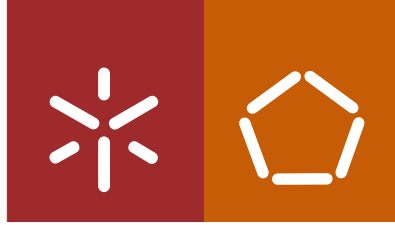




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Cristiana Maria de Castro Brandão

**Efeito das sobrecargas de tráfego
na constituição dos pavimentos**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Cristiana Maria de Castro Brandão

**Efeito das sobrecargas de tráfego
na constituição dos pavimentos**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana
Ramo de Infraestruturas Viárias

Trabalho realizado sob orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

DECLARAÇÃO

Cristiana Maria de Castro Brandão, endereço eletrónico: cristiana.mcbrandao@gmail.com, com o telemóvel n.º 964462586, número de Cartão de Cidadão 12574782 e autora da tese com o título “**Efeito das sobrecargas de tráfego na constituição dos pavimentos**” com o orientador Professor **Doutor Jorge Carvalho Pais**, com conclusão no ano **2016** no ramo de conhecimento da **Engenharia Urbana- Infraestruturas Viárias**, declara que:

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ___/ ___/ _____

Assinatura: _____

Agradecimentos

Nesta fase de finalização de mais uma etapa de ensino a qual revelou-se muito enriquecedora ao nível dos conhecimentos adquiridos, importa, pois, fazer um agradecimento a todos aqueles que tornaram este meu objetivo possível.

Em primeiro lugar, e que todos os outros me perdoem, quero e devo agradecer ao Professor Doutor Jorge Pais. Ao Professor devo todo o conhecimento transmitido e não menos importante, o apoio sempre presente para que nunca desistisse de concluir este trabalho. Teve em todas as fases, uma palavra de incentivo, mesmo quando eu não correspondia às expetativas.

À minha família, em especial aos meus pais, José e Assunção, que me proporcionaram a oportunidade de estudar e de me formar. Obrigada por todo o amor, educação e apoio que sempre me deram sem nunca pedir nada em troca. À minha irmã, Manuela, obrigada, por estar sempre presente nos bons e nos menos bons momentos das nossas vidas.

Ao Afonso João, obrigada, por encher a nossa família de felicidade e inspiração.

Por fim, um agradecimento à Escola de Engenharia da Universidade do Minho por todo o contributo concedido para que esta tese de mestrado fosse concluída.

Efeito das sobrecargas do tráfego na constituição dos pavimentos

Resumo

Os pavimentos rodoviários são estruturas concebidas para suportar o tráfego de veículos durante um determinado período de tempo, sob determinadas condições climáticas, em condições adequadas de segurança, conforto e economia.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação baseia-se na análise de um perfil de tráfego de veículos pesados e no estudo do efeito das sobrecargas desse espectro de tráfego na constituição dos pavimentos rodoviários. A abordagem é realizada através do cálculo da agressividade, ESAL (Equivalent Single Axle Load), ou seja, o efeito dos veículos pesados é convertido através da utilização de fatores caminhão que transformam os danos provocados no pavimento no dano que seria aplicado por um eixo normalizado, designado de eixo-padrão.

O estudo avalia, ao nível da constituição dos pavimentos, o impacto do elevado número de veículos pesados que circulam sobrecarregados nas estradas nacionais comparativamente com os veículos que circulam abaixo do limite legal.

Neste sentido, este trabalho tem como principal objetivo estudar o efeito das sobrecargas, através da análise da agressividade do tráfego aplicando metodologias distintas para a análise global do tráfego através do fator caminhão, e da influência do tráfego, na constituição dos pavimentos. A abordagem é concluída com a comparação entre métodos, entre classes de veículos pesados e entre classes de tráfego.

O estudo revelou que a presença de veículos sobrecarregados aumenta os danos no pavimento e a espessura necessária da camada betuminosa num máximo de 5,3% em comparação com os mesmos veículos com cargas legais. Consequentemente verifica-se o aumento dos custos do ciclo de vida dos pavimentos.

Palavras-chave:

Pavimentos rodoviários; Tráfego; Veículos pesados; Agressividade; Sobrecargas.

Effect of the traffic overloads on the constitution of road pavements

Abstract

Road pavements are structures designed to support the road traffic during a given period of time and subjected to certain climatic conditions, under suitable conditions of safety, comfort and economy.

The work developed in this dissertation is based on the analysis of a traffic profile of heavy vehicles and on the study of the effect of the overloads of this traffic spectrum on the constitution of road pavements. The approach is carried out by calculating the Equivalent Single Axle Load (ESAL), that is, the effect of heavy vehicles is converted through the use of truck factors that transform the damages caused on the pavement in the damage that would be applied by a single axle, designated of standard axle.

The study evaluates, in terms of the pavement constitution, the impact of the high number of heavy vehicles circulating with overloads on national roads compared to the vehicles traveling below the legal limit.

Thus, this work has as main objective to study the effect of the overloads, through the analysis of the damage of the traffic, applying different methodologies for the analysis of the traffic through the calculation of the truck-factor, and the influence of the traffic, on the constitution of the pavements. The approach is completed by comparing the applied methods and the damage of the axles and the heavy vehicles.

The study allow concluding that the presence of overloaded vehicles increases pavement damage and the required asphalt layer thickness by a maximum of 5.3% compared to the same vehicles with legal loads. Consequently there is an increase in the life cycle costs of the pavements.

Key-words:

Road pavements; Traffic; Heavy vehicles; Aggressiveness; Overloads.

Símbolos e listas de abreviaturas

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

EN – Estrada Nacional

EALF – Equivalent Axle Load Factor

ESAL – Equivalent Single Axle Loads

JAE – Junta Autónoma de Estradas

IP – Infraestruturas de Portugal

MACOPAV – Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RRN – Rede Rodoviária Nacional

NEEP – Número Equivalente de Eixos Padrão

NAVP – Número Acumulado de Veículos Pesados

c – Fator Camião

TMD – Taxa Média Diária

f – Coeficiente de Agressividade

ET – Espessura Equivalente

α - Coeficiente, função do tipo de pavimento

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Símbolos e listas de abreviaturas	ix
Índice.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tabelas.....	xvi
1. Introdução	1
1.1. Apresentação do tema e seu enquadramento	1
1.2. Objetivos e metodologia	4
1.3. Estrutura da dissertação	5
2. Caracterização do tráfego rodoviário	7
2.1. Pavimentos rodoviários.....	7
2.2. Tráfego rodoviário	10
2.2.1. Classificação do tráfego.....	10
2.2.2. Caracterização dos tipos de eixos	13
2.2.3. Caracterização do tipo de roda.....	16
2.3. Agressividade dos veículos pesados	18
2.3.1. Cálculo de ESAL	21
2.3.1.1. Método da Quarta Potência.....	22
2.3.1.2. Método Francês.....	23
2.3.1.3. Método JPais	24
2.4. Cálculo da espessura da camada betuminosa.....	25
3. Metodologia de estudo	27
3.1. Recolha e tratamento dos dados.....	27
3.1.1. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado F1.....	29
3.1.2. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado F2.....	30
3.1.3. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado H3.....	31
3.1.4. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado H5	33
3.2. Descrição da metodologia do estudo	36
3.2.1. Método da Quarta Potência.....	37
3.2.2. Método Francês.....	39
3.2.3. Método JPais	40
3.2.4. Determinação da espessura da camada betuminosa.....	42
4. Análise da agressividade do tráfego	45
4.1. Análise da Classe F1	45
4.1.1. Método Quarta Potência	45
4.1.2. Método Francês.....	48
4.1.3. Método JPais	49
4.1.4. Análise da comparação entre os métodos	51

4.1.5.	Valores médios da agressividade	53
4.2.	Análise da Classe F2	54
4.2.1.	Método JPais	54
4.2.2.	Análise da Comparação entre os Métodos	58
4.2.3.	Valores médios da agressividade	60
4.3.	Análise da Classe H3	61
4.3.1.	Método JPais	61
4.3.2.	Análise da Comparação entre os Métodos	65
4.3.3.	Valores médios da agressividade	68
4.4.	Análise da Classe H5	69
4.4.1.	Método JPais	69
4.4.2.	Análise da Comparação entre os Métodos	74
4.4.3.	Valores médios da agressividade	77
5.	Análise global do tráfego	79
5.1.1.	Método Quarta Potência	79
5.1.2.	Método Francês	80
5.1.3.	Método JPais	82
6.	Influência do tráfego na constituição dos pavimentos	85
6.1.	Classe de veículos pesados F1	85
6.2.	Classe de veículos pesados F2	87
6.3.	Classe de veículos pesados H3	89
6.4.	Classe de veículos pesados H5	91
6.5.	Tráfego global	93
6.5.1.	Método Quarta Potência	93
6.5.2.	Método Francês	94
6.5.3.	Método JPais	96
7.	Conclusões	99
8.	Referências bibliográficas	101

Índice de figuras

Figura 1 – Representação esquemática de um pavimento rodoviário: ações e solicitações (Pereira & Miranda, 1999).....	7
Figura 2 – Exemplo de roda dupla e roda simples (Addis, 2000).....	17
Figura 3 – Número de veículos pesados e número de veículos sobrecarregados por classe .	28
Figura 4 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe F1	29
Figura 5 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe F1	30
Figura 6 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe F2.....	30
Figura 7 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe F2.....	31
Figura 8 – Distribuição das cargas observadas no eixo 3 dos veículos da Classe F2.....	31
Figura 9 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe H3	32
Figura 10 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe H3	32
Figura 11 – Distribuição das cargas observadas no eixo 3 dos veículos da Classe H3	33
Figura 12 – Distribuição das cargas observadas no eixo 4 dos veículos da Classe H3	33
Figura 13 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe H5	34
Figura 14 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe H5	34
Figura 15 – Distribuição das cargas observadas no eixo 3 dos veículos da Classe H5	35
Figura 16 – Distribuição das cargas observadas no eixo 4 dos veículos da Classe H5	35
Figura 17 – Distribuição das cargas observadas no eixo 5 dos veículos da Classe H5	35
Figura 18 – Veículo da classe F1	36
Figura 19 – Veículo da classe F2.....	36
Figura 20 – Veículo da classe H3	36
Figura 21 – Veículo da classe H5	37
Figura 22 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F1	46
Figura 23 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F1.....	46
Figura 24 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe F1	47
Figura 25 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1	47
Figura 26 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F148	
Figura 27 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1	48
Figura 28 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F1	49
Figura 29 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe F1	50
Figura 30 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1	50
Figura 31 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1	51
Figura 32 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe F1	52
Figura 33 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe F1	52
Figura 34 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe F1	53

Figura 35 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F2.....	55
Figura 36 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe F2.....	55
Figura 37 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 3 da Classe F2.....	56
Figura 38 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F2.....	57
Figura 39 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F2.....	57
Figura 40 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe F2.....	58
Figura 41 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe F2.....	59
Figura 42 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da Classe F2.....	59
Figura 43 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe F2.....	60
Figura 44 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe H3.....	61
Figura 45 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe H3.....	62
Figura 46 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 3 da Classe H3.....	63
Figura 47 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 4 da Classe H3.....	63
Figura 48 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H3.....	64
Figura 49 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H3.....	65
Figura 50 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe H3.....	66
Figura 51 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe H3.....	66
Figura 52 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da Classe H3.....	67
Figura 53 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da Classe H3.....	67
Figura 54 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe H3.....	68
Figura 55 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe H5.....	69
Figura 56 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe H5.....	70
Figura 57 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 3 da Classe H5.....	71
Figura 58 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 4 da Classe H5.....	71
Figura 59 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 5 da Classe H5.....	72

Figura 60 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H3	73
Figura 61 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H5	73
Figura 62 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe H5	74
Figura 63 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe H5	75
Figura 64 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da Classe H5	75
Figura 65 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no Eixo 4 da Classe H5.....	76
Figura 66 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, no Eixo 5 da Classe H5.....	76
Figura 67 – Evolução do ESAL para método da 4. ^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe H3	77
Figura 68 – Influência dos veículos sobrecarregados no fator caminhão pelo Método Quarta Potência.....	80
Figura 69 – Influência dos veículos sobrecarregados no fator caminhão pelo Método Francês.....	81
Figura 70 – Influência dos veículos sobrecarregados no fator caminhão pelo Método JPais ...	83
Figura 71 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F1	86
Figura 72 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F1	86
Figura 73 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe F1	87
Figura 74 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F2	88
Figura 75 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F2	88
Figura 76 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe F2.....	89
Figura 77 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H3.....	90
Figura 78 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H3.....	90
Figura 79 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe H3	91
Figura 80 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H5.....	92
Figura 81 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H5.....	92
Figura 82 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe H5	93
Figura 83 – Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa	94
Figura 84 – Aumento da espessura da camada betuminosa devido às sobrecargas.....	94
Figura 85 – Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa	95
Figura 86 – Aumento da espessura da camada betuminosa devido às sobrecargas.....	95
Figura 87 – Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa	96
Figura 88 – Aumento da espessura da camada betuminosa devido às sobrecargas.....	97

Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação dos veículos automóveis.....	11
Tabela 2 - Classificação dos veículos pesados da Classe F.....	12
Tabela 3 - Classificação dos veículos pesados da Classe G.....	13
Tabela 4 - Classificação dos veículos pesados da Classe H.....	13
Tabela 5 - Classificação dos veículos pesados da Classe I.....	13
Tabela 6 – Peso máximo por veículos.....	17
Tabela 7 – Peso bruto máximo por eixo dos veículos pesados.....	18
Tabela 8 – Elementos relativos ao tráfego (JAE, 1995).....	21
Tabela 9 – Valores dos coeficientes de k e α para o Método Francês.....	23
Tabela 10 – Axle parameter (AP).....	24
Tabela 11 – Constantes da equação 6.....	25
Tabela 12 – Constantes da equação 10.....	26
Tabela 13 - Distribuição das pesagens por classes de veículos pesados.....	27
Tabela 14 – Classes dos veículos e carga máxima legal.....	38
Tabela 15 - Classes dos veículos e ESAL máximo legal.....	39
Tabela 16 – Coeficiente k, segundo o Método Francês.....	39
Tabela 17 - Classes dos veículos e ESAL máximo legal.....	40
Tabela 18 – Constituição do pavimento rodoviário do estudo.....	40
Tabela 19 – Axle parameter (AP).....	41
Tabela 20 – Constantes da equação 15.....	41
Tabela 21 – Coeficiente k.....	42
Tabela 22 – Coeficiente k.....	42
Tabela 23 - Classes de tráfego dos veículos e ESAL máximo legal.....	42
Tabela 24 – Constantes da equação.....	43
Tabela 25 – Constantes da equação.....	43
Tabela 26 – Fator Camião Médio para classe F1.....	54
Tabela 27 – Fator Camião Máximo para classe F1.....	54
Tabela 28 – Fator Camião Médio.....	60
Tabela 29 – Fator Camião Máximo.....	61
Tabela 30 – Fator Camião Médio.....	68
Tabela 31 – Fator Camião Máximo.....	69
Tabela 32 – Fator Camião Médio.....	77
Tabela 33 – Fator Camião Máximo.....	78
Tabela 34 – Fator Camião pelo Método Quarta Potência.....	80
Tabela 35 – Fator Camião pelo Método Francês.....	82
Tabela 36 – Fator Camião pelo Método JPais.....	83

1. Introdução

1.1. Apresentação do tema e seu enquadramento

O transporte de mercadorias através de veículos pesados é considerado como o principal meio transporte utilizado pela maioria dos países a nível europeu e mundial. Os últimos dados revelam que o crescimento mantém-se progressivo, à semelhança da tendência das últimas décadas. No que concerne ao cenário nacional, o transporte de mercadorias e passageiros através de veículos pesados é generalizado. Esta realidade exige a todos os agentes envolvidos nesta temática a responsabilidade de dimensionar, construir, reabilitar e gerir os pavimentos rodoviários capazes de suportar este tráfego.

Os pavimentos rodoviários são concebidos para suportar o tráfego esperado, mesmo que sobrecarregado, sob certas condições climáticas, mas frequentemente apresentam necessidade de intervenção antes do final do período de dimensionamento. Este cenário justifica-se com possíveis causas relacionadas com o deficiente dimensionamento do pavimento, com a fraca qualidade dos materiais ou usualmente devido à inadequada previsão do tráfego de projeto, tanto em termos de volume ou de sobrecargas.

A abordagem ao dimensionamento de um pavimento para a Rede Rodoviária Nacional (RRN) pressupõe que sejam satisfeitos os seguintes requisitos específicos: oferecer aos utentes um nível de serviço adequado, permitindo que a circulação se faça em condições de segurança, conforto e economia; corresponder às exigências das diferentes classes de tráfego e taxas de crescimento expectáveis; garantir condições adequadas de fundação para os pavimentos; melhorar a qualidade dos pavimentos a construir e sistematizar as estruturas de pavimentos.

A escolha da solução de pavimentação deve ser feita com base em considerações técnico-económicas, designadamente, as condições geotécnicas e climáticas, os materiais disponíveis, os prazos de execução e as exigências futuras dos pavimentos (MACOPAV, 1995).

Para definir um pavimento rodoviário torna-se necessário considerar no dimensionamento as ações fundamentais, designadamente, o tráfego (número e tipo de veículos pesados que

circularão durante o período de vida de projeto), as condições geotécnicas (tipos de solos ocorrentes, regime hidrológico e características do leito do pavimento), as condições climáticas (pluviosidade e temperatura ambiente ao longo do ano) e as características mecânicas dos materiais das camadas (deformabilidade e resistência à fadiga dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos).

Das ações fundamentais a considerar no dimensionamento dos pavimentos, o tráfego é um dos principais fatores. A consideração do tráfego deve incluir: a magnitude das cargas, a sua configuração e o número de passagens.

O dimensionamento dos pavimentos rodoviários considera apenas o efeito do tráfego dos veículos pesados.

Considera-se um veículo pesado, aquele cujo peso bruto é igual ou superior a 3 tf, o que inclui uma larga gama de veículos, compreendendo autocarros e camiões com ou sem reboque ou semirreboque. De acordo com a metodologia das contagens de tráfego efetuadas pela entidade Infraestruturas de Portugal, consideram-se veículos pesados os pertencentes às classes F, G, H, I, J e K.

Devido à grande variedade de eixos dos diversos tipos de veículos pesados, é corrente caracterizar o tráfego solicitante, para efeito de dimensionamento de pavimentos rodoviários, transformando aquela variedade num número equivalente de eixos simples, os quais se designam por eixo-padrão.

Neste contexto, um adequado dimensionamento procura que o espectro de tensões induzidas pela sucessiva passagem dos diversos tipos de veículos pesados não conduza, nem à excessiva formação de cavados de rodeiras, nem à ocorrência de fendilhamento por fadiga.

No caso dos pavimentos flexíveis, que representam mais de 90% dos pavimentos rodoviários em Portugal, os estados de tensão/deformação que são críticos para o dimensionamento estrutural de um pavimento são: extensão máxima de tração na base do conjunto das camadas de misturas betuminosas e extensão máxima de compressão no topo do solo de fundação.

Ao limitar-se a extensão máxima de tração tem-se por objetivo evitar a ruína do pavimento por fendilhamento em resultado da fadiga das misturas betuminosas e ao limitar a extensão máxima de compressão evita-se o aparecimento à superfície de deformações permanentes excessivas por deformação da fundação.

Importa agora aferir o modo como se processa a análise estrutural do pavimento. A análise estrutural é realizada para um ciclo de aplicação de carga de um eixo-padrão, este procedimento pode ser efetuado recorrendo a programas de cálculo automático, para determinação do estado de tensão/deformação induzido nos materiais das várias camadas dos pavimentos pelas ações que sobre eles atuam, pela ação de um ciclo de aplicação de carga. Para tal consideraram-se os seguintes parâmetros:

- O tipo de solicitação (eixo-padrão) e o modo como é aplicada (geometria do rodado, distância entre eixos e pressão de enchimento dos pneus);
- As características mecânicas (modulo de rigidez - E e coeficiente de Poisson - U) dos materiais das camadas e da respetiva fundação, tendo em conta as características de composição dos materiais e climáticas da região;
- As espessuras das camadas do pavimento.

Para que o dimensionamento do pavimento rodoviário seja adequado é necessário o conhecimento da agressividade do tráfego, a qual permite transformar o espectro de cargas previsto/ observado em eixos-padrão.

O fator de agressividade de um dado tráfego depende do efeito provocado pelo volume de veículos pesados e respetiva carga, recolhidos por uma estação de contagem e pesagem. O fator de agressividade depende do tipo de pavimento, do estado da via, do tipo de eixos dos veículos pesados (simples, duplo e triplo) e do eixo-padrão para o qual foi projetada.

O fator de agressividade é calculado a partir do espectro de cargas característico do tráfego solicitante (veículos pesados) e traduz a correspondência, em termos de efeito destruidor do pavimento, entre um veículo pesado e um certo eixo-padrão.

Os danos resultantes da passagem de um determinado veículo são convertidos no efeito de um único tipo de eixo simples, eixo-padrão, o qual é caracterizado por um determinado peso, geometria e pressão de enchimento.

Em Portugal, os fatores de agressividade utilizados no dimensionamento dos pavimentos rodoviários são recorrentemente retirados do Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV). Os fatores de agressividade recomendados no manual são função do tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada e resultaram de valores obtidos em estações de pesagem e tiveram em consideração a ocorrência de eixos sobrecarregados.

Neste contexto, as sobrecargas dos veículos pesados condicionam os valores da agressividade de tráfego, ou seja, quanto maior o dano provocado no pavimento, mais elevado será o fator de agressividade.

1.2. Objetivos e metodologia

O trabalho elaborado tem como principal objetivo estudar o efeito das sobrecargas do tráfego na constituição dos pavimentos, com base na análise da agressividade do tráfego que circula num dado troço da RRN obtido através de uma estação de pesagem de veículos pesados.

A base de dados utilizada no estudo é composta pelos valores da pesagem manual de quatro diferentes classes de veículos, designadamente, F1, F2, H3 e H5.

A análise do tráfego foi realizada através do cálculo da agressividade, ESAL, para todos os eixos observados utilizando três métodos diferentes: o Método da Quarta Potência, o Método Francês que considera o efeito do tipo de eixo e o Método JPais que contempla o efeito do tipo de eixo e de roda e ainda as características do pavimento rodoviário.

Os valores obtidos no cálculo do ESAL para cada eixo e veículo foram utilizados para calcular a espessura necessária para a camada betuminosa considerando todo o tráfego observado e o tráfego limitado aos limites de carga legal.

Para calcular a espessura de pavimento necessária para diferentes níveis de tráfego, foi desenvolvido um modelo baseado nas leis de fadiga da Shell. Este modelo permitiu um cálculo rápido da espessura do pavimento para qualquer nível de tráfego.

Em suma, o estudo desenvolveu-se no sentido de demonstrar qual a espessura necessária da camada betuminosa para suportar o efeito das sobrecargas dos veículos pesados comparativamente com os veículos que circulam abaixo ou próximo das cargas permitidas por lei.

Paralelamente, foi possível responder, para a base de dados em análise, às seguintes premissas:

- quais as classes de veículos que circulam regularmente com excesso de carga;
- analisar e comparar o cálculo da agressividade através do Método da Quarta Potência, Método Francês e Método JPais;
- quais as classes de veículos pesados que apresentam maior fator camião;
- analisar a influência das sobrecargas na espessura do pavimento, dependendo do nível de tráfego.

1.3. Estrutura da dissertação

O estudo desenvolvido no âmbito da presente dissertação divide-se em oito capítulos. O primeiro capítulo, no qual este subcapítulo se insere, tem como objetivo enquadrar e clarificar a temática da dissertação e exprimir os objetivos e disposição da mesma.

O Capítulo 2 descreve toda a vertente teórica proveniente da pesquisa efetuada e do atual estado da arte, que serve de base para o desenvolvimento da dissertação. Por conseguinte, o capítulo inicia-se com generalidades referentes aos pavimentos rodoviários, designadamente, as ações, a sua constituição e sua classificação e, posteriormente a caracterização do tráfego rodoviário através da classificação, dos tipos de eixos e de roda e assinalam-se as leis que decretam estas características em território nacional. De seguida, aborda-se a agressividade dos veículos pesados e os métodos adotados para o seu cálculo. Por fim, contextualiza-se o efeito das sobrecargas do tráfego.

No Capítulo 3 apresenta-se uma série de atividades baseadas na recolha e tratamento de dados provenientes da estação de pesagem considerada. Primeiramente, explica-se a recolha e o tratamento dos dados. De seguida, o tratamento de informação abrange a análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado F1, F2, H3 e H5. Neste capítulo fomenta-se ainda a descrição pormenorizada da metodologia adotada.

No Capítulo 4 apresenta-se a análise da agressividade do tráfego para a classe de veículos pesados F1, segundo o Método da Quarta Potência, Método Francês e Método JPais e a comparação entre as distintas metodologias. A análise da agressividade do tráfego para a classe de veículos pesados F2, H3 e H5 apresenta-se apenas para o Método JPais, bem como a comparação entre metodologias.

No Capítulo 5 apresenta-se a análise global do tráfego através do fator caminhão calculado segundo o Método da Quarta Potência, Método Francês e Método JPais e para as seguintes configurações de tráfego: veículos com carga máxima legal em cada eixo; veículos com carga média em cada eixo; todos os veículos observados neste trabalho; veículos legais; veículos sobrecarregados e veículos limitados ao limite legal.

Sequencialmente, o Capítulo 6 apresenta a espessura necessária da camada betuminosa para os veículos das classes de tráfego F1, F2, H3 e H5, considerando o fator caminhão definido pelo método JPais. Neste capítulo insere-se ainda a espessura necessária da camada betuminosa para todos os veículos, mas limitados à carga máxima por eixo.

No Capítulo 7 é feita a conclusão da dissertação, onde é apresentada uma breve síntese do trabalho e referidas algumas das conclusões mais importantes a retirar.

Por fim, no Capítulo 8 apresentam-se as referências bibliográficas.

2. Caracterização do tráfego rodoviário

2.1. Pavimentos rodoviários

Um pavimento rodoviário é uma estrutura concebida para suportar um determinado número de ações, ou seja, é uma estrutura que possibilita a circulação de um certo número de veículos durante um determinado período de tempo, em condições adequadas de segurança, conforto e economia.

As ações fundamentais a considerar no dimensionamento de pavimentos rodoviários são o tráfego e as que decorrem da variação dos agentes climáticos, conforme observado na Figura 1.

O pavimento rodoviário possui duas funções, uma função estrutural que consiste em diminuir a pressão transmitida ao solo até valores admissíveis com a sua capacidade de suporte e uma função funcional que consiste em constituir uma superfície resistente à ação de desgaste dos veículos, confortável e segura.

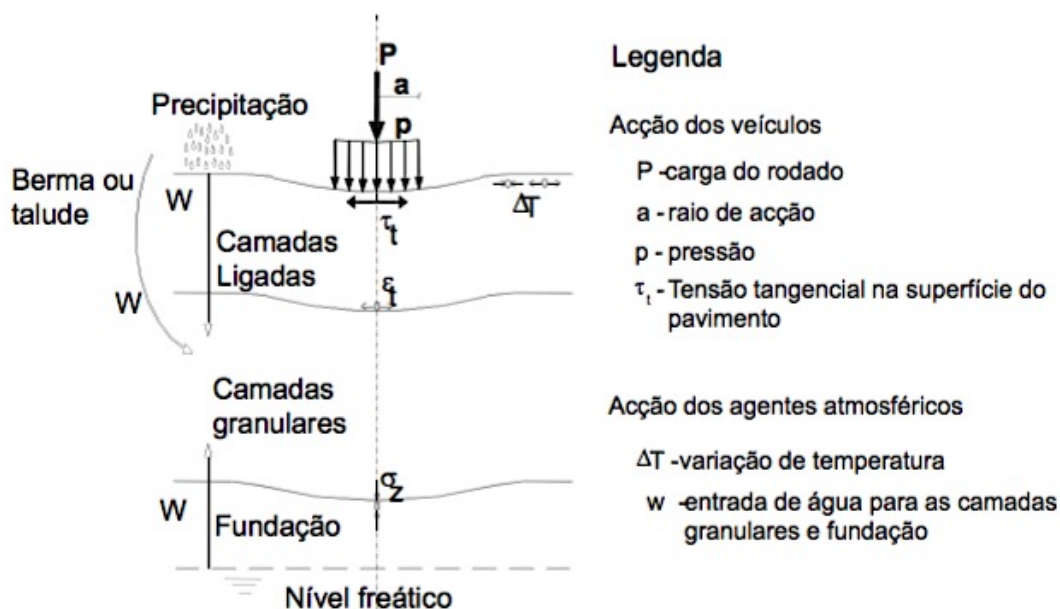


Figura 1 – Representação esquemática de um pavimento rodoviário: ações e solicitações (Pereira & Miranda, 1999)

De acordo com o esquema da Figura 1, as ações que interagem com os pavimentos rodoviários são as seguintes:

- P: Carga por roda – 40 kN ou 65 kN /eixo (valor considerado em dimensionamento)
- p: Pressão (0,7 MPa – 1,5 MPa)
- τ : Tensão tangencial ((0,35 – 1,50 MPa) até 3,00 MPa)
- Δt : Amplitudes térmicas (diurnas, 30° C; anuais, 60° C)
- Água - Precipitação (média mensal: ≤ 120 mm)

Ainda de acordo com a Figura 1, os pavimentos rodoviários apresentam nas camadas superiores materiais estabilizados com ligantes, responsável pela resistência à tração e nas camadas inferiores materiais naturais e granulares com estabilização mecânica, responsável pela resistência à compressão.

Os pavimentos rodoviários são classificados nas seguintes tipologias, em função dos materiais constituintes e da deformabilidade:

- Pavimentos Flexíveis;
- Pavimentos Rígidos;
- Pavimentos Semirrígidos.

Os pavimentos flexíveis são construídos com materiais betuminosos e granulares. Em média, 90% dos pavimentos construídos são flexíveis. A primeira estrada asfaltada nos Estados Unidos com pavimento flexível foi construída no ano de 1870 em Newark, Nova Jérсия.

Os pavimentos flexíveis convencionais são constituídos por um sistema de camadas com os melhores materiais no topo onde a intensidade das tensões é elevada e materiais inferiores na base onde a intensidade das tensões é reduzida. A adesão a este princípio de dimensionamento torna possível o uso de materiais locais e usualmente resulta num dimensionamento mais económico.

