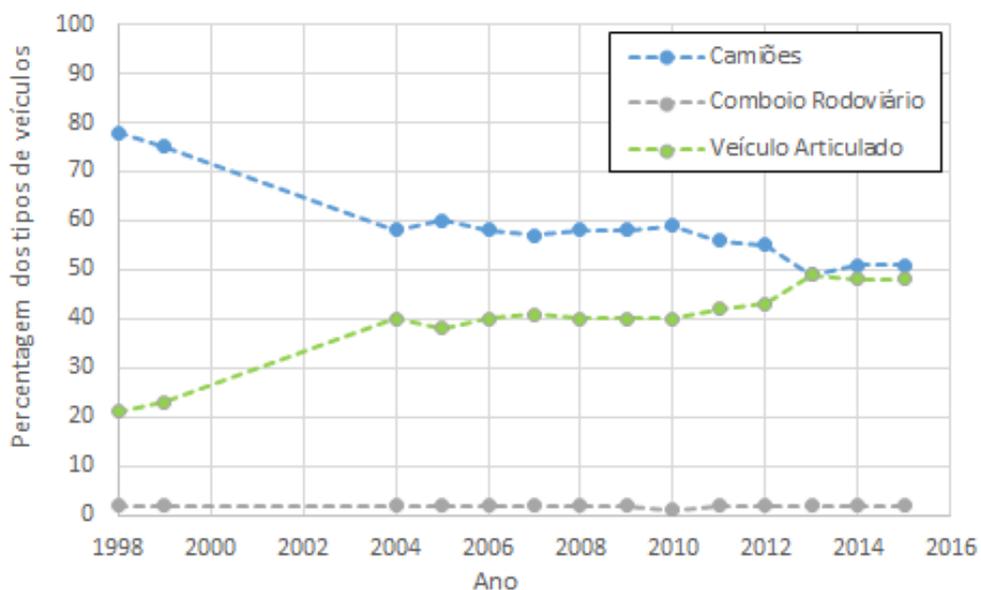


Figura 2.7 - Percentagem por tipo de veículos (INE @ 2016)

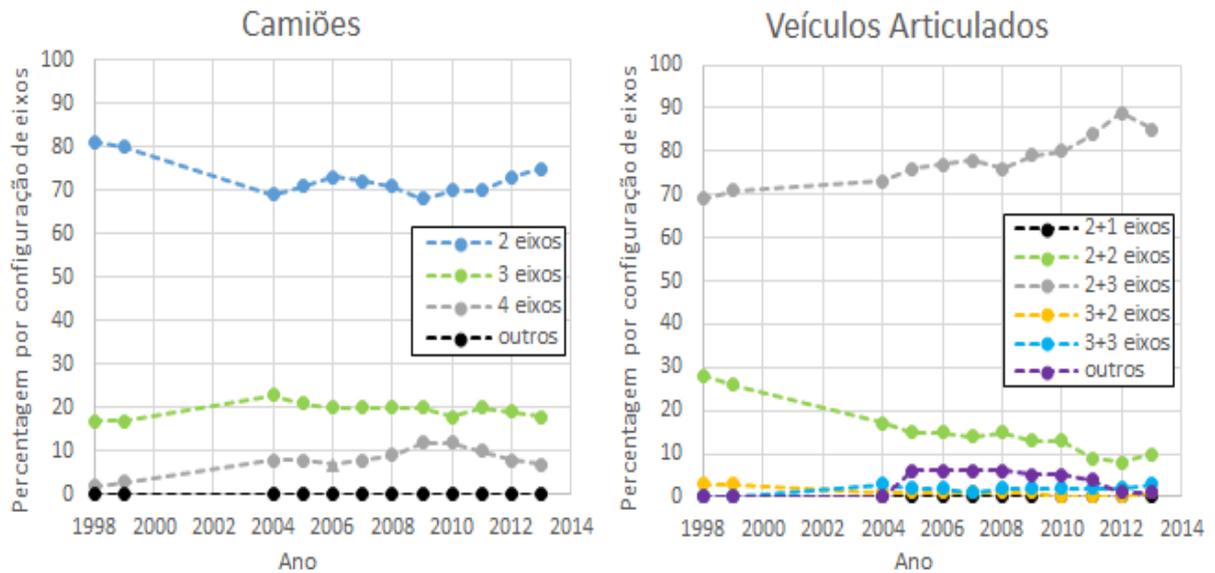


Figura 2.8 – Percentagem dos dois tipos de veículos predominantes por configuração dos eixos (INE @ 2016)

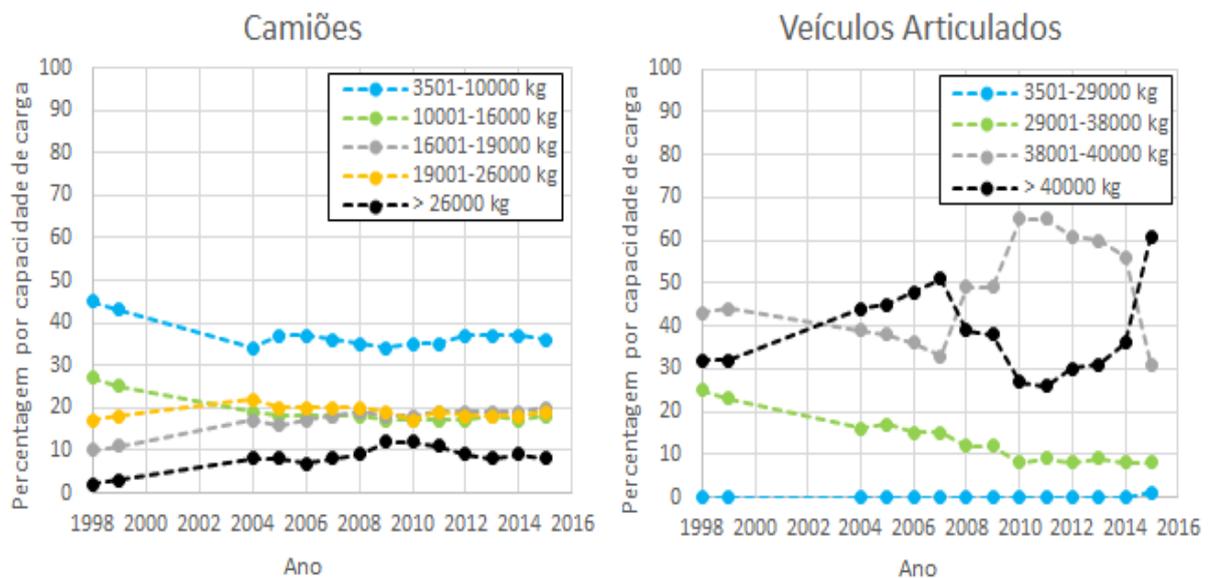


Figura 2.9 – Percentagem dos dois tipos de veículos predominantes por capacidade de carga (INE @ 2016)

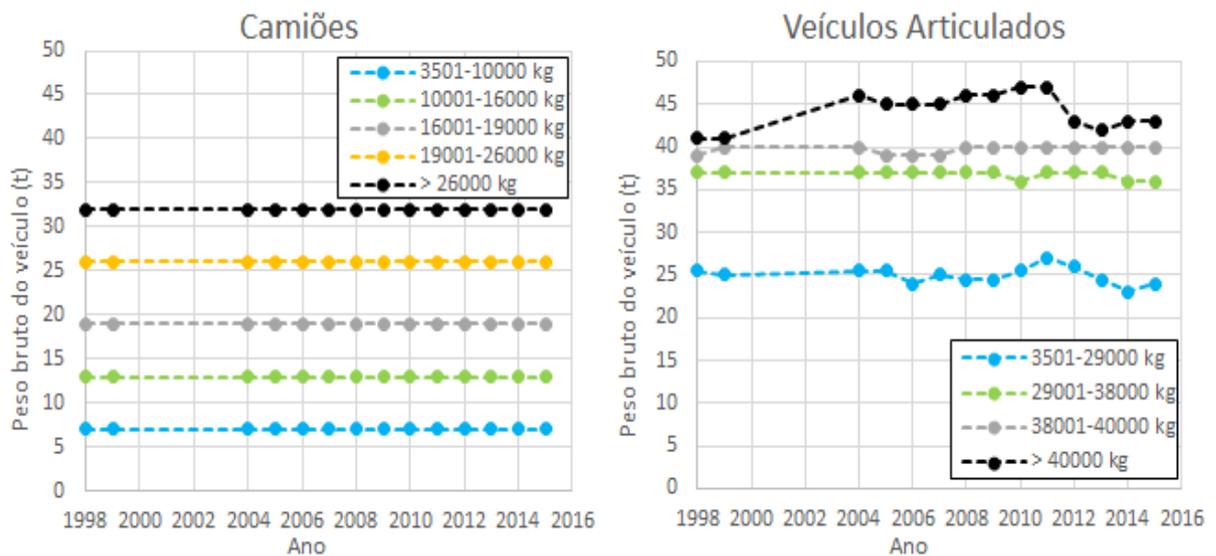


Figura 2.10 - Peso bruto dos veículos por capacidade de carga (INE @ 2016)

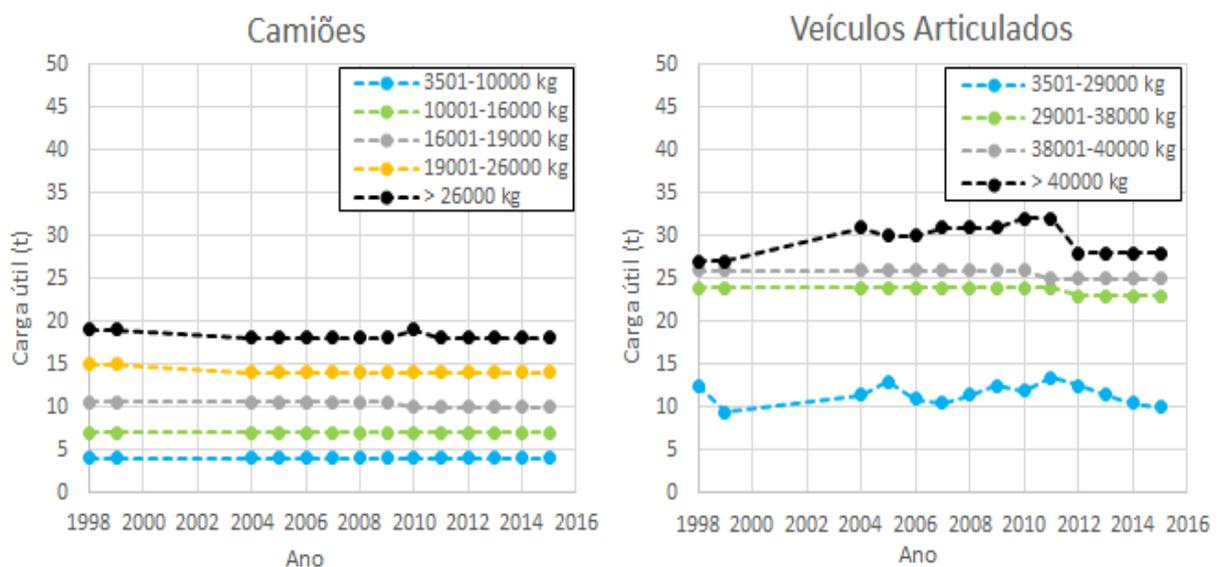


Figura 2.11 – Carga útil dos veículos por capacidade de carga (INE @ 2016)

Da análise da Figura 2.6 à Figura 2.11 é possível verificar que:

- O número de veículos pesados sofreu um decréscimo nos últimos 10 anos;
- A frota de veículos pesados de mercadorias é constituída essencialmente por camiões e veículos articulados;
- Entre 1998 e 2013 o número de camiões tem vindo a diminuir contrariamente ao número de veículos articulados;

- Dos dois tipos de veículos pesados predominantes a configuração de eixos mais usual é de 2 eixos para os camiões (Subclasse F₁) e de 2+3 eixos para os veículos articulados (Subclasse H₅);
- Em 2013 (últimos dados relativos à configuração de eixos), os veículos da classe F₁ e H₅, constituíam 78% dos veículos pesados;
- Entre 2014 e 2015 verifica-se um grande aumento na percentagem de veículos articulados com peso acima das 40 t (Figura 2.9) talvez devido à alteração referida no Decreto-Lei n.º133/2014 art.8º-A.
- Quanto à capacidade de carga, entre 1998 e 2015, 37% dos camiões pesava cerca de 7 t, 55% pesava entre 13 a 26 t e apenas 8% excedia as 26 t;
- Relativamente aos veículos articulados, cerca de 48% pesavam 40 t embora em 2015 se tenha notado um decréscimo acentuado;
- No mesmo período de tempo, cerca de 37% dos camiões apresentavam uma carga útil de aproximadamente 4 t, 55% carregava cargas compreendidas entre 7 e 15 t e apenas 8% das cargas excediam os 18 t;
- Os veículos articulados mais comuns transportavam cargas na ordem das 26 t.

Recorrendo à base de dados do Eurostat (Eurostat @ 2017) foi possível determinar a percentagem média de veículos/km que circularam vazios no período 2006-2015, como ilustra a Figura 2.12.

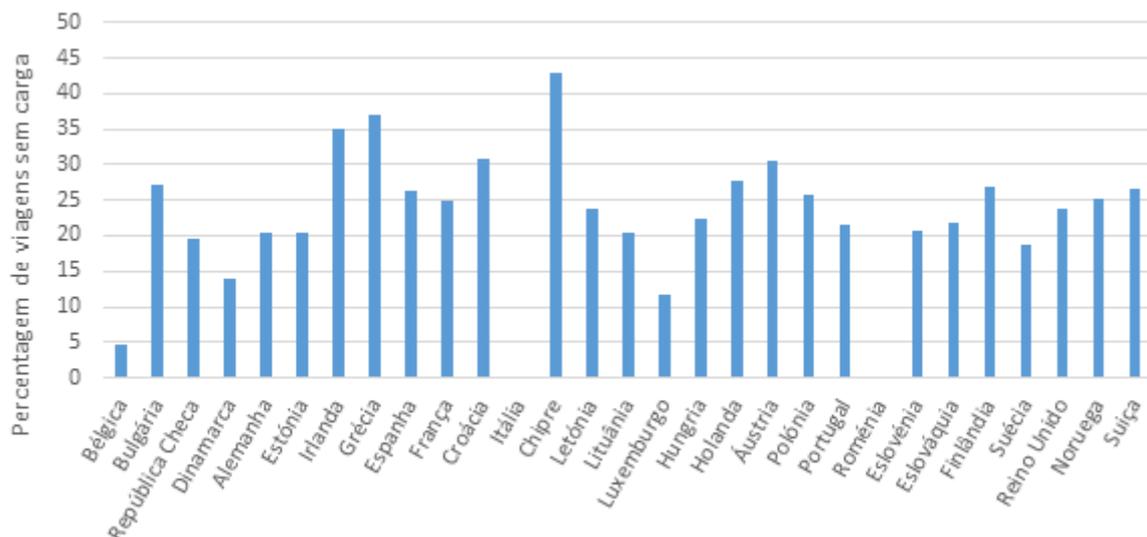


Figura 2.12 - Percentagem de veículos/km que circulam vazios (Eurostat @ 2017)

Da análise da Figura 2.12 é possível constatar que o valor relativo a Portugal é cerca de 22%, bem como a média para todos os países.

Para o mesmo intervalo de tempo, calculou-se o fator de carga, em massa e para cada país, do camião de dois eixos e dos veículos articulados de 2+2 eixos e 2+3 eixos, que serão objeto de estudo da presente dissertação. Para o efeito, dividiu-se as toneladas/km pelos veículos/km e por último pela carga máxima (13,2 t, 24 t e 26 t, respetivamente). As Figura 2.13, Figura 2.14 e Figura 2.15 apresentam os resultados obtidos, para o camião de dois eixos e os veículos articulados de 2+2 eixos e de 2+3 eixos, respetivamente.