Sequencialmente ao referido nos parágrafos anteriores, a constituição do pavimento flexível tem por função suportar a intensidade do tráfego, leve ou pesado e garantir a capacidade de carga da fundação, fraca ou boa e aproveitar a disponibilidade de materiais, granulares e betuminosos.

As camadas dos pavimentos flexíveis apresentam as seguintes funções:

➤ **Camada de desgaste**

Está sob a ação direta do tráfego e do clima, estando sujeita a pressões verticais devidas ao tráfego da ordem de 0,7 a 1,5 MPa, tensões tangenciais da ordem de 0,35 a 1,50 MPa e a variações de temperatura e humidade.

Em termos de função funcional, a camada de desgaste deve constituir uma superfície regular (conforto), com rugosidade suficiente (segurança) e com resistência ao desgaste (polimento e/ou arranque dos agregados: segurança, conforto).

Em termos de função estrutural, a camada de desgaste deve proteger as camadas inferiores das ações do clima (água e temperatura) e contribuir para a resistência global da estrutura através da sua espessura, resistência mecânica e ligação com a camada inferior.

➤ **Camada de base**

A camada de base deve constituir um suporte regular e resistente para a camada de desgaste, além de repartir os esforços verticais devidos às cargas, para diminuir as tensões sobre o solo de fundação, de modo a evitar assentamentos diferenciais ou a sua rotura.

➤ **Camada de sub-base**

As funções da camada de sub-base são idênticas às da camada de base, assegurando uma transição entre a base e a fundação. Deve também reduzir a pressão vertical ao nível da fundação, tornar o solo de fundação capaz de suportar a circulação da obra e homogeneizar as características mecânicas da fundação. Como está sujeita a esforços mais reduzidos pode ser constituída por materiais com características inferiores às dos materiais da camada de base.

O mecanismo de transmissão de carga dos pavimentos flexíveis caracteriza-se pela aplicação da carga do tráfego sobre a camada superficial e, conseqüentemente, ocorre uma deformação localizada sob a carga. A carga é distribuída sobre uma pequena área na superfície e com o aumento da profundidade, a mesma carga é distribuída por uma área maior. Portanto, as maiores tensões ocorrem na superfície, diminuindo à medida que a profundidade aumenta. Assim, o material de maior qualidade precisa estar na superfície, e à medida que a profundidade aumenta, materiais de menor qualidade podem ser usados. Quando a carga é removida, as camadas de pavimento recuperam a deformação sofrida. Uma quantidade

muito pequena de extensão, no entanto, poderia ficar permanentemente o que poderia acumular sobre muitas repetições de carga e causar cavado da rodeira.

2.2. Tráfego rodoviário

Na caracterização das solicitações dos pavimentos rodoviários consideram-se duas ações fundamentais: o tráfego e os agentes climáticos, designadamente a temperatura e a água.

O tráfego é o fator mais importante no dimensionamento dos pavimentos. A consideração do tráfego deve incluir a magnitude das cargas e a configuração e o número de repetições da carga.

2.2.1. Classificação do tráfego

O tráfego é caracterizado como resposta a objetivos de ordem:

- Regulamentar: regras de segurança e concorrência, velocidade, carga total;
- Económica: indicadores económicos (País, Região), volume de cargas e pessoas;
- Técnica: dimensionamento geométrico e estrutural (pavimentos e obras de arte), volume, composição e intensidade.

A caracterização do tráfego assenta nas seguintes características:

- Volume (n.º de veículos e n.º de aplicações das cargas);
- Composição (distribuição do tráfego por classes de veículos; % veículos pesados);
- Intensidade (n.º de eixos; distância entre eixos; carga por eixo; tipo de eixo);
- Condições de aplicação da carga (pressão de contacto; pressão de enchimento);
- Velocidade (frequência de aplicação das cargas: caracterização dos materiais betuminosos).

Os meios de avaliação do tráfego são a classificação geométrica (volume de tráfego; composição (silhueta)) através do recenseamento de tráfego e a classificação ponderal (intensidade das cargas; agressividade) através da pesagem de veículos (cargas/eixo).

O presente estudo aborda a classificação ponderal.

O recenseamento de tráfego inclui:

- Volume, composição: classes de veículos

Os postos de contagem podem ser manuais ou automáticos e anuais (postos de referência; 5/5 anos). Os postos de contagem podem ainda classificar-se como simples, tráfego total nos dois sentidos, e duplos.

- Velocidade, intensidade: cargas/eixo







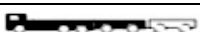



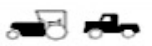
Postos de Pesagem (balanças, cabos piezométricos)

Pesagem de Veículos (cargas/eixo): Pesagem Estática (menos real)

Pesagem Dinâmica + Estática (Postos de Controlo) Pesagem Dinâmica (mais real).

O tráfego é constituído por diversos tipos de veículos, que se encontram agrupados em 11 classes, de “a” a “k”, segundo a JAE, conforme presente na Tabela 1, na qual estão assinaladas as classes analisadas no presente trabalho.

Tabela 1 - Classificação dos veículos automóveis

CLASSE	SILHUETAS	DESCRIÇÃO
A		Velocípedes sem motor auxiliar
B		Velocípedes com motor auxiliar
VELOCÍPEDES		Classes 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 3000 kg de carga com ou sem reboque
LIGEIOS		Classes C + D + E
F		Camiónes de mais de 3000 kg de carga sem reboque
G		Camiónes com um ou mais reboque
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
PESADOS		Classes F + G + H + I + J + K
MOTORIZADOS		Ligeiros + Pesados
TOTAL GERAL		Velocípedes + Ligeiros + Pesados
MERCADORIAS		Classes C + F + G + H

Para efeitos de dimensionamento de pavimentos, só as classes “f” e seguintes (veículos pesados) têm interesse, em virtude de as cargas por eixo dos veículos ligeiros terem um efeito desprezável. Contudo, as classes “j” e “k”, normalmente são excluídas no dimensionamento por corresponderem a situações específicas.

Considera-se um veículo pesado, aquele cujo peso bruto é igual ou superior a 3 tf, o que inclui uma larga gama de veículos. De acordo com a metodologia das contagens de tráfego efetuadas pela JAE, os veículos pesados dividem-se em 4 classes: classe F, classe G, classe H e classe I, de acordo com o tipo de veículo. As três primeiras classes dizem respeito a veículos de transporte de mercadorias: camião sem reboque (classe F), camião com reboque (classe G) e trator com semirreboque (classe H) e a classe I inclui os veículos pesados de passageiros.

A classificação anteriormente apresentada não permite efetuar a distinção dos veículos de acordo com o número ou a disposição dos seus eixos, facto que constitui um parâmetro fundamental para o cálculo da agressividade.

As estações automáticas de contagem/ pesagem registam para cada veículo, além de outros parâmetros, a classe a que o veículo pertence (de acordo com a classificação da JAE) o peso por eixo e a distância entre eixos. Assim e de acordo com os dados obtidos é possível a subdivisão de cada classe, de acordo com a disposição dos eixos dos veículos que a ela pertenciam, conforme se apresenta nas Tabelas de 2 a 5, nas quais estão assinaladas as classes analisadas no presente estudo.

Tabela 2 - Classificação dos veículos pesados da Classe F





TIPO DE VEÍCULO	DESIGNAÇÃO	
	CLASSE	SUBCLASSE
	F	F1
		F2
		F3
		F4

Tabela 3 - Classificação dos veículos pesados da Classe G

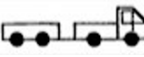
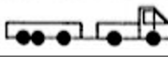

TIPO DE VEÍCULO	DESIGNAÇÃO	
	CLASSE	SUBCLASSE
	G	G1
		G2
		G3

Tabela 4 - Classificação dos veículos pesados da Classe H

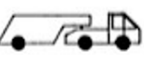

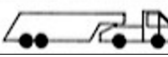
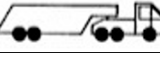
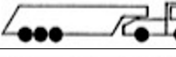

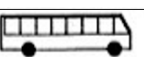
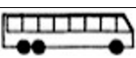
TIPO DE VEÍCULO	DESIGNAÇÃO	
	CLASSE	SUBCLASSE
	H	H1
		H2
		H3
		H4
		H5
		H6

Tabela 5 - Classificação dos veículos pesados da Classe I

TIPO DE VEÍCULO	DESIGNAÇÃO	
	CLASSE	SUBCLASSE
	I	I1
		I2

2.2.2. Caracterização dos tipos de eixos

O conceito de eixo de um veículo define-se como o meio de transmissão de movimento de uma extremidade à outra do mesmo. Este movimento poderá ter origem na energia proveniente do motor como é o caso dos eixos cardã.

Os tipos de eixos que se encontram nos veículos pesados, que normalmente percorrem as estradas do país e de todo o mundo, baseiam-se em eixos simples, tandem ou duplo, tridem ou triplo e quad. Estes últimos são também denominados por eixos múltiplos.

Os eixos tandem, tridem e quad são representados como um conjunto de eixos simples. Desta forma, considera-se um eixo tandem ou duplo como um grupo de dois eixos simples. O mesmo se passa para os restantes eixos tridem, quad e outros, respetivamente três, quatro e mais eixos simples.

Por vezes, poderá mesmo aparecer eixos que devido à carga a que estão sujeitos a transportar possam ter um conjunto de cinco ou mais eixos seguidos. Estes casos podem ser observados nos chamados veículos de transporte especiais, que efetuam o transporte de objetos que devido à sua carga, dimensão ou especificidade de transporte necessitam de maior força de carga ou superfície de carga. Apesar de se realizarem em quantidades bastante inferiores, comparando com o transporte regular de veículos pesados de mercadoria ou passageiros, os transportes especiais representam um grande contributo para o desgaste e deterioração dos pavimentos.

A classificação das diferentes configurações dos eixos assenta nas seguintes definições:

- **Eixo simples:** um eixo simples com mais de 1,8 m de distância aos outros eixos;
- **Eixo tandem:** uma configuração de dois eixos com uma distância entre os eixos inferior a 1,8 m. A carga máxima suportada pelo eixo depende da distância entre os eixos e da sua suspensão e apresenta-se diferente para veículos a motor ou para reboques e semirreboques;
- **Eixo tridem:** uma configuração de três eixos com uma distância longitudinal relativamente curta entre os eixos. Existem casos, em que a suspensão do eixo triplo é tal que a carga sobre o eixo triplo é dividida quantitativamente entre os eixos constituintes.

Os efeitos provocados no pavimento rodoviário pelos diferentes eixos, eixos simples, duplos e triplos não podem ser tratados pela soma dos efeitos dos seus eixos individuais constituintes. Este facto relaciona-se com duas razões, por um lado, a dispersão da carga nos pavimentos pode ser tal que a resposta, tensão e deformação, pode aumentar substancialmente a resposta sob o eixo considerado devido aos eixos vizinhos com uma configuração dupla ou tripla, e por outro lado, a natureza viscoelástica dos materiais betuminosos, tensões e deformações causadas por uma carga de eixo precisam de algum tempo para relaxar, após o eixo ter passado.

A consideração do efeito do tráfego pesado é determinante no dimensionamento de um qualquer pavimento rodoviário, pelo que rapidamente percebeu-se ser necessário regulamentar a circulação dos pesos dos veículos pesados, através da imposição de limites ao peso bruto máximo dos veículos e ao peso máximo por eixo. A premência na regulamentação relaciona-se com o desgaste dos pavimentos e a sua deterioração provocada pelos veículos pesados e com o estabelecimento de princípios de igualdade na concorrência entre agentes económicos no âmbito dos transportes.

Historicamente e ao nível nacional, os limites máximos dos pesos autorizados para os veículos pesados foram aumentados através do Decreto Regulamentar n.º 78/85, de 26 de novembro por transposição da Diretiva da Comunidade Europeia para melhorar as possibilidades concorrenciais das transportadoras do território. Ao nível europeu, desde 1984, o Conselho das Comunidades emitiu várias diretivas visando a regulamentação das cargas transmitidas pelos veículos pesados aos pavimentos com vista a limitar os danos causados por esses veículos nos pavimentos.

Sequencialmente e em termos legislativos, foi publicada a Diretiva n.º 96/53/CE, de 25 de julho que fixou, para além de outras características dos veículos pesados, os pesos máximos autorizados para os veículos e para os diversos eixos. Em Portugal, por transposição da referida Diretiva, foi publicada a Portaria n.º 1092/97, de 3 de novembro, que fixou para Portugal valores idênticos aos previstos naquele diploma.

Apesar da regulamentação existente, ao nível comunitário houve necessidade de harmonizar as dimensões máximas autorizadas para os veículos rodoviários de transporte de passageiros entre as normas em vigor nos Estados membros. Assim, procedeu-se à publicação da Diretiva n.º 2002/7/CE, de 18 de fevereiro e a transposição da mesma para o direito nacional através do Decreto-Lei n.º 99/2005, de 21 de junho, o qual revoga a Portaria n.º 1092/97, de 3 de novembro.

O Decreto-Lei n.º 99/2005, de 21 de junho aprova o regulamento que fixa os pesos e as dimensões máximos autorizados para os veículos em circulação nas estradas. No artigo 8.º do Anexo I do citado diploma fixa-se o peso bruto máximo dos veículos e no artigo 9.º, o peso máximo por eixo, conforme consta na Tabela 6 e 7, respetivamente.

A legislação referida no paragrafo anterior mantém-se em vigor, contudo foram-lhe introduzidas quatro alterações. A primeira alteração, o decreto-lei n.º 131/2006, de 11 de julho, altera os limites dos pesos máximos autorizados para os veículos de transporte de madeira, desde que os veículos estejam tecnicamente preparados para o efeito. A segunda alteração, o decreto-lei n.º 203/2007, de 28 de maio, altera os limites do comprimento máximo para os veículos de transporte de madeira em resultado da alteração dos pesos máximos autorizados. A terceira alteração, o decreto-lei n.º 133/2010, de 22 de dezembro, altera os limites dos pesos máximos autorizados para os veículos de transporte de papel, pasta de papel e produtos cerâmicos nas deslocações de e para portos nacionais e altera a altura máxima dos veículos pesados da classe I a utilizar em transporte público urbano de passageiros. A última alteração, o decreto-lei n.º 133/2014, de 5 de setembro, introduz ligeiras alterações aos limites, principalmente para transportes para indústrias especiais, os quais devem ser considerados aquando da análise e dimensionamento de pavimentos em estradas que se preveja a circulação de tais veículos.

2.2.3. Caracterização do tipo de roda

A roda tem como função, suportar a carga, oferecer respostas diferentes em aceleração e desaceleração, assegurar a transmissão da força motriz, contribuir em conjunto com a suspensão para o conforto do veículo e garantir a dirigibilidade do veículo. Quanto ao tipo de roda, elas podem ser simples (“single-wheel”) ou dupla (“dual-wheel”) como se pode observar na Figura 2.

Tabela 6 – Peso máximo por veículos

Tipo de veículo	Peso máximo (toneladas)
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 – semirreboque	
De 3 eixos	29
De 4 eixos	38
De 5 ou mais eixos	40
De 5 ou mais eixos transportando um contentor ISO de 40 pés	44
Conjunto motor – reboque	
De 3 eixos	29
De 4 eixos	37
De 5 ou mais eixos	40
Reboques	
De 1 eixo	10
De 2 eixos	18
De 3 ou mais eixos	20



Figura 2 – Exemplo de roda dupla e roda simples (Addis, 2000)

Tabela 7 – Peso bruto máximo por eixo dos veículos pesados

Tipo de eixo		Peso máximo (toneladas)
Eixo da frente (veículos automóveis)		7,5
Eixo simples não motor		10
Eixo simples motor		12
Eixo duplo motor se a distância (d) entre eixos for:	$d < 1,0$ m	12
	$1,0$ m $< d < 1,3$ m	17
	$1,0$ m $\leq d < 1,3$ m	19
	$d \geq 1,8$ m	20
Eixo triplo motor e não motor se a distância (d) entre eixos for:	$d < 2,6$ m	21
	$d \geq 2,6$ m	24

As Tabelas 6 e 7 revelam que o peso máximo por eixo simples depende de este ser motor ou não motor. No caso de eixos duplos e triplos verifica-se que o peso máximo depende da distância entre cada sub-eixo.

Um eixo composto por roda dupla provoca menos dano no pavimento comparativamente com um eixo constituído por roda simples. Este facto justifica-se pela distribuição de cargas.

A realização de diferentes estudos relativos à temática das características da roda/ pneu revelaram que rodas/ pneus simples, mas com maior largura produzem maior desgaste no pavimento do que roda/ pneu duplo, para a mesma carga por eixo. A conclusão relaciona-se com o facto de na roda dupla, a carga é distribuída por uma maior área. Para colmatar esta realidade têm-se desenvolvido trabalhos no sentido de considerar a pressão pneumática.

2.3. Agressividade dos veículos pesados

O conhecimento do tráfego de veículos pesados é um dado indispensável no projeto, na conservação e na reabilitação de um pavimento rodoviário. Uma avaliação grosseira do tráfego pesado pode consistir na contagem errada do número de veículos pesados que

circulam numa determinada via e num determinado período de tempo. No entanto, os veículos pesados variam em peso, número de eixos e espaçamento entre eixos. De modo a considerar-se numa forma simples esta variação, na ação que os rodados exercem sobre um pavimento, foi desenvolvido o conceito de equivalência de pesos por eixo. Isto é, os efeitos resultantes da passagem dos diferentes pesos por eixo dos diversos veículos são convertidos no efeito de um único tipo de eixo simples – eixo-padrão – caracterizado por um determinado peso, geometria e pressão de enchimento.

A agressividade de um eixo relativamente a um dado eixo de referência (eixo-padrão), ou seja, um número de passagens - n - de um eixo simples de carga P_i produz um dano semelhante a N eixos-padrão P_r (80 kN, por exemplo) é dado pela Expressão 1.

$$\frac{N_{Pr}}{n_{px}} = \left(\frac{P_x}{P_r}\right)^\alpha = f \quad (1)$$

Onde:

f : coeficiente de equivalência (coeficiente de agressividade) entre o dano no pavimento provocado pela passagem de um eixo-padrão de P_r e o dano provocado por um eixo de peso P_x ;

n_{px} : o número de eixos de peso P_x ;

N_{Pr} : o número de eixos-padrão de P_r (80 kN, por ex.);

α : coeficiente de potenciação, função da rigidez da estrutura do pavimento:

- Pavimentos flexíveis: 4 a 6
- Pavimentos semi-rígidos: 8 a 12
- Pavimentos rígidos: 12 a 30.

Os fatores que interferem no valor da agressividade são o tipo de pavimento (flexível, rígido ou semi-rígido) e a carga no eixo padrão P_r (80 kN ou 130 kN). No entanto, o peso por eixo de um veículo pesado é um elemento preponderante na avaliação do fator de agressividade.

O cálculo da agressividade média do tráfego e do fator-camião é realizado através do cálculo do coeficiente de agressividade f para cada classe de tráfego, seguido da determinação da agressividade por classe. A determinação da agressividade média é a média ponderada da agressividade de cada classe.

Genericamente, a agressividade de um veículo pesado é igual ao somatório das agressividades de todos os seus eixos.

A verificação da capacidade de carga dos pavimentos é feita com base no número acumulado de veículos pesados (NAVP) que se prevê que irão circular sobre o pavimento durante o período de dimensionamento.

A partir do número acumulado de veículos pesados, determina-se o número equivalente de passagens de um eixo padrão, com base num fator de agressividade do tráfego pesado.

O cálculo do fator de agressividade (fator caminhão na terminologia americana) é feito com base no espectro das cargas por eixo do tráfego de pesados e em coeficientes de equivalência que relacionam entre si os efeitos destruidores das diferentes cargas por eixo.

Conhecendo o Número Acumulado de Veículos Pesados (NAVP) e o fator caminhão (c), determina-se o “Número de Eixos Equivalentes” ao “Eixo-Padrão”, NEEP:

$$NEEP = ESAL = NAVP \times c \quad (2)$$

Onde:

$$c = f \times n$$

e, n é o número médio de eixos por veículo pesado.

Em 1995, a JAE editou o "Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional" destinado a apoiar a realização de "Estudos Prévios" no qual são feitas recomendações para os valores a adotar para o fator de agressividade f definidos em função do TMD de pesados, no ano de abertura ao tráfego por sentido e na via mais solicitada. Tais fatores *"resultaram da análise de valores obtidos em estações de pesagem e tiveram em atenção a ocorrência de eixos sobrecarregados sobretudo nos itinerários de mais volume de tráfego pesado"*.

As classes de tráfego definidas no Manual estão indicadas na Tabela 8, em que se inclui também o número acumulado de pesados em 20 anos na via de projeto, com taxas de crescimento propostas no Manual.

Tabela 8 – Elementos relativos ao tráfego (JAE, 1995)

Classe	(TMDA) _p	Taxa de crescimento médio (t)	Pavimentos flexíveis		Pavimentos semi-rígidos	
			Coef. De agress. (f)	N _{dim80} (20 anos)	Coef. De agress. (f)	N _{dim130} (20 anos)
T ₆	50 - 150	3	2	2 x 10 ⁶	0,5	5 x 10 ⁵
T ₅	150 – 300		3	8 x 10 ⁶	0,6	2 x 10 ⁶
T ₄	300 – 500	4	4	2 x 10 ⁷	0,7	4 x 10 ⁶
T ₃	500 – 800		4,5	4 x 10 ⁷	0,8	7 x 10 ⁶
T ₂	800 - 1200	5	5	7 x 10 ⁷	0,9	10 ⁶
T ₁	1200 - 2000		5,5	10 ⁸	1,0	2 x 10 ⁷

N_{dim80} - Número equivalente de eixos padrão de 80 kN

N_{dim130} - Número equivalente de eixos padrão de 130 kN

A maioria dos métodos de concepção dos pavimentos rodoviários exige que o tráfego de projeto, com base na transformação do espectro de tráfego, seja calculado num número de passagens equivalentes de um eixo normalizado utilizando os coeficientes de carga equivalentes dos eixos.

2.3.1. Cálculo de ESAL

ESAL (Equivalent Single Axle Load) define o dano no pavimento provocado pela passagem de um eixo de peso P_i relativamente ao dano provocado pela passagem de um eixo-padrão, usualmente um eixo simples com carga de 80 kN.

O ESAL depende do tipo de pavimento, espessura ou capacidade estrutural e utiliza o conceito de EALF (Equivalent Axle Load Factor). A maioria dos valores de EALF utilizados, atualmente, é baseada na experiência.

Os diferentes métodos de cálculo do ESAL não consideram o tipo de eixo, apenas consideram a carga total dos eixos.

O primeiro procedimento usado para converter o tráfego em eixos padrão foi definido no Manual da AASHTO para o Projeto de Estruturas de Pavimento (AASHTO, 1993), que permite converter um fluxo de tráfego misto com diferentes cargas de eixo e configurações de eixos num número de tráfego de projeto. Isto é conseguido convertendo cada carga de eixo esperada num número equivalente de cargas de eixo simples de 80 kN, conhecido como, ESAL, utilizando o fator equivalente de carga calculado em função da carga por eixo e do tipo de pavimento da estrutura.

O cálculo do ESAL foi recentemente movido de uma base empírica, como o método proposto pela AASHTO, para uma abordagem mecanicista, como os métodos utilizados por White et al. (1994), Jessup (1996), Hong et al. (2006), e Prozzi et al. (2007). Na base mecanicista, os fatores equivalentes de carga são obtidos pela relação entre a vida útil do pavimento do eixo padrão e a vida útil do pavimento para a carga real.

A generalidade dos diferentes métodos de cálculo do ESAL não consideram o tipo de eixo, mas tão somente a carga total dos eixos. Esta realidade aplica-se corretamente aos eixos simples, no entanto, para os eixos duplos e triplos, a distância entre os sub-eixos tem um efeito importante sobre o estado de tensão/ deformação no pavimento e, portanto, tem um efeito importante no fator de agressividade.

Nos três subcapítulos seguintes apresentam-se três metodologias diferentes para o cálculo do ESAL e as respectivas abordagens.

2.3.1.1. Método da Quarta Potência

No caso de pavimentos flexíveis, que constituem mais de 90% da extensão da rede de estradas, o valor do expoente que é utilizado com mais frequência é o valor 4 derivado do ensaio AASHTO, pelo que a expressão é conhecida pela “lei da potência quarta”.

O método apenas é válido para os pavimentos flexíveis e a agressividade é determinada pela equação 3.

$$ESAL = \gamma = \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^\alpha \quad (3)$$

Onde:

P_x é a atual carga do eixo;

P_{80} é carga de um eixo padrão, usualmente um eixo simples com carga de 80 kN;

α é o coeficiente que é função do tipo de pavimento.

2.3.1.2. Método Francês

O Manual Francês de Dimensionamento de Pavimentos (LCPC) considera o efeito do tipo de eixo (simples, duplo e triplo) no cálculo de ESAL e é dado pela seguinte equação 4:

$$ESAL = \gamma = k \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^\alpha \quad (4)$$

Onde:

P_x é a atual carga do eixo;

P_{80} é carga de um eixo padrão, usualmente um eixo simples com carga de 80 kN;

k é o coeficiente que é função do tipo de eixo (Tabela 9);

α é o coeficiente que é função do tipo de pavimento (Tabela 9).

Tabela 9 – Valores dos coeficientes de k e α para o Método Francês

Tipo de Pavimento	α	k		
		Eixo simples	Eixo duplo	Eixo triplo
Pavimento Flexível	4	1	0,75	1,1
Pavimentos Rígidos e Semi-rígidos	12	1	12	113

O presente método não considera o efeito do tipo de roda, isto é, roda simples ou dupla, o que tem uma influência importante no cálculo do ESAL. Outro constrangimento apontado ao método é o facto do coeficiente k não levar em conta a variedade de pavimentos flexíveis, tanto em termos de espessura como de rigidez das camadas do pavimento.

2.3.1.3. Método JPais

O Método JPais (Pais e Pereira, 2016) baseia-se num modelo cálculo do ESAL considerando o tipo de roda, isto é, simples ou dupla, válido para pavimentos flexíveis compostos por três camadas (uma camada betuminosa, uma camada granular e fundação) definidas pela espessura e rigidez das camadas de pavimento. As camadas betuminosa e granular são caracterizadas pela espessura e rigidez e a camada de fundação é caracterizada apenas pela rigidez.

A agressividade é determinada pela equação 5.

$$ESAL = \gamma = k \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^\alpha \quad (5)$$

A quantificação do coeficiente k é função das propriedades do pavimento (espessura e rigidez das camadas do pavimento) e da configuração eixo/roda.

A configuração eixo/roda é considerada no modelo pelo parâmetro denominado Axle Parameter (AP). Os valores de AP são apresentados na Tabela 10 e correspondem a uma variação regular do parâmetro k.

Tabela 10 – Axle parameter (AP)

Eixo simples Roda simples	Eixo simples Roda dupla	Eixo duplo Roda simples	Eixo duplo Roda dupla	Eixo triplo Roda simples	Eixo triplo Roda dupla
1,0	2,0	2,7	4,1	3,8	5,2

Dada a influência das propriedades das camadas dos pavimentos (espessura e rigidez), bem como de AP, a equação 6 define o modelo para o cálculo do coeficiente k.

$$k = a_1 \times (H_{asp})^{a_2} \times (H_{gra})^{a_3} \times (E_{asp})^{a_4} \times (E_{subg})^{a_5} \times e^{(a_6 \times AP)} \quad (6)$$

Onde:

H_{asp} é a espessura da camada betuminosa (m);

H_{gra} é a espessura da camada granular (m);

E_{asp} é o modulo de rigidez da camada betuminosa (MPa);

E_{subg} é o modulo de rigidez da camada de fundação (MPa);

AP é o axle parameter definido na Tabela 10;

a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6 são as constantes apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Constantes da equação 6

ET (m)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
<1,2	1,08E+01	-9,41E-01	6,69E-02	-2,85E-01	3,04E-01	-1,41E+00
>1,2	5,20E+00	3,33E-02	1,82E-03	1,15E-01	-1,17E-01	-1,33E+00

O cálculo de ET é efetuado através da seguinte equação:

$$ET = \sqrt[3]{\frac{(H_{asp})^3 \times E_{asp} + (H_{gra})^3 \times E_{gra}}{E_{subg}}} \quad (7)$$

2.4. Cálculo da espessura da camada betuminosa

O impacto das sobrecargas dos veículos pesados no comportamento do pavimento é estudado pela definição da espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento suportar os veículos analisados, considerando o pavimento com uma camada betuminosa e uma camada granular.

Para calcular a espessura do pavimento função do tráfego foi desenvolvido um modelo que traduzisse a vida do pavimento em função do tráfego.

O modelo foi desenvolvido pela simulação de vários pavimentos com espessura da camada betuminosa de 0,05 m até 0,30 m. Para cada pavimento, a tensão de tração na parte inferior da camada betuminosa e a deformação vertical na parte superior do subsolo foram calculadas para um eixo de carga de 80 kN.

A vida do pavimento foi calculada usando as leis de fadiga Shell (1978). A lei de fadiga é definida na equação 8 e correlaciona a vida de fadiga (N) com o nível de extensão (ϵ), a rigidez das misturas betuminosas (S_{mix}) e o volume de betume (V_b). Esta é a lei de fadiga mais utilizada na Europa, proveniente de um extenso programa de testes laboratoriais. Esta

lei de fadiga foi calibrada para ser usada no projeto do pavimento para prever a vida do pavimento.

$$\varepsilon = (0,856 \times V_b + 1,08) S_{mix}^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (8)$$

Em termos de deformação permanente utilizou-se a equação 9, onde $a = 2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de confiança, $a = 2,1 \times 10^{-2}$ para 85% de confiança e $a = 1,8 \times 10^{-2}$ para 95% de confiança.

$$\varepsilon = a \times N^{-0,2} \quad (9)$$

Usando as leis de fadiga definidas pelo Método de Shell e considerando um pavimento com uma camada granular de 20 cm com uma rigidez duas vezes maior que a da fundação, a espessura da camada betuminosa (h) pode ser definida pela equação 10 onde N é o número de ESAL (eixo padrão de 80 kN) e a, b e c são constantes dependendo da rigidez da fundação e da camada betuminosa, dado na Tabela 12, onde E_{asp} é a rigidez da camada de betuminosa e E_{subg} é a rigidez da fundação. O modelo prevê diferentes valores para as constantes a, b e c, em função da rigidez da fundação e da camada betuminosa.

$$\log(h) = a + b(\log(N))^2 + \frac{c}{\log(N)} \quad (10)$$

Tabela 12 – Constantes da equação 10

E_{asp} (MPa)	E_{subg} (MPa)	a	b	c
5000	20	-4.94E-01	6.63E-03	-2.79E+00
	40	-2.66E-01	5.32E-03	-4.49E+00
	60	-8.48E-02	4.53E-03	-5.91E+00
	80	1.22E-01	3.67E-03	-7.44E+00
	100	2.80E-01	3.12E-03	-8.71E+00
	120	3.10E-01	3.18E-03	-9.23E+00
	140	3.99E-01	2.95E-03	-1.01E+01

3. Metodologia de estudo

O presente capítulo desenvolve o processo de análise do efeito das sobrecargas do tráfego na constituição dos pavimentos e os pressupostos adotados para o efeito. A avaliação teve por base o cálculo da agressividade, ESAL, utilizando três metodologias, o Método da Quarta Potência, Método Francês e Método JPais.