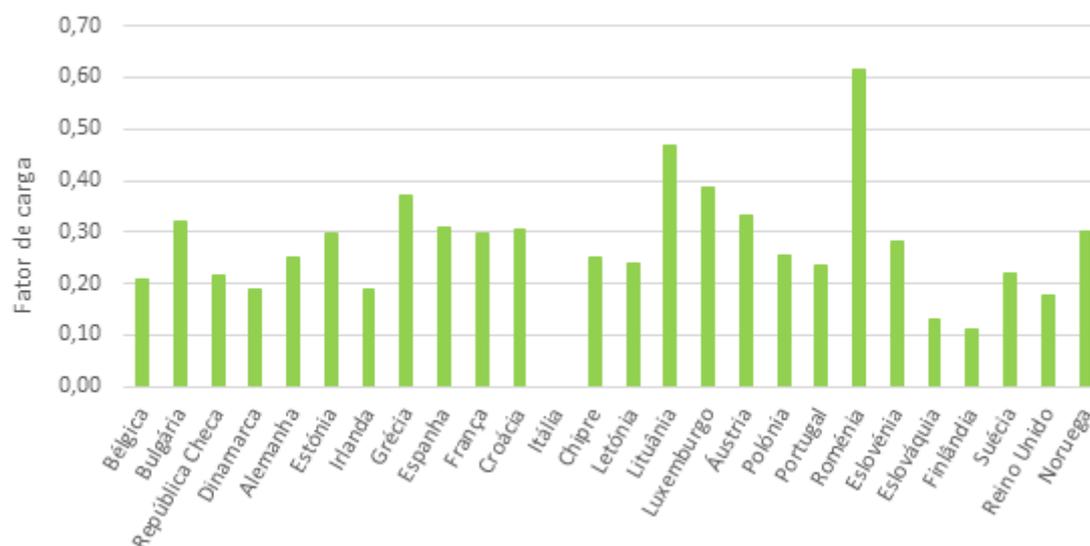


Figura 2.13 – Fator de carga para o camião de dois eixos (Eurostat @ 2017)

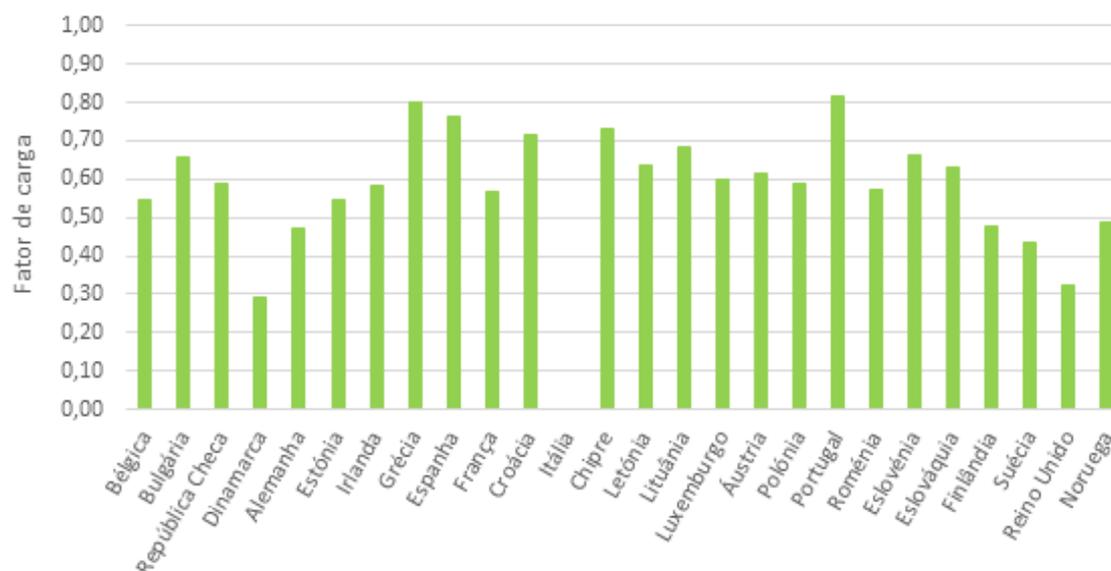


Figura 2.14 - Fator de carga para o veículo articulado de 2+2 eixos (Eurostat @ 2017)

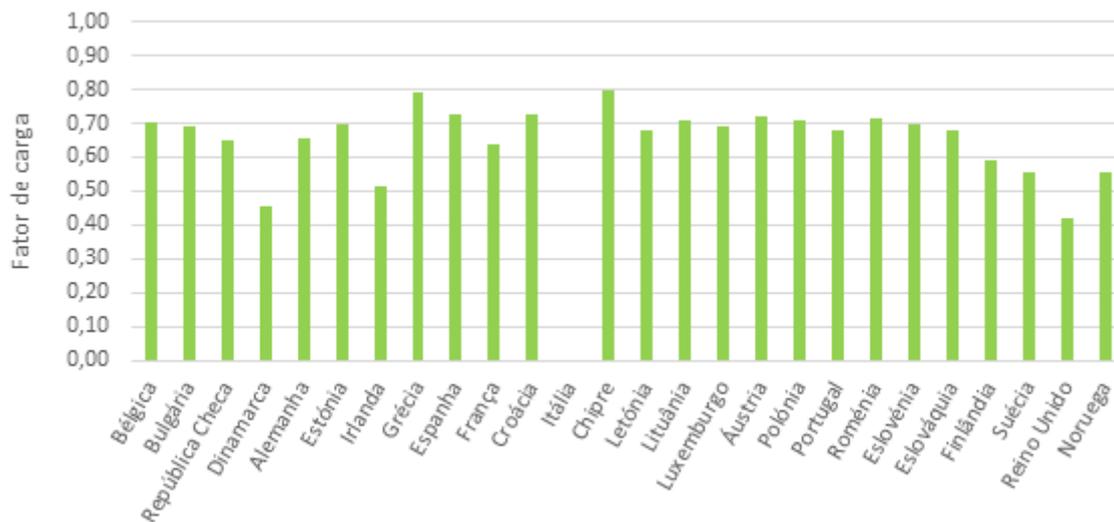


Figura 2.15 - Fator de carga para o veículo articulado de 2+3 eixos (Eurostat @ 2017)

Através das Figura 2.13, Figura 2.14 e Figura 2.15 é possível verificar que o fator de carga médio para os veículos referidos é cerca de 0,3, 0,6 e 0,7, respetivamente.

2.3 Metodologia de dimensionamento correntemente utilizada

2.3.1 Introdução

Uma vez conhecidos quais os veículos a considerar no dimensionamento de pavimentos rodoviários e os mais predominantes nas estradas portuguesas, estão reunidas as condições para perceber como se realiza o dimensionamento de pavimentos flexíveis em Portugal.

O presente subcapítulo descreve a metodologia mais adotada em Portugal, a qual, de forma sucinta, se divide nas seguintes etapas: o pré-dimensionamento, a análise estrutural do pavimento, a previsão de desempenho e o cálculo do dano.

2.3.2 Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento depende do volume de tráfego que solicitará a estrutura durante o período de vida útil. É assim necessário efetuar estudos de previsão de tráfego, através dos quais é possível elaborar modelos que fornecem o tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDA_P), bem como a respetiva taxa de crescimento anual do tráfego pesado (t). De acordo com Branco *et al.* (2011), depois de conhecidos os valores referidos, é possível determinar o somatório do número de veículos pesados (N_{pes}), que solicitam o pavimento durante o número

de anos da vida útil através da equação (1). Considera-se, correntemente, para pavimentos flexíveis um período de vida útil (n) de 20 anos,

$$N_{pes} = TMDA_1 \times \frac{(1+t)^n - 1}{t} \times 365 \quad (1)$$

Depois de conhecido o tráfego total de veículos pesados que circula nos dois sentidos durante a vida útil (N_{pes}), é necessário proceder à distribuição do mesmo pelas vias, isto é, embora a circulação do tráfego pesado se faça predominantemente na via situada mais à direita, pode repartir-se pelas diversas vias existentes num dado sentido, caso exista mais do que uma via, como descreve o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) – JAE (1995).

O Quadro 2.4 indica as percentagens de tráfego, para a via mais solicitada (via de projeto), no caso de existirem duas ou mais vias no mesmo sentido.

Quadro 2.4 - Percentagem do tráfego na via mais solicitada (JAE, 1995)

Nº de vias	Via mais solicitada
2	90
3 ou mais	80

De forma a exprimir o efeito de um dado número acumulado de passagens de veículos pesados com características muito diversas, o MACOPAV estabelece os fatores de agressividade apresentados no Quadro 2.5, através dos quais é possível fazer a conversão em passagens equivalentes de um eixo-padrão.

Em Portugal, para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, é usual utilizar-se um eixo-padrão de carga 80 kN (valor preconizado no MACOPAV). Porém, à semelhança de outros países, alguns estudos, principalmente em estradas com grande volume de tráfego, consideram um eixo-padrão de 130 kN. O MACOPAV prevê também o uso de 130 kN no dimensionamento de pavimentos rígidos e semi-rígidos.

Sendo os fatores de agressividade a base da presente dissertação, o estudo dos mesmos será aprofundado posteriormente.

Quadro 2.5 – Caracterização do tráfego (JAE, 1995)

Classe	(TMDA) _p	Taxa de crescimento médio (t)	Pavimentos Flexíveis	
			Fator de agressividade (α)	N ₈₀ (20 anos)
T7	<50	estudo específico		
T6	50 - 150	3	2	2×10^6
T5	150 - 300		3	8×10^6
T4	300 - 500	4	4	2×10^7
T3	500 - 800		4,5	4×10^7
T2	800 - 1200	5	5	7×10^7
T1	1200 - 2000		5,5	10^8
T0	>2000	estudo específico		

Como é possível verificar no quadro acima, o MACOPAV agrupa o tráfego em oito classes, dependendo dos valores do TMDA de pesados na via de projeto. A cada classe corresponde um determinado fator de agressividade e uma determinada taxa de crescimento médio anual.

Por fim, é possível concluir que o número acumulado de eixos-padrão, durante o período de dimensionamento (N₈₀) determina-se em função do N_{pes} (calculado pela equação (1)) e do fator de agressividade (α), como indica a equação (2).

$$N_{80} = N_{pes} \times \alpha \quad (2)$$

Depois de determinado o número acumulado de eixos-padrão (N₈₀), e conhecendo a classe de tráfego e a classe de fundação é possível obter a geometria das camadas que se obtêm do pré-dimensionamento.

De notar que, atendendo às características dos materiais do solo de fundação, é, já nesta etapa, possível determinar os módulos de deformabilidade correspondentes às camadas granulares e de fundação, importantes para o dimensionamento dos pavimentos.

2.3.3 Análise estrutural do pavimento

Para realizar a análise estrutural, é necessário definir a geometria das cargas que atuam no pavimento.

Para efeitos de dimensionamento, considera-se para o eixo-padrão, um eixo simples constituído por um rodado de duas rodas gémeas em cada extremo, afastadas uma da outra de uma distância (L). Assume-se que a área de contacto de cada roda com o pavimento (A), é circular de raio (r)

e que a pressão de contacto (p), é igual à pressão de enchimento dos pneus. Assim, conhecida a carga P do eixo-padrão, cada roda descarrega $P/4$, distribuída por uma área de $P/4p$.

A Figura 2.16 apresenta o esquema do rodado padrão utilizado nos métodos de dimensionamento empírico-mecanicistas mais usados em Portugal (Método da Shell e Método de Nottingham).

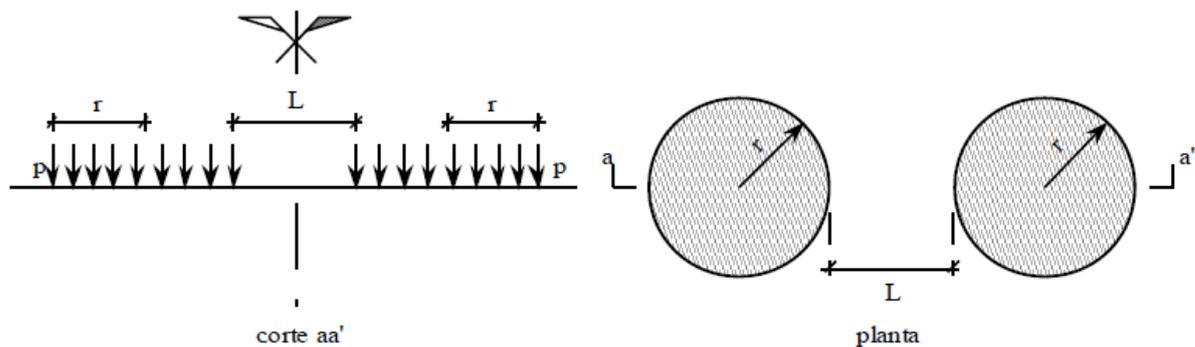


Figura 2.16 - Esquemática do rodado padrão pelos métodos de dimensionamento da Shell e Nottingham (Branco *et al.* 2011)

Nos dois métodos referidos utilizam-se os seguintes valores para as características consideradas:

- Shell:
 $L=105$ mm; $p=0,6$ MPa; $r=105$ mm
- Nottingham:
 $L=150$ mm; $p=0,5$ MPa; $r=113$ mm

Devido às alterações que se têm vindo a notar relativamente à configuração dos eixos dos veículos pesados de mercadorias, que consistem na substituição do rodado duplo em alguns eixos por rodados simples de base larga, modelos mais avançados consideram que a área de contacto entre o pneu e o pavimento possui forma retangular. Uma vez que alguns *softwares*, como o BISAR (*Bitumen Stress Analysis in Roads*), apenas permitem cargas circulares, é possível modelar áreas de contacto retangulares a partir de áreas de contacto circulares, como mostra a Figura 2.17 (COST 334, 2001).

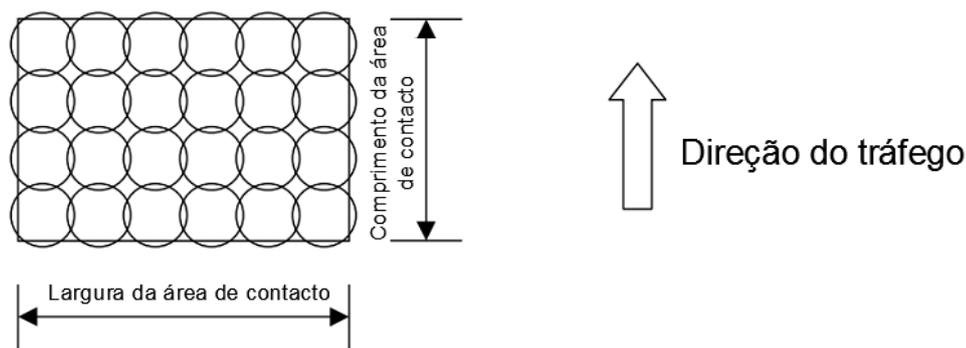


Figura 2.17 - Exemplo da modelação da área de contacto retangular (adaptado de COST 334, 2001)

2.3.4 Previsão do desempenho e cálculo do dano

O dimensionamento pelo método da Shell consiste num processo iterativo cujo objetivo é a otimização da espessura das camadas betuminosas, até se atingir um valor ao qual corresponde um dano entre 80 e 100%.

Primeiramente, é necessário determinar variáveis correspondentes às características das misturas a utilizar. Determinadas as variáveis referidas, torna-se possível efetuar o cálculo dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas.

Seguidamente, recorrendo ao *software* BISAR, calculam-se as extensões de fadiga e de deformação permanente que ocorrem num pavimento quando sujeito à carga exercida por um eixo simples de 80 kN, como demonstra a Figura 2.18.

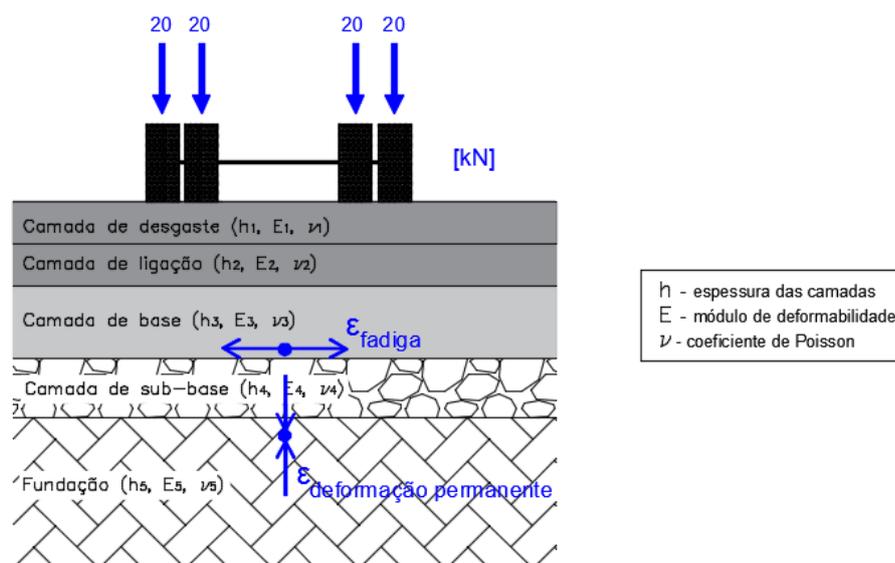


Figura 2.18 - Esquematização das extensões obtidas no *software* BISAR

Depois de obtidas as extensões de fadiga e de deformação permanente, procede-se ao cálculo dos danos respetivos, de acordo com a equação (3).

$$\text{Dano} = \frac{N_{80}}{N_{80\text{máximo}}} \quad (3)$$

Para o efeito, é necessário calcular o $N_{80\text{máximo}}$ para a fadiga e para a deformação permanente, através das equações (4) e (5), respetivamente.

$$N_{80\text{máximo}}^{\text{fadiga}} = \left[\frac{0,856 \times V_b + 1,08}{E_m^{0,36} \times \varepsilon_{\text{fadiga}}} \right]^5 \quad (4)$$

$$N_{80\text{máximo}}^{\text{def.permanente}} = k_s^4 \times \varepsilon_{\text{def.permanente}}^{-4} \quad (5)$$

Onde,

V_b - % Volumétrica de betume no volume total

E_m – Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa)

$\varepsilon_{\text{fadiga}}$ – Extensão de fadiga

k_s – Depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento (95%)

$\varepsilon_{\text{def. permanente}}$ – Extensão de deformação permanente

Tal como referido anteriormente, dever-se-á fazer tantas iterações quantas as forem necessárias, até se obter um dano compreendido entre 80 e 100%. Obtido esse valor, encontra-se definido o dimensionamento das camadas betuminosas.