3.1. Recolha e tratamento dos dados

Os dados do tráfego utilizados no processo de análise foram obtidos através de pesagens de eixos de veículos pesados num dado troço de um pavimento rodoviário nacional e num determinado período de tempo.

Os dados do tráfego disponíveis para análise contêm a seguinte informação: classe do veículo pesado, tipologia do eixo e da roda e o peso (kg) de cada eixo.

A base de dados utilizada no estudo é composta pelos valores da pesagem manual de 417 veículos pesados num determinado troço de uma estrada nacional. Os veículos pesados correspondem a 1587 eixos.

A partir dos valores compilados, os dados foram agrupados por classe segundo o número de eixos. A distribuição é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição das pesagens por classes de veículos pesados

Classe de Veículo Pesado	Número de Eixos	Número de Veículos
Classe F1	2	107
Classe F2	3	59
Classe H3	4	59
Classe H5	5	192
Total		418

Os dados em análise corroboram a predominância da classe dos veículos pesados que circulam nas estradas nacionais. A Classe F1 para trajetos mais curtos e com menores cargas e a Classe H5 para deslocações longas e com cargas superiores.

O universo dos veículos foi dividido em veículos que circulam com carga regulamentar e veículos que circulam com excesso de carga.

A análise da Figura 3 revela que para as classes de veículos pesados F2 e H3, mais de 50% do tráfego circula com excesso de carga, facto que, previsivelmente, produz um elevado dano no pavimento.

Em cenário oposto, os eixos dos veículos pesados da Classe de veículo pesado F1 circulam com cargas menores que as restantes classes, com apenas 13% dos veículos a circularem sobrecarregados.

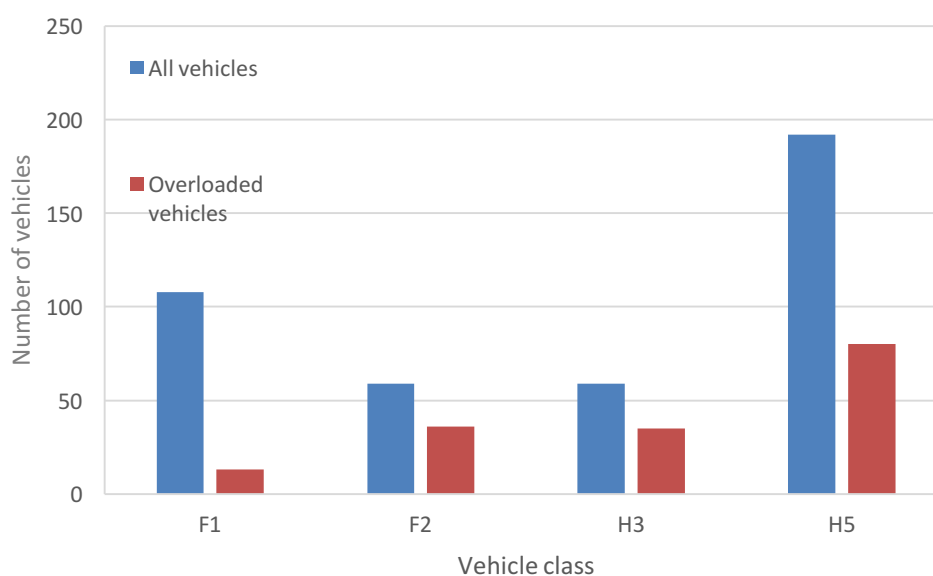


Figura 3 – Número de veículos pesados e número de veículos sobrecarregados por classe

Nos quatro subcapítulos seguintes realiza-se a análise das cargas dos eixos das quatro classes de veículos pesados presentes neste estudo.

A análise individual de cada carga por eixo permite verificar qual o número de eixos dos veículos pesados, suscetíveis de circularem sobrecarregados.

A análise da distribuição das cargas observadas nos eixos dos veículos pesados das classes F1, F2, H3 e H5 apresenta-se nas Figuras 5 a 18 e possibilita avaliar a quantidade de eixos sobrecarregados. Refira-se que o cálculo da percentagem dos eixos dos veículos sobrecarregados é feito através da análise individual de cada eixo (legal ou sobrecarregado), após a ordenação das cargas por ordem crescente.

3.1.1. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado F1

A análise da Figura 4 revela que apenas 13% dos veículos pesados circulam com excesso de carga no eixo 1. A percentagem é idêntica à verificada nas cargas do eixo 2, ou seja, 12% circulam acima do permitido por lei, conforme presente na Figura 5. Em termos de veículo, 20% da classe F1 circula com excesso de carga o que significa que não são considerados veículos sobrecarregados apenas aqueles que a análise revela ambos os eixos sobrecarregados. Em suma, apresentar um eixo sobrecarregado corresponde à caracterização de um veículo com excesso de carga.

Através da observação das Figuras 4 e 5 constata-se, ainda, que os eixos dos veículos da classe F1 circulam com cargas reduzidas e muito abaixo do limite permitido por lei, para ambos os eixos. Este acontecimento deve-se ao facto de os veículos pesados desta classe, em regra, circularem em distâncias menores e com mercadorias de carga reduzida.

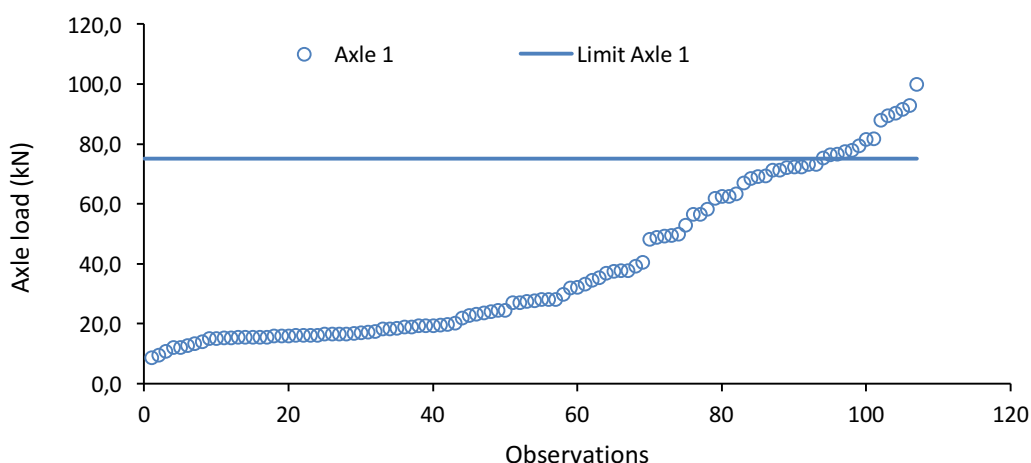


Figura 4 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe F1

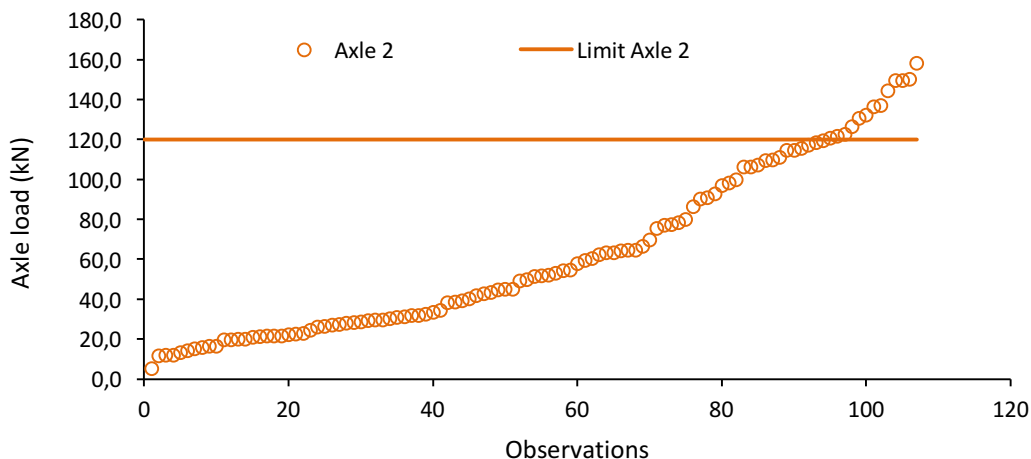


Figura 5 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe F1

3.1.2. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado F2

Para a classe de veículos pesados F2, a análise das Figuras 6, 7 e 8 mostra que o eixo 1, o eixo 2 e o eixo 3 circulam com carga acima do permitido por lei, nomeadamente, 56%, 61% e 54%, respetivamente. No que respeita ao veículo, o valor aumenta consideravelmente para 80% da classe F2 que circula com excesso de carga.

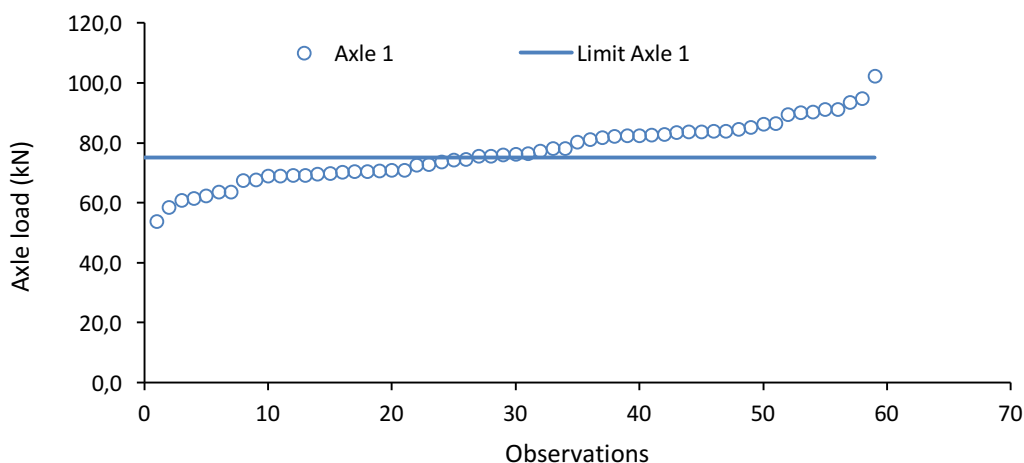


Figura 6 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe F2

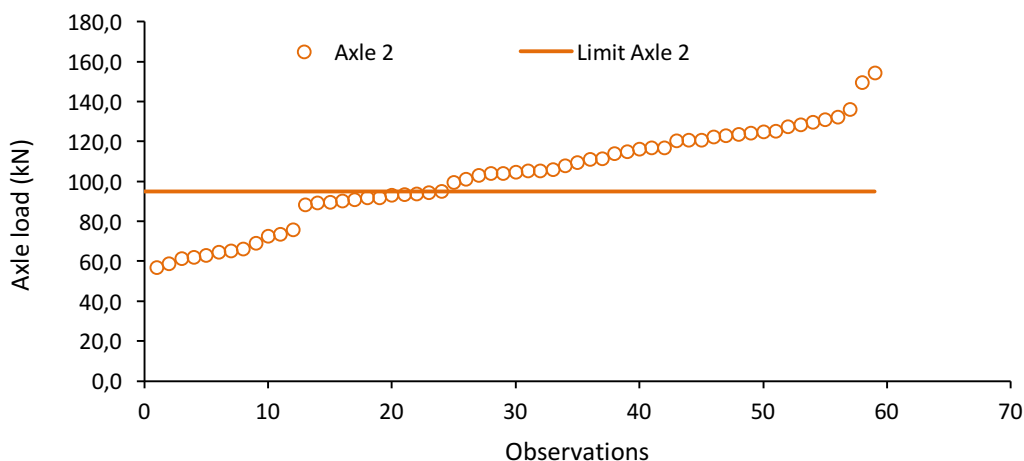


Figura 7 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe F2

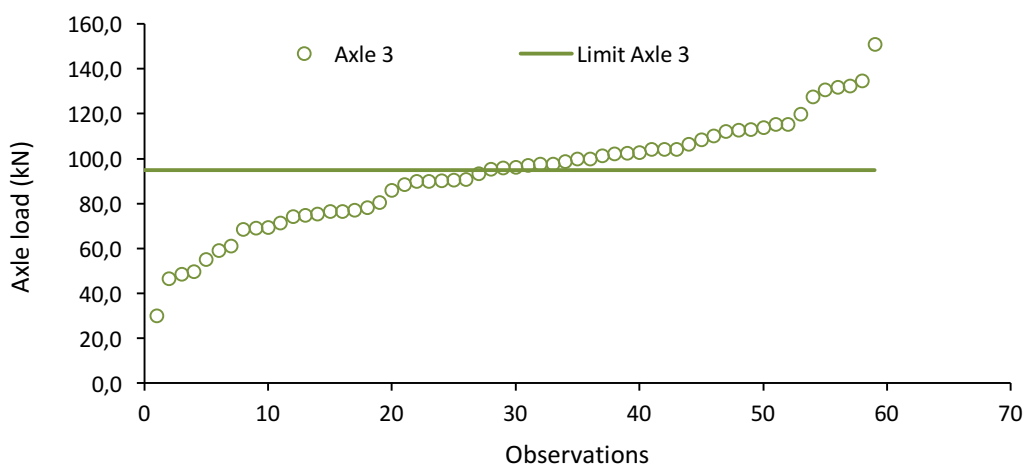


Figura 8 – Distribuição das cargas observadas no eixo 3 dos veículos da Classe F2

3.1.3. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado H3

As cargas dos eixos da classe H3, Figuras 9 e 10, caracterizam-se pela presença de um trator com eixo dianteiro e traseiro simples com apenas 17% e 25%, respetivamente, dos eixos com carga acima do permitido por lei. As cargas legais aproximam-se do limite legal.

Em situação oposta e patente nas Figuras 11 e 12, a classe H3 apresenta um reboque com um eixo duplo composto pelo eixo 3 e eixo 4, sobrecarregados em 68% e 59% dos veículos, respetivamente. Em termos de veículo, 83% da classe H3 circula com excesso de carga.

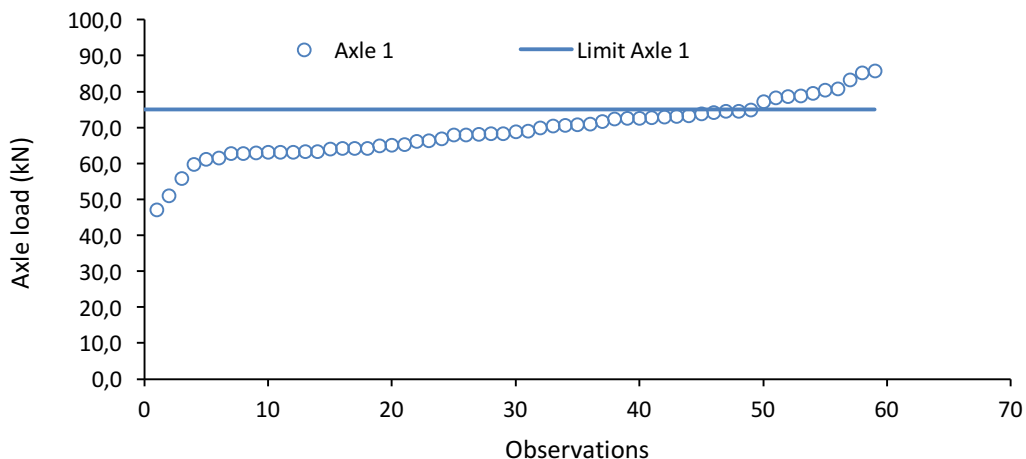


Figura 9 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe H3

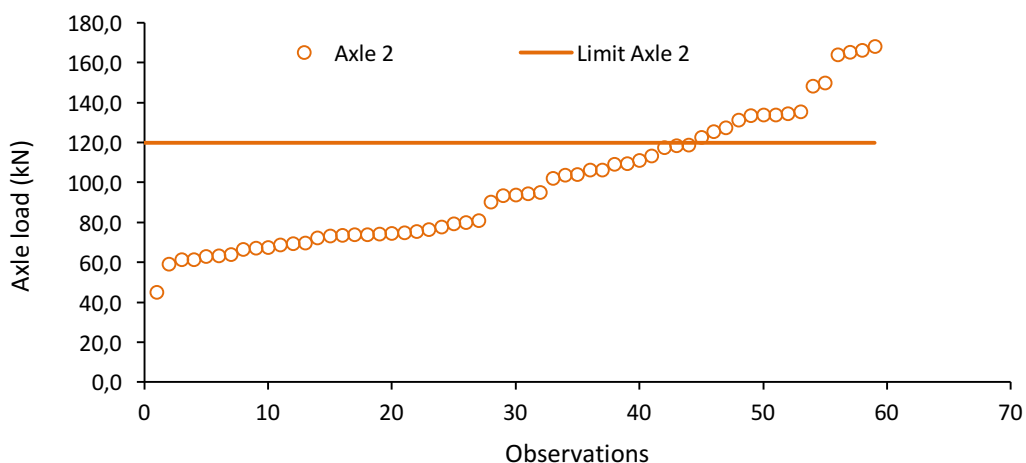


Figura 10 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe H3

O número de veículos que circulam com cargas acima do permitido por lei no eixo 3 e 4 é superior aos eixos 1 e 2, o que significa uma maior vulnerabilidade destes eixos em relação aos anteriores, de circularem sobrecarregados.

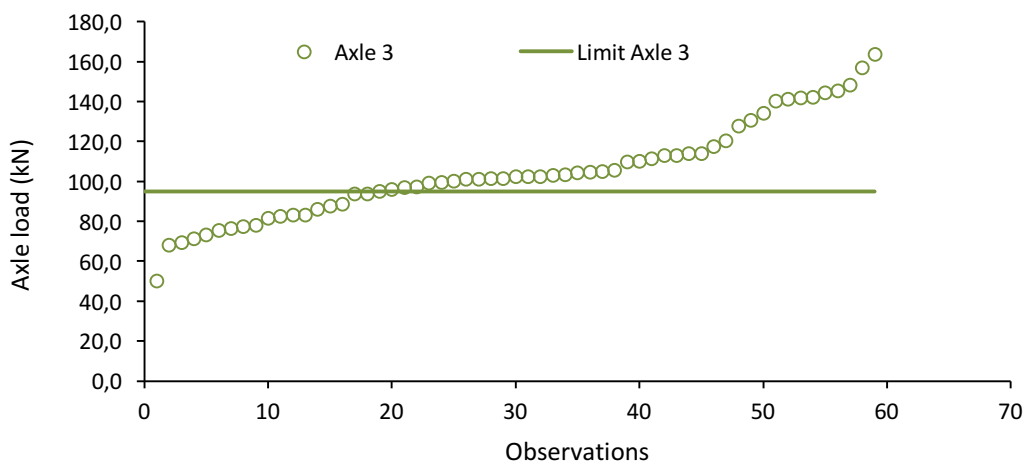


Figura 11 – Distribuição das cargas observadas no eixo 3 dos veículos da Classe H3

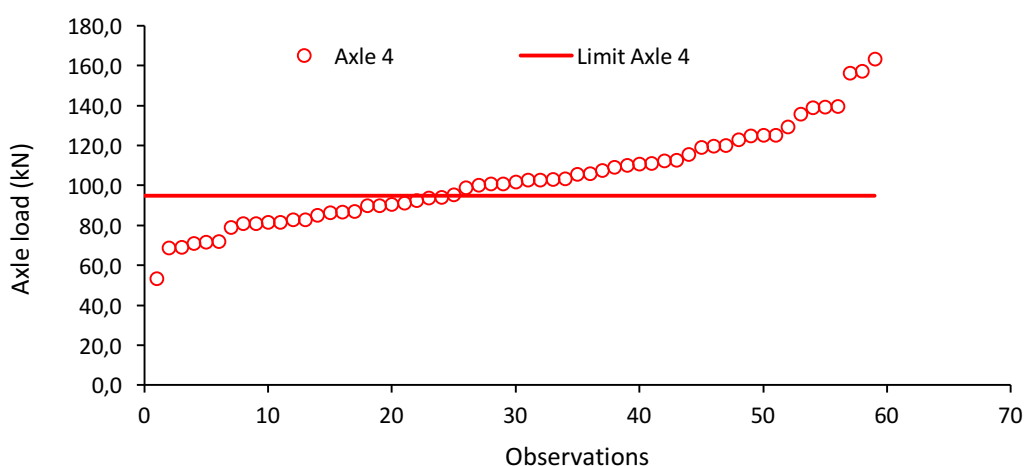


Figura 12 – Distribuição das cargas observadas no eixo 4 dos veículos da Classe H3

3.1.4. Análise das cargas dos eixos da classe de veículo pesado H5

O estudo das Figuras 13 a 17 revela que a maioria dos veículos pesados da classe H5 transitam com peso regulamentar em todos os eixos. O eixo 1 tem uma variação de valor de carga reduzida e apresenta apenas 15% dos eixos sobrecarregados, Figura 13. Por sua vez, o eixo 2 apresenta, na Figura 14, uma variação do valor de carga com 42% dos eixos com excesso de sobrecarga.

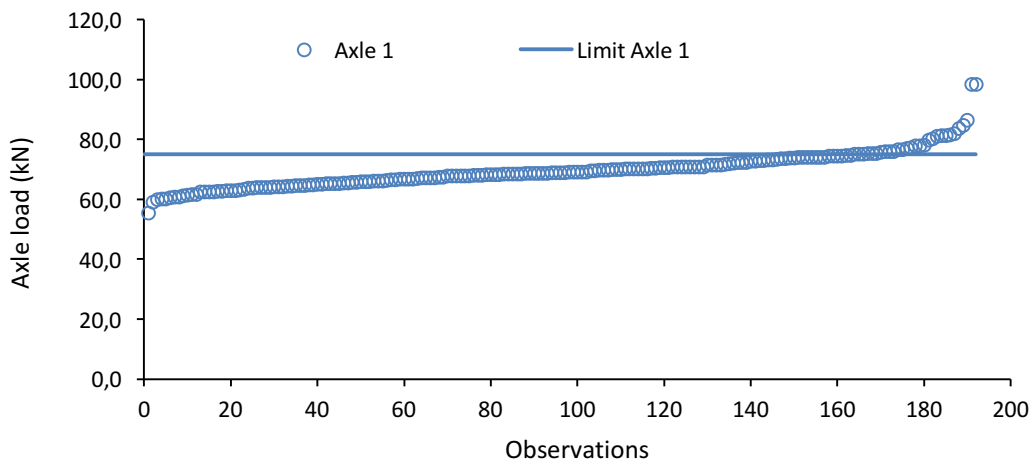


Figura 13 – Distribuição das cargas observadas no eixo 1 dos veículos da Classe H5

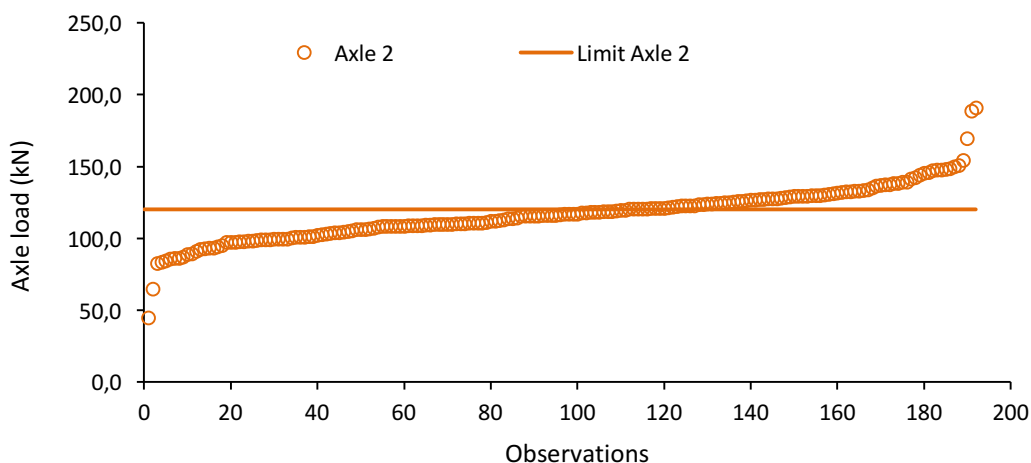


Figura 14 – Distribuição das cargas observadas no eixo 2 dos veículos da Classe H5

O eixo triplo caracteriza-se por uma variação média do valor das cargas e apresenta, individualmente, para os eixos 3, 4 e 5, 35%, 33% e 30% de excesso carga, respetivamente, Figuras 15, 16 e 17. Para a classe H5, 61% dos veículos circulam com excesso de carga.

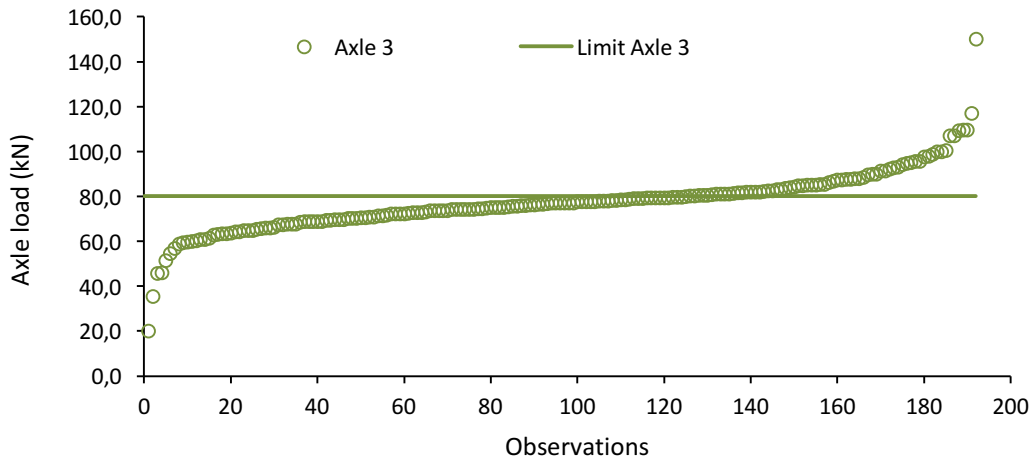


Figura 15 – Distribuição das cargas observadas no eixo 3 dos veículos da Classe H5

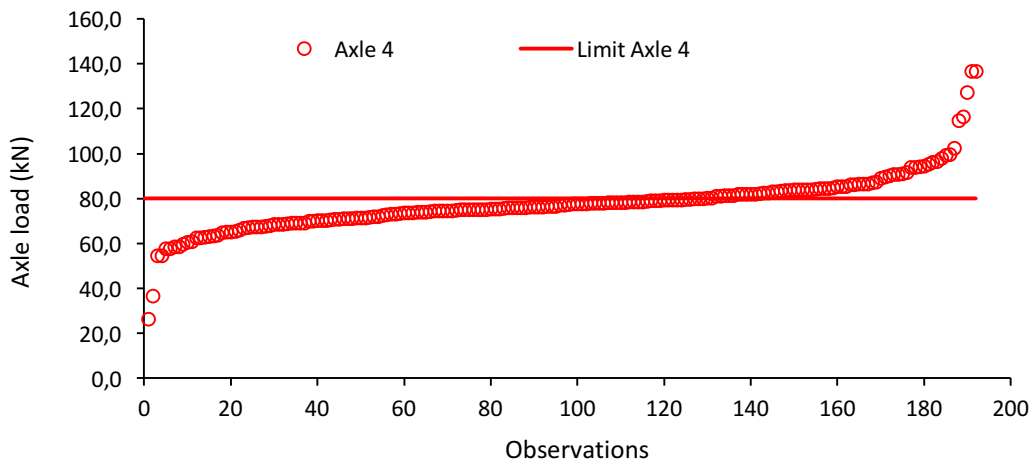


Figura 16 – Distribuição das cargas observadas no eixo 4 dos veículos da Classe H5

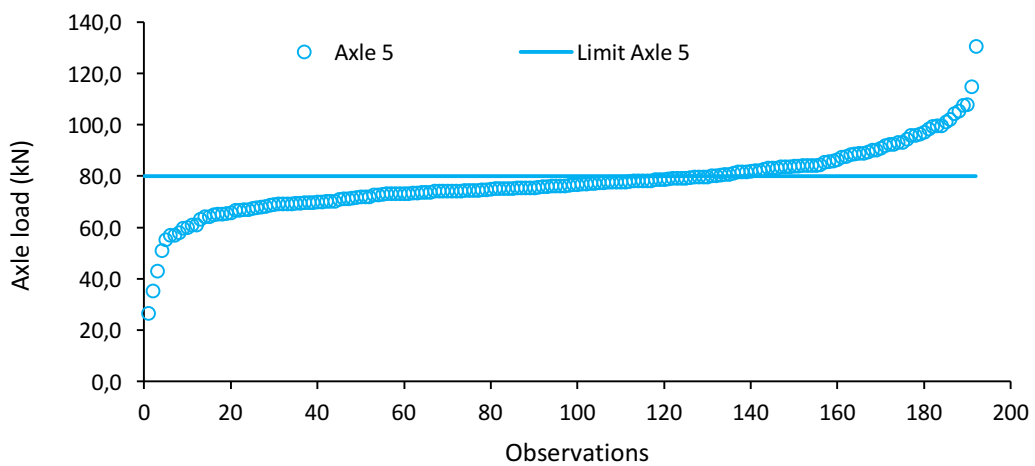


Figura 17 – Distribuição das cargas observadas no eixo 5 dos veículos da Classe H5

3.2. Descrição da metodologia do estudo

O objetivo principal deste estudo é determinar os valores do fator de agressividade e consequentemente estudar o impacto dos veículos pesados, em especial, os sobrecarregados, na constituição dos pavimentos.

A amostragem dos veículos pesados que compõe o estudo caracteriza-se pelas seguintes classes de veículos pesados:

- Classe de veículo pesado F1 – eixo dianteiro: eixo simples/ roda simples e eixo traseiro: eixo simples/roda dupla, conforme observado na Figura 18;



Figura 18 – Veículo da classe F1

- Classe de veículo pesado F2 – eixo dianteiro: eixo simples/ roda simples e eixo traseiro: eixo duplo/roda dupla, conforme observado na Figura 19;



Figura 19 – Veículo da classe F2

- Classe de veículo pesado H3 – trator com eixo dianteiro: eixo simples/ roda simples e eixo traseiro: eixo simples/roda dupla e um reboque: eixo duplo/ roda simples, conforme observado na Figura 20;

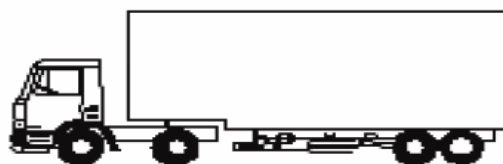


Figura 20 – Veículo da classe H3

- Classe de veículo pesado H5 – trator com eixo dianteiro: eixo simples/ roda simples e eixo traseiro: eixo simples/roda dupla e um reboque: eixo triplo/roda simples, conforme observado na Figura 21.

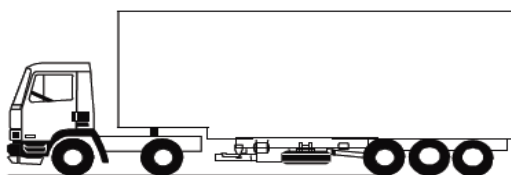


Figura 21 – Veículo da classe H5

As cargas dos eixos de cada classe de veículo foram organizadas, individualmente, por ordem crescente e decompostas nas seguintes configurações:

- Todos os veículos;
- Veículos com carga legal;
- Veículos com excesso de carga;
- Veículos sobrecarregados transformados em veículos legais.

Caracterizadas as cargas, a metodologia desenvolve-se agora no cálculo da agressividade – ESAL através da aplicação do Método da Quarta Potência, Método Francês e Método JPais.

O impacto dos veículos e principalmente das sobrecargas no desempenho do pavimento foi estudado convertendo todas as cargas dos eixos dos veículos num eixo representativo, isto é, no dimensionamento do pavimento é referido como um eixo padrão resultando no ESAL.

Para converter um eixo num eixo padrão, é utilizado o conceito de ESAL que por definição, já anteriormente explicitada, é a relação entre o dano da passagem de um eixo sobre um pavimento e o dano de um eixo padrão, geralmente a carga de 80 kN, passando no mesmo pavimento.

3.2.1. Método da Quarta Potência

A aplicação do Método da Quarta Potência possibilitou o cálculo do ESAL através da seguinte expressão matemática:

$$ESAL = \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^\alpha \quad (11)$$

Onde, α é igual a 4, assumindo tratar-se de um pavimento flexível.

Por exemplo, para o eixo 1 do veículo 1 da classe F1:

$$ESAL = \left(\frac{8,4}{80} \right)^4 = 0,00012$$

O procedimento foi repetido, individualmente, para o eixo 1 e para o eixo 2 e ainda para o veículo considerando:

$$ESAL_{Veículo} = ESAL_{Eixo\ 1} + ESAL_{Eixo\ 2} \quad (12)$$

De igual modo, procedeu-se para as classes de veículos F2, H3 e H5.

A análise individual das cargas dos eixos foi realizada considerando os limites legais constantes na Tabela 14.

Tabela 14 – Classes dos veículos e carga máxima legal (kN)

Classes dos veículos	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4	Eixo 5
F1	75	120			
F2	75	95	95		
H3	75	120	95	95	
H5	75	120	80	80	80

Aplicando o Método da Quarta Potência aos valores constantes na tabela anterior, obtêm-se o ESAL para os vários eixos dos veículos e classes de veículos, conforme expresso na Tabela 15.

Tabela 15 - Classes dos veículos e ESAL máximo legal

Classes dos veículos	ESAL Eixo 1	ESAL Eixo 2	ESAL Eixo 3	ESAL Eixo 4	ESAL Eixo 5	ESAL Veículo
F1	0,77	5,06				5,83
F2	0,77	1,99	1,99			4,75
H3	0,77	5,06	1,99	1,99		9,81
H5	0,77	5,06	1,00	1,00	1,00	8,83

3.2.2. Método Francês

A aplicação do Método Francês possibilitou o cálculo do ESAL através da seguinte expressão matemática:

$$ESAL = k \times \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^\alpha \quad (13)$$

Onde, α é igual a 4, assumindo tratar-se de um pavimento flexível.

A variável k é determinada segundo a configuração do eixo e de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 – Coeficiente k, segundo o Método Francês

Eixo Simples	Eixo Duplo	Eixo Triplo
1	0,75	1,1

Por exemplo, para o eixo 1 do veículo 1, eixo simples, da classe F1:

$$ESAL = 1 \times \left(\frac{8,4}{80} \right)^4 = 0,00012$$

O procedimento foi repetido, individualmente, para o eixo 1 e para o eixo 2 e ainda para o veículo considerando:

$$ESAL_{Veículo} = ESAL_{Eixo 1} + ESAL_{Eixo 2}$$

De igual modo procedeu-se para as classes de veículos F2, H3 e H5.

Aplicando o Método Francês aos valores constantes na Tabela 14, obtêm-se o ESAL máximo legal para as classes de veículos, conforme Tabela 17.

Tabela 17 - Classes dos veículos e ESAL máximo legal

Classes dos veículos	ESAL Eixo 1	ESAL Eixo 2	ESAL Eixo 3	ESAL Eixo 4	ESAL Eixo 5	ESAL Veículo
F1	0,77	5,06				5,83
F2	0,77	1,49	1,49			3,76
H3	0,77	5,06	1,49	1,49		8,82
H5	0,77	5,06	1,10	1,10	1,10	9,13

3.2.3. Método JPais

A aplicação do Método JPais possibilitou o cálculo do ESAL através da seguinte expressão matemática:

$$ESAL = k \times \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^\alpha \quad (14)$$

Onde, α é igual a 4, assumindo tratar-se de um pavimento flexível.

O parâmetro k é determinado segundo a tipologia do eixo e da roda e de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$k = a_1 \times (H_{asp})^{a_2} \times (H_{gra})^{a_3} \times (E_{asp})^{a_4} \times (E_{subg})^{a_5} \times e^{(a_6 \times AP)} \quad (15)$$

Onde:

O pavimento rodoviário em análise apresenta as características, espessura e módulo de rigidez das camadas, indicadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Constituição do pavimento rodoviário do estudo

H_{asp} (m)	E_{asp} (MPa)	H_{gra} (m)	E_{gra} (MPa)	E_{subg} (MPa)
0,15	5000	0,20	120	60

Os valores do parâmetro AP, Axle Parameter, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Axle parameter (AP)

Eixo simples Roda simples	Eixo simples Roda dupla	Eixo duplo Roda simples	Eixo duplo Roda dupla	Eixo triplo Roda simples	Eixo triplo Roda dupla
1,0	2,0	2,7	4,1	3,8	5,2

Os valores das constantes a1 a a6 pressupõem o conhecimento do coeficiente ET denominado Espessura Equivalente e é determinado pela aplicação da seguinte equação:

$$ET = \sqrt[3]{\frac{(H_{asp})^3 \times E_{asp} + (H_{gra})^3 \times E_{gra}}{E_{subg}}} \quad (16)$$

Ou seja:

$$ET = \sqrt[3]{\frac{(0,15)^3 \times 5000 + (0,20)^3 \times 120}{60}} = 0,667381178$$

Após o cálculo de ET, as constantes de a1 a a6 são determinados pela aplicação da Tabela 20 e considerando α igual a 4.

Tabela 20 – Constantes da equação 15

ET – Espessura Equivalente (m)	a₁	a₂	a₃	a₄	a₅	a₆
< 1,2	1,08E+01	-9,41E-01	6,69E-02	-2,85E-01	3,04E-01	-1,41E+00
> 1,2	5,20E+00	3,33E-02	1,82E-03	1,15E-01	-1,17E-01	-1,33E+00

Resolvendo a equação 15, o coeficiente k assume os valores da Tabela 21 para o caso dos eixos múltiplos serem considerados como apenas um eixo. Caso os eixos múltiplos sejam considerados como eixos individuais, o coeficiente k assume os valores da Tabela 22. No presente estudo, os eixos múltiplos são considerados como eixos individuais.

Tabela 21 – Coeficiente k

Eixo simples Roda simples	Eixo simples Roda dupla	Eixo duplo Roda simples	Eixo duplo Roda dupla	Eixo triplo Roda simples	Eixo triplo Roda dupla
4,29	1,00	0,39	0,05	0,08	0,01

Tabela 22 – Coeficiente k

Eixo simples Roda simples	Eixo simples Roda dupla	Eixo duplo Roda simples	Eixo duplo Roda dupla	Eixo triplo Roda simples	Eixo triplo Roda dupla
4,29	1,00	3,10	0,43	2,20	0,30

Por exemplo, para o eixo 1 do veículo 1, eixo simples/ roda simples, da classe de tráfego F1:

$$ESAL = 4,29 \times \left(\frac{8,4}{80}\right)^4 = 0,00052$$

Aplicando o Método JPais aos valores constantes na Tabela 14, obtêm-se o ESAL máximo legal para as classes de veículos, conforme Tabela 23.

Tabela 23 - Classes de trafego dos veículos e ESAL máximo legal

Classes dos veículos	ESAL Eixo 1	ESAL Eixo 2	ESAL Eixo 3	ESAL Eixo 4	ESAL Eixo 5	ESAL Veículo
F1	3,31	5,06				5,83
F2	3,31	0,85	0,85			5,01
H3	3,31	5,06	6,16	6,16		20,69
H5	3,31	5,06	2,20	2,20	2,20	14,98

3.2.4. Determinação da espessura da camada betuminosa

Considerando a teoria apresentada no subcapítulo 2.4, a espessura da camada betuminosa calcula-se pela aplicação da expressão:

$$\log(h) = a + b(\log(N))^2 + \frac{c}{\log(N)}$$

Onde:

N é o número de ESAL (eixo padrão de 80 kN);

a, b e c são constantes que dependem do módulo de rigidez da camada de fundação e da camada betuminosa, indicadas Tabela 24.

Tabela 24 – Constantes da equação

E _{asp} (MPa)	E _{subg} (MPa)	a	b	c
5000	20	-4.94E-01	6.63E-03	-2.79E+00
	40	-2.66E-01	5.32E-03	-4.49E+00
	60	-8.48E-02	4.53E-03	-5.91E+00
	80	1.22E-01	3.67E-03	-7.44E+00
	100	2.80E-01	3.12E-03	-8.71E+00
	120	3.10E-01	3.18E-03	-9.23E+00
	140	3.99E-01	2.95E-03	-1.01E+01

Para o cálculo da espessura da camada betuminosa necessita-se de conhecer o NAVP (número acumulado de veículos pesados). Para tal, recorre-se ao Manual do MACOPAV, Tabela 25 e à expressão:

$$NAVP = \frac{NEEP}{c}$$

Tabela 25 – Constantes da equação

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
NEEP	1,0E+08	7,0E+07	4,0E+07	2,0E+07	8,0E+06	2,0E+06
FC	5,5	5	4,5	4	3	2
NAVP	1,8E+07	1,4E+07	8,9E+06	5,0E+06	2,7E+06	1,0E+06

O procedimento para determinação da espessura da camada betuminosa foi efetuado para o número ESAL de todos os veículos e dos veículos limitados à carga legal.

4. Análise da agressividade do tráfego

Considerando a base de dados do presente estudo, a avaliação da agressividade foi feita calculando o ESAL para dois casos diferentes: para os eixos e para os veículos e para ambos aplicando o Método da Quarta Potência, o Método Francês e o Método JPais.

Estes modelos apresentam diferenças significativas originando diferentes resultados em função do tipo de eixo como acontece com o Método Francês e os resultados em função do tipo de roda e do pavimento, como sucede no Método JPais.

4.1. Análise da Classe F1

4.1.1. Método Quarta Potência

A análise realizada utilizando o Método da Quarta Potência permitiu obter os ESAL do eixo 1 dos veículos indicados na Figura 22 podendo-se verificar que estes se encontram, para a generalidade dos eixos, muito abaixo do limite legal. Este acontecimento resulta do facto de as cargas reduzidas provocarem danos no pavimento extremamente reduzidos.

De modo a estudar o efeito das sobrecargas, os eixos com excesso de carga foram transformados em eixos legais e então o ESAL para esta situação encontram-se na Figura 23, sendo esta idêntica à anterior com exceção dos eixos em sobrecarga que passaram a ter um ESAL igual ao máximo legal.

Os valores resultantes do cálculo de ESAL, segundo o Método da Quarta Potência, apresentam o mesmo comportamento da análise das cargas efetuada no subcapítulo 3.1.1.

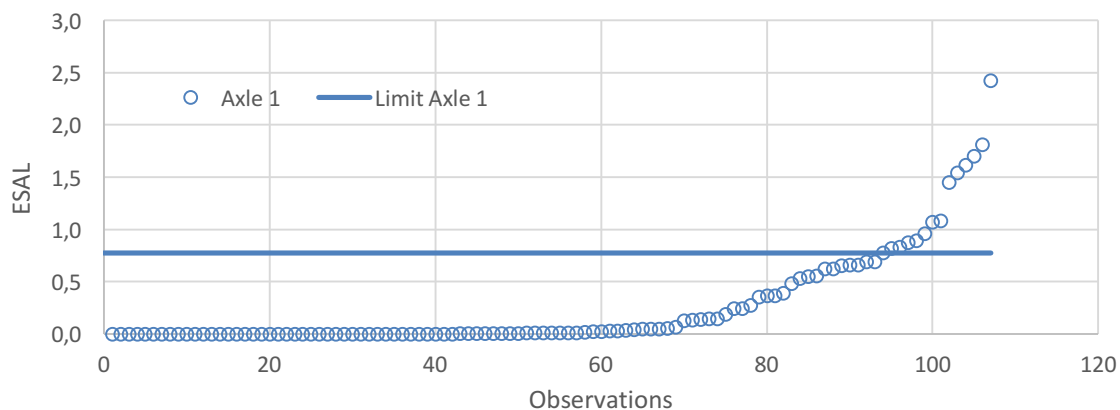


Figura 22 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F1

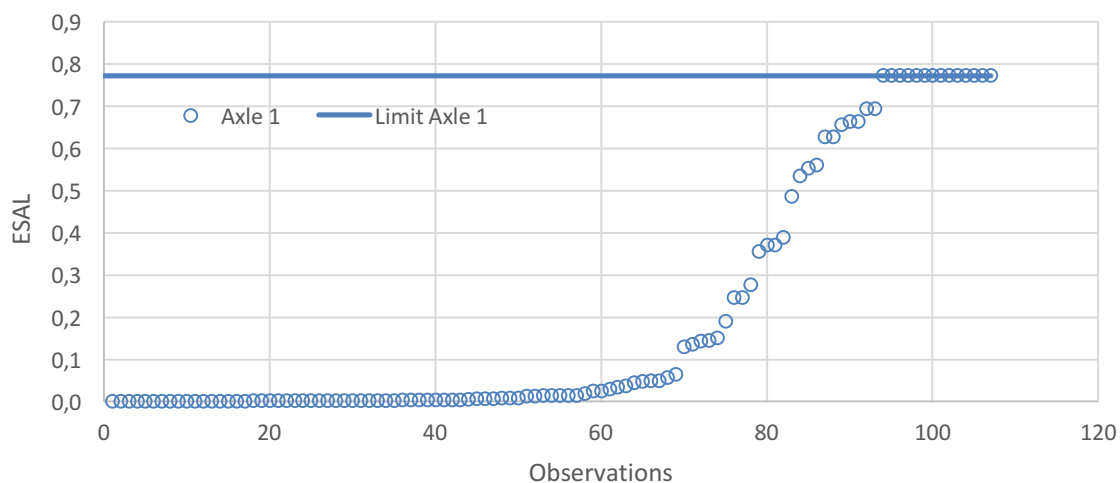


Figura 23 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F1

No que respeita ao eixo 2 dos veículos pesados da classe em análise verifica-se, através da Figura 24, que 88% apresentam uma agressividade de tráfego abaixo do valor estabelecido por lei, tal como para o caso das cargas, e que o ESAL correspondente de cada eixo é muito reduzido. Mais de metade dos eixos apresentam um ESAL praticamente nulo.

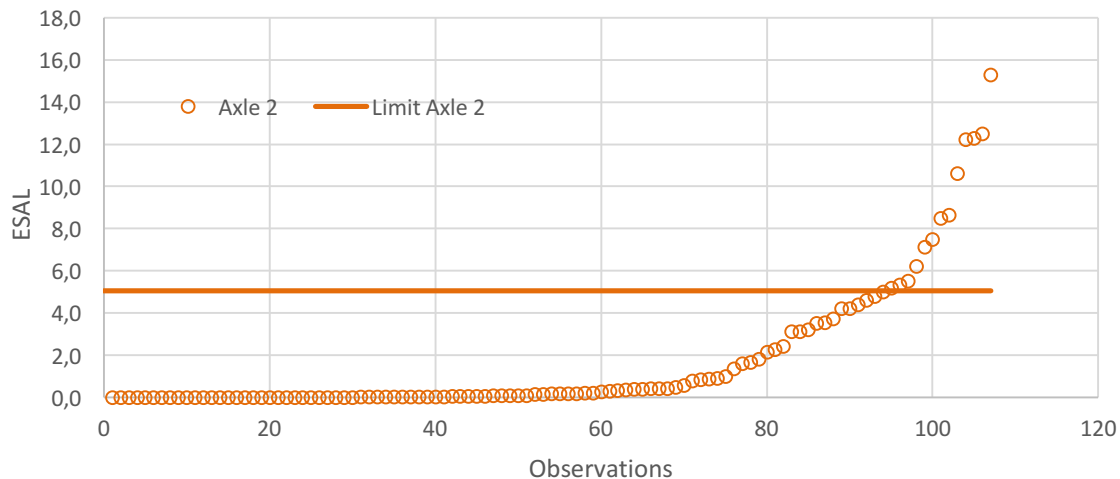


Figura 24 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe F1

Analisado o efeito da consideração das cargas observadas no eixo 1 e no eixo 2, importa agora caracterizar o conjunto do veículo. Neste sentido, e através da análise das Figuras 25 e 26 constata-se os ESAL dos veículos da classe F1 são muito reduzidos para os veículos legais enquanto que para os veículos em excesso de carga o ESAL aumenta de forma exponencial, mostrando o efeito nefasto das sobrecargas.

Considerando apenas os veículos com carga legal, mais de metade dos veículos desta classe apresentam um ESAL nulo.

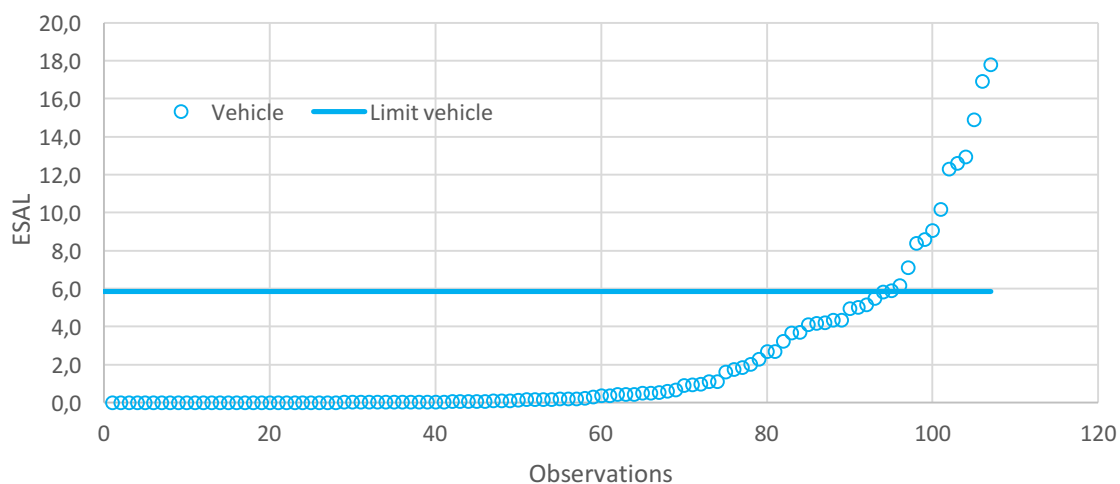


Figura 25 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1

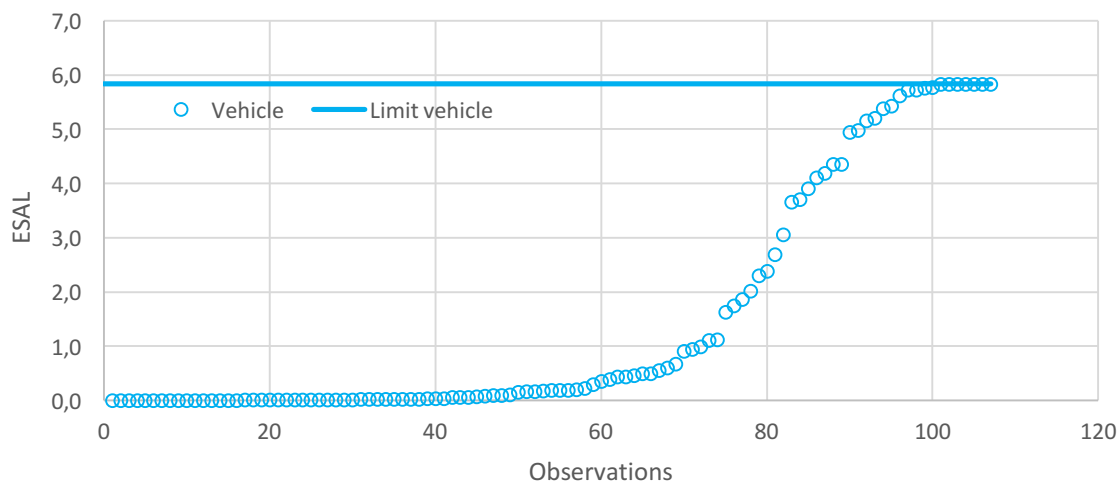


Figura 26 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1

Na Figura 27 está patente o efeito da consideração do acumulado do ESAL observado no cálculo da agressividade da classe F1. A variação do ESAL apresenta uma linha não uniforme, com duas inclinações distintas, indicando que uma parte dos veículos apresentavam um tipo de carregamento e outra parte outro. Isto pode acontecer, correspondendo a veículos carregados e a veículos sem carga.

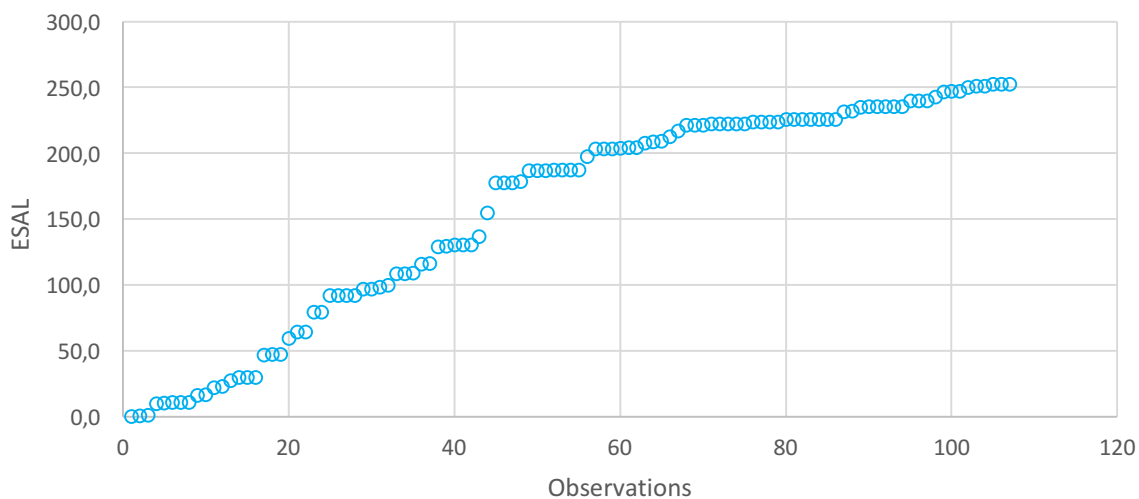


Figura 27 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1

4.1.2. Método Francês

A agressividade de tráfego da classe F1 determinada através do Método Francês é igual à calculada pelo Método da Quarta Potência. Tal facto relaciona-se com as características do

veículo, designadamente a configuração dos eixos, conforme consta na Figura 18 descrita no subcapítulo 3.2. Apesar do Método Francês considerar o efeito da configuração do eixo, o valor da constante k é igual à unidade para o eixo simples, fazendo que o Método Francês seja igual ao Método da Quarta Potência para os veículos da classe F1.

4.1.3. Método JPais

O cálculo do ESAL do eixo 1 dos veículos pesados da classe F1 recorrendo ao Método JPais encontram-se na Figura 28 verificando-se o que já se tinha concluído para o Método da Quarta Potência, ou seja, uma parte significativa dos veículos apresentam um ESAL nulo. Também se verifica um aumento exponencial para o caso dos eixos com excesso de carga. Conclusões idênticas são obtidas para o eixo 2, representado na Figura 29.

Apesar do Método JPais considerar o efeito da configuração do eixo e da roda, para o eixo 2, eixo simples e roda dupla, o valor da constantes k é igual à unidade, facto pelo qual o valor de ESAL, para o eixo 2, é igual segundo os três métodos.

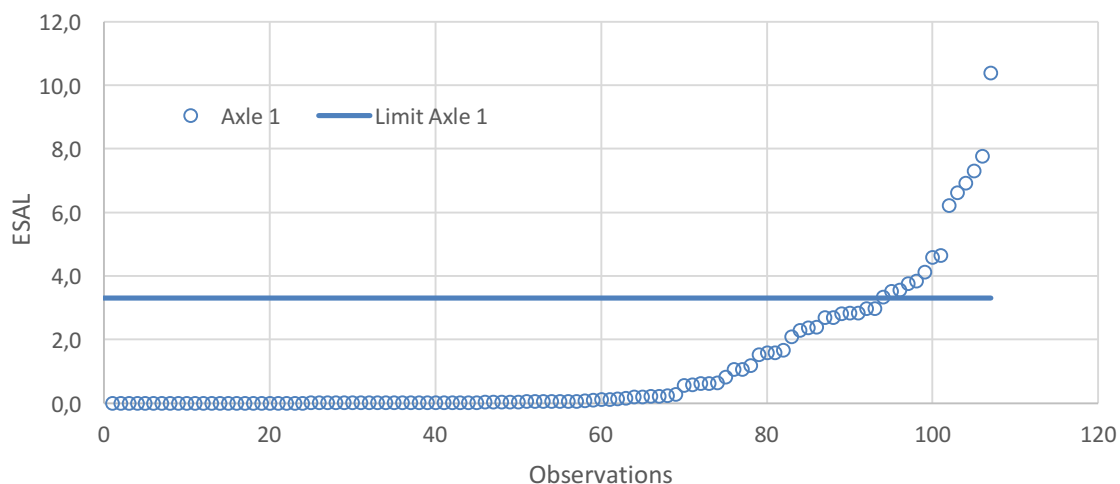


Figura 28 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F1

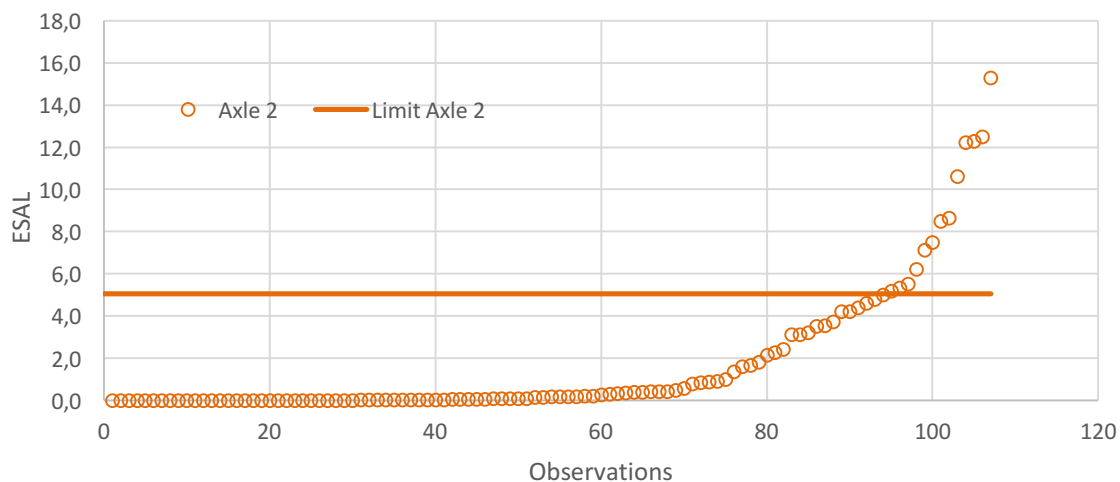


Figura 29 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe F1

Analisado o efeito da consideração das cargas observadas no eixo 1 e no eixo 2, importa agora caracterizar o conjunto do veículo. Neste sentido, e através da análise da Figura 30 constata-se as duas conclusões anteriores, nomeadamente que os veículos em excesso de carga apresentam ESAL com uma evolução exponencial e que aproximadamente metade dos veículos apresenta ESAL nulo.