2.4 MEPDG

2.4.1 Descrição

No âmbito do Projeto NCHRP 1-37A foi desenvolvido, pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASTHO) juntamente com a *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), um novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários denominado *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) – (NCHRP, 2004). Este método vem substituir o antigo método de dimensionamento da AASTHO – AASTHO (1993). Através deste novo método, o desempenho dos pavimentos é avaliado de acordo com a sua resposta relativamente aos vários parâmetros de estado (irregularidade longitudinal, rodeiras, fendilhamento e pele de crocodilo), contrariamente ao

antigo método que apenas considera o desempenho do pavimento com base no PSI (*Pavement Serviceability Index*), que depende apenas do tipo de pavimento e da classe da estrada.

Na Figura 2.19 encontra-se representado o organigrama da metodologia de dimensionamento de pavimentos rodoviários, de acordo com o novo método da AASTHO.

Juntamente com o novo guia de dimensionamento, foi também disponibilizado um *software* que permite a aplicação do novo método tendo em conta os dados de tráfego, do clima, das propriedades dos materiais e da estrutura do pavimento.

Relativamente aos dados de tráfego, Simões *et al.* (2013) referem a necessidade de introduzir no *software* o TMDA, em ambos os sentidos, o número de vias, a percentagem de pesados em cada sentido e na via de dimensionamento. O *software* requer também a percentagem do total de pesados, a taxa de crescimento e os fatores de distribuição mensal e horária, para cada classe de pesados.

Os dados de tráfego referidos são coletados em estações de pesagem dinâmica (WIM – *Weight-in-motion*). Através desses mesmos dados são obtidos os espectros de carga por eixo que representam a percentagem das aplicações totais dos eixos em diferentes intervalos de carga para vários tipos de eixos. Quando não é possível obter essa informação o MEPDG define três níveis hierárquicos com base no tipo e quantidade de dados de tráfego disponíveis (NCHRP, 2004):

1. Específico do local
2. Específico da região
3. Dados padrão ou médias estaduais

Como descrito no subcapítulo anterior, em Portugal, o dimensionamento de pavimentos rodoviários é realizado através do método da Shell com recurso ao MACOPAV, para o pré-dimensionamento. Contudo, estes métodos pouco auxiliam as administrações rodoviárias na gestão e reabilitação de pavimentos. Como tal, Simões *et al.* (2013) consideram o MEPDG uma mais-valia para as administrações rodoviárias e um método de referência mundial, no futuro.

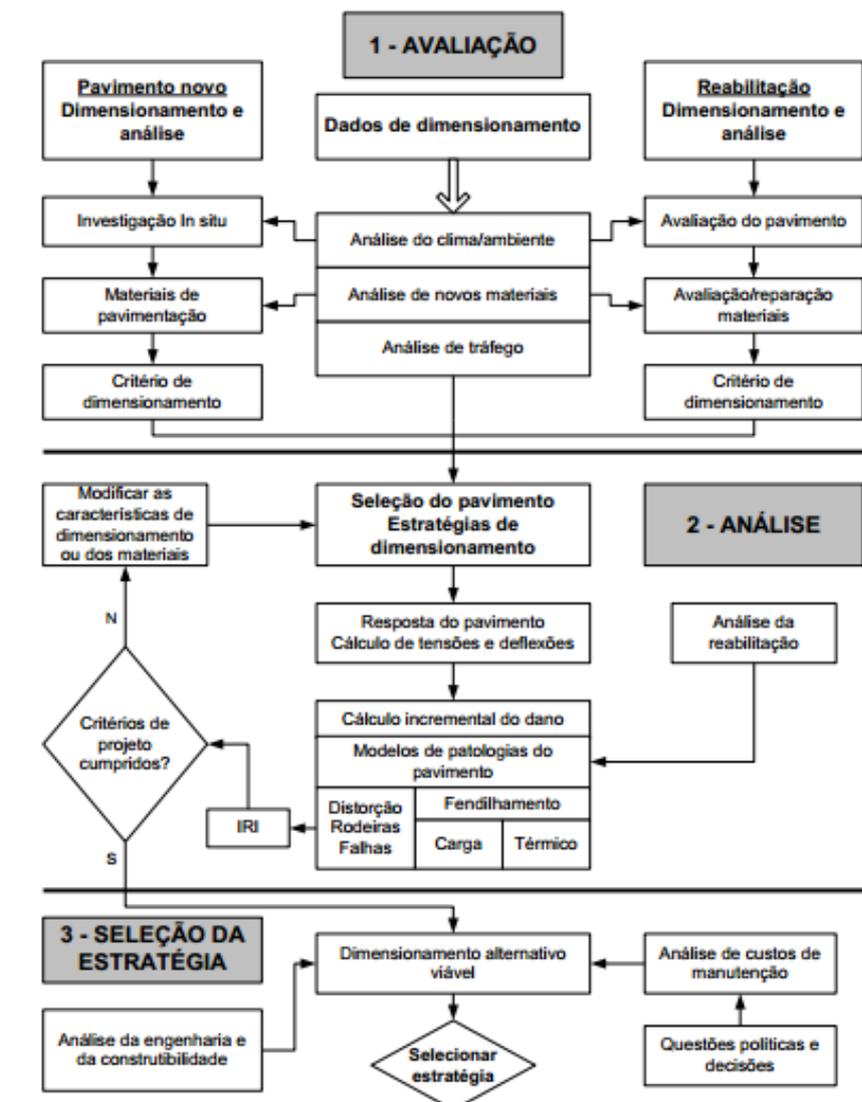


Figura 2.19 – Organograma da metodologia do dimensionamento de pavimentos rodoviários (Simões *et al.* 2013)

2.4.2 Espectros de carga

Para dimensionar corretamente um pavimento é importante conhecer com precisão os efeitos que o tráfego de pesados exerce no mesmo. Para tal, torna-se essencial conhecer não só o número e tipo de eixos mas também a distribuição das cargas por eixo dos veículos (espectros de carga). Esta distribuição tem sido alvo de inúmeros estudos para que seja considerada em futuros projetos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, substituindo assim a conversão de cargas em número de eixos-padrão fomentada pelo ensaio da *American Association of State Highways Officials* (AASHO).

De acordo com NCHRP (2004), através dos espectros de carga por eixo, o MEPDG melhorou os dados de tráfego a considerar para o dimensionamento de pavimentos através do qual é possível efetuar uma análise mais detalhada dos danos.

Embora existam os três níveis hierárquicos definidos pelo MEPDG para fazer face à indisponibilidade dos dados WIM, Romanoschi *et al.* (2011) atentam para a importância de não considerar valores médios ou valores padrão, uma vez que o estudo referente à variabilidade dos dados de tráfego coletados em cada estação WIM revelou uma grande diferença entre os valores registados e os valores padrão recomendados pelo MEPDG como ilustra a Figura 2.20.

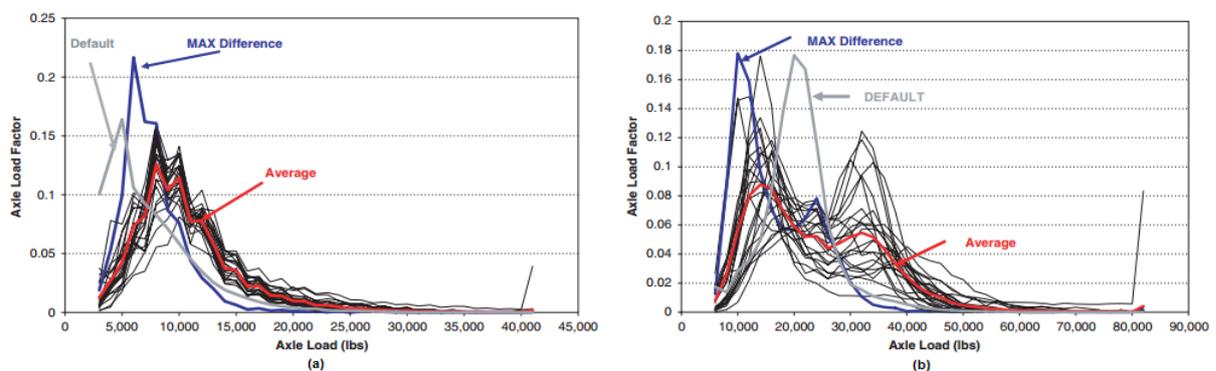


Figura 2.20 - Variação do espectro de carga por eixo: (a) eixo simples, classe F e (b) eixo duplo, classe H (Romanoschi *et al.* 2011)

Deste modo, muitos estudos têm sido realizados de forma a avaliar corretamente o efeito do tráfego pesado sobre os pavimentos, com o intuito de desenvolver métodos simplificados para produzir espectros de carga através de modelos estatísticos (Fontenele, 2011).

Para caracterizar os espectros de carga por eixo, Timm *et al.* (2005) propuseram um modelo de distribuição misto (combinação linear de distribuições normais e log-normais). Para o mesmo efeito, Haider e Harichandran (2009) usaram uma distribuição mista bimodal, como ilustra a Figura 2.21.

Jiang *et al.* (2008) *apud* Haider e Harichandran (2007), mostraram que é possível desenvolver relações razoáveis entre os espectros de carga e os pesos brutos dos veículos pesados e seus volumes. Haider e Harichandran (2009) mostraram também ser possível estabelecer uma relação entre as características da distribuição de carga e o desempenho dos pavimentos flexíveis.

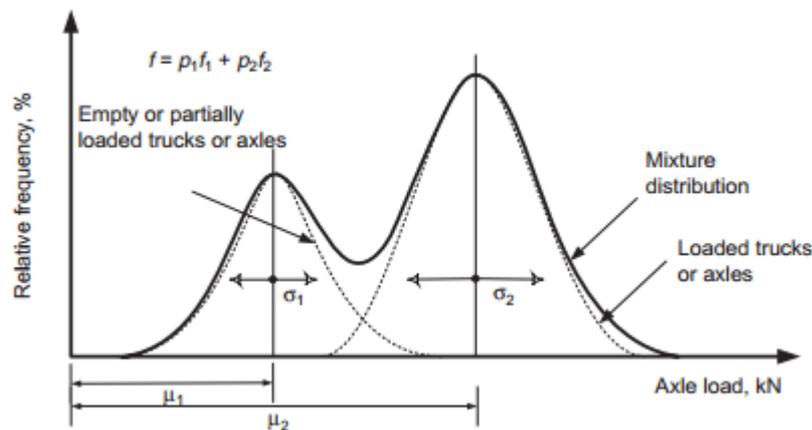


Figura 2.21 - Distribuição mista bimodal (Haider e Harichandran, 2009)

A utilização de espectros de carga implica o cálculo da resposta estrutural para as diferentes cargas que solicitam o pavimento, contrariamente à utilização do eixo-padrão, cuja resposta estrutural é calculada apenas uma vez.

Uma vez que cargas diferentes implicam áreas de contacto pneu-pavimento diferentes, Ahmed e Englingsson (2015) consideraram pertinente caracterizar os espectros de carga para a análise empírica-mecanicista de pavimentos recorrendo a três abordagens: i) o espectro de carga convertido em eixo-padrão; ii) o espectro de carga assumindo área de contacto constante; e iii) o espectro de carga assumindo pressão de contacto constante. Do estudo efetuado os autores concluíram que a terceira abordagem era a que melhor representava as condições de tráfego, mas as três produziram resultados semelhantes para as camadas abaixo dos 25 cm. Contudo, acima dos 25 cm, tanto a primeira com a segunda abordagem subdimensionam a deformação permanente.

2.4.3 Estações de medição – WIM

Na secção anterior referiu-se que os espectros de carga são definidos através dos dados de tráfego coletados em estações WIM.

De acordo com Brito (2012), a tecnologia WIM consiste na utilização de dispositivos que permitem detetar e registar o peso por eixo e o peso bruto dos veículos a partir de um local de medição, independentemente dos veículos se encontrarem em movimento ou parados. Esta tecnologia é intrusiva uma vez que requer a instalação de sensores diretamente na superfície do pavimento rodoviário.

Segundo Hallenbeck e Weinblatt (2004), existem dois tipos de sistemas WIM: de curta duração ou permanentes. O sistema de curta duração pressupõe a montagem de um sensor portátil sobre o pavimento, que devido à sua localização cria uma saliência quando o pneu passa sobre o sensor, o que afeta a precisão do sistema WIM. Deste modo, é extremamente difícil atingir o nível de precisão que se obtém dos sistemas permanentes, pelo que é necessário que as agências rodoviárias atentem na calibração dos sensores e que monitorizem os resultados obtidos após a calibração.

Quanto ao sistema permanente WIM, o mesmo é utilizado na maioria das pesquisas efetuadas devido ao seu grau de precisão relativamente aos sistemas anteriormente referidos. Nos Estados Unidos, os sistemas permanentes correntemente utilizados são os sensores piezoelétricos, placas de dobragem, células de carga hidráulica, entre outras. De acordo com os autores, todos os sistemas possuem sensores permanentemente instalados dentro ou debaixo do pavimento, originando menor força de impacto nos sensores relativamente aos sensores aplicados à superfície e menos movimento dinâmico dos veículos, o que se traduz em condições de pesagem mais precisas e numa maior vida útil dos sensores.

Hallenbeck e Weinblatt (2004) referem também a importância dos locais WIM serem locais onde os veículos viajam com velocidade constante e sem mudar de via.

Para que a utilização dos dados de tráfego coletados resultem num bom dimensionamento e gestão dos pavimentos, é importante que os sistemas WIM sejam precisos e confiáveis. Como tal, na Europa, foi desenvolvida a ação COST 323 (2002), com o principal objectivo de cobrir a necessidade de especificações completas para os sistemas WIM. Através desta ação, surgiu o Projeto WAVE (*Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe*), cujo objectivo era prover um avanço na compreensão e desenvolvimento dos sistemas WIM (WAVE, 2001).

Segundo Mimbela e Klein (2000), os sistemas piezoelétricos são a tecnologia WIM mais utilizada e contêm um ou mais sensores que detetam uma tensão causada pela pressão exercida sobre o sensor por um eixo, e medem assim o peso desse mesmo eixo. Quando um veículo passa sobre o sensor piezoelétrico, o sistema WIM grava a tensão no sensor e calcula a carga dinâmica. A Figura 2.22 mostra o esquema em planta do sistema piezoelétrico.

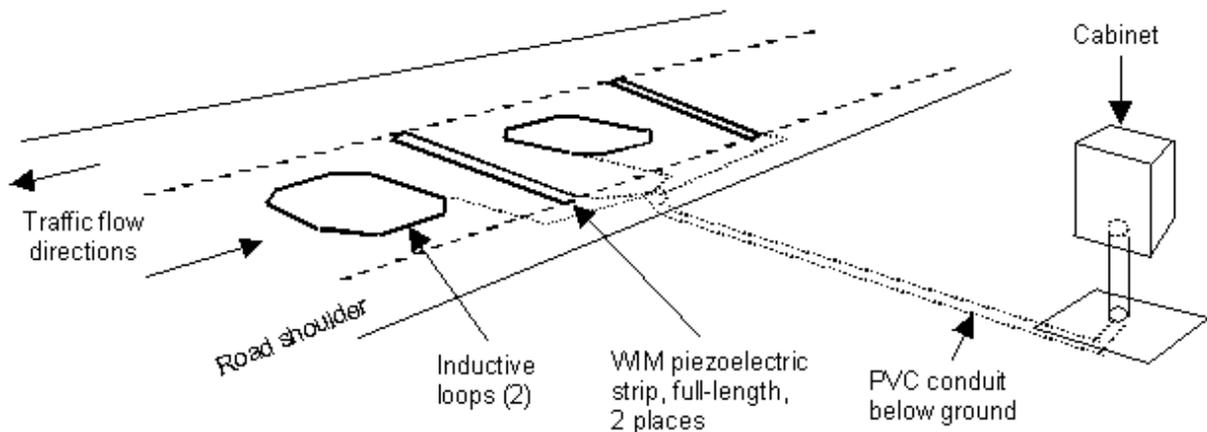


Figura 2.22 – Esquema do sistema piezoelétrico (Mimbela e Klein, 2000)

Em Portugal, a Ascendi possui equipamentos de contagem automática e classificação de veículos denominados por CAV (Contagem Automática de Veículos). Estes equipamentos são constituídos por loops indutivos e sensores piezoelétricos, que além de efetuarem a contagem de veículos em tempo real e respetiva classificação, de acordo com as diversas categorias e classes, permitem determinar volumes de tráfego em cada troço, valores de velocidade média, entre outros parâmetros.

A informação coletada é posteriormente tratada pelos equipamentos de via instalados em armários adequados (Figura 2.23), que será depois enviada para um servidor central que agrupa toda a informação que será futuramente processada (Corte-Real e Rodrigues, 2013).



Figura 2.23 – Equipamentos CAV (Ascendi)

Além dos equipamentos referidos, a Ascendi possui igualmente, estações de pesagem dinâmica (PAV – Pesagem Automática e dinâmica de Veículos) em toda a rede concessionada. Estas estações efetuam a pesagem automática e dinâmica dos veículos, possibilitando o cálculo do desgaste sofrido pelo pavimento e conseqüentemente o planeamento antecipado de intervenções.