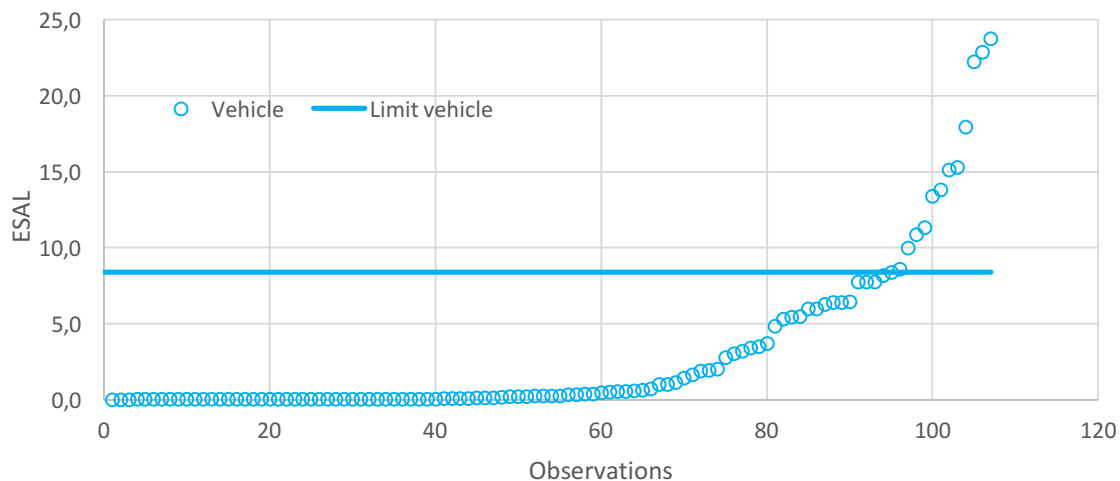


Figura 30 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1

Na Figura 31 está patente o efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do tráfego da classe F1, a variação de ESAL apresenta um comportamento de uma linha não uniforme, indicando dois tipos diferentes de carregamento.

Comparando aos resultados do efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do tráfego da classe F1 através das três metodologias, constata-se que o ESAL acumulado máximo é igual no Método da Quarta Potência e no Método Francês e 28% mais elevado no Método JPais.

O Método JPais considera a configuração do eixo e da roda, logo obtém valores de ESAL mais elevados, contudo representam o real dano provocado pelos veículos pesados seja qual for a sua classe.

4.1.4. Análise da comparação entre os métodos

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam a comparação da agressividade de tráfego calculado pelo Método da Quarta Potência, pelo Método Francês e pelo Método JPais.

No que respeita ao eixo 1 dos veículos da classe F1 observa-se na Figura 32 que o Método JPais apresenta valores de ESAL mais altos comparando com o Método Francês e o Método da Quarta Potência, correspondendo as metodologias mencionadas a 77% do Método JPais. Para eixos simples, o Método JPais apresenta valores superiores quando comparado com as restantes metodologias.

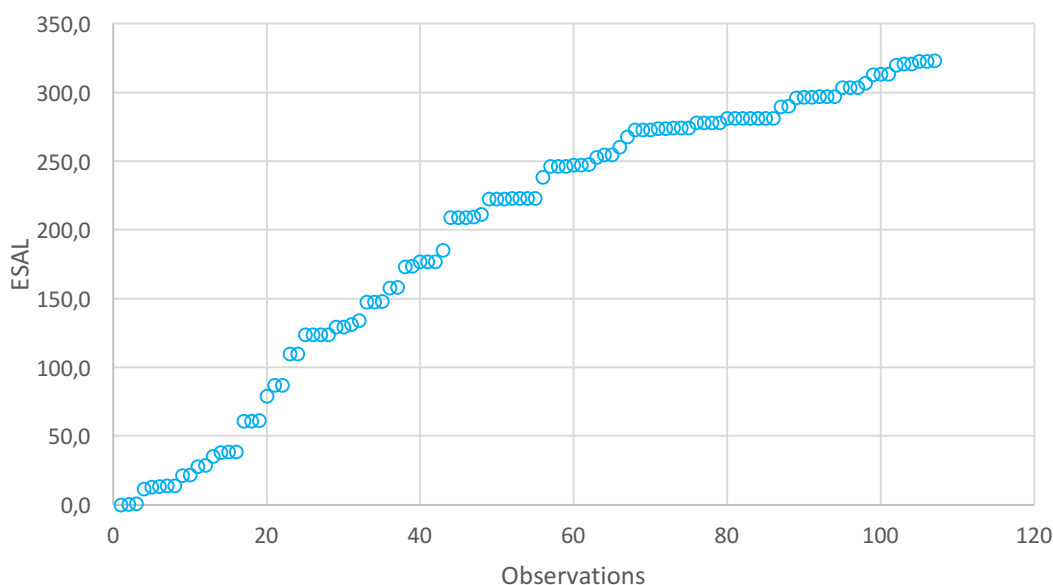


Figura 31 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F1

Na análise ressalva-se ainda a igualdade dos valores ESAL, segundo as três metodologias, para o eixo 2, conforme observado na Figura 33. Este facto relaciona-se com a configuração do eixo ser simples com roda dupla. No Método Francês, o coeficiente k para esta configuração é igual à unidade, assim como para o Método JPais.

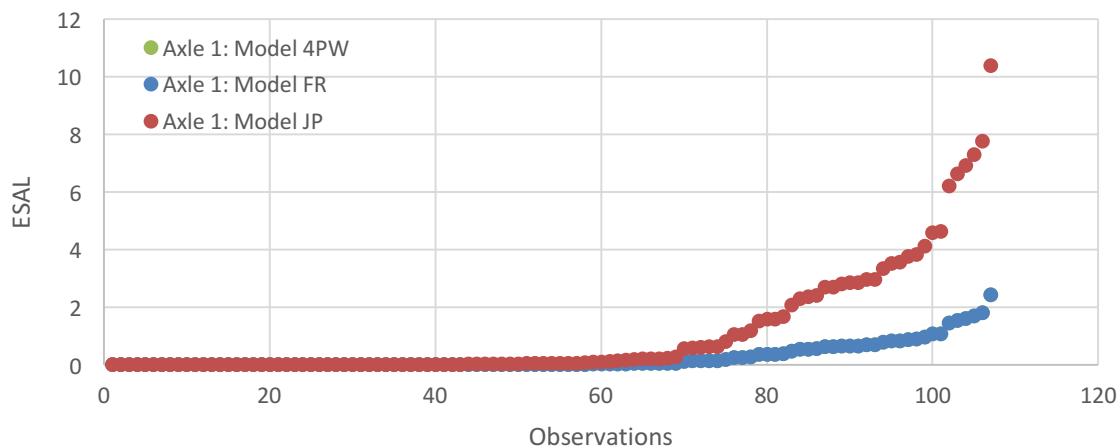


Figura 32 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe F1

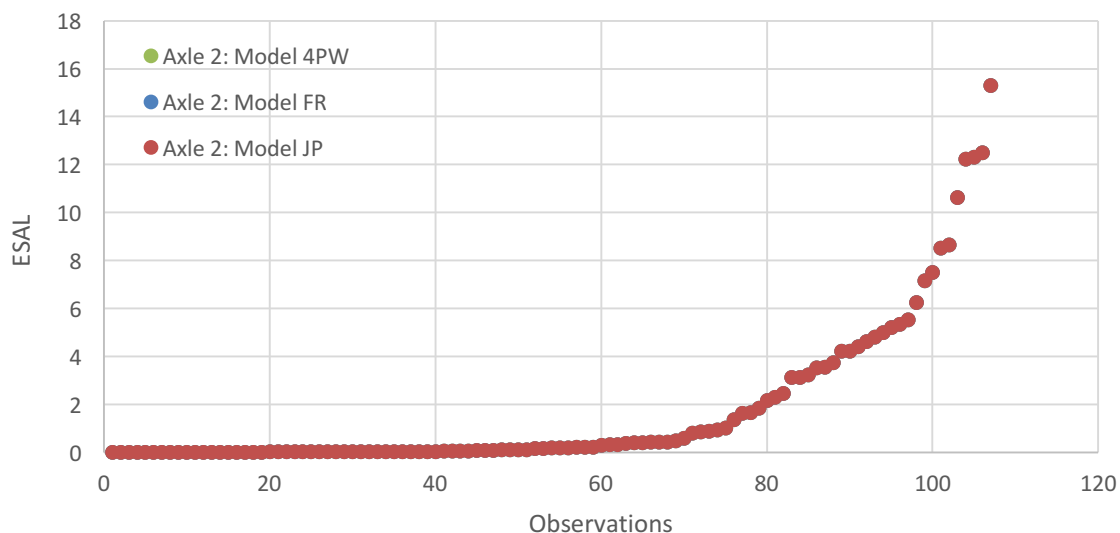


Figura 33 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe F1

A análise da Figura 34 revela que o ESAL obtido pelo Método JPais é 27% superior aos restantes métodos devido à influência do eixo 1 que é muito superior e ao nível do veículo não consegue diluir o seu valor.

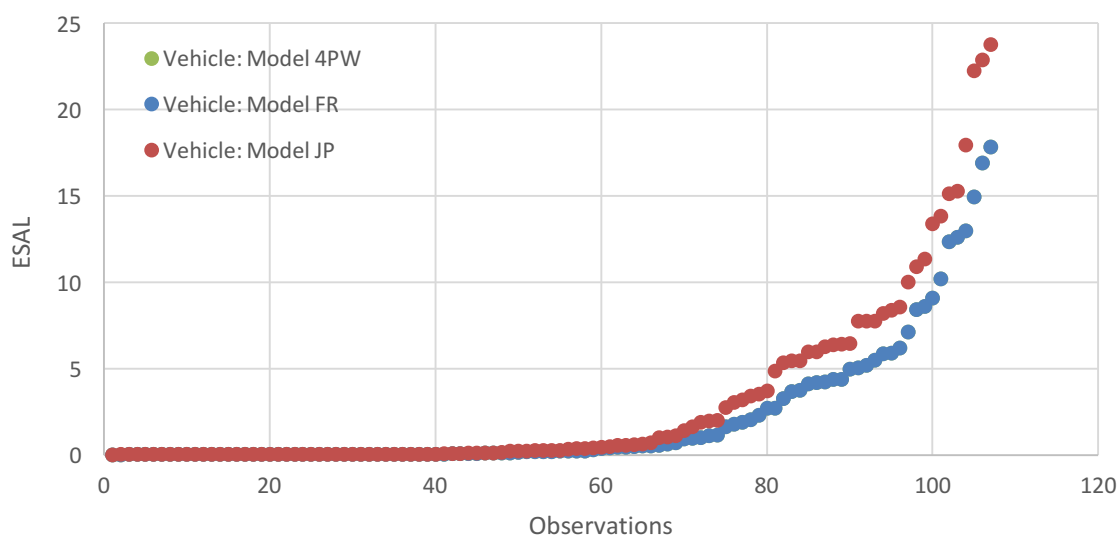


Figura 34 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe F1

4.1.5. Valores médios da agressividade

Através das Tabelas 26 e 27, o fator caminhão médio e máximo é igual segundo o Método da Quarta Potência e o Método Francês e superior para o Método JPais, considerando todos veículos, os veículos legais e os veículos sobrecarregados.

O método da 4.^a Potência e o Método Francês apresentam o mesmo fator caminhão médio e máximo, pois os veículos da classe F1 apresentam dois eixos simples. Para eixos simples, os métodos são iguais, pois a configuração da roda não é considerada.

No que respeita ao Método JPais verifica-se uma ligeira diferença, pois o Método considera o efeito da configuração da roda.

Tabela 26 – Fator Camião Médio para classe F1

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	2,036	2,036	2,787	1,492	1,492	2,057
Veículos legais	0,839	0,839	1,161	0,891	0,891	1,233
Veículos sobrecarregados	9,991	9,991	13,591	5,835	5,835	8,014

Tabela 27 – Fator Camião Máximo para classe F1

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	17,714	17,714	24,545	5,835	5,835	8,014
Veículos legais	5,491	5,491	7,447	5,768	5,768	7,946
Veículos sobrecarregados	17,714	17,714	24,545	5,835	5,835	8,014

4.2. Análise da Classe F2

Para a análise da agressividade dos eixos da Classe F2 e das seguintes apenas se apresentam os resultados obtidos no método JPais, não se apresentando também os resultados da agressividade dos eixos transformados em legais.

4.2.1. Método JPais

A análise da Figura 35 revela que 56% do eixo 1 dos veículos pesados da Classe F2 apresentam uma agressividade de tráfego acima do valor estabelecido por lei, não havendo, neste caso, eixos com agressividade nula como se verificava na Classe F1. Isto acontece porque as cargas nesta classe de veículos são mais elevadas que na Classe F1, onde há

muitos veículos, que apesar de serem considerados pesados, em termos de carga quase se assemelham a veículos ligeiros.

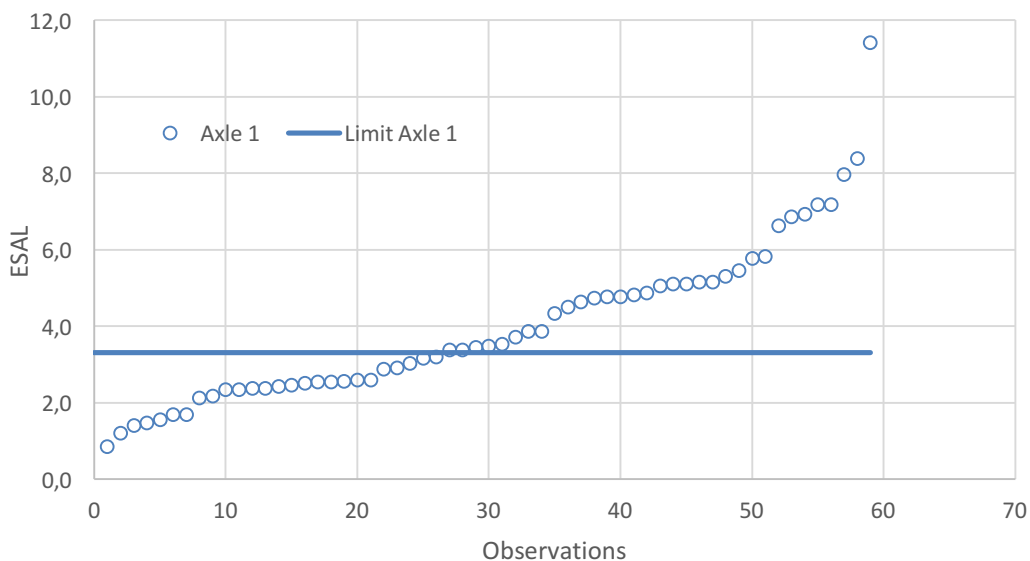


Figura 35 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe F2

No que respeita ao eixo 2 dos veículos pesados da Classe F2 verifica-se, através da Figura 36, o aumento dos veículos que apresentam uma agressividade de tráfego acima do valor estabelecido por lei, mais precisamente 61%, chegando a agressividade destes eixos a atingir seis vezes o máximo legal.

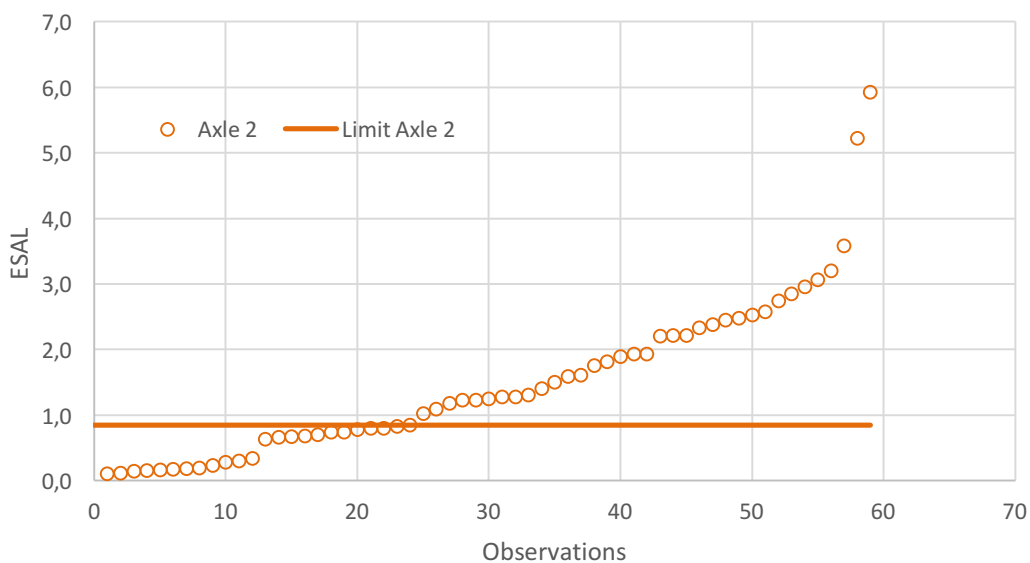


Figura 36 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe F2

Por sua vez, para o eixo 3 dos veículos pesados da Classe F2 verifica-se, através da Figura 37, que 54% apresentam uma agressividade de tráfego acima do valor estabelecido por lei. As conclusões relativas ao eixo 2 são válidas para o eixo 3, como seria de esperar, uma vez que estes dois eixos fazem parte de um eixo duplo.

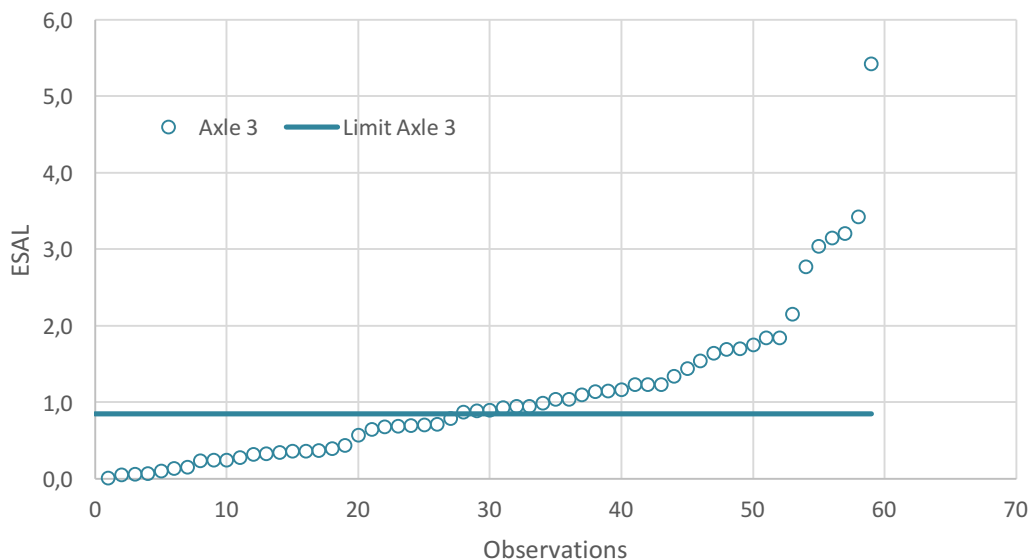


Figura 37 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 3 da Classe F2

Para os veículos pesados da Classe F2 e pela observação da Figura 38 conclui-se que a maioria dos veículos provoca maior dano no pavimento, precisamente 64%, pois os valores ESAL são acima do valor permitido por lei, podendo atingir três vezes mais que o valor máximo legal.

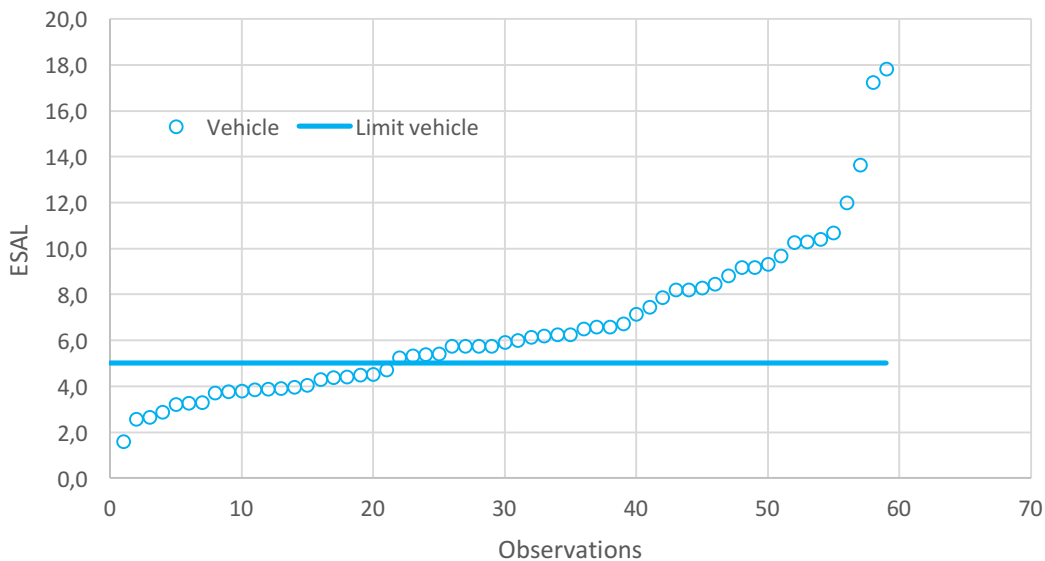


Figura 38 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F2

O ESAL acumulado para os veículos observados na Classe F2 calculado, usando o Método JPais, é expresso na Figura 39. A inclinação da linha representa o fator caminhão da Classe F2 e pode ser usado para caracterizar o tráfego observado numa estação de pesagem e o dimensionamento do pavimento.

Pode ser observado que a Classe F2 apresenta um crescimento uniforme e constante, assumindo o ESAL acumulado uma linha reta o que significa que os veículos circulam tendencialmente todos com a mesma carga, não havendo veículos a circular sem carga e poucos veículos com carga extremamente elevadas.

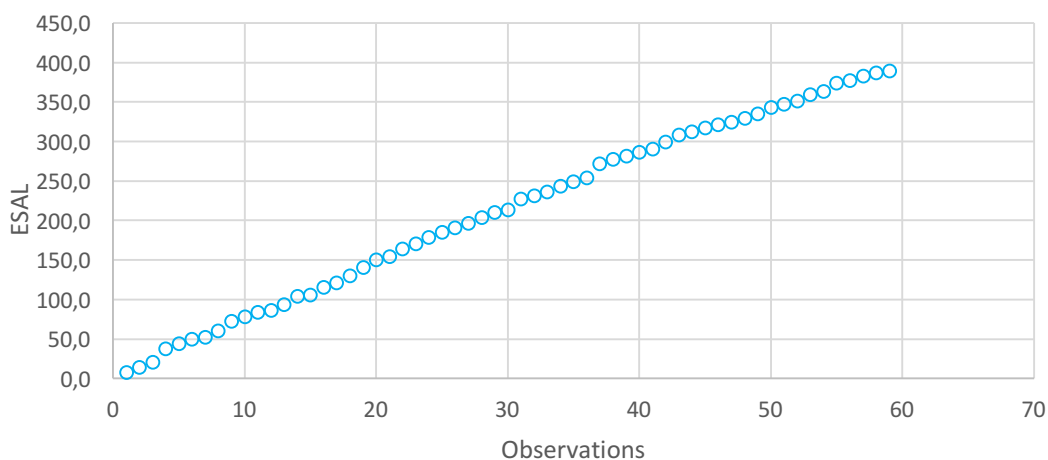


Figura 39 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe F2

4.2.2. Análise da Comparação entre os Métodos

As Figuras 40 a 43 caracterizam a agressividade do tráfego calculada pelas três metodologias adotadas neste estudo.

Para o caso do eixo 1, visualiza-se na Figura 40 uma igualdade entre o Métodos da Quarta Potência e o Método Francês, contudo o Método JPais apresenta valores mais altos, realidade justificada pela presença de um eixo simples com grande influência.

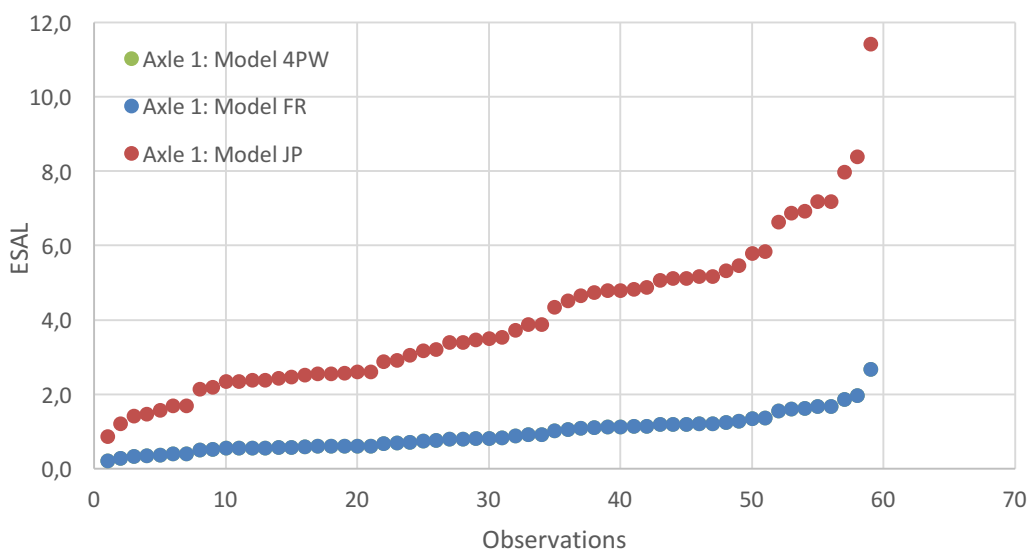


Figura 40 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe F2

O eixo 2 da Classe de F2, de acordo com o Método da Quarta Potência apresenta valores de ESAL mais elevados em comparação com o Método Francês e o Método JPais (Figura 41).

O Método Francês corresponde a 75% do Método da Quarta Potência. Por sua vez, o Método JPais apresenta valores mais baixos devido ao facto do eixo ser roda dupla. A carga é dividida pelas duas rodas, o que faz com o seu efeito do dano no pavimento seja reduzido e o ESAL apresentado pelo Método JPais é menor (Figura 41).

Os efeitos observados no eixo 2 mantêm-se no eixo 3, conforme consta na Figura 42.

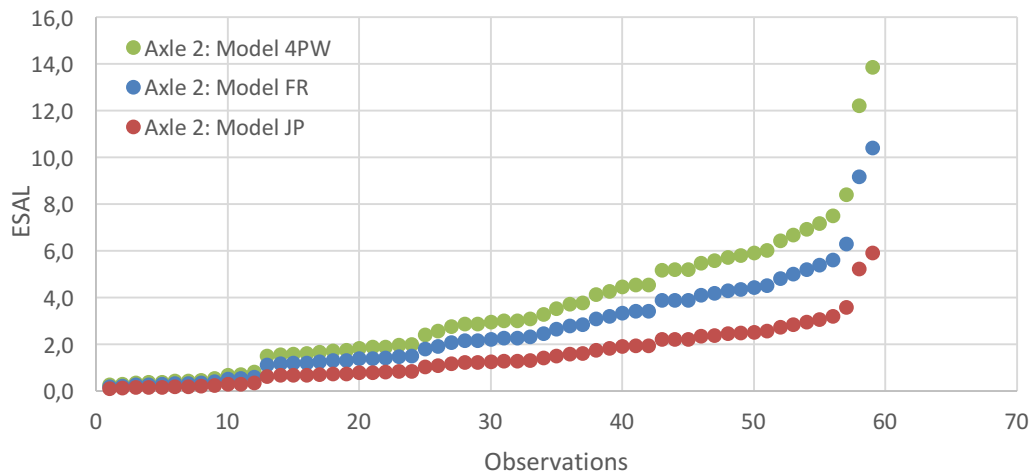


Figura 41 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe F2

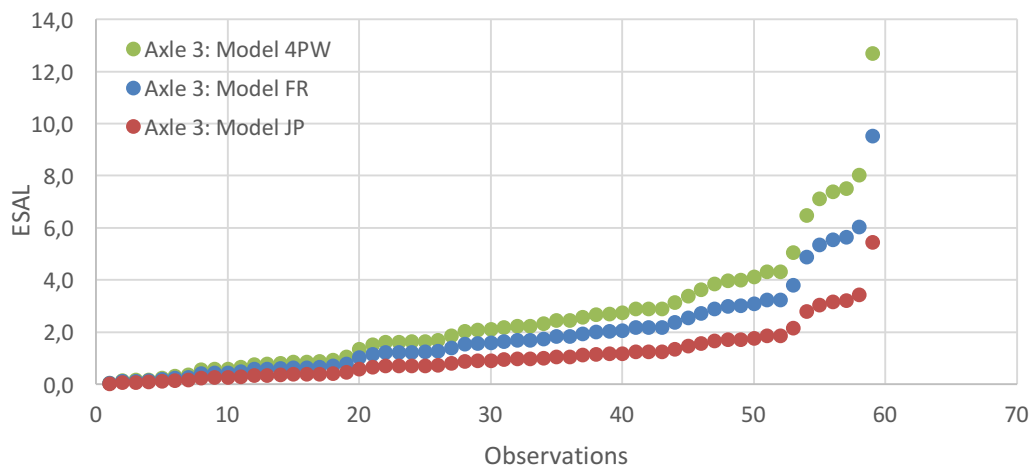


Figura 42 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da Classe F2

A Figura 43 caracteriza a agressividade de tráfego dos veículos da Classe F2. Os valores ESAL são próximos segundo as três metodologias. A análise revela que nas primeiras 30 observações, o Método JPais é ligeiramente superior devido à influência do eixo 1, enquanto nas restantes observações o Método da Quarta Potência é superior devido à presença de um eixo duplo (eixo 2 + eixo 3) com roda dupla, onde é verificada a distribuição das cargas.

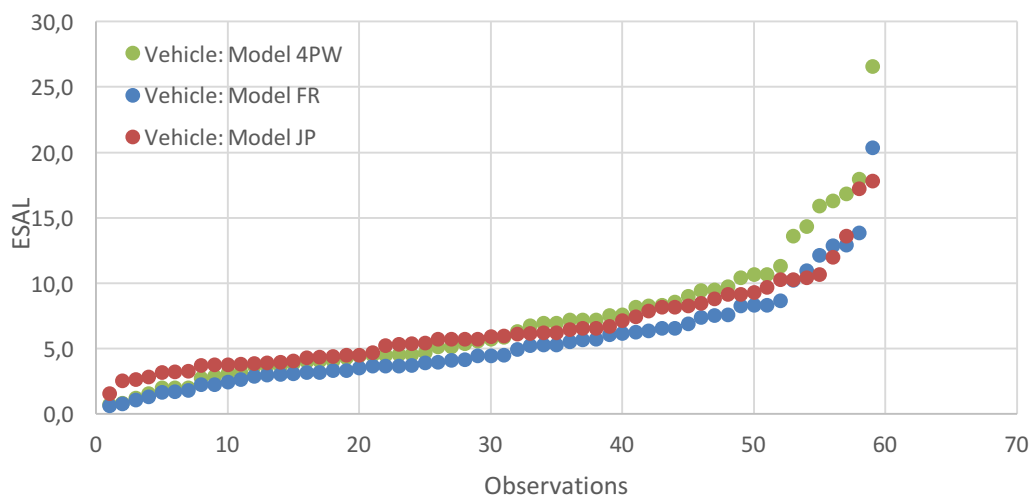


Figura 43 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe F2

4.2.3. Valores médios da agressividade

As Tabelas 28 e 29 mostram que o fator caminhão médio e máximo é próximo entre os três métodos e superior para o Método Quarta Potência, considerando todos veículos, os veículos com carga legal e os veículos sobrecarregados.