Os dados coletados em estações WIM são utilizados por projetistas, administrações rodoviárias entre outros, para o dimensionamento e manutenção dos pavimentos rodoviários. Deste modo, é de extrema importância garantir a precisão e calibração dos sistemas WIM. Como refere Haider *et al.* (2012), os erros WIM podem ser de dois tipos: aleatórios e/ou sistemáticos. Os primeiros podem ocorrer devido ao perfil da estrada, aos veículos e ao ambiente e os segundos devido à calibração inadequada das estações WIM.

2.5 Fatores de agressividade

Tal como já fora referido, existe uma diversidade de veículos pesados que diferem em peso, número de eixos e espaçamento dos mesmos, no tipo de rodado, o que se traduz numa enorme variedade de cargas aplicadas ao pavimento. De forma a simplificar a ação que os diferentes veículos pesados exercem sobre o pavimento, foi realizado em meados do século XX, nos Estados Unidos da América (EUA), o AASHO *Road Test*, promovido pela atual AASTHO. De acordo com Branco *et al.* (2011), este ensaio permitiu concluir que, para cada tipo de pavimento, há uma relação de equivalência entre os efeitos causados por eixos com diferentes cargas, traduzida pela equação (6).

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^x = f \quad (6)$$

Onde N_1 é o número de passagens de um eixo simples de carga P_1 que provoca no pavimento um dano análogo ao de N_2 passagens de um eixo simples de carga P_2 . Por sua vez, o fator f é o fator de equivalência entre os eixos. No mesmo ensaio, os valores do expoente variaram entre 3,6 e 4,6 pelo que se tem assumido um valor de 4 para pavimentos flexíveis (expressão conhecida como a lei da potência à quarta). Contudo, pesquisas mais recentes demonstraram uma maior variabilidade do valor do expoente x , por exemplo entre 2 e 9, como refere Lima e Quaresma, (1999).

Uma vez que a equação (6) apenas contempla os eixos simples, é necessário fazer a conversão para os eixos duplos e triplos. Segundo Branco *et al.* (2011), atendendo-se à sobreposição de efeitos dos rodados, tem-se considerado que um eixo tandem (ou duplo) de peso P corresponde a 1,4 eixos simples de peso $P/2$ e que um eixo triplo de peso P equivale a 2,3 eixos simples de peso $P/3$.

Outros autores, como Gillespie *et al.* (1992) e Lima e Quaresma (1999) consideraram que um eixo múltiplo (tandem ou tridem) exerce num pavimento o mesmo efeito que um conjunto de eixos independentes.

Como tal, torna-se possível, transformar todas as cargas dos eixos e as passagens dos diversos veículos, num número equivalente de passagens de um único eixo simples, de carga arbitrariamente escolhida, designado por “eixo-padrão”.

Todavia, embora a equação (6) seja ainda bastante utilizada, alguns estudos já efetuados revelaram que a mesma equação com o expoente de valor 4 não fornece com exatidão a agressividade das cargas por eixo. De acordo com Hjort *et al.* (2008) *apud* Cebon (1999) estão subjacentes algumas limitações devido às diferenças relativas à configuração dos veículos pesados, ao volume de tráfego e aos pavimentos atuais, comparativamente aos considerados no *AASHO Road Test*.

Como tal, da imprecisão subjacente à lei da potência à quarta resultou um projeto promovido pela OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico) entre a JAE e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC (Lima e Quaresma, 1999), no qual recorrendo aos critérios de dimensionamento utilizados em Portugal, consideraram pertinente atribuir ao expoente da equação (6) o valor de 5. Assim, assumindo um valor de 8,2 tf (80 kN) para o peso por eixo-padrão, determinaram os fatores de agressividade para as diversas subclasses de tráfego para ambas as potências, verificando então que, para o expoente 4, os fatores de agressividade são mais elevados para valores de peso por eixo menores, e que, para o expoente 5, para pesos por eixo maiores corresponde fatores de agressividade também maiores. Por conseguinte, adotando uma análise conservativa foi considerada a potência 5.

No mesmo trabalho, Lima e Quaresma (1999) consideraram que a agressividade dos eixos múltiplos podia ser determinada através de dois processos. O primeiro onde o fator de equivalência entre eixos é calculado para cada sub-eixo do eixo múltiplo - método do cálculo do “eixo padrão simples” e o segundo onde o fator de equivalência é calculado para cada eixo múltiplo, mas adotando para cada eixo duplo ou triplo diferentes eixos-padrão – método do “eixo padrão múltiplo”. Os fatores de agressividade obtidos em ambos os procedimentos foram de valores aproximados à exceção das subclasses G3, H3 e H6, devido a uma distribuição desigual de carga entre os sub-eixos do eixo múltiplo.

A avaliação dos dois procedimentos referidos permitiu aos autores concluir que o segundo método subvaloriza a agressividade devido à repartição desigual da carga não poder ser avaliada. Como tal, foi adotado o método do “eixo padrão simples”.

Através dos dados obtidos numa estação de contagem/pesagem, Lima e Quaresma (1999) conseguiram determinar os fatores de agressividade para cada subclasse e classe e consequentemente o fator de agressividade global para o tráfego pesado. O Quadro 2.6 e o Quadro 2.7 apresentam os valores obtidos.

Quadro 2.6 - Fatores de agressividade para cada subclasse (Lima e Quaresma, 1999)

Subclasse	Fator de agressividade
F1	1,12
F2	3,84
F3	1,04
F4	3,74
G1	3,45
G2	5,96
G3	7,53
H1	0,15
H2	0,11
H3	9,21
H4	12,02
H5	3,29
H6	3,11
I1	1,79
I2	0,55

Quadro 2.7 – Fator de agressividade para cada classe e para o tráfego de veículos pesados em geral (Lima e Quaresma, 1999)

Classe	Fator de agressividade
F	1,72
G	2,74
H	5,37
I	1,73
Veículos pesados em geral	3,34

Do trabalho analisado é possível concluir que a classe mais agressiva é a classe H com um fator de agressividade ponderado de 5,37, ao passo que o fator de agressividade global de um veículo pesado é de 3,34.

Embora a amostra do trabalho seja de 5 dias, considerando o TMD_p calculado de 351 veículos, verifica-se que o valor obtido no Quadro 2.7 para o fator de agressividade geral é aproximado ao apresentado no Quadro 2.5.

A lei da potência à quarta apresentada na equação (6) relaciona o peso dos eixos, pressupondo que a estrutura do pavimento e que a área de contacto pneu-pavimento não se alteram. Assim sendo, a equivalência entre eixos pode ser feita a partir da resposta estrutural em função do mecanismo de degradação que se está a considerar. Considerando os critérios de ruína correntemente considerados em Portugal, fadiga - equação (4) e deformação permanente – equação (5), chega-se aos seguintes fatores de equivalência entre eixos - fadiga - equação (7) e deformação permanente – equação (8):

$$f_i^{\text{fadiga}} = \left(\frac{\varepsilon_P^{\text{fadiga}}}{\varepsilon_{80}^{\text{fadiga}}} \right)^5 \quad (7)$$

$$f_i^{\text{def.permanente}} = \left(\frac{\varepsilon_P^{\text{def.permanente}}}{\varepsilon_{80}^{\text{def.permanente}}} \right)^4 \quad (8)$$

Onde,

$\varepsilon_P^{\text{fadiga}}$ – Extensão horizontal de tracção na parte inferior das camadas betuminosas devido à aplicação de um eixo de P

$\varepsilon_{80}^{\text{fadiga}}$ – Extensão horizontal de tracção na parte inferior das camadas betuminosas devido à aplicação de um eixo-padrão

$\varepsilon_P^{\text{def.permanente}}$ – Extensão vertical de compressão no topo da camada de fundação devido à aplicação de um eixo de carga P

$\varepsilon_{80}^{\text{def.permanente}}$ – Extensão vertical de compressão no topo da camada de fundação devido à aplicação de um eixo-padrão

Conhecidos os fatores de equivalência entre eixos, pode-se determinar o fator de agressividade de cada veículo através da equação (9).

$$\alpha_{\text{veículos simulados}} = \sum_{i=1}^{\text{n}^\circ \text{ eixos}} f_i \quad (9)$$

Com a agressividade de cada veículo, pode-se calcular a agressividade da totalidade dos veículos pesados, isto é a agressividade da corrente de tráfego em análise.

Almeida e Picado Santos (2014) avaliaram o efeito da irregularidade do pavimento na agressividade do tráfego, uma vez que a irregularidade da superfície do pavimento excita o veículo originando cargas dinâmicas de magnitude superior às cargas estáticas. Para tal, consideraram no cálculo da agressividade as equações (7), (8) e (9).

Deste trabalho os autores concluíram que os fatores de agressividade são fortemente influenciados pela estrutura dos pavimentos, pelos critérios de ruína e pela irregularidade da superfície do pavimento.

Outro estudo para a determinação do fator de agressividade do tráfego foi realizado por Pais e Pereira (2016) onde foi considerado pertinente avaliar o efeito da sobreposição das cargas dos eixos múltiplos. Deste modo, a equação (6) é influenciada por um coeficiente k em função do tipo de eixo, como indica a equação (10).

$$f = k \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^x \quad (10)$$

Segundo os autores, o tipo de pneu dos veículos pesados afeta significativamente a avaliação dos fatores de agressividade. No entanto, de acordo com a literatura, este parâmetro não tem sido considerado devido aos sistemas de classificação de veículos identificarem apenas o tipo de eixos.

Com o intuito de determinar os fatores de agressividade em função do tipo de roda, Pais e Pereira (2016) desenvolveram um modelo através da simulação de diferentes tipos de rodados em pavimentos flexíveis com diferentes geometrias (diferentes espessuras e rigidez de camadas).

Para determinar o coeficiente k , e conseqüentemente os fatores de agressividade, foi considerado para o trabalho, como o principal modo de degradação do pavimento, o fendilhamento por fadiga, isto é, a extensão horizontal de tração na parte inferior da camada betuminosa.

Devido ao efeito da sobreposição das cargas dos eixos, os autores consideraram que a extensão de fadiga para os eixos múltiplos teria de ser obtida por uma análise de danos, uma vez que a extensão instalada na passagem do segundo eixo de eixos múltiplos é constituída pela extensão devido ao segundo eixo e a parte da extensão do primeiro eixo que não tenha sido recuperada.

Assim, para a análise dos danos, Pais e Pereira (2016) recorreram ao método de Huang (Huang, 2004), o qual consiste no cálculo das extensões instaladas no pavimento de acordo com a Figura 2.24 onde, para o primeiro eixo a extensão é obtida pelo primeiro eixo (ϵ_a) e para o segundo e terceiros eixos a extensão é a diferença entre a extensão sob o primeiro eixo (ϵ_a) e a extensão no ponto médio entre os dois eixos (ϵ_b), que resulta em $\epsilon_a - \epsilon_b$.

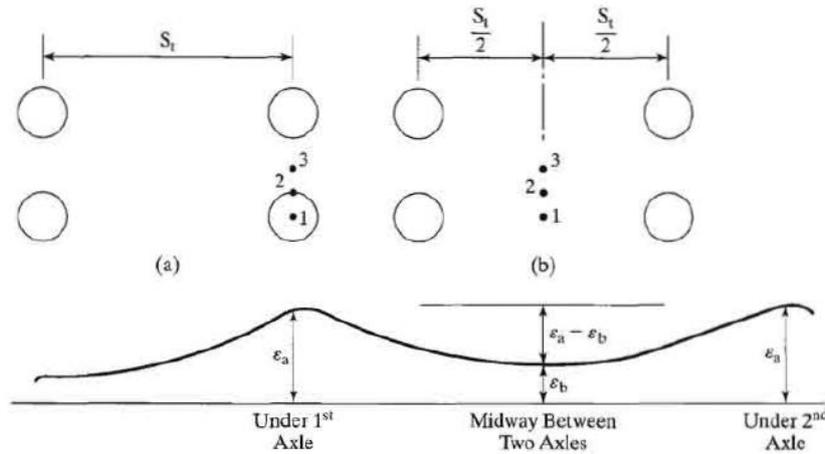


Figura 2.24 - Análise do dano para eixos múltiplos (Huang, 2004)

Relativamente ao coeficiente x da equação (10), devido às imprecisões subjacentes ao mesmo já referidas anteriormente, os autores consideraram pertinente realizar o trabalho assumindo para o efeito tanto a potência de valor 4 como a de valor 5.

Depois de obtidos os resultados do trabalho, Pais e Pereira (2016) concluíram que todas as variáveis analisadas afetam significativamente o coeficiente k e conseqüentemente os fatores de agressividade, ou seja, k diminui com o aumento da espessura e com a rigidez da camada betuminosa e aumenta com a espessura da camada granular e sua rigidez, à exceção de pavimentos com uma espessura equivalente superior a 1,2 m e para vários eixos, onde k apresenta comportamento inverso. Quanto ao tipo de roda, o trabalho demonstrou que para uma roda simples o valor de k é aproximadamente 10 vezes superior ao valor obtido para uma roda dupla, como é possível verificar na Figura 2.25.

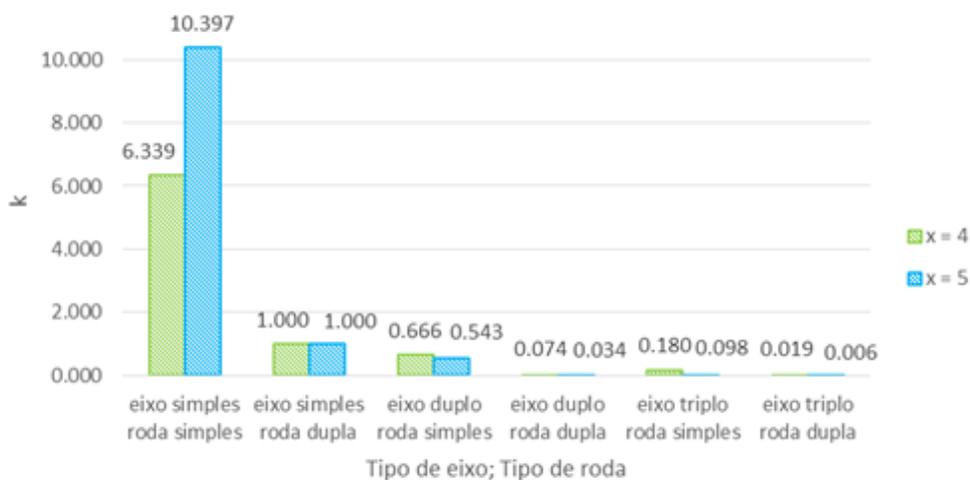


Figura 2.25 – Valores médios do coeficiente k para todos os tipos de eixos e de roda (Pais e Pereira, 2016)

2.6 Simulação de veículos pesados

Apesar dos espectros de carga por eixo serem definidos através de dados coletados em estações WIM, quando esses dados não estão disponíveis é possível recorrer a ferramentas de simulação para determinar a carga por eixo que os veículos pesados exercem no pavimento.

Na presente dissertação recorreu-se à ferramenta de simulação TruckSIM[®]. O TruckSIM[®] é um *software* desenvolvido pelo UMTRI (*The University of Michigan Transportation Research Institute*) que, através de modelos matemáticos, permite simular e analisar as cargas dinâmicas por eixo que resultam da interação dos veículos pesados com o pavimento. Este *software* permite definir as características dos veículos que se pretende simular (configuração do veículo, tipo de eixos, tipo de rodagem, carga útil, pressão de enchimento dos pneus, etc.), bem como as características da via (irregularidade longitudinal e geometria da via) e o procedimento da operação (velocidade e carga a transportar).

Para definir as características referidas o utilizador recorre à base de dados do *software* que dispõe de várias combinações de trator-reboque, de configurações de eixos múltiplos, modelos de pneus, perfis de estrada, entre outras.

Depois de definidas as características pretendidas e de correr o programa, o TruckSIM[®] permite visualizar o resultado das simulações através de gráficos e de animação foto-realista.

A Figura 2.26 apresenta o visor principal do *software* TruckSIM[®].