Tabela 28 – Fator Camião Médio

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	7,016	5,495	5,728	3,768	2,992	3,764
Veículos legais	2,289	1,842	2,704	2,604	2,088	2,704
Veículos sobrecarregados	10,036	7,829	7,661	4,750	3,755	4,464

Tabela 29 – Fator Camião Máximo

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	29,231	22,589	19,656	4,750	3,755	4,464
Veículos legais	4,235	3,346	3,893	4,603	3,645	4,302
Veículos sobrecarregados	29,231	22,589	19,656	4,750	3,755	4,464

4.3. Análise da Classe H3

4.3.1. Método JPais

A análise realizada através do Método JPais à Classe H3 permitiu concluir que 83% do eixo 1 dos veículos pesados da Classe H3 apresentam uma agressividade de tráfego abaixo do valor estabelecido por lei (Figura 44) sendo que a agressividade dos eixos em excesso de carga apenas duplica o máximo legal.

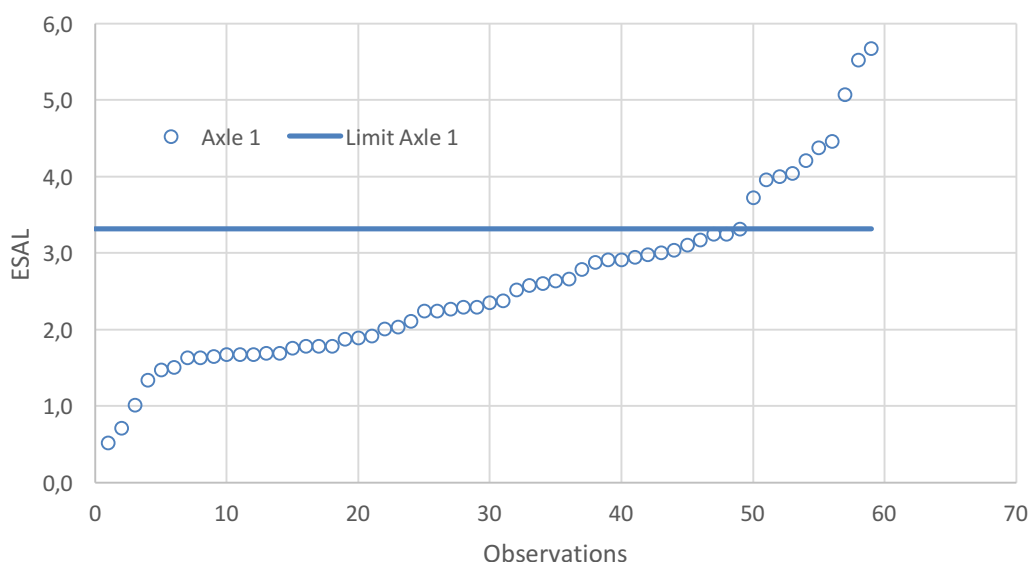


Figura 44 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe H3

No que respeita ao eixo 2 dos veículos pesados da Classe H3 verifica-se, através da Figura 45, o aumento dos veículos que apresentam uma agressividade de tráfego abaixo do valor estabelecido por lei, mais precisamente 75%, sendo que aí os eixos em excesso de carga apresentam agressividades que podem ser quatro vezes superiores ao máximo legal. Apesar de haver 25% dos eixos em excesso de carga, apenas metade destes apresenta agressividades consideravelmente elevadas.

Também importa aqui realçar que há cerca de metade dos eixos com agressividade quase nula, pelo que o efeito das sobrecargas, comparativamente ao máximo legal é muito reduzido.

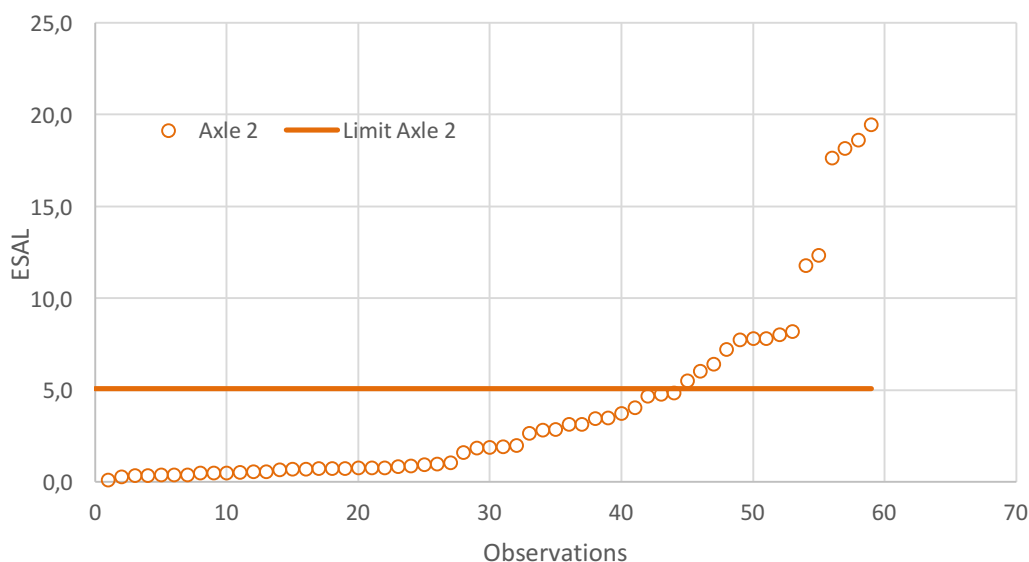


Figura 45 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe H3

Cenário oposto ao caracterizado para os eixos 1 e 2, apresentam o eixo 3 e 4, respetivamente nas Figuras 46 e 47. Trata-se de eixos que apresentam valores para o fator camião muito elevados devido ao facto de que o eixo traseiro é composto por rodas simples que produzem maior dano no pavimento e, portanto, aumenta o valor da agressividade.

Para o eixo 3 dos veículos pesados da classe H3 verifica-se, através da Figura 46, que apenas 32% apresentam uma agressividade de tráfego abaixo do valor estabelecido por lei, sendo que a agressividade chega a atingir quase dez vezes o máximo legal.

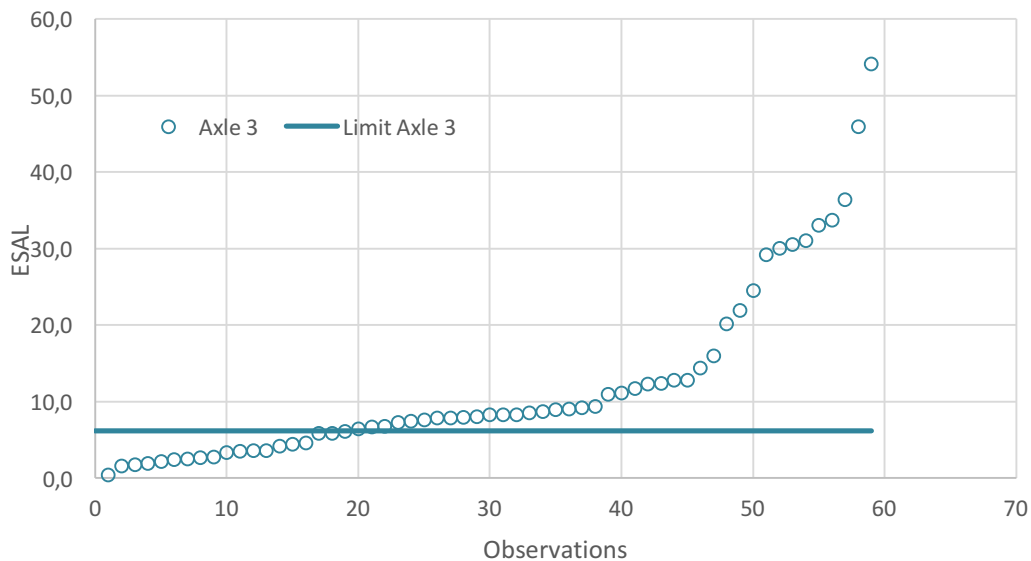


Figura 46 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 3 da Classe H3

No eixo 4 dos veículos pesados da classe em análise verifica-se, através da Figura 47, que 41% apresentam uma agressividade de tráfego abaixo do valor estabelecido por lei, sendo que os restantes apresentam agressividades extremamente elevadas como verificado para o eixo 3.

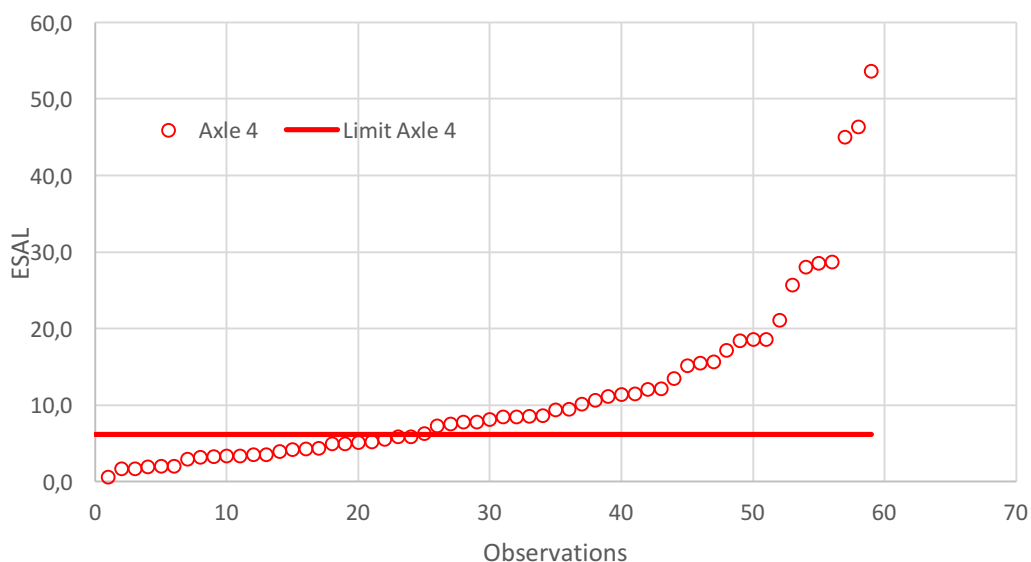


Figura 47 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 4 da Classe H3

Analisado o efeito da consideração das cargas observadas no eixo 1 a 4, importa agora caracterizar o conjunto do veículo. Neste sentido, e através da análise da Figura 48 constata-se que 61% dos veículos pesados apresentam uma agressividade de tráfego acima do valor estabelecido por lei e um reduzido de número de eixos circula no limite do máximo legal. Ao contrário do que acontecia com, por exemplo, a classe F1, aqui não se verificam veículos pesados em que a agressividade seja praticamente nula.

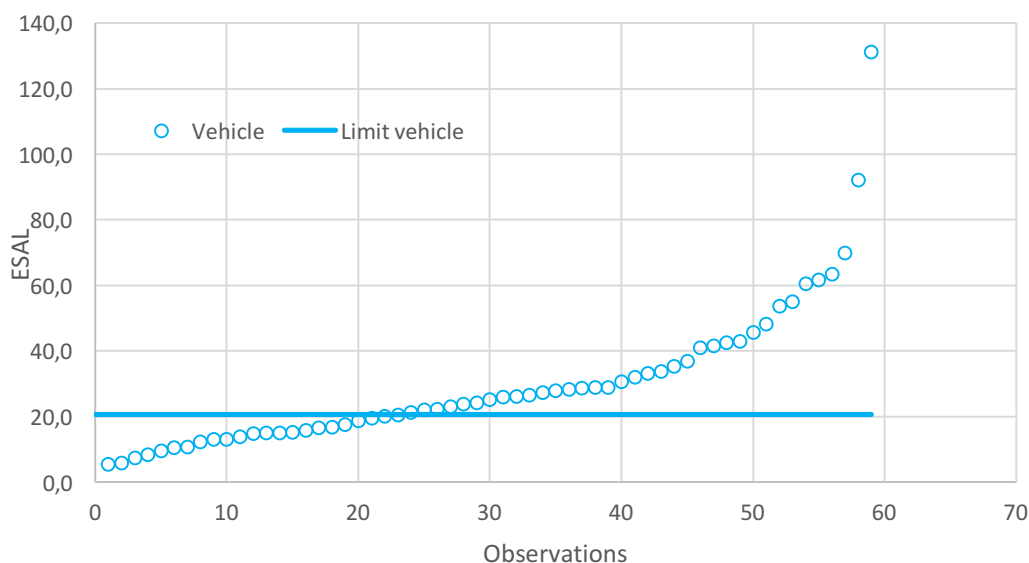


Figura 48 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H3

Na Figura 49 está patente o efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo da agressividade da Classe H3. A variação do ESAL apresenta uma linha não uniforme representativa de diferentes tipos de carregamento nos veículos desta classe. O fator camião é maior nesta classe, devido ao facto que os eixos traseiros são constituídos por rodas simples que produzem maior dano no pavimento e assim o valor ESAL aumenta.

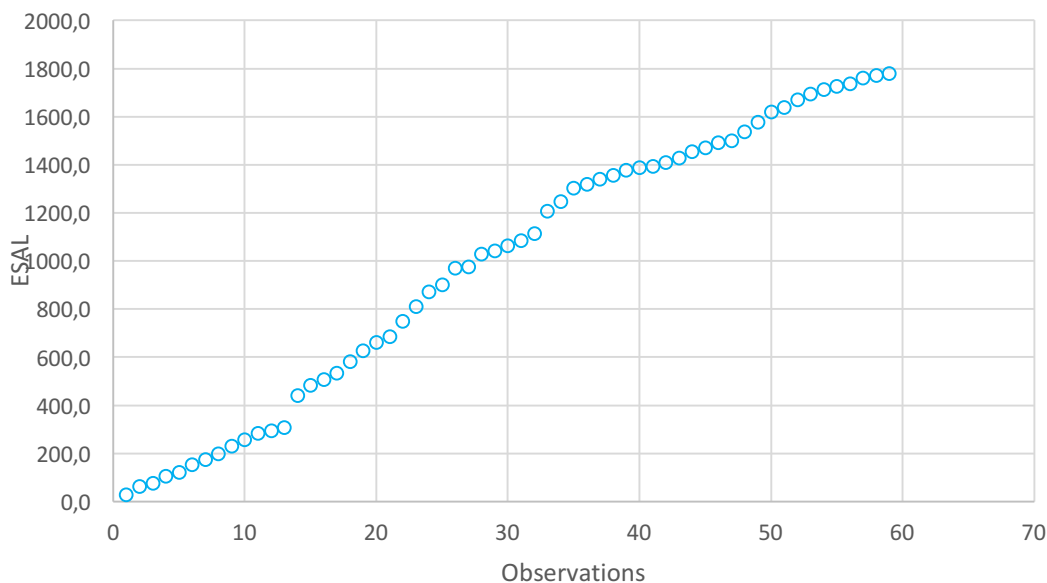


Figura 49 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H3

4.3.2. Análise da Comparação entre os Métodos

As Figuras 50 a 54 apresentam a comparação da agressividade de tráfego calculado pelo Método da Quarta Potência, pelo Método Francês e pelo Método JPais.

No que respeita ao eixo 1 dos veículos da Classe H3 observa-se na Figura 50 que o Método JPais apresenta valores de ESAL mais altos comparando com o Método Francês e o Método da Quarta Potência.

O Método da Quarta Potência e o Método Francês corresponde a 23% do Método JPais. Para eixos simples, o Método JPais apresenta valores superiores quando comparado com as restantes metodologias.

Na análise salienta-se ainda a igualdade dos valores ESAL, segundo as três metodologias, para o eixo 2, conforme observado na Figura 51. Este facto relaciona-se com a configuração do eixo ser simples com roda dupla. No Método Francês, o coeficiente k para esta configuração é igual à unidade, assim como para o Método JPais.

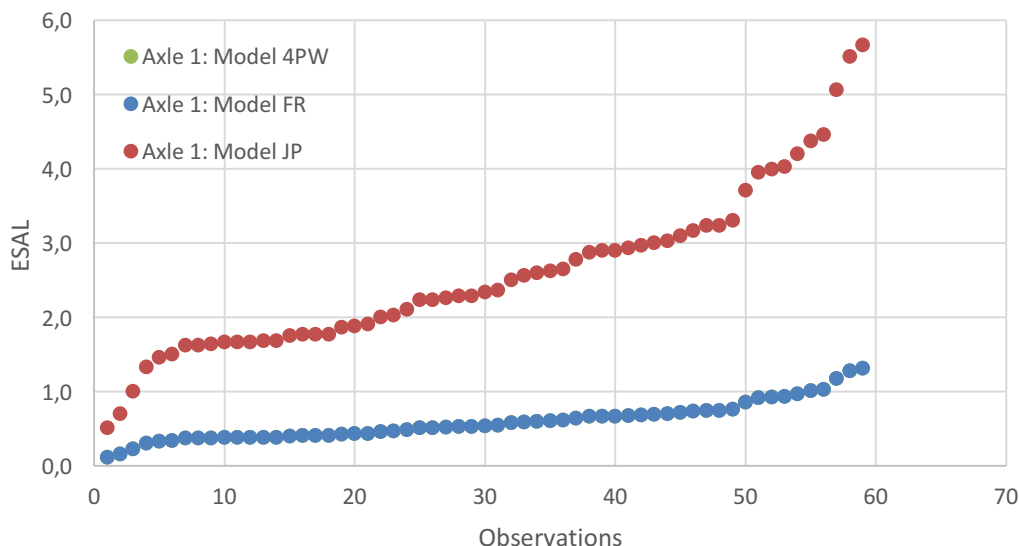


Figura 50 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe H3

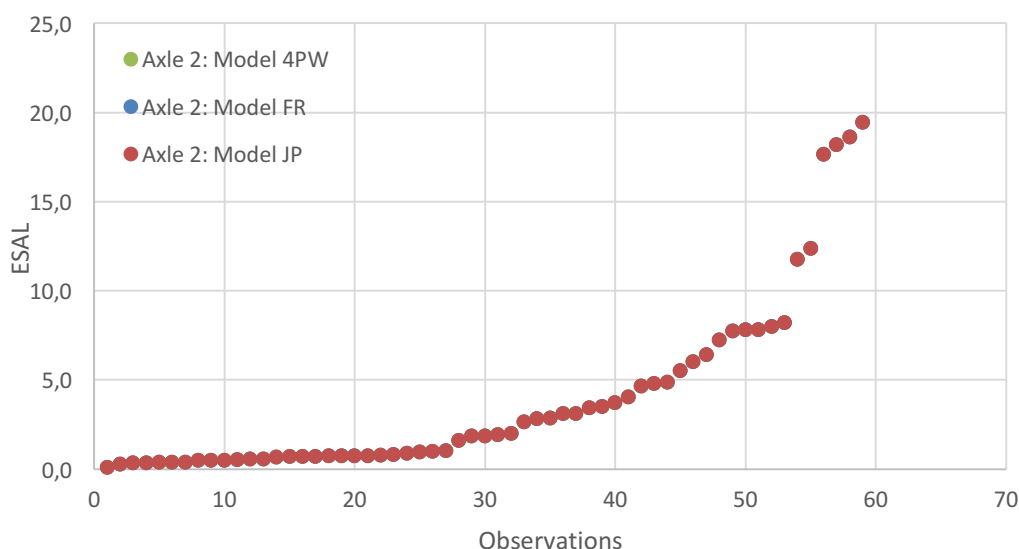


Figura 51 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe H3

A observação das Figuras 52 e 53 mostra que o ESAL obtido pelo Método da Quarta Potência é ligeiramente superior comparando com o Método Francês que evidencia a influência da configuração do eixo. O ESAL calculado segundo o Método JPais é muito superior devido à influência do eixo traseiro ser composto por roda simples.

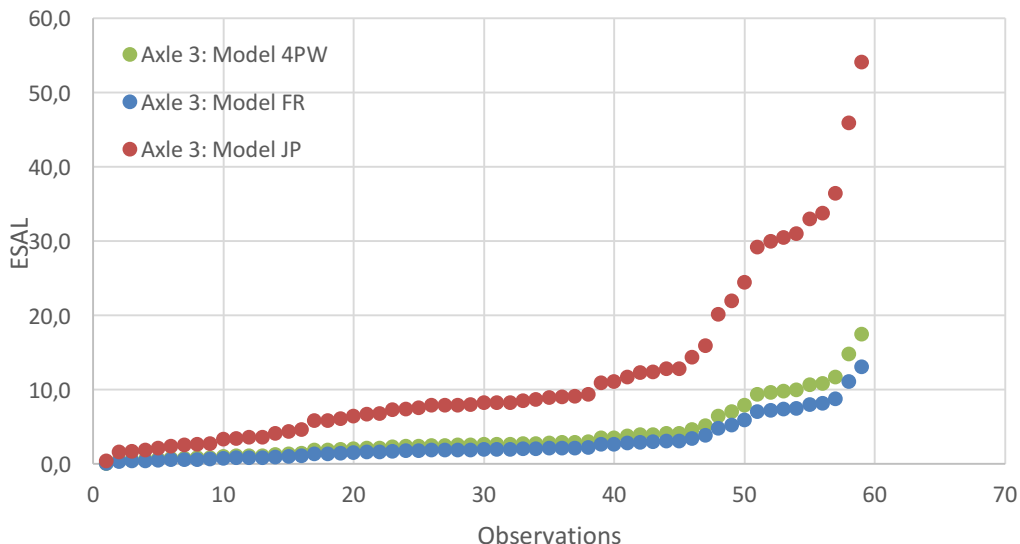


Figura 52 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da Classe H3

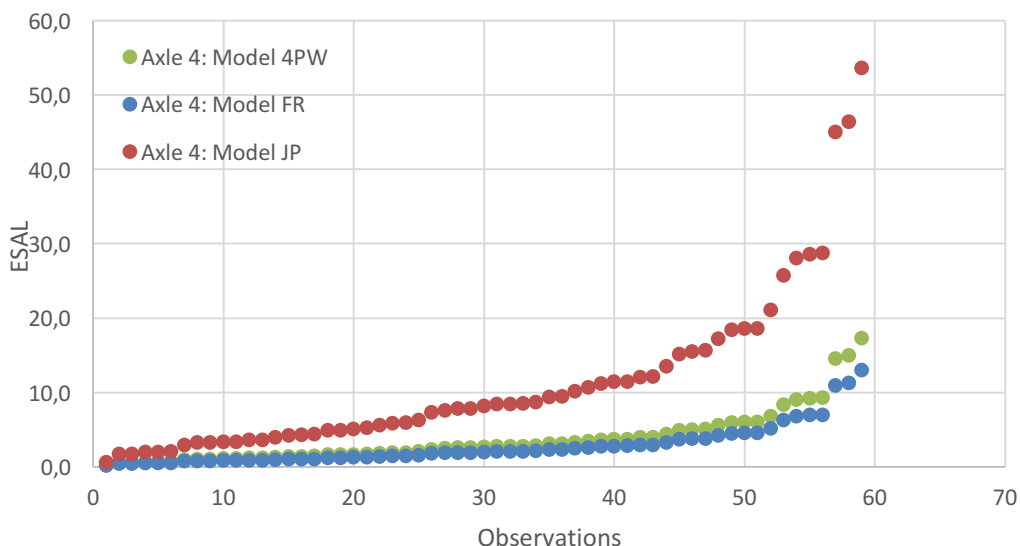


Figura 53 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da Classe H3

A análise da Figura 54 revela que o ESAL obtido pelo Método JPais é superior em 65% e 58% ao Método Francês e ao Método da Quarta Potência, respetivamente. Estes resultados justificam-se pela influência dos elevados valores dos eixos simples 1 e 2, que ao nível do veículo não consegue diluir os seus valores.

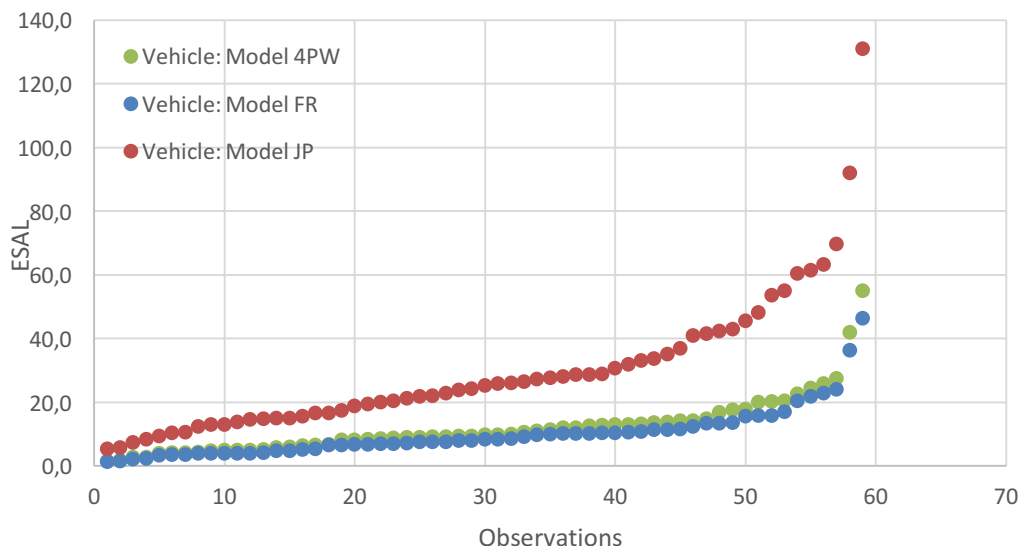


Figura 54 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe H3

4.3.3. Valores médios da agressividade

A análise das Tabelas 30 e 31 revela que o fator caminhão médio e máximo é superior no Método da Quarta Potência e Método Francês comparativamente ao Método JPais, considerando todos veículos, os veículos legais e os veículos sobrecarregados.

Tabela 30 – Fator Camião Médio

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	12,187	10,276	6,241	6,378	5,539	5,894
Veículos legais	3,354	2,748	1,891	5,591	4,788	5,061
Veículos sobrecarregados	17,831	15,086	8,472	9,812	8,818	9,527

Tabela 31 – Fator Camião Máximo

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	55,579	46,877	24,503	9,812	8,818	9,527
Veículos legais	5,561	4,497	2,442	9,796	8,801	9,464
Veículos sobrecarregados	55,579	46,877	24,503	9,812	8,818	9,527

4.4. Análise da Classe H5

4.4.1. Método JPais

A análise realizada através do Método JPais revela que 85% do eixo 1 dos veículos pesados da Classe H5 (Figura 55) apresentam uma agressividade de tráfego abaixo do valor estabelecido por lei, sendo que não se verifica a existência de veículos com agressividade nula nem veículos com agressividade extremamente elevada, à exceção de dois casos.

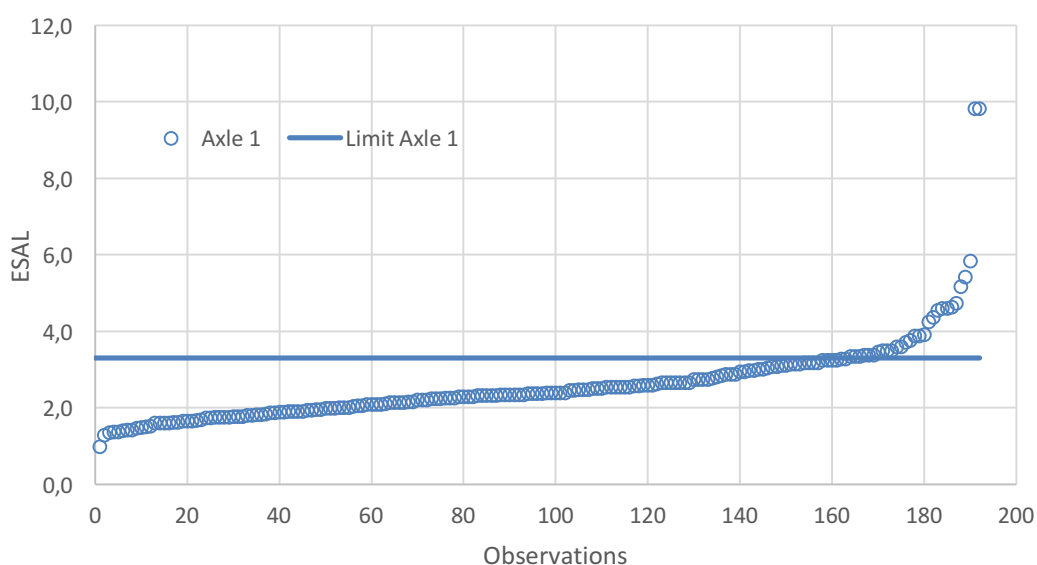


Figura 55 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 1 da Classe H5

No que respeita ao eixo 2 dos veículos pesados da classe em análise verifica-se, através da Figura 56, que 58% apresentam uma agressividade de tráfego abaixo do valor estabelecido por lei, sendo visível também para este eixo os dois casos de agressividade elevada. No entanto, o valor máximo, retirando esses casos não excede três vezes o valor máximo legal.