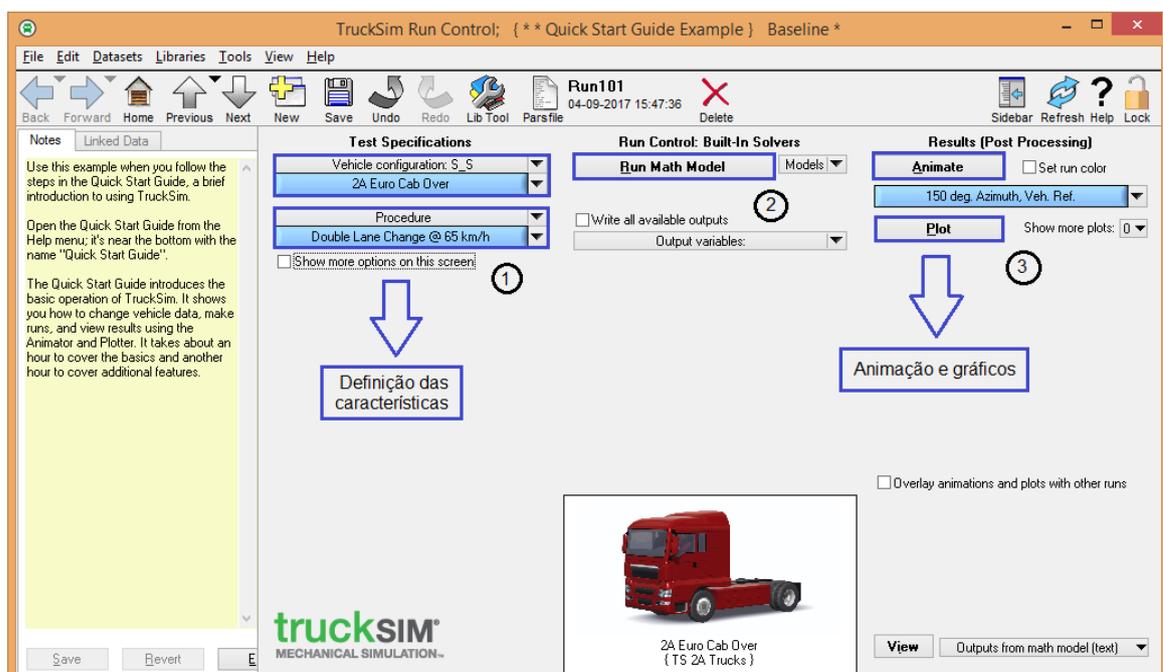


Figura 2.26 - *Software* TruckSIM[®]

3 CASO DE ESTUDO

3.1 Considerações iniciais

Como referido no capítulo 2, no dimensionamento de pavimentos rodoviários os dados de tráfego são geralmente convertidos em eixos-padrão através de fatores de agressividade. Contudo, de acordo com o novo guia de dimensionamento empírico-mecanicista (MEPDG), a consideração dos dados de tráfego foram melhorados recorrendo aos espectros de carga por eixo - NCHRP (2004).

Embora os espectros de carga sejam obtidos através de dados coletados em estações de pesagem dinâmica (WIM – *Weigh-in-motion*), nem sempre estes dados estão disponíveis, pelo que surge a necessidade de verificar se é possível ultrapassar este problema recorrendo à simulação de veículos.

Como tal, no presente capítulo, será determinada a agressividade do tráfego através de simulação de veículos e de dados coletados numa estação WIM. Os valores obtidos por simulação serão posteriormente analisados e comparados com os da estação WIM, a fim de se verificar a validade da metodologia em estudo.

3.2 Análise do tráfego numa estação WIM

Os dados de tráfego considerados na presente dissertação foram coletados numa estação de pesagem dinâmica (WIM), localizada no sublanço da A25/IP5, entre Fagilde e Mangualde, durante um ano (de 17 de Março de 2014 a 16 de Março de 2015) - Figura 3.1.

No Anexo A encontra-se um excerto dos dados coletados na estação WIM referida.



Figura 3.1 - Localização do sublanço entre Fagilde e Mangualde

A coleta de dados das estações WIM fornece informação relativa ao período horário, à via solicitada, ao número e peso médio dos eixos, à velocidade de circulação e ao número de veículos em cada ciclo de coleta.

Para o presente estudo, os dados referidos anteriormente, foram coletados em três vias de tráfego, em ambos os sentidos. A Figura 3.2 e Figura 3.3 apresentam a percentagem de veículos por número de eixos que circularam no trecho considerado, nos dois sentidos (Este-Oeste e Oeste-Este, respectivamente). De notar que a percentagem de veículos na terceira via de circulação não se encontra ilustrada, devido a valores residuais ou nulos.

Por observação da Figura 3.2 e Figura 3.3 é possível verificar que os veículos mais predominantes são os veículos de dois eixos, usualmente denominados “camiões” (subclasse F1) e os veículos de quatro e cinco eixos denominados “veículos articulados” (subclasse H3 e H5, respectivamente). Estes veículos representam mais de 90% de todos os pesados.

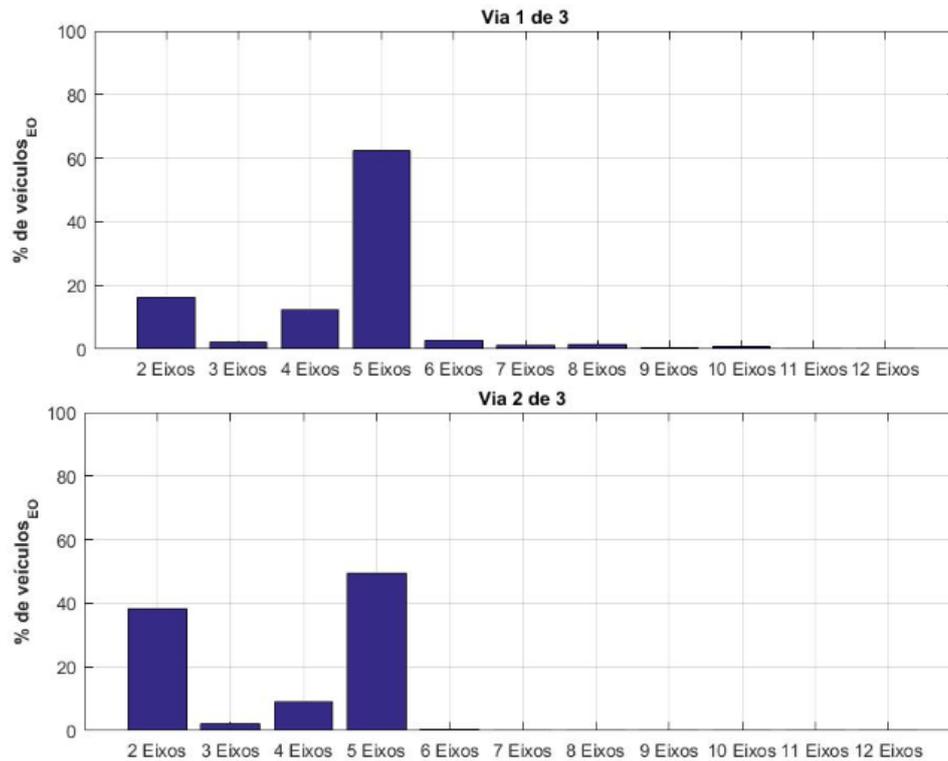


Figura 3.2 – Percentagem de veículos pesados por eixo (Este – Oeste)

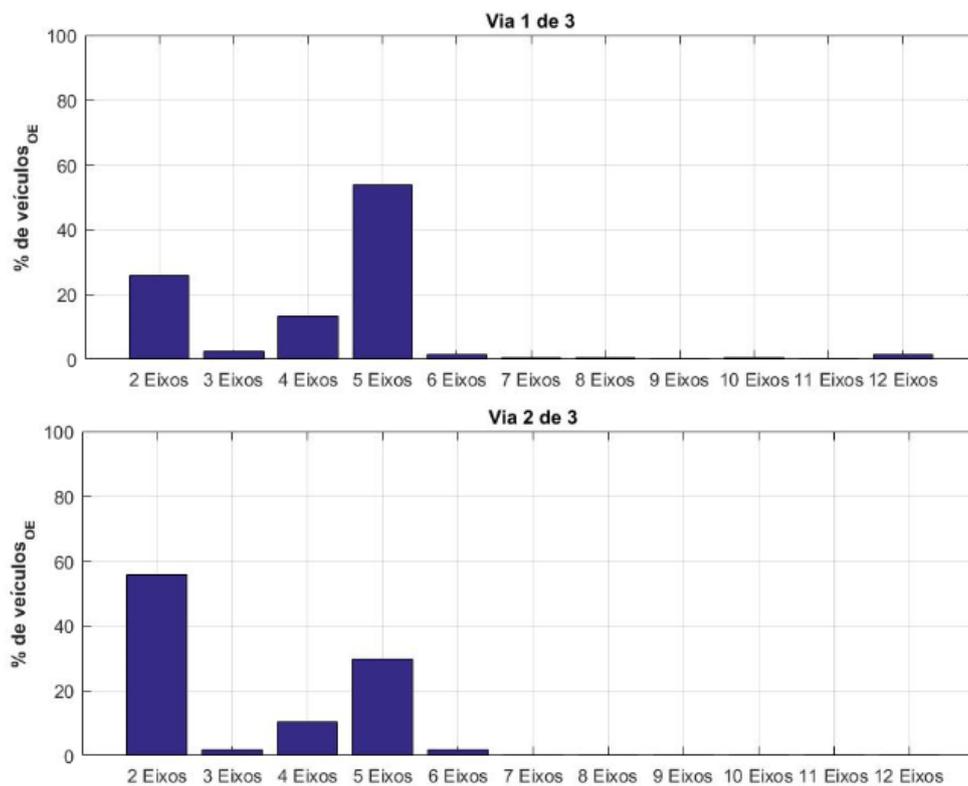


Figura 3.3 - Percentagem de veículos pesados por eixo (Oeste – Este)

Assim sendo, analisou-se de forma mais detalhada o peso bruto destes veículos (Figura 3.4) assim como as respectivas cargas por eixo (Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7, respectivamente para o camião F1 e os veículos articulados H3 e H5).

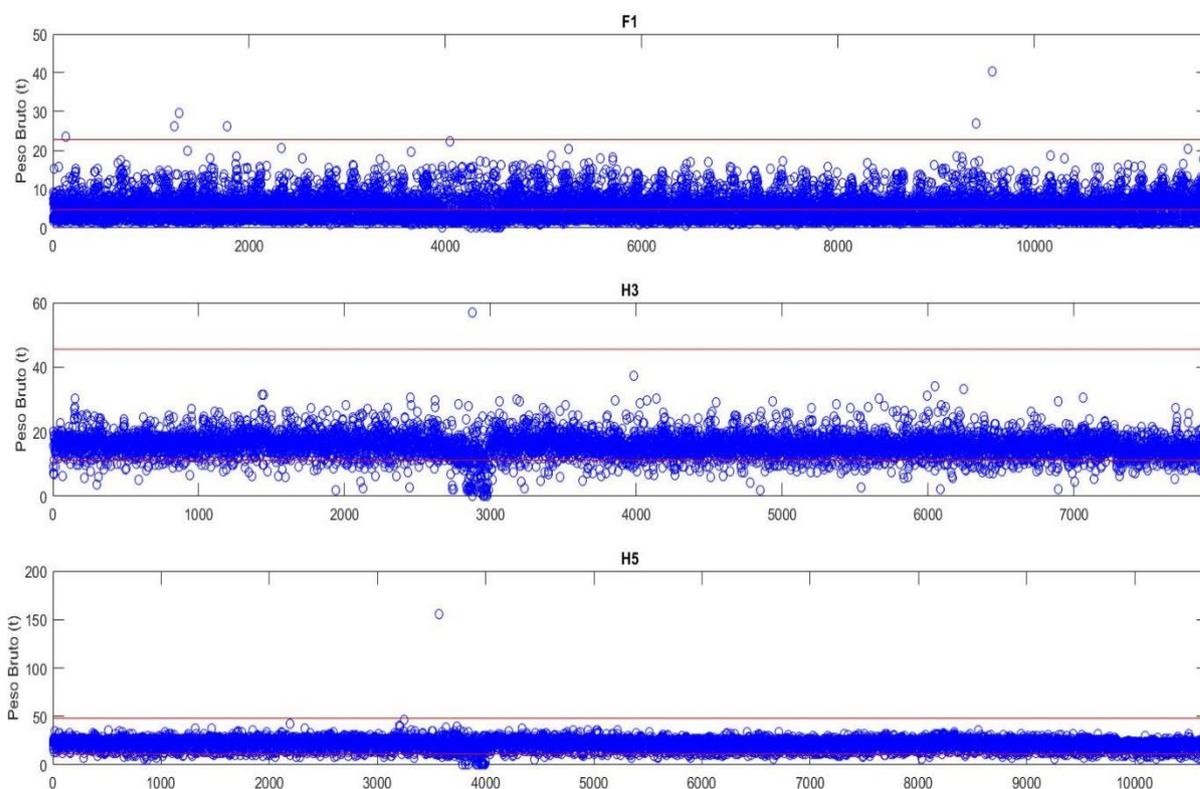


Figura 3.4 – Peso bruto de cada veículo registado

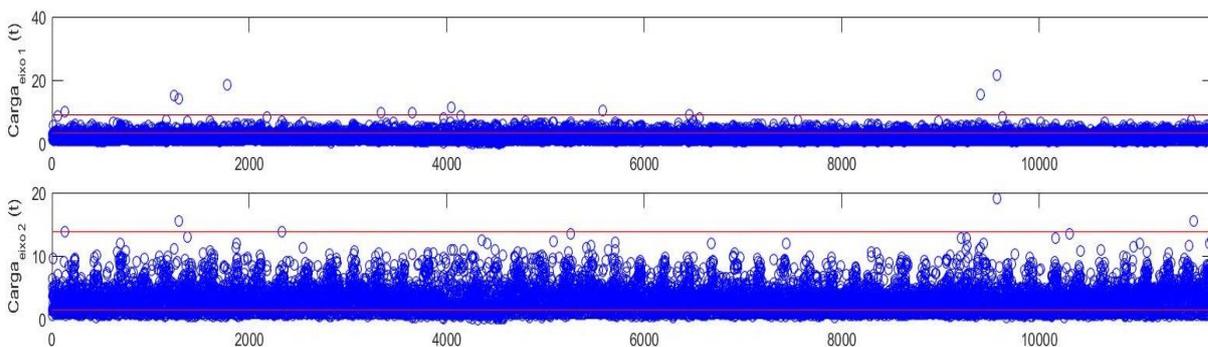


Figura 3.5 – Cargas por eixo do camião de dois eixos (F1)

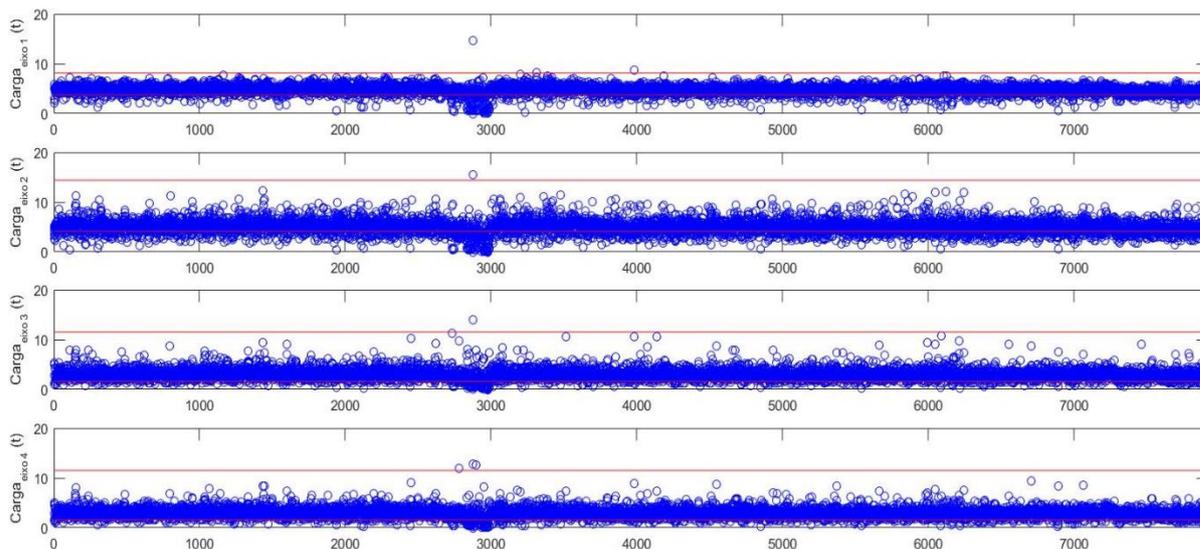


Figura 3.6 – Cargas por eixo do veículo articulado de quatro eixos (H3)

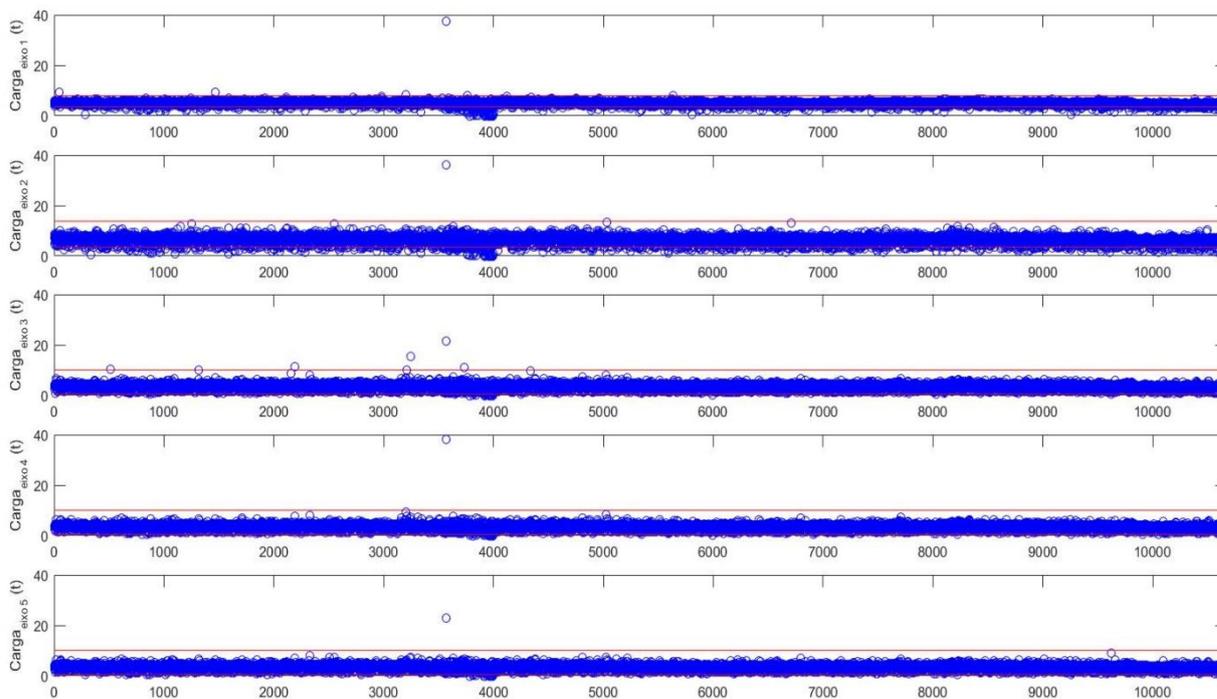


Figura 3.7 – Cargas por eixo do veículo articulado de cinco eixos (H5)

As figuras mostram alguns valores anómalos, pelo que se procedeu à verificação dos dados coletados, tal como já fora feito por outros autores, como por exemplo Rys *et al.* (2016), tendo-se considerado apenas válidos os valores entre um limite mínimo e máximo (representados nas figuras por linhas horizontais vermelhas). O limite mínimo foi definido como sendo 80% dos valores simulados com o veículo em vazio e o limite máximo foi definido como sendo 130% dos valores simulados com o veículo com a carga máxima legal.