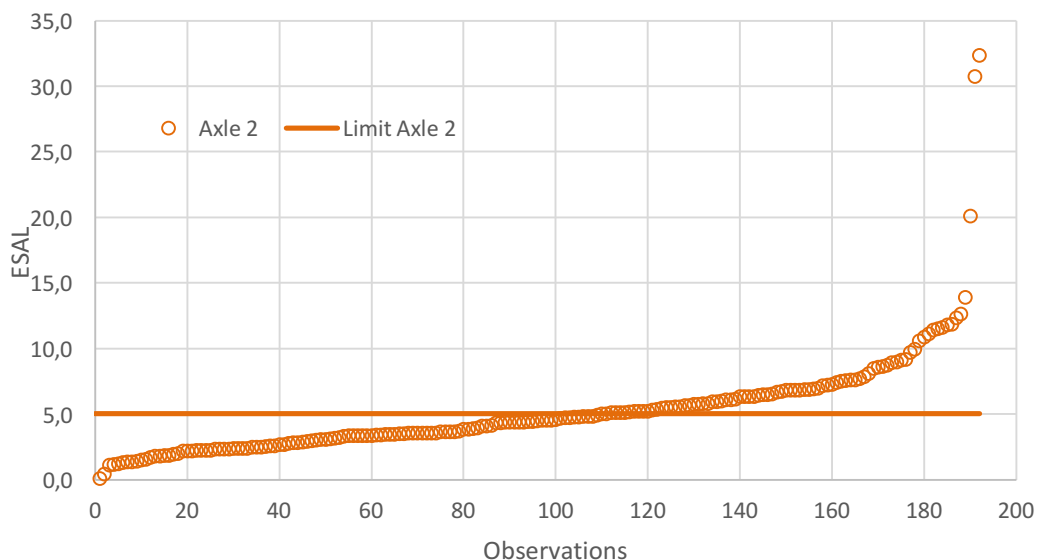


Figura 56 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 2 da Classe H5

No que respeita aos eixos 3, 4 e 5 dos veículos pesados da Classe H5 verifica-se, através das Figuras 57, 58 e 59, que apenas 35%, 33% e 33%, respetivamente, apresentam uma agressividade de tráfego acima do valor permitido por lei, continuando a haver alguns eixos com valores extremamente elevados da agressividade, principalmente no eixo 4. Além disto também se pode concluir que a evolução da agressividade para estes eixos é muito suave, sendo reflexo de uma reduzida variação no valor das cargas.

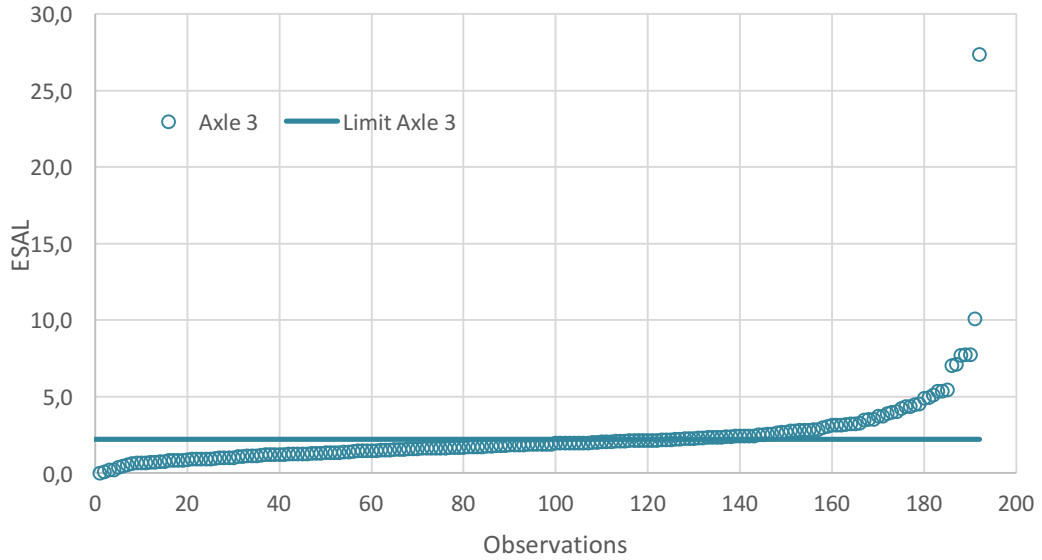


Figura 57 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 3 da Classe H5

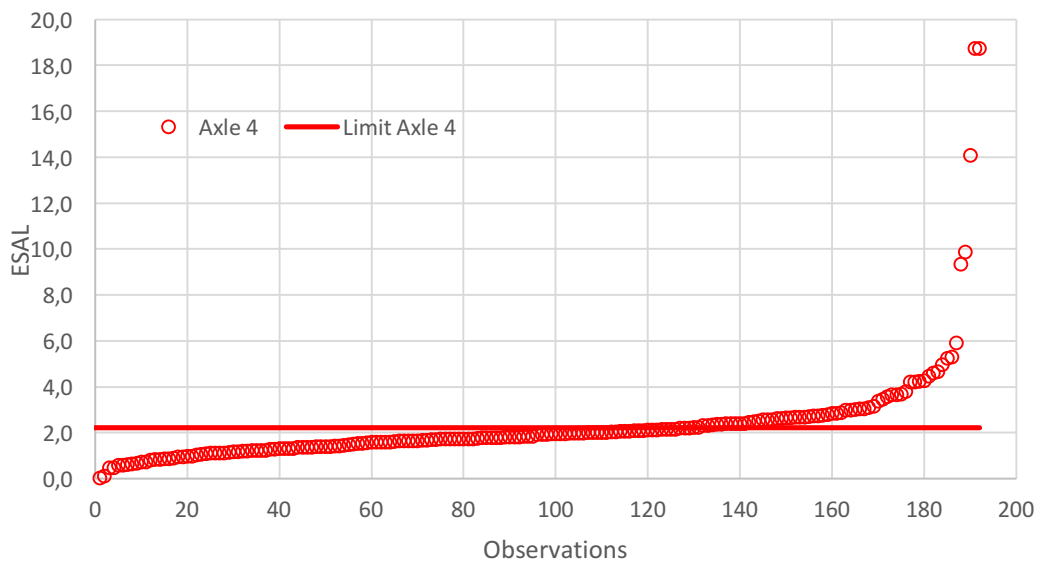


Figura 58 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 4 da Classe H5

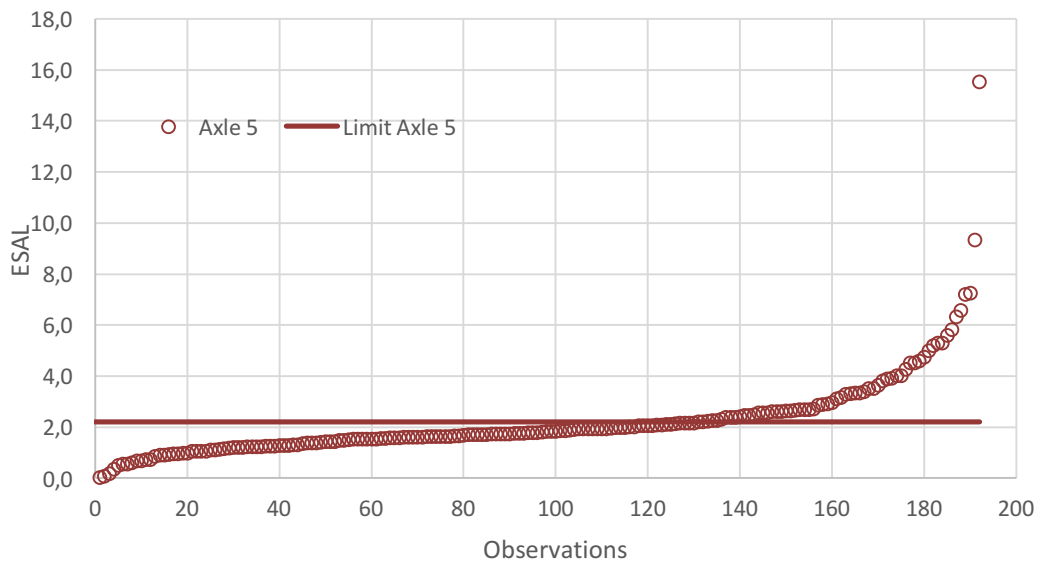


Figura 59 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL no eixo 5 da Classe H5

Analisado o efeito da consideração das cargas observadas nos cinco eixos, importa agora caracterizar o conjunto do veículo. Neste sentido, e através da análise das Figuras 60 e 61 constata-se que 34% dos veículos pesados apresentam uma agressividade de tráfego acima do valor permitido por lei, e retirando os últimos cinco casos em que a agressividade é claramente elevada, verifica-se uma evolução muito regular sendo que o valor máximo apenas é o dobro do máximo legal.

No entanto, os casos com agressividade extremamente elevada chegam a ser mais de cinco vezes o máximo legal.

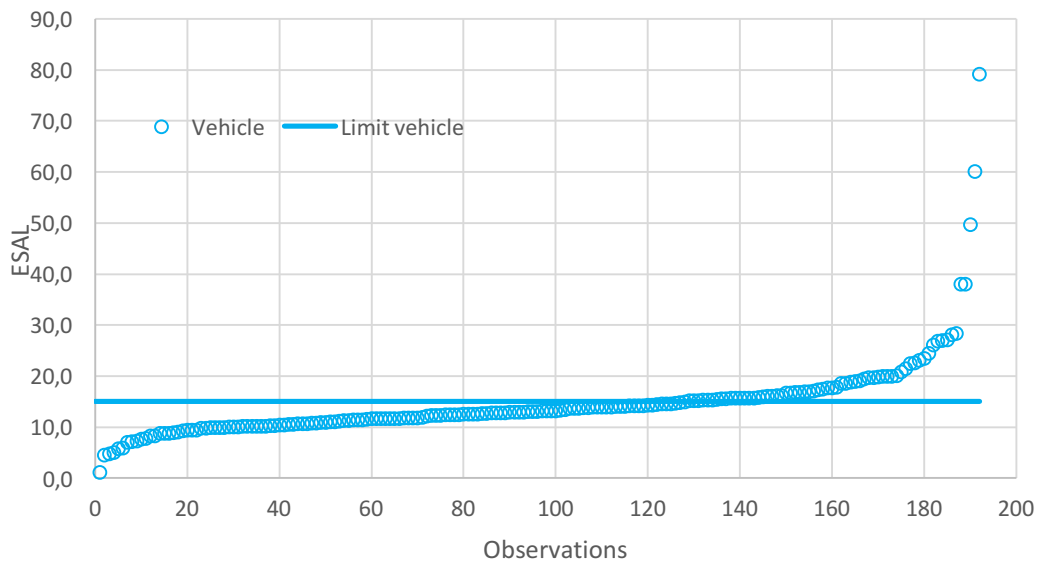


Figura 60 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H5

Na Figura 61 está patente o efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do tráfego da Classe H5, a variação de ESAL apresenta um comportamento linear, sendo que as únicas distorções da reta correspondem aos veículos com agressividade extremamente elevada.

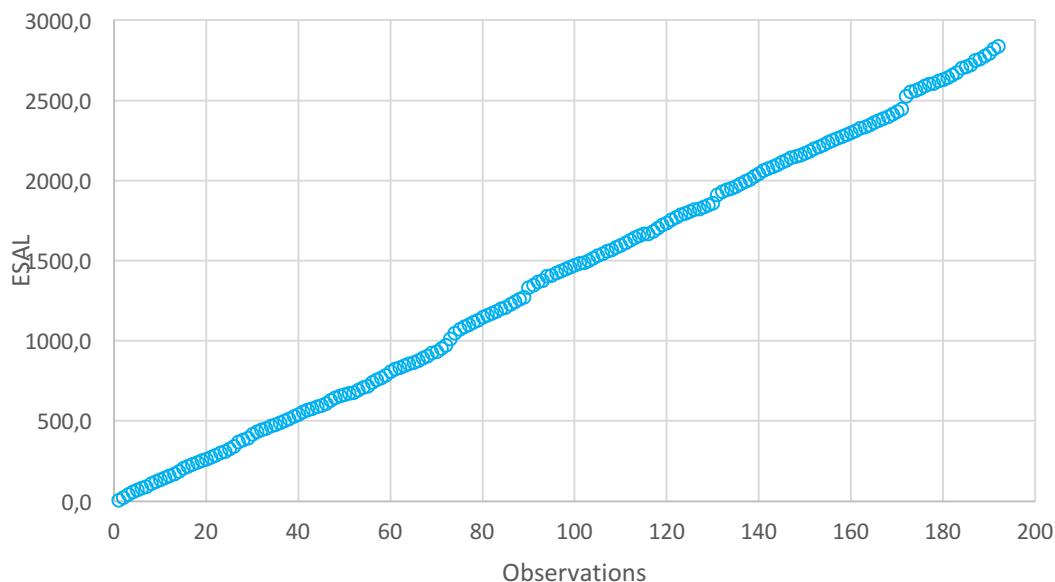


Figura 61 – Efeito da consideração do acumulado das cargas observadas no cálculo do ESAL da Classe H5

4.4.2. Análise da Comparação entre os Métodos

As Figuras 62 a 67 comparam a agressividade de tráfego calculado pelo Método da Quarta Potência, pelo Método Francês e pelo Método JPais.

No que respeita ao eixo 1 dos veículos da Classe H5 observa-se na Figura 62 que o Método JPais apresenta valores de ESAL mais altos comparando com o Método Francês e o Método da Quarta Potência.

O Método da Quarta Potência e o Método Francês, com valores iguais, correspondem a 23% do Método JPais. Para eixos simples, o Método JPais apresenta valores superiores quando comparado com as restantes metodologias.

Na análise ressalva-se ainda a igualdade dos valores ESAL, segundo as três metodologias, para o eixo 2, conforme observado na Figura 63. Este facto relaciona-se com a configuração do eixo ser simples com roda dupla. No Método Francês, o coeficiente k para esta configuração é igual à unidade, assim como para o Método JPais.

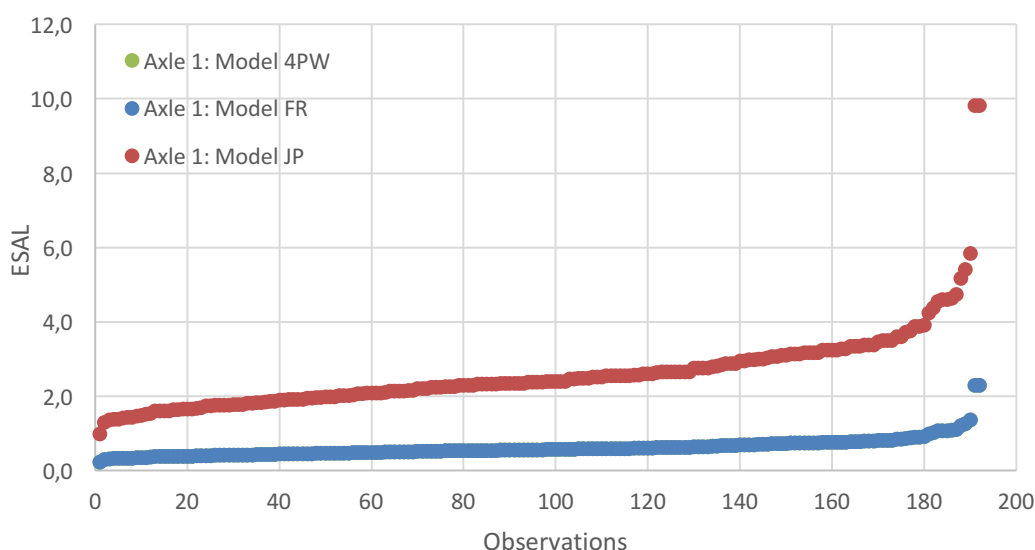


Figura 62 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da Classe H5

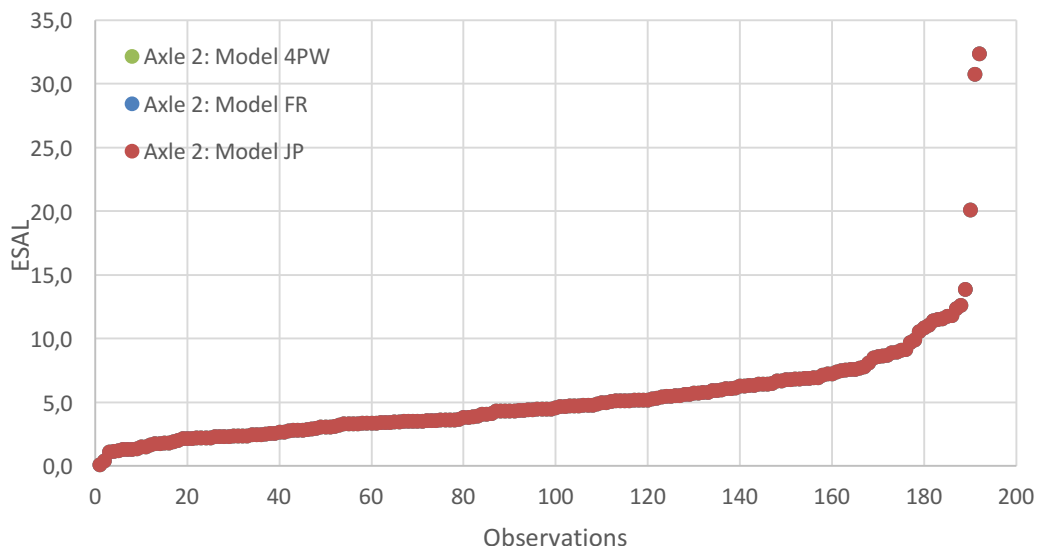


Figura 63 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da Classe H5

A observação das Figuras 64 a 67 mostra que o ESAL obtido pelo Método Francês é ligeiramente superior comparando com o Método da Quarta Potência que evidencia a influência da configuração do eixo, designadamente eixo triplo. O ESAL calculado segundo o Método JPais é superior devido à influência do eixo triplo traseiro ser composto por roda simples, facto que provoca maior dano no pavimento e conseqüentemente maior valor ESAL.

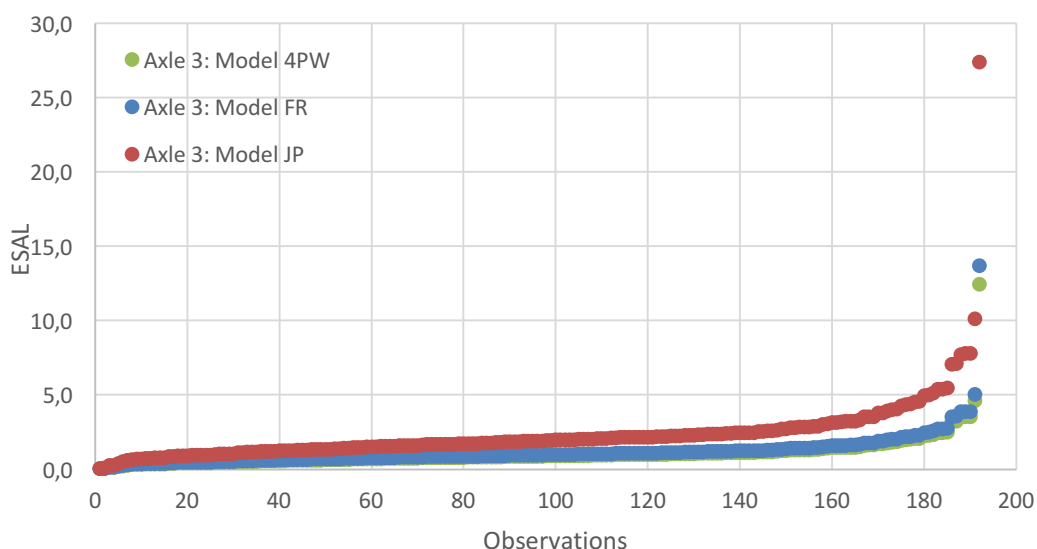


Figura 64 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da Classe H5

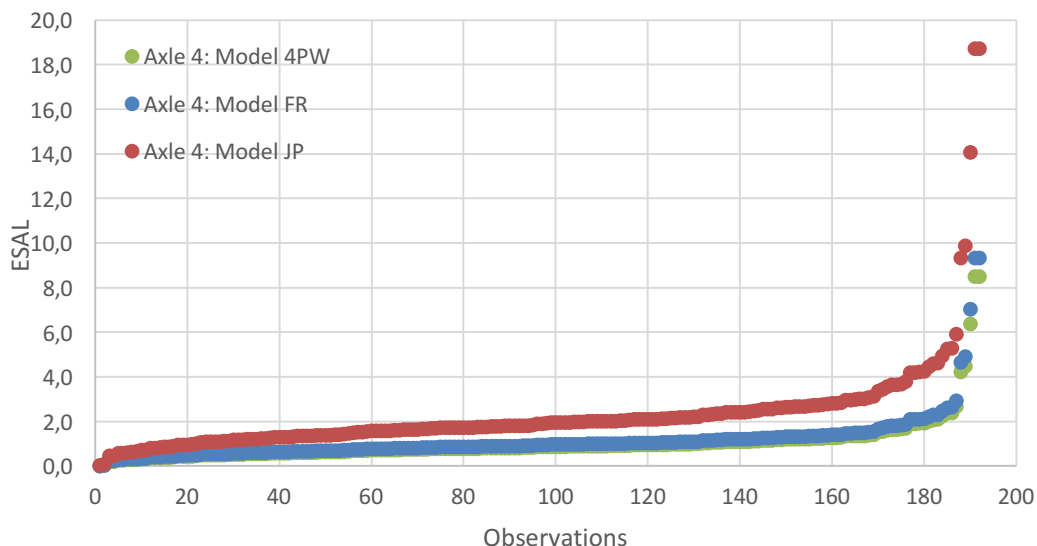


Figura 65 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no Eixo 4 da Classe H5

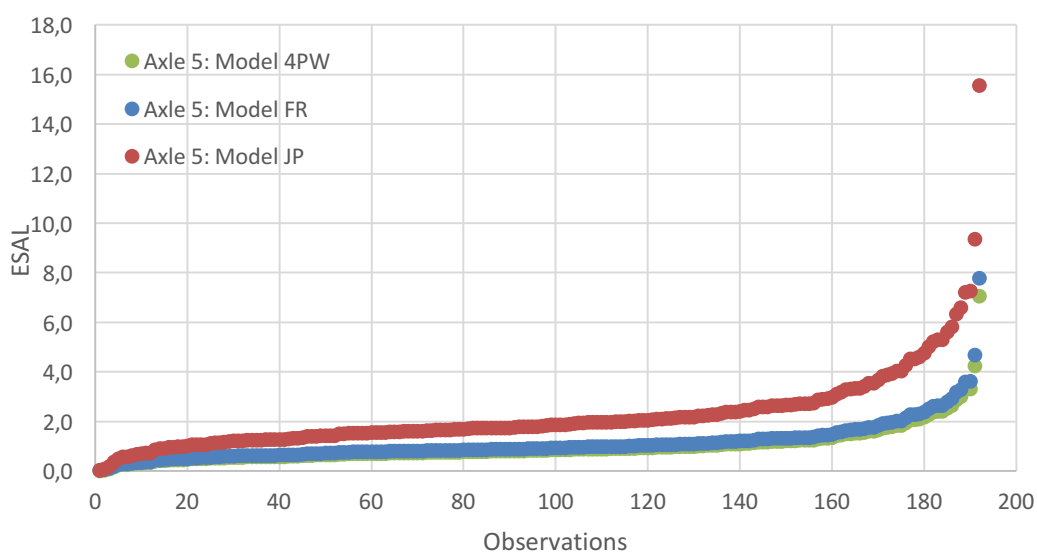


Figura 66 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, no Eixo 5 da Classe H5

A análise da Figura 67 revela que o ESAL obtido pelo Método JPais é superior em 32% e 35% ao Método Francês e ao Método da Quarta Potência, respetivamente. Estes resultados justificam-se pela influência dos elevados valores dos eixos simples 1 e 2, que ao nível do veículo não consegue diluir os seus valores.

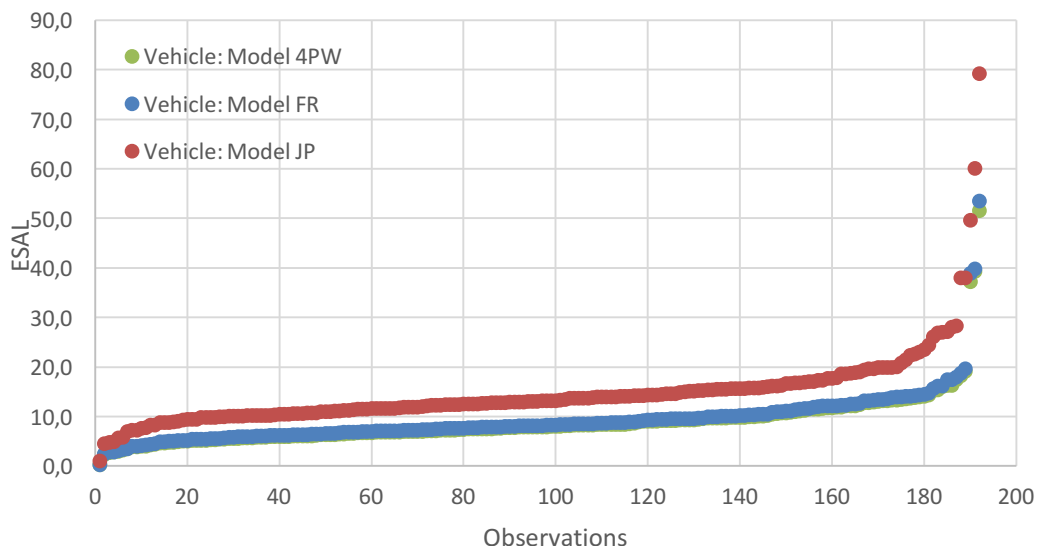


Figura 67 – Evolução do ESAL para método da 4.^a Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da Classe H3

4.4.3. Valores médios da agressividade

Na Tabelas 32 e 33 indicam-se o fator camião médio e máximo para a classe de tráfego H3, sendo que estes valores são próximo segundo o Método da Quarta Potência e o Método Francês e superior para o Método JPais, considerando todos veículos, os veículos legais e os veículos sobrecarregados.

Tabela 32 – Fator Camião Médio

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	9,007	9,321	13,444	6,873	7,107	10,833
Veículos legais	5,508	5,697	9,474	6,523	6,747	8,826
Veículos sobrecarregados	13,802	14,286	21,768	8,835	9,135	13,903

Tabela 33 – Fator Camião Máximo

Configuração das cargas nos veículos	Cargas medidas			Cargas limitadas ao máx legal		
	4. ^a Potência	Francês	JPais	4. ^a Potência	Francês	JPais
Todos os veículos	62,630	65,429	74,081	8,835	9,135	9,478
Veículos legais	8,318	8,591	14,056	8,827	9,127	6,863
Veículos sobrecarregados	62,630	65,429	74,081	8,835	9,135	9,478

5. Análise global do tráfego

No âmbito da presente dissertação, a análise do fator camião foi realizada para diferentes configurações de tráfego, designadamente:

1. Veículos com carga máxima legal em cada eixo;
2. Veículos com carga média em cada eixo;
3. Todos os veículos observados neste trabalho;
4. Veículos legais;
5. Veículos sobrecarregados;
6. Veículos limitados ao limite legal.

O fator camião para estas configurações é indicado nas Figuras 68, 69 e 70, as quais permitem compreender o efeito das cargas legais, das sobrecargas e da carga média e máxima de cada eixo que suportam a definição do fator camião que será aplicado na análise e dimensionamento dos pavimentos.

5.1.1. Método Quarta Potência

A análise dos valores dos fatores camião obtidos pelo Método da Quarta Potência e apresentados na Figura 68 e na Tabela 34 revela que os veículos com carga máxima legal representam bem o tráfego real das Classes F2 e H5 enquanto para a classe F1 representa um valor maior que o tráfego real e para a classe H3 representa um valor menor que o tráfego real.

O fator camião é superior quando a análise recai nos veículos sobrecarregados, facto que é expectável pois trata-se dos veículos que provocam maior dano nos pavimentos. Em situação oposta, apresentam-se os veículos legais, ou seja, menor fator camião e menor dano nos pavimentos.

A presença das sobrecargas aumenta o valor do fator camião que pode alcançar 91% para a Classe H3 enquanto para as classes F1 e F2 é 53% e 86%, respetivamente. Apenas para a Classe H5 o aumento do fator camião devido às sobrecargas é relativamente baixo (31%).

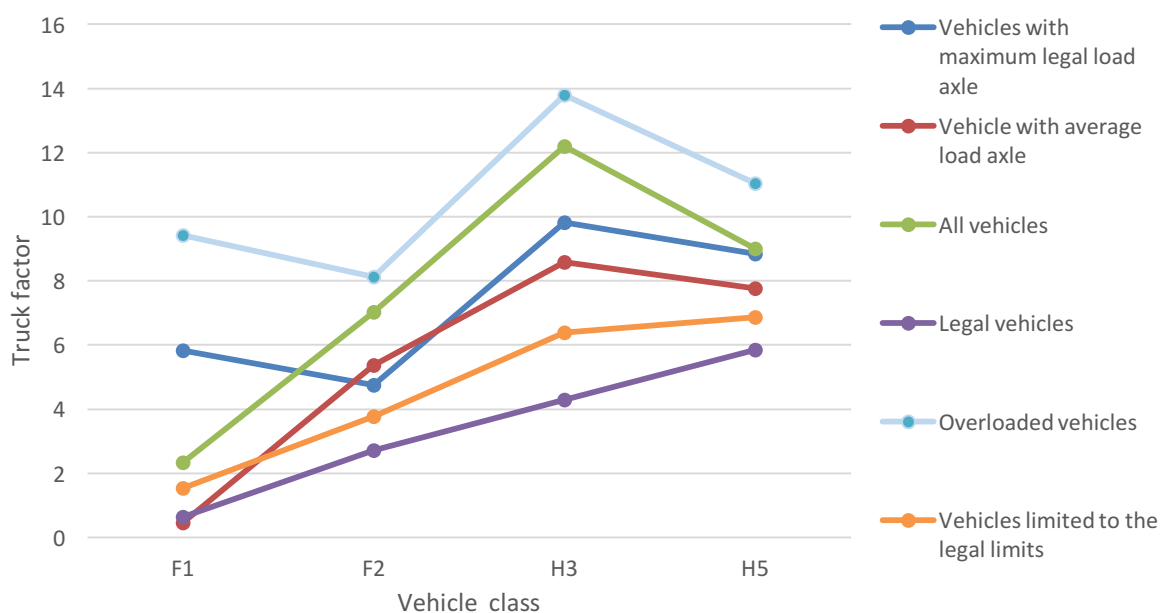


Figura 68 – Influência dos veículos sobrecarregados no fator caminhão pelo Método Quarta Potência

Tabela 34 – Fator Camião pelo Método Quarta Potência

Vehicle class	Vehicles with maximum legal load in each axle (1)	Vehicle with average load in each axle (2)	All vehicles (3)	Legal vehicles (4)	Overloaded vehicles (5)	Vehicles limited to the legal limits (6)	Aumento do fator caminhão devido às sobrecargas (%)
F1	5,83	0,45	2,34	0,63	9,42	1,53	53
F2	4,75	5,37	7,02	2,65	7,91	3,77	86
H3	9,81	8,58	12,19	3,65	13,53	6,38	91
H5	8,83	7,76	9,01	5,47	10,32	6,87	31

5.1.2. Método Francês

A análise dos valores dos fatores caminhão obtidos pelo Método Francês e apresentados na Figura 69 e na Tabela 34 revela que os veículos com carga máxima legal representam bem o tráfego real das Classes F2 e H5 enquanto para a Classe F1 representa um valor maior que o tráfego real e para a Classe H3 representa um valor menor que o tráfego real.