De seguida, elaboraram-se histogramas representativos das cargas por eixo para os três tipos de veículos pesados em estudo, como ilustram a Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10, para o camião F1 e os veículos articulados H3 e H5, respetivamente.

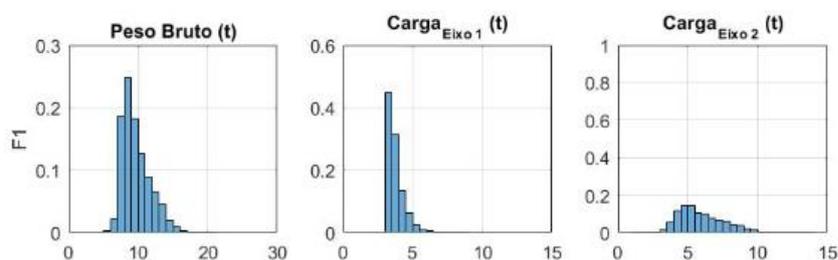


Figura 3.8 – Histogramas das cargas por eixos para o camião F1

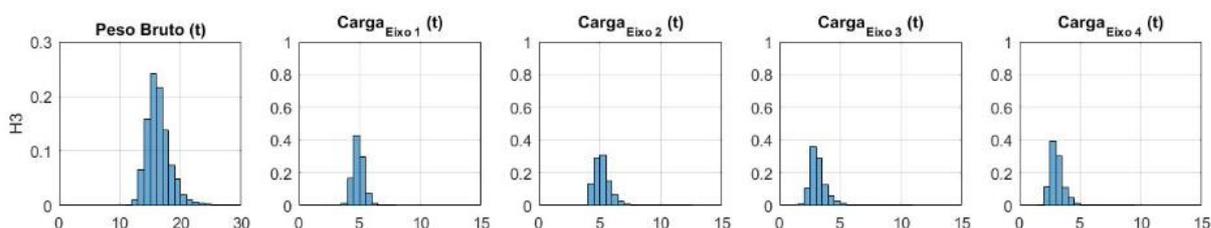


Figura 3.9 - Histogramas das cargas por eixos para o veículo articulado H3

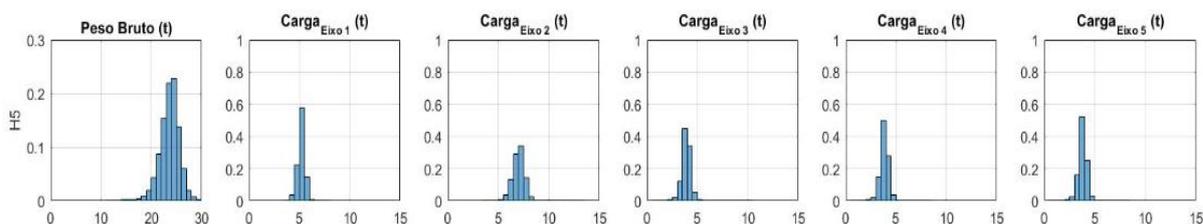


Figura 3.10 - Histogramas das cargas por eixos para o veículo articulado H5

3.3 Simulação de veículos pesados

Para o presente estudo foi necessário avaliar as cargas que os veículos pesados de mercadorias exercem no pavimento, através de um *software* de simulação de veículos (TruckSIM[®]), como mencionado no capítulo 2.

De forma a representar o efeito dos pesados mais predominantes nas estradas portuguesas, foram simulados três diferentes veículos: um camião com dois eixos (subclasse F1) e dois veículos articulados com 2+2 eixos e 2+3 eixos (subclasses H3 e H5 respetivamente). Para tal, foi necessário selecionar as configurações apropriadas a cada veículo recorrendo à base de dados do *software*.

No caso do veículo H5, o mesmo é constituído por um trator com dois eixos (“*lead unit*”) e um semi-reboque (“*trailer*”) com três eixos, como ilustra a Figura 3.11, retirada do TruckSIM®.

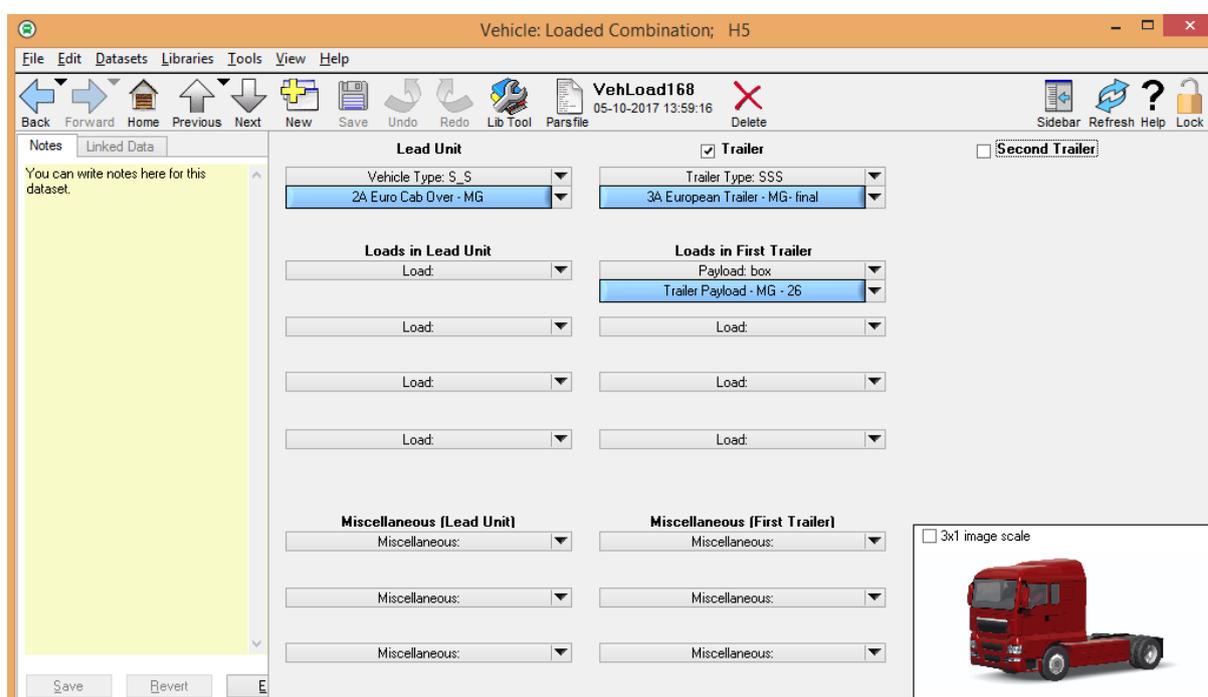


Figura 3.11 - Configuração do veículo articulado H5

Um dos parâmetros mais importantes a ter em conta na configuração dos veículos é o tipo de pneu. Como tal, para os três veículos simulados foram selecionados os pneus que usualmente equipam estes veículos em Portugal, indicados na Figura 3.12. Para outros parâmetros também de relativa importância, como a suspensão, foram admitidos os valores pré-definidos pelo *software*.



Figura 3.12 – Pneus considerados nos veículos simulados

Relativamente à carga útil, foram modeladas várias cargas com diferentes pesos e dimensões para os veículos em estudo. A Figura 3.13 apresenta uma janela retirada do *software* TruckSIM®, onde foi simulada uma carga útil de 26 t para o veículo H5, que perfaz um peso bruto de 40 t - limite permitido por lei.

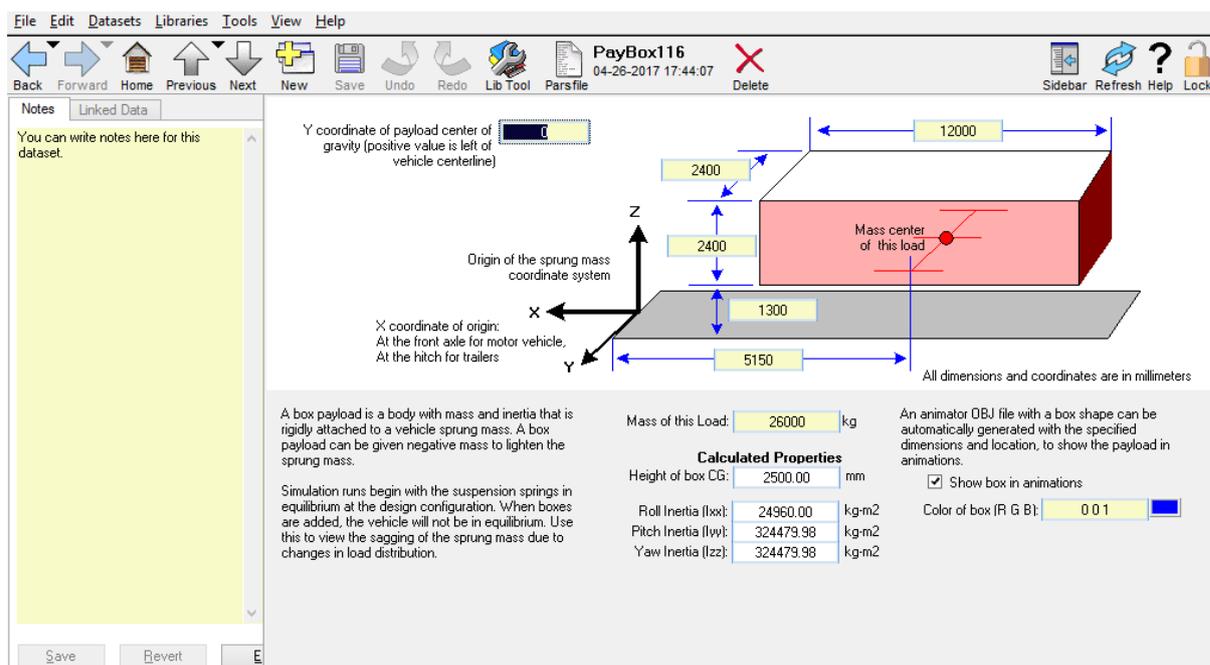


Figura 3.13 – Simulação de cargas do veículo articulado H5

Deste modo, obteve-se as distribuições das cargas por eixo, para diversos valores de peso bruto, apresentadas no Quadro 3.1, Quadro 3.2 e Quadro 3.3, respectivamente para o camião de dois eixos (F1) e os veículos articulados de quatro (H3) e cinco eixos (H5).

Estas distribuições foram obtidas através do *software* de simulação, considerando que os veículos circulam:

- Sempre em linha reta;
- A uma velocidade de 80 km/h;
- Numa superfície lisa;
- Sem efetuarem travagens.

Quadro 3.1 – Cargas por eixo para o camião F1

Peso bruto (t)	Carga útil (t)	Carga por eixo (t)	
		eixo 1	eixo 2
6	0	4,0	1,8
8	2	4,6	3,2
10	4	5,1	4,7
12	6	5,6	6,2
14	8	6,1	7,6
16	10	6,7	9,1
18	12	7,2	10,6
19	13	7,5	11,5
21	15	8,0	13,0
23	17	8,5	14,4

Quadro 3.2 – Cargas por eixo para o veículo articulado H3

Peso bruto (t)	Carga útil (t)	Carga por eixo (t)			
		eixo 1	eixo 2	eixo 3	eixo 4
14	0	4,7	5,2	2,0	2,0
16	2	4,9	5,8	2,7	2,7
18	4	5,1	6,3	3,3	3,3
20	6	5,2	6,9	3,9	3,9
22	8	5,4	7,5	4,6	4,5
24	10	5,6	8,0	5,2	5,2
26	12	5,7	8,6	5,8	5,8
28	14	5,9	9,2	6,5	6,4
30	16	6,1	9,7	7,1	7,1
32	18	6,2	10,3	7,7	7,7
34	20	6,4	10,9	8,4	8,3
36	22	6,6	11,4	9,0	9,0
38	24	6,8	12,0	9,6	9,6
40	26	6,9	12,6	10,3	10,2
42	28	7,1	13,1	10,9	10,9
44	30	7,2	13,7	11,5	11,5
46	32	7,4	14,3	12,2	12,1

Quadro 3.3 – Cargas por eixo para o veículo articulado H5

Peso bruto (t)	Carga útil (t)	Carga por eixo (t)				
		eixo 1	eixo 2	eixo 3	eixo 4	eixo 5
14	0	4,5	4,5	2,6	1,7	0,7
16	2	4,7	5,0	3,0	2,1	1,1
18	4	4,8	5,6	3,5	2,5	1,6
20	6	5,0	6,1	3,9	2,9	2,0
22	8	5,1	6,7	4,4	3,4	2,4
24	10	5,3	7,2	4,8	3,8	2,8
26	12	5,5	7,7	5,3	4,2	3,2
28	14	5,6	8,3	5,7	4,7	3,7
30	16	5,8	8,8	6,1	5,1	4,1
32	18	6,0	9,4	6,6	5,5	4,5
34	20	6,1	9,9	7,0	6,0	4,9
36	22	6,3	10,4	7,5	6,4	5,3
38	24	6,4	11,0	7,9	6,8	5,7
40	26	6,6	11,5	8,4	7,3	6,2
42	28	6,8	12,1	8,8	7,7	6,6
44	30	6,9	12,6	9,3	8,1	7,0
46	32	7,1	13,2	9,7	8,6	7,4
48	34	7,2	13,7	10,2	9,0	7,8

Através dos quadros apresentados foi possível verificar que existe uma relação linear entre a carga por eixo e o peso bruto dos veículos, que se traduz pela equação (11). A mesma relação encontra-se ilustrada na Figura 3.14, Figura 3.15 e Figura 3.16, para o camião F1 e os veículos articulados H3 e H5, respetivamente.

$$\text{Carga por eixo} = a \times \text{Peso bruto} + b \tag{11}$$

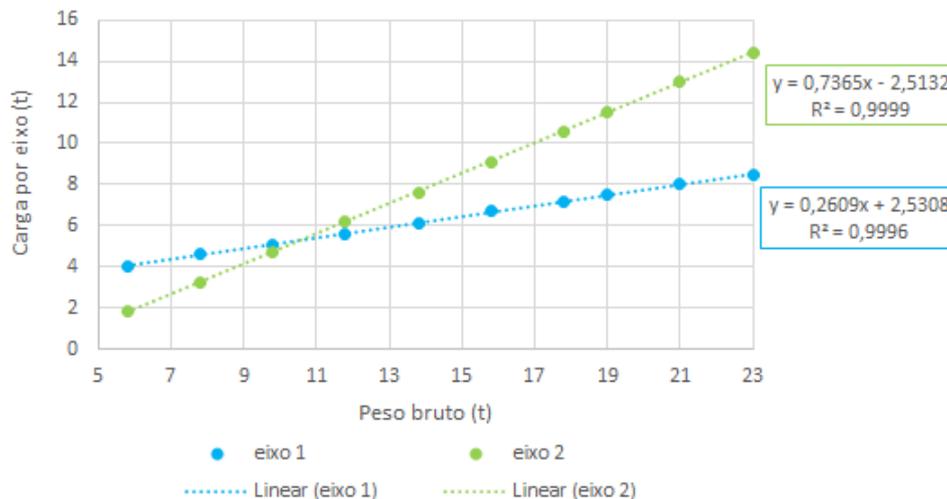


Figura 3.14 - Regressão linear para o camião F1

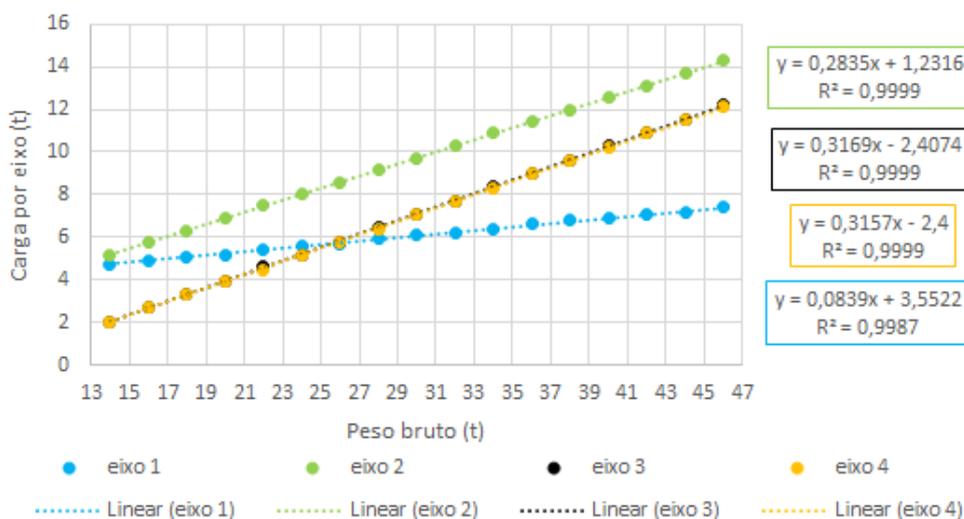


Figura 3.15 – Regressão linear para o veículo articulado H3

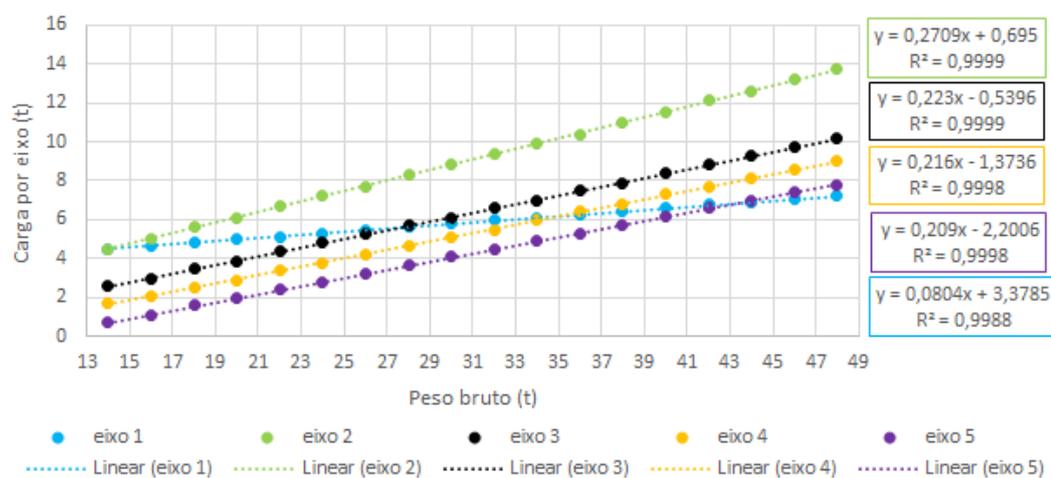


Figura 3.16 – Regressão linear para o veículo articulado H5

Relativamente às cargas por eixo do veículo articulado H5, estas encontram-se de acordo com os valores apresentados em Glaeser, (2010) - Figura 3.17.

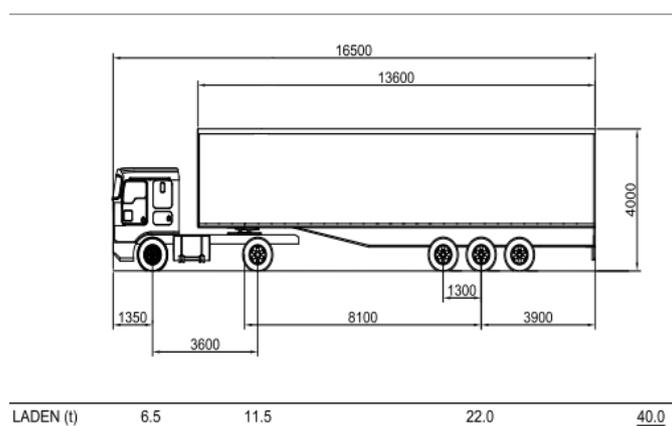


Figura 3.17 – Cargas por eixo do veículo articulado H5 quando totalmente carregado – peso bruto = 40 t (Glaeser, 2010)

3.4 Fatores de agressividade

Depois de obtidas as distribuições das cargas por eixos para os veículos em estudo, foi necessário proceder à realização de alguns cálculos para definir os fatores de agressividade.

Para tal, considerou-se a estrutura do pavimento da memória descritiva do projeto referente ao sublanço Fagilde – Mangualde, a qual se encontra apresentada na Figura 3.18 e cujas propriedades estão presentes no Quadro 3.4.

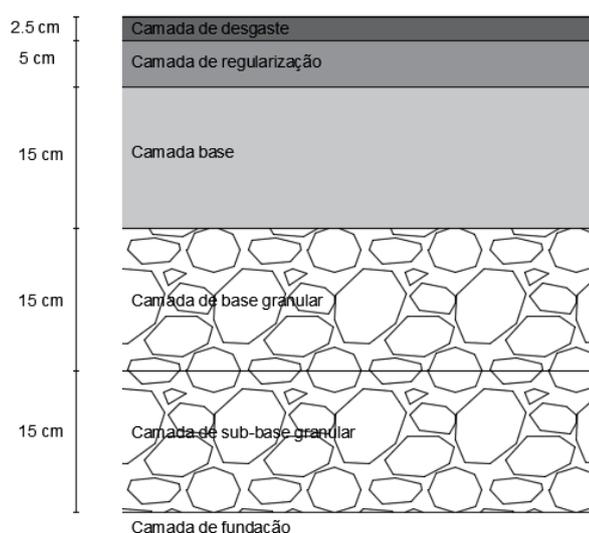


Figura 3.18 – Esquema da estrutura do pavimento

Quadro 3.4 - Propriedades das camadas do pavimento

Camadas	Módulo de deformabilidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Desgaste	5000	0,35
Regularização	5500	
Base	6500	
Base granular	340	
Sub-base granular	180	0,4
Fundação	100	

Para o mesmo efeito, e atendendo ao facto de que o rodado duplo dos veículos pesados tem vindo a ser substituído pelo rodado simples de base larga, tornou-se necessário modelar cinco áreas de contacto pneu-pavimento, presentes na Figura 3.19.

Como descrito no capítulo 2, embora o *software* BISAR apenas considere áreas de contacto circulares, modelos mais avançados consideram áreas rectangulares. Deste modo, com o intuito de simular áreas de contacto mais próximas da realidade, foi necessário modelar áreas rectangulares através de áreas circulares como ilustra a Figura 3.20.

De seguida, conhecendo a estrutura do pavimento e as áreas de contacto, tornou-se possível o cálculo da resposta do pavimento, através do *software* BISAR, considerando os mecanismos de deterioração usualmente utilizados no dimensionamento de pavimentos: a fadiga e a deformação permanente - Figura 3.19.

Tipo de rodado	Áreas de contacto	ϵ_{fadiga}	$\epsilon_{deformação\ permanente}$
Eixo-padrão		66.11	151.20
H3 ou H5 Eixo 1 315/80R22.5 simples		81.60	173.30
H3 ou H5 Eixo 2 315/80R22.5 duplo		61.90	156.10
H3 ou H5 Eixo 3, 4 ou 5 385/65R22.5 simples		84.47	173.20
F1 Eixo 1 315/70R22.5 simples		84.46	173.80
F1 Eixo 2 315/70R22.5 duplo		61.40	155.34

Figura 3.19 – Áreas de contacto para os veículos simulados e respetivas respostas do pavimento

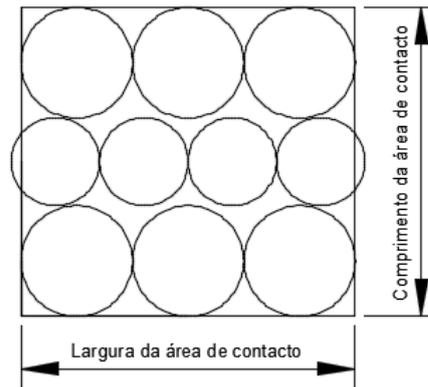


Figura 3.20 – Modelação da área de contacto

Conhecidas as respostas do pavimento, encontram-se reunidas as condições para proceder ao cálculo da agressividade do tráfego quer para os dados WIM como para a simulação de veículos.

Para o efeito, foi necessário determinar, para as duas metodologias referidas, o fator de equivalência entre cargas tanto para a fadiga como para a deformação permanente, através das equações (12) e (13) aqui transcritas:

$$f_i^{\text{fadiga}} = \left(\frac{\varepsilon_P^{\text{fadiga}}}{\varepsilon_{80}^{\text{fadiga}}} \right)^5 \quad (12)$$

$$f_i^{\text{def.permanente}} = \left(\frac{\varepsilon_P^{\text{def.permanente}}}{\varepsilon_{80}^{\text{def.permanente}}} \right)^4 \quad (13)$$

3.4.1 Dados WIM

Determinados os fatores de equivalência, procedeu-se ao cálculo do número acumulado de eixos-padrão (N_{80}), para os mecanismos de deterioração, que resultou do somatório desses mesmos fatores.

Deste modo, conhecendo o número de veículos pesados (N_{pes}) que circularam durante o período em análise no sentido Oeste-Este, tornou-se possível calcular os fatores de agressividade (α) através da equação (14).

$$\alpha = \frac{N_{80}}{N_{\text{pes}}} \quad (14)$$

De notar que, a agressividade do tráfego foi determinada não só para áreas de contacto pneu-pavimento retangulares, mas também para o eixo padrão e lei da potência à quarta, de forma a avaliar se a alteração das áreas de contacto podem ou não influenciar o dimensionamento dos pavimentos.

3.4.2 Simulação de veículos

Depois de calculados os fatores de equivalência entre cargas para a simulação de veículos, somaram-se os mesmos obtendo a agressividade de cada veículo para diferentes pesos brutos. Por observação da Figura 3.21 à Figura 3.23, constatou-se que existe uma relação exponencial entre a agressividade de cada veículo e o peso dos mesmos.

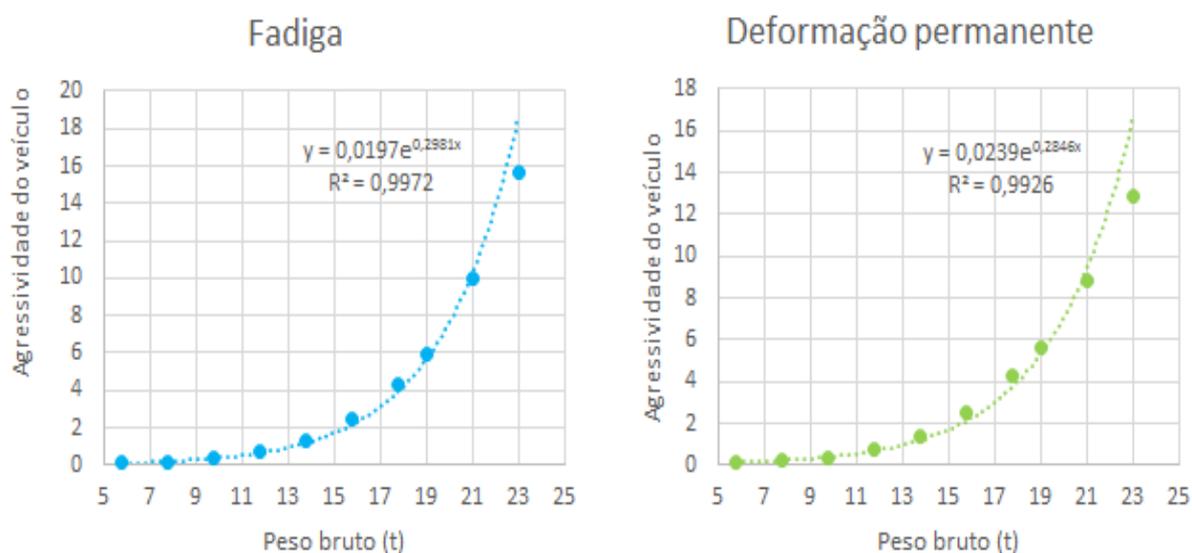


Figura 3.21 – Regressão exponencial para o camião F1

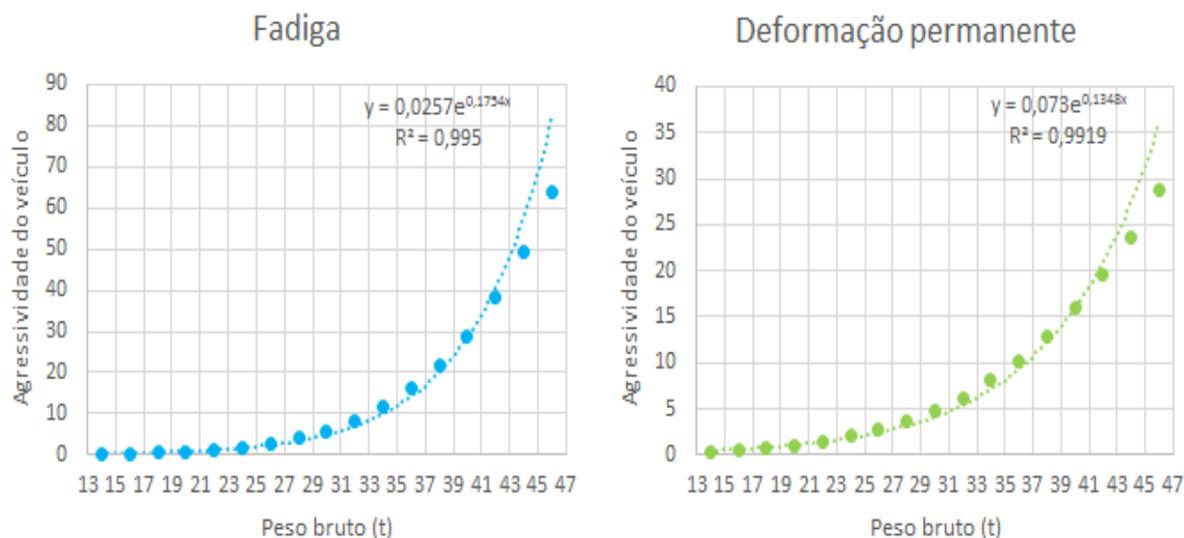


Figura 3.22 – Regressão exponencial para o veículo articulado H3

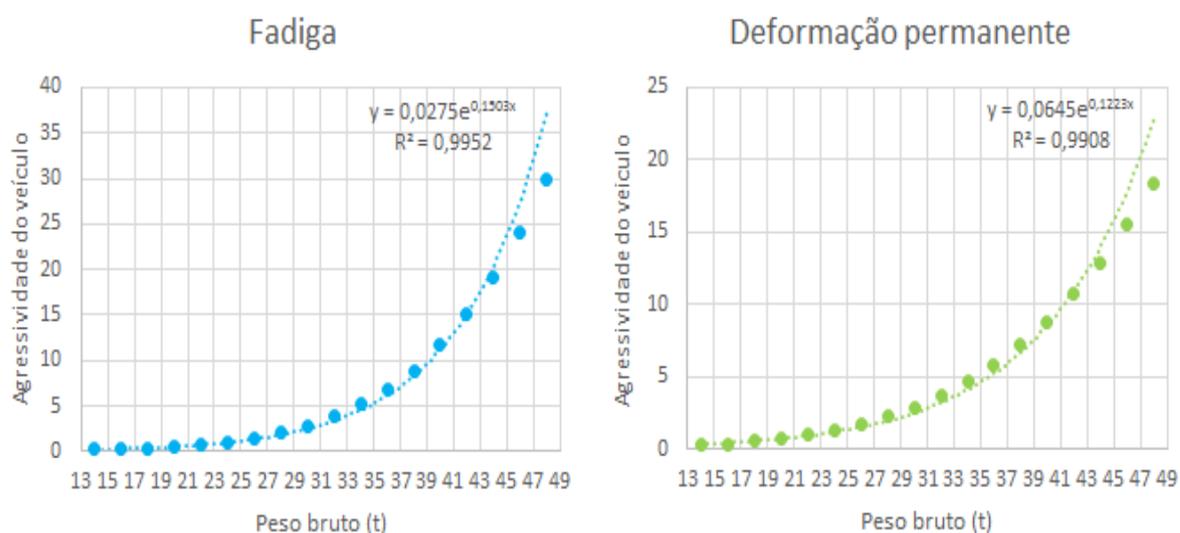


Figura 3.23 – Regressão exponencial para o veículo articulado H5

Seguidamente, determinaram-se os pesos brutos dos três veículos relativamente aos fatores de carga e conseqüentemente a agressividade de acordo com as regressões exponenciais, que se traduzem pela equação (15).

$$\text{Agressividade} = a \times e^{b \times \text{Peso bruto}} \quad (15)$$

Aos valores obtidos, multiplicou-se o número de veículos pesados (N_{pes}) obtendo-se assim o número acumulado de eixos-padrão (N_{80}). Somando estes valores e aplicando a equação (14) determinaram-se os fatores de agressividade.

3.5 Análise de resultados

Determinados os fatores de agressividade para as duas metodologias estudadas no presente capítulo, é importante analisar e comparar os resultados obtidos, de forma a verificar se a simulação de veículos pesados é uma metodologia viável para definir fatores de agressividade na ausência de dados WIM.

Neste subcapítulo, pretende-se também analisar a influência de alguns parâmetros, tais como a área de contacto pneu-pavimento, os fatores de carga e os mecanismos de deterioração, relativamente aos fatores de agressividade.

3.5.1 Dados WIM

Para os dados coletados na estação WIM, tornou-se pertinente determinar os fatores de agressividade não só para áreas de contacto rectangulares, mas também para o eixo-padrão e lei da potência à quarta. Os resultados obtidos encontram-se apresentados no Quadro 3.5, Quadro 3.6 e Quadro 3.7.

Quadro 3.5 – Fatores de agressividade com áreas de contacto rectangulares

	Npesados	N80fadiga	N80def. permanente	α fadiga	α def. permanente
F1	10848	3958	6137	-	-
H3	38546	16938	21302	-	-
H5	163043	151743	195450	-	-
Total	212437	172638	222889	0,81	1,05

Quadro 3.6 – Fatores de agressividade para o eixo-padrão

	Npesados	N80fadiga	N80def. permanente	α fadiga	α def. permanente
F1	10848	4669	5185	-	-
H3	38546	9530	14828	-	-
H5	163043	111224	144676	-	-
Total	212437	125423	164688	0,59	0,78

Quadro 3.7 – Fatores de agressividade para a lei da potência à quarta

	Npesados	N80	α
F1	10848	5185	-
H3	38546	14828	-
H5	163043	144676	-
Total	212437	164688	0,78

Por observação do Quadro 3.6 e do Quadro 3.7 é possível verificar que, tal como seria expectável, os fatores de agressividade para o eixo-padrão e para a lei da potência à quarta são iguais, uma vez que na lei da potência à quarta está subjacente a consideração do eixo-padrão.

Comparando o Quadro 3.5 com o Quadro 3.6, constata-se que os fatores de agressividade calculados a partir de áreas de contacto rectangulares são significativamente maiores do que os fatores de agressividade calculados através do eixo-padrão. Esta diferença deve-se ao facto de que a pressão de contacto de um rodado simples (modelado com área de contacto retangular) é superior à pressão de contacto do eixo-padrão (rodado duplo), uma vez que a área de contacto pneu-pavimento é menor.

3.5.2 Simulação de veículos

Relativamente à simulação de veículos, optou-se por calcular os fatores de agressividade não só para os fatores de carga determinados através dos dados WIM, mas também para os fatores de carga apresentados para Portugal na secção 2.2.4, de acordo com o Eurostat. Os valores obtidos encontram-se apresentados no Quadro 3.8 e Quadro 3.9.

Quadro 3.8 – Fatores de agressividade em função dos fatores de carga dos dados WIM

	Fator de carga	Peso bruto (t)	α_{fadiga}	$\alpha_{def. permanente}$	$N_{pesados}$	$N_{80fadiga}$	$N_{80def. permanente}$	α_{fadiga}	$\alpha_{def. permanente}$
F1	0,51	9,70	0,35	0,38	10848	3846	4093	-	-
H3	0,42	15,81	0,41	0,62	38546	15862	23711	-	-
H5	0,59	23,70	0,97	1,17	163043	157876	190724	-	-
Total	-	-	-	-	212437	177583	218528	0,84	1,03

Quadro 3.9 – Fatores de agressividade em função dos fatores de carga do Eurostat

	Fator de carga	Peso bruto (t)	α_{fadiga}	$\alpha_{def. permanente}$	$N_{pesados}$	$N_{80fadiga}$	$N_{80def. permanente}$	α_{fadiga}	$\alpha_{def. permanente}$
F1	0,24	4,56	0,08	0,09	10848	832	949	-	-
H3	0,82	31,16	6,08	4,87	38546	234171	187715	-	-
H5	0,68	27,20	1,64	1,80	163043	267362	292798	-	-
Total	-	-	-	-	212437	502365	481462	2,36	2,27

Da análise dos quadros apresentados é possível verificar que à medida que o fator de carga aumenta, também o peso bruto e consequentemente a agressividade dos veículos aumenta, uma vez que a agressividade aumenta exponencialmente com o peso bruto do veículo.

Como é possível observar do Quadro 3.8 e Quadro 3.9, os fatores de carga determinados através dos dados WIM, são bastante diferentes dos fatores de carga calculados a partir da base de dados do Eurostat. Tal pode ser devido a diversas razões, tais como:

- Os dados do Eurostat consideram apenas os veículos que circulam carregados;
- Existem diversos veículos de dois eixos que podem ser confundidos com os camiões F1;
- Na análise dos dados WIM admitiu-se que todos os veículos de quatro eixos que circularam nas vias em estudo representavam os veículos articulados H3, quando na verdade existem outros veículos pesados de quatro eixos.

3.5.3 Fadiga vs. Deformação permanente

Através da análise do Quadro 3.5, Quadro 3.6 e Quadro 3.8, verifica-se que os fatores de agressividade para a fadiga são inferiores aos fatores de agressividade para a deformação permanente. Tal acontece devido ao facto da camada betuminosa ser espessa, originando extensões de fadiga significativamente inferiores às extensões de deformação permanente. Deste modo, constata-se que a deformação permanente é mais condicionante no dimensionamento de pavimentos rodoviários.

Por outro lado, o mesmo não acontece no Quadro 3.9, no qual o fator de agressividade para a fadiga é superior ao fator de agressividade para a deformação permanente. Isto sucede porque o fator de carga, obtido através do Eurostat, para o veículo H3 é bastante elevado, originando um peso bruto do veículo também elevado.

3.5.4 Dados WIM vs. Simulação de veículos

Depois de analisados os parâmetros que influenciam o cálculo dos fatores de agressividade, tornou-se pertinente analisar e comparar os fatores de agressividade obtidos através dos dados WIM e através da simulação de veículos pesados.

Através da análise do Quadro 3.5 e do Quadro 3.8, verifica-se que os fatores de agressividade obtidos nas duas metodologias em estudo apresentam valores bastante aproximados, nomeadamente valores na ordem dos 0,8 relativamente à agressividade para a fadiga e na ordem dos 1,0 relativamente à agressividade para a deformação permanente.

Assim, torna-se possível afirmar que na ausência de dados WIM, pode optar-se por recorrer à simulação de veículos pesados.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

A presente dissertação tinha como principal objectivo avaliar o uso da simulação de veículos pesados na definição de fatores de agressividade, de forma a superar a indisponibilidade dos dados coletados nas estações de pesagem dinâmica (WIM – *Weigh-in-motion*). Assim, concluído o trabalho, torna-se possível afirmar que o mesmo objectivo foi alcançado, uma vez que os fatores de agressividade obtidos através de simulação de veículos pesados são bastante aproximados dos fatores de agressividade obtidos através dos dados WIM.

O mesmo trabalho permitiu ainda tirar conclusões acerca de alguns parâmetros que influenciam a definição dos fatores de agressividade, e os quais não são, atualmente, considerados no dimensionamento de pavimentos rodoviários. Alguns desses parâmetros são: o tipo de pneu e respetiva área de contacto pneu-pavimento, o fator de carga e os mecanismos de deterioração.

Da análise de resultados foi possível concluir o seguinte:

- A alteração dos pneus que resultou na consideração de áreas de contacto pneu-pavimento retangulares, por substituição de áreas de contacto circulares, influencia significativamente os fatores de agressividade na medida em que, para áreas de contacto rectangulares a agressividade do tráfego é superior comparativamente à agressividade do tráfego considerando o eixo-padrão;
- Como seria expectável, o fator de carga influencia a agressividade do tráfego, uma vez que depende da carga transportada. Isto é, quanto maior a carga que o veículo transporta, maior o fator de carga, o que origina uma maior solicitação no pavimento por parte do veículo, aumentando assim a agressividade;
- Para camadas betuminosas espessas, a agressividade do tráfego é maior para a deformação permanente, isto é, no topo da camada de fundação. Como tal, a deformação permanente é mais condicionante pelo que deve ser o mecanismo de deterioração considerado para efeitos de dimensionamento.

Para concluir, torna-se importante referir que, existem diversos parâmetros e fatores que influenciam a definição dos fatores de agressividade e consequentemente a ação que o tráfego de pesados exerce nos pavimentos. Uma vez que os fatores de agressividade utilizados

atualmente no dimensionamento de pavimentos, se mantêm inalterados desde pelo menos 1995, é fundamental desenvolver metodologias como as que foram desenvolvidas no presente trabalho, de forma a melhorar o dimensionamento e gestão dos pavimentos rodoviários.

4.2 Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido na presente dissertação constitui um passo importante para o dimensionamento de pavimentos rodoviários, na medida em que apresenta uma metodologia que permite a definição de novos fatores de agressividade.

Assim, no sentido de aprofundar e dar continuidade ao mesmo trabalho, apresentam-se sugestões para trabalhos futuros que consistem na:

- Simulação de outros veículos pesados, além dos veículos considerados no trabalho, de forma a avaliar a sua influência no desempenho dos pavimentos;
- Simulação dos veículos pesados com diferentes disposições da carga, com o intuito de avaliar a influência da disposição das cargas no cálculo da agressividade do tráfego;
- Análise, com maior detalhe, dos veículos de quatro eixos que constituem o tráfego coletado na estação WIM em estudo, a fim de confirmar qual a percentagem de veículos articulados H3.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, A. e Englingsson, S. (2015). “Characterisation of heavy traffic axle load spectra for mechanistic-empirical pavement design applications”. *International Journal of Pavement Engineering*, 16:6, 488-501, DOI: 10.1080/10298436.2014.94313.
- Åkerman, I. e Jonsson, R. (2007). “European Modular System for road freight transport – experiences and possibilities. TFK – TransportForsK AB and KTH – Department of Transportation and urban economics. Estocolmo. Suécia.
- Almeida, A. (2014). “A methodological framework for pavement damage estimation considering simulated axle load spectra”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Almeida, A. e Picado Santos, L. (2014). “Methodological framework for truck-factor estimation considering vehicle-pavement interaction”. *Journal of Transportation Engineering*. DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000726.
- AASTHO (1993). “Guide for design of pavement structures”. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC.
- Baptista, A. (1999). “Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis – Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado Santos, L. (2011). “Pavimentos Rodoviários”. Edições Almedina, Coimbra.
- Brito, J. (2012). “Caracterização da flutuação do tráfego na cidade de Lisboa”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Lisboa.
- Burgess, A., Engel, A., Kindt, M., Schoemaker, L., Groen, R. e Gutzkow, P. (2010). “European Modular System (EMS) Paper”. European Express Association, R20100085/31238000/MKI/LJO, version 20. Zoetermeer. Holanda.
- Correia, J. (2014). “Retro-análise de resultados de caracterização estrutural de pavimentos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Técnico de Lisboa.
- Corte-Real, V. e Rodrigues, N. (2013). “Sistemas ITS da Ascendi – Serviços disponibilizados”. Ascendi. 7º Congresso Rodoviário Português. Lisboa.
- COST 323 (2002). “Weigh-in-motion of Road Vehicles”. European Commission (EC), European Cooperation in Science and Technology (COST) e Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris.
- COST 334 (2001). “Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres”. European Commission, Directorate General Transport. Bélgica.

- Fontenele, H. (2011). “Representação do tráfego de veículos rodoviários da carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos”. Tese de Doutorado em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo.
- Gillespie, T., Karamihas, S., Cebon, D., Sayers, M., Nasin, M., Hansen, W. e Ehsan, N. (1992). “Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance.” National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). The University of Michigan – Transportation Research Institute (UMTRI).
- Glaeser, K. (2010). “Performance of articulated vehicles and road trains regarding road damage and load capacity”. International heavy vehicle symposium. International Transport Forum.
- Haider, S. e Harichandran, R. (2009). “Effect of axle load spectrum characteristics on flexible pavement performance”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Board, No. 2095, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009, pp. 101-114. DOI: 10.3141/2095-11.
- Haider, S., Harichandran, R. e Dwaikat, M. (2012). “Impact of systematic axle load measurement error on pavement design using mechanistic-empirical pavement design guide”. Journal of the Transportation Engineering. 2012.138:381-386. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000335.
- Hallenbeck, M. e Weinblatt, H. (2004). “Equipment for collecting traffic load data”. NCHRP report 509. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Hjort, M., Haraldsson, M. e Jansen, J. (2008), “Road wear from heavy vehicles”. NVF committee vehicles and transports.
- Huang, Y. (2004). “Pavement Analysis and Design”. Second Edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. USA.
- JAE (1995). “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional”. Junta Autónoma de Estradas (JAE), Almada.
- Jiang, Y., Li, S., Nantung, T., Mangold, K. e MacArthur, S. (2008). “Creation of truck axle load spectra using Weigh-in-Motion data.” Journal of the Transportation Research Forum, Vol. 47, No. 4, pp.45-61.
- Lima, H. e Quaresma, L. (1999). “Caracterização do factor de agressividade do tráfego de veículos pesados em Portugal”. JAE e LNEC. Lisboa.
- Mimbela, L. e Klein, L. (2000). “A summary of vehicle detection and surveillance technologies used in inteligente transportation systems.” The vehicle detector clearinghouse.
- NCHRP, 2004. “MEPDG – Guide for Mechanistic – Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures”. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Transportation Research Board, National Research Council.
- OCDE (2011). “Moving Freight with Better Trucks: Improving Safety, Productivity and Sustainability”. Organisation for Economic Co-operation and Development Publishing. DOI: 10.1787/9789282102961-en.
- Pais, J. e Pereira, P. (2016). “Impacto das sobrecargas do tráfego no desenvolvimento dos pavimentos rodoviários”. 8º Congresso rodoviário português. Lisboa.

- Pais, J. e Pereira, P. (2016). “Modelo para determinação do fator de agressividade do tráfego”. 8º Congresso rodoviário português. Lisboa.
- Romanoschi, S., Momin, S., Bethu, S. e Bendana, L. (2011). “Development of traffic inputs for new Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide”. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 2256, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011, pp. 142-150. DOI: 10.3141/2256-17.
- Rys, D., Judycki, J. e Jaskula, P. (2016). “Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data”. International Journal of Pavement Engineering, 17:8, 716-726. DOI: 10.1080/10298436.2015.1019493.
- Simões, F., Lopes, F., Ferreira, A. e Micaelo, R. (2013). “Aplicação a Portugal do novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da AASTHO”. 7º Congresso Rodoviário Português. Lisboa.
- Timm, D., Tisdale, S. e Turochy, R. (2005). “Axle load spectra characterization by mixed distribution modeling”. Journal of Transportations Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:2(83).
- Verweij, K., Davydenko, I. e Zomer, G. (2010). “Estimation of the impact of long and heavy vehicles on future european transport demand and modal shift”. European Commission.
- WAVE (2001). “Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe”. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). RTD project, RO-95-SC, 403.
- Decreto-Lei nº 133/2010. <https://dre.tretas.org/dre/281191/decreto-lei-133-2010-de-22-de-dezembro> Acedido: Fevereiro de 2017.
- Decreto-Lei nº 133/2014. <https://dre.tretas.org/dre/319090/decreto-lei-133-2014-de-5-de-setembro> Acedido: Março 2017.
- Diretiva 96/53/CE. [http://www.antram.pt/attachments/legislacao/Directiva%2096-53-1996%20\(consolidada\).pdf](http://www.antram.pt/attachments/legislacao/Directiva%2096-53-1996%20(consolidada).pdf). Acedido: Fevereiro de 2017.
- Eurostat (2017). Statistical Database – Road Transport. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>. Acedido: Abril de 2017.
- INE (2016). Instituto Nacional de Estatística. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=276403454&PUBLICACOESstema=55488&PUBLICACOESmodo=2. Acedido: Março de 2017.
- ITF@2017. International Transport Forum. <http://www.itf-oecd.org/weights-and-dimensions>. Acedido: Março de 2017.
- Mechanical Simulation Corporation. TruckSIM®. <http://carsim.com/products/trucksim/> Acedido: Abril de 2017.

ANEXO A

Quadro A.1 – Dados de tráfego coletados na estação WIM

CAV ID	Data	Hora	Direção	Via	Classe	Nº Eixos	Velocidade Média	Peso Total	Peso Eixo 1	Peso Eixo 2	Peso Eixo 3	Peso Eixo 4	Peso Eixo 5	...	Peso Eixo 10	Nº Veículos
CAV51601	20150101	21	Oeste - Este	1	B	5	86	5524	5524	6596	3090	3208	3052		0	5
CAV51601	20150101	22	Oeste - Este	1	B	2	89	2245	2245	3145	0	0	0		0	2
CAV51601	20150101	22	Oeste - Este	1	B	5	87	4640	4640	6310	2783	2506	2603		0	3
CAV51601	20150101	23	Oeste - Este	1	B	2	101	5710	5710	10880	0	0	0		0	1
CAV51601	20150101	23	Oeste - Este	1	B	5	81	4520	4520	6600	4140	4100	3900		0	3
CAV51601	20150102	0	Oeste - Este	1	B	2	90	2290	2290	7110	0	0	0		0	3
CAV51601	20150102	0	Oeste - Este	1	B	5	77	5715	5715	6930	3515	3505	3085		0	2
CAV51601	20150102	1	Oeste - Este	1	B	5	86	4740	4740	4900	3555	3740	3475		0	2
CAV51601	20150102	2	Oeste - Este	1	B	5	83	5470	5470	8095	3720	3725	3950		0	2
CAV51601	20150102	3	Oeste - Este	1	B	5	90	6320	6320	7230	4780	4540	4680		0	1