O fator caminhão é superior quando a análise recai nos veículos sobrecarregados, facto que é expectável pois trata-se dos veículos que provocam maior dano nos pavimentos. Em situação oposta, apresentam-se os veículos legais, ou seja, menor fator caminhão e menor dano nos pavimentos.

A presença das sobrecargas aumenta o valor do fator caminhão que pode alcançar 86% para a Classe H3 enquanto para as Classes F1 e F2 é 53% e 84%, respetivamente. Apenas para a Classe H5 o aumento do fator caminhão devido às sobrecargas é relativamente baixo (31%).

Segundo o Método Francês, o valor do fator caminhão é superior quando comparado com o Método da Quarta Potência devido à influência da configuração do eixo no Método Francês.

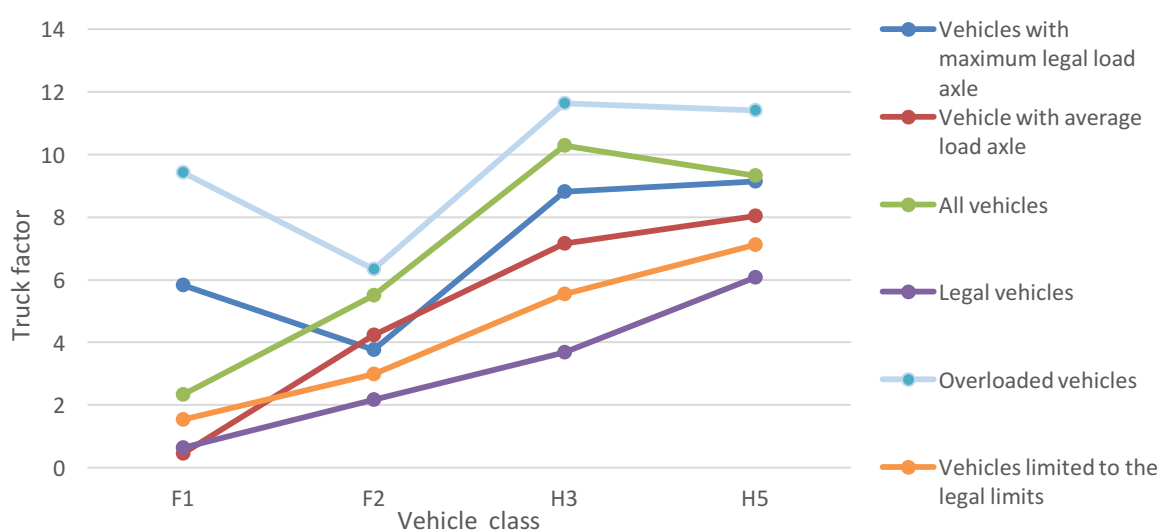


Figura 69 – Influência dos veículos sobrecarregados no fator caminhão pelo Método Francês

Tabela 35 – Fator Camião pelo Método Francês

Vehicle class	Vehicles with maximum legal load in each axle (1)	Vehicle with average load in each axle (2)	All vehicles (3)	Legal vehicles (4)	Overloaded vehicles (5)	Vehicles limited to the legal limits (6)	Aumento do fator camião devido às sobrecargas (%)
F1	5,83	0,45	2,34	0,63	9,42	1,53	53
F2	3,76	4,24	5,50	2,13	6,18	2,99	84
H3	8,82	7,15	10,28	3,12	11,40	5,54	86
H5	9,13	8,03	9,32	5,67	10,68	7,11	31

5.1.3. Método JPais

A análise dos valores dos fatores camião obtidos pelo Método JPais e apresentados na Figura 70 e na Tabela 35 revela que os veículos com carga máxima legal representam bem o tráfego real da Classe H5 enquanto para a Classe F1 representa um valor maior que o tráfego real e para a Classe H3 representa um valor menor que o tráfego real. Para a Classe F2, as distintas configurações do tráfego representam o tráfego real.

O fator camião é superior quando a análise recai nos veículos sobrecarregados, facto que é expectável pois trata-se dos veículos que provocam maior dano nos pavimentos. Em situação oposta, apresentam-se os veículos legais, ou seja, menor fator camião e menor dano nos pavimentos.

A presença das sobrecargas aumenta o valor do fator camião que pode quase alcançar 100% para a Classe H3 enquanto para as Classes F1 e F2 é 71% e 58%, respetivamente. Apenas para a Classe H5 o aumento do fator camião devido às sobrecargas é relativamente baixo (28%).

Segundo o Método JPais, o valor do fator camião é superior quando comparado com o Método da Quarta Potência e com o Método Francês devido à influência do tipo de eixo e da roda no Método JPais.

Através da Tabela 36 constatamos os valores do fator caminhão são maiores na Classe H3 por influência da presença de um eixo duplo composto por roda simples. Contudo, estes valores enfatizam o efeito das sobrecargas na análise e dimensionamento dos pavimentos. Sem sobrecargas, o dimensionamento de tráfego pode ser significativamente reduzido, produzindo pavimentos menos caros do que para o caso de que um grande número de veículos sobrecarregados circular na estrada.

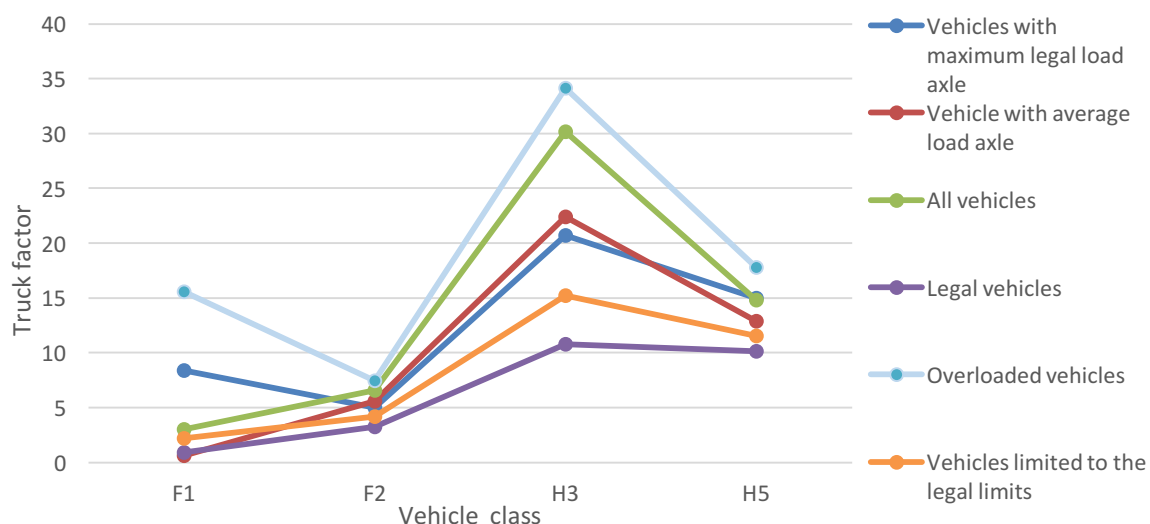


Figura 70 – Influência dos veículos sobrecarregados no fator caminhão pelo Método JPais

Tabela 36 – Fator Camião pelo Método JPais

Vehicle class	Vehicles with maximum legal load in each axle (1)	Vehicle with average load in each axle (2)	All vehicles (3)	Legal vehicles (4)	Overloaded vehicles (5)	Vehicles limited to the legal limits (6)	Aumento do fator caminhão devido às sobrecargas (%)
F1	8,37	0,65	3,77	0,91	15,60	2,21	71
F2	5,01	5,56	6,60	3,35	7,26	4,18	58
H3	20,69	22,41	30,19	9,50	33,43	15,23	98
H5	14,98	12,86	14,78	9,47	16,76	11,57	28

6. Influência do tráfego na constituição dos pavimentos

O cálculo da espessura da camada betuminosa necessária para os veículos das Classes de tráfego F1, F2, H3 e H5, considerando o fator caminhão definido pelo método JPais, está representado nos seguintes quatro subcapítulos. Para cada veículo, a espessura betuminosa calculada corresponde à espessura de pavimento necessária para suportar um tráfego composto apenas pelo veículo em análise que passaria um número de vezes, quanto o NAVP definidos para as várias classes de tráfego do MACOPAV e apresentados na Tabela 25.

A espessura da camada betuminosa necessária foi, também, calculada para todos os veículos limitados à carga máxima por eixo.

As representações gráficas consideraram o fator caminhão ordenado em ordem crescente, o que significa que os últimos veículos pesados representados no gráfico correspondem a veículos sobrecarregados.

6.1. Classe de veículos pesados F1

Na Figura 71 encontram-se representadas as espessuras de pavimento necessárias para suportar cada um dos veículos da Classe F1 observados, considerando que para a classe de tráfego do MACOPAV todos os veículos eram iguais ao observado.

Através da análise da Figura 71 é possível verificar que, por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,03 m até 0,37 m. Considerando a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,01 m até 0,28 m. Estes resultados significam que a variação de peso destes veículos varia consideravelmente. Para os outros níveis das classes de tráfego, a espessura da camada betuminosa necessária segue a mesma tendência.

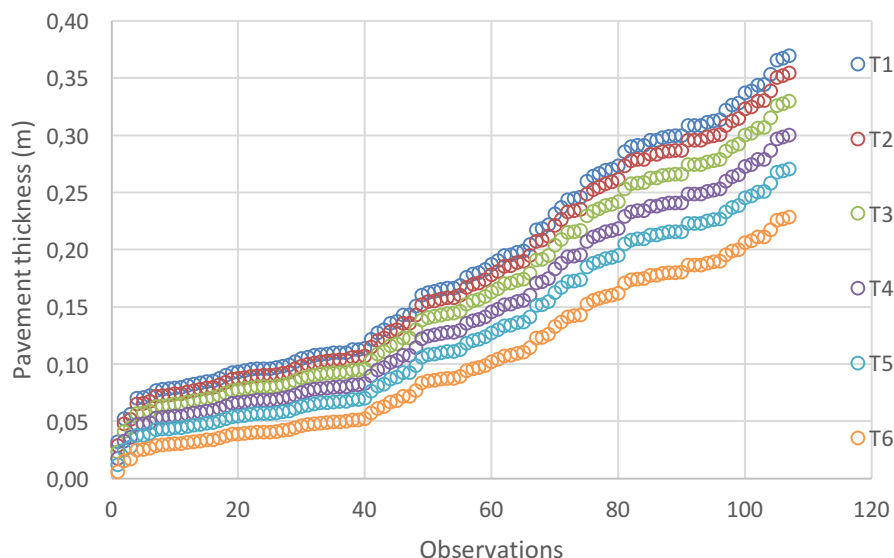


Figura 71 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F1

Na análise seguinte, as cargas dos veículos legais foram mantidas constantes, mas para os eixos que excediam a carga limite legal, estas cargas foram reduzidas ao limite legal. Portanto, todos os veículos considerados nesta análise podem ser considerados como veículos legais. A espessura da camada betuminosa necessária para estes veículos limitados à carga legal está representada na Figura 72. Por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,03 m até 0,31 m. Por sua vez para a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,01 m até 0,19 m.

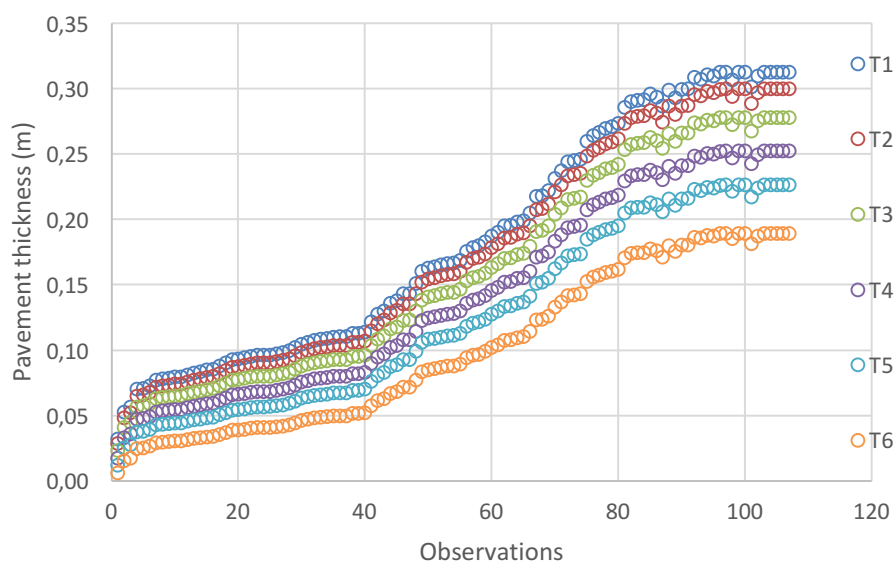


Figura 72 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F1

A comparação direta entre as Figuras 71 e 72 corresponde à espessura devido à sobrecarga que é representada na Figura 73.

A análise da Figura 73 revela que para a classe de tráfego T1, apenas 13% dos veículos correspondem a um aumento da espessura da camada betuminosa em comparação com o dimensionamento considerando as cargas de todos os veículos. O aumento da espessura da camada betuminosa oscila entre 0,01 m e 0,06 m. Por sua vez, para a classe de tráfego T6, o número de veículos é 12% e a espessura da camada betuminosa varia entre 0,01 m e 0,04 m.

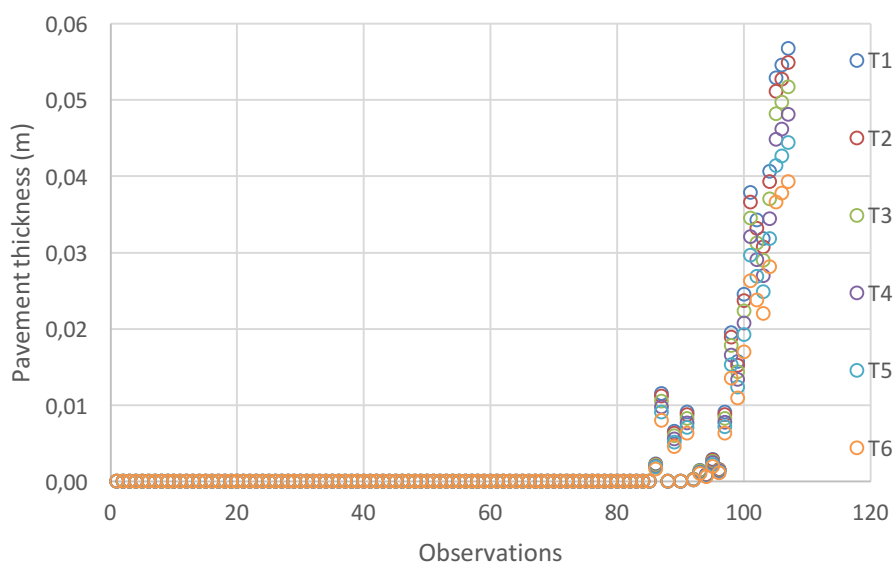


Figura 73 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe F1

6.2. Classe de veículos pesados F2

Na Figura 74 encontram-se representadas as espessuras de pavimento necessárias para suportar cada um dos veículos da Classe F2 observados, considerando que para classe de tráfego do MACOPAV todos os veículos eram iguais ao observado.

A observação da Figura 74 permite concluir que, por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,24 m até 0,35 m. Considerando a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,14 m até 0,22 m. Estes resultados significam que a variação de peso destes veículos não oscila consideravelmente. Para os outros níveis das classes de tráfego, a espessura da camada betuminosa necessária segue a mesma tendência.

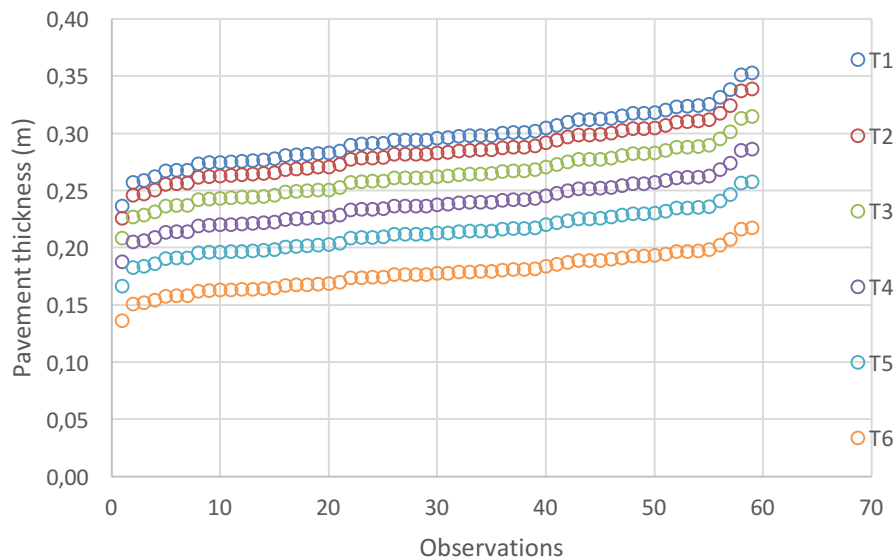


Figura 74 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F2

Na Figura 75, todos os veículos considerados nesta análise correspondem a veículos legais e representa a espessura da camada betuminosa necessária para estes veículos limitados à carga legal. Por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,24 m até 0,29 m, por sua vez para a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,14 m até 0,17 m.

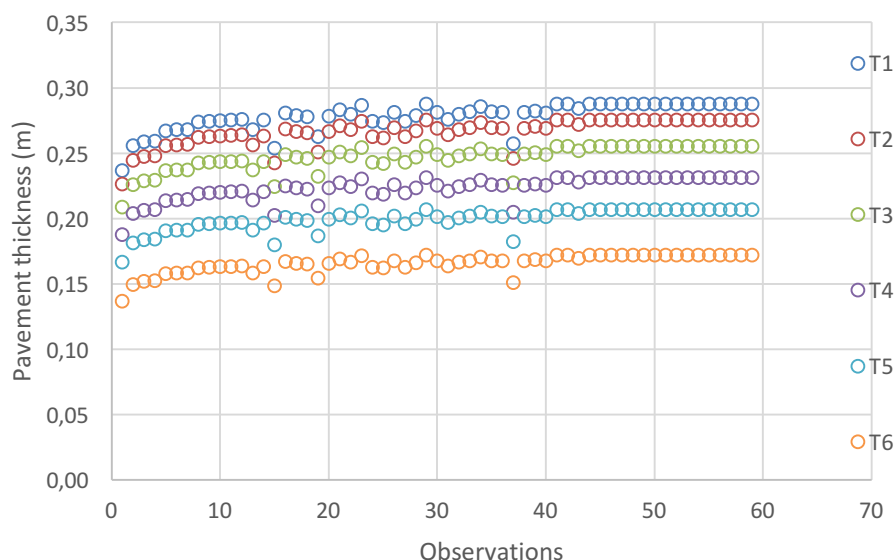


Figura 75 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe F2

A análise da Figura 76 apresenta a espessura de pavimento devido às sobrecargas, revelando que para a classe de tráfego T1, 64% dos veículos correspondem a um aumento da espessura da camada betuminosa em comparação com o dimensionamento considerando as cargas de todos os veículos. O aumento da espessura da camada betuminosa oscila entre 0,01 m e 0,07 m. Por sua vez, para a classe de tráfego T6, o número de veículos é 66% e a espessura da camada betuminosa varia entre 0,01 m e 0,05 m.

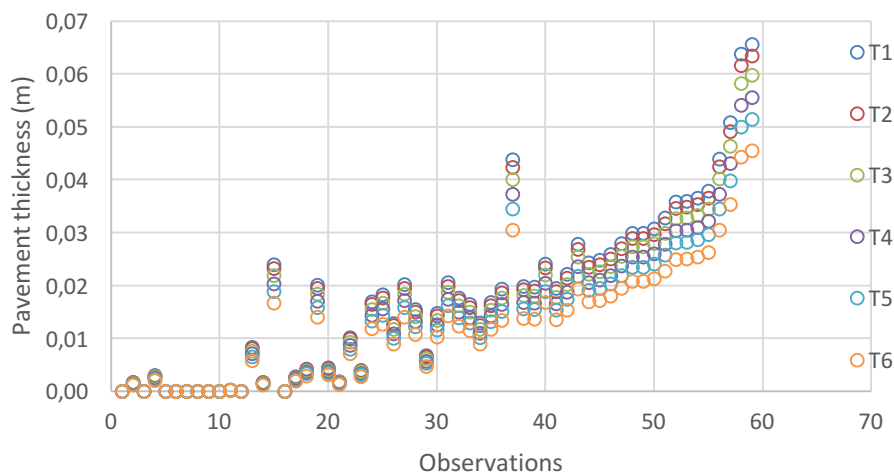


Figura 76 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe F2

6.3. Classe de veículos pesados H3

Na Figura 77 encontram-se representadas as espessuras de pavimento necessárias para suportar cada um dos veículos da Classe H3 observados, considerando que para a classe de tráfego do MACOPAV todos os veículos eram iguais ao observado.

Para a Classe de veículos pesados H3 procedeu-se de igual modo ao realizado para as classes já caracterizadas. Assim, pela análise da Figura 77 constata-se que, por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,29 m até 0,48 m. Considerando a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,18 m até 0,31 m. Estes resultados significam que a variação da espessura da camada betuminosa necessária é maior na classe H3. A afirmação é justificada pelo facto de a classe H3 provocar maior dano no pavimento correspondendo a uma maior agressividade. Em termos operacionais, a espessura da camada betuminosa será superior.

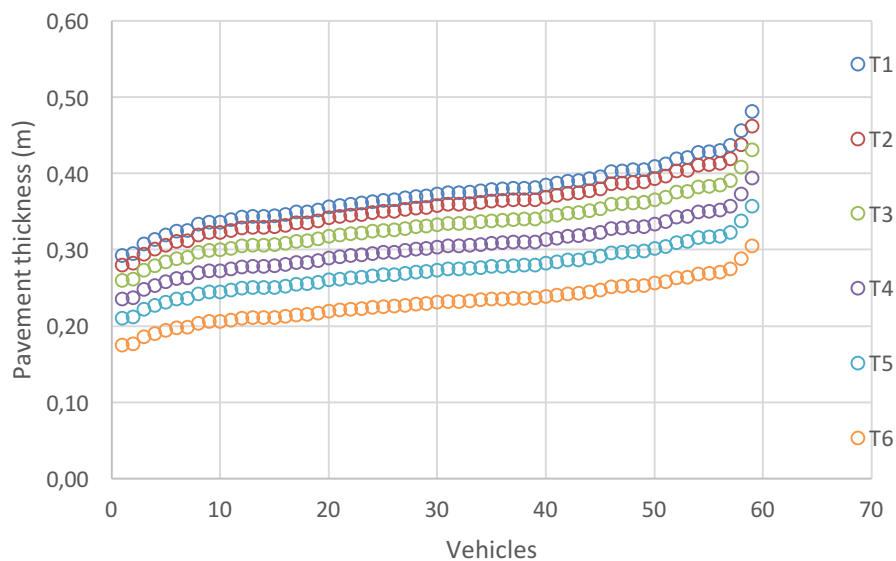


Figura 77 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H3

Na Figura 78, todos os veículos considerados nesta análise correspondem a veículos legais e representa a espessura da camada betuminosa necessária para estes veículos limitados à carga legal. Por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,29 m até 0,36 m, por sua vez para a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,18 m até 0,22 m.

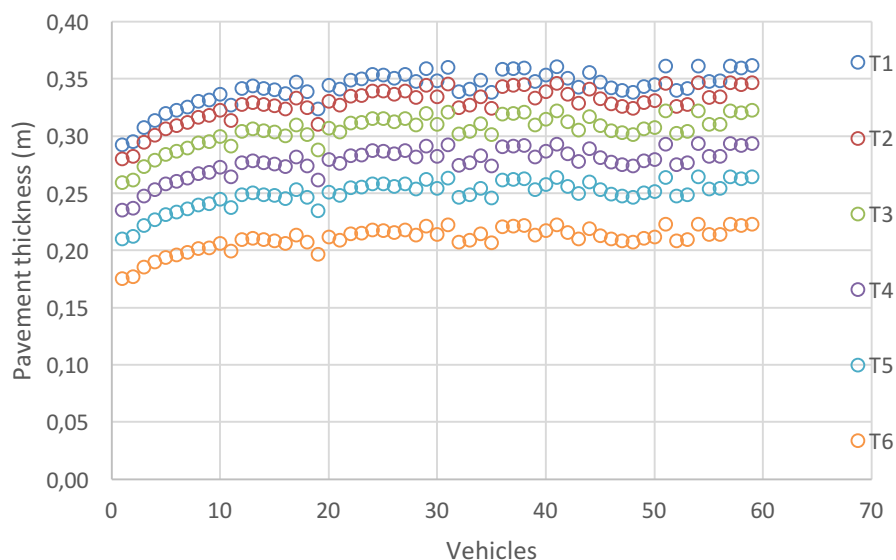


Figura 78 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H3

A análise da Figura 79 revela que para a classe de tráfego T1, 75% dos veículos correspondem a um aumento da espessura da camada betuminosa em comparação com o dimensionamento considerando as cargas de todos os veículos. O aumento da espessura da camada betuminosa oscila entre 0,01 m e 0,12 m. Por sua vez, para a classe de tráfego T6, o número de veículos é 75% e a espessura da camada betuminosa varia entre 0,01 m e 0,08 m.

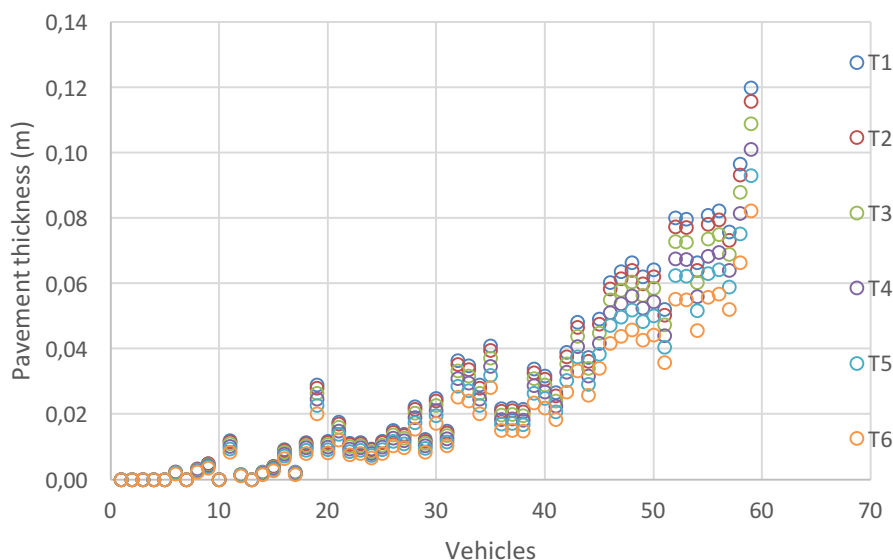


Figura 79 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe H3

6.4. Classe de veículos pesados H5

Na Figura 80 encontram-se representadas as espessuras de pavimento necessárias para suportar cada um dos veículos da Classe H5 observados, considerando que para a classe de tráfego do MACOPAV todos os veículos eram iguais ao observado.

Através da análise da Figura 80 é possível verificar que, por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,22 m até 0,45 m. Considerando a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,13 m até 0,28 m. Estes resultados significam que a variação de peso destes veículos varia consideravelmente. Para os outros níveis das classes de tráfego, a espessura da camada betuminosa necessária segue a mesma tendência.

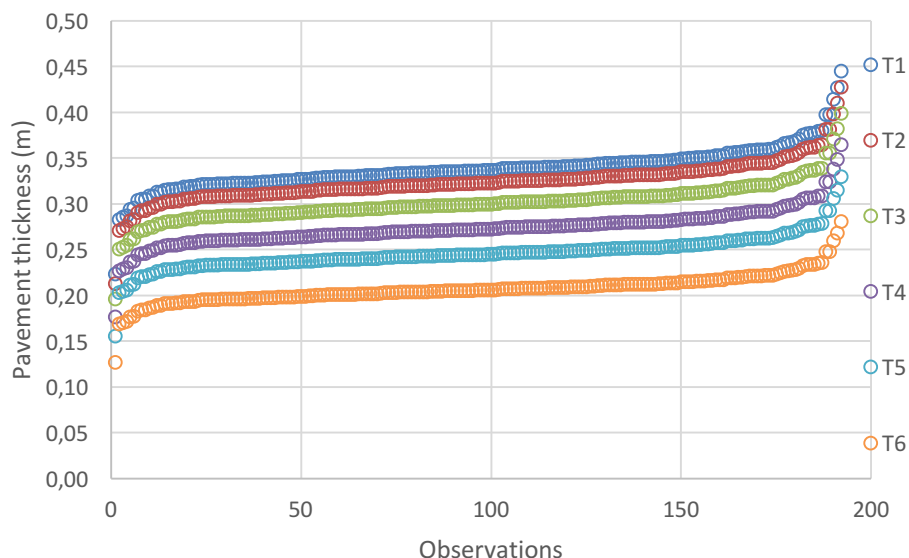


Figura 80 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H5

Na Figura 81, todos os veículos considerados nesta análise correspondem a veículos legais e representa a espessura da camada betuminosa necessária para estes veículos limitados à carga legal. Por exemplo, para a classe de tráfego T1, a espessura da camada betuminosa necessária para o pavimento varia de 0,22 m até 0,34 m, por sua vez para a classe de tráfego T6, a variação registada é de 0,13 m até 0,21 m.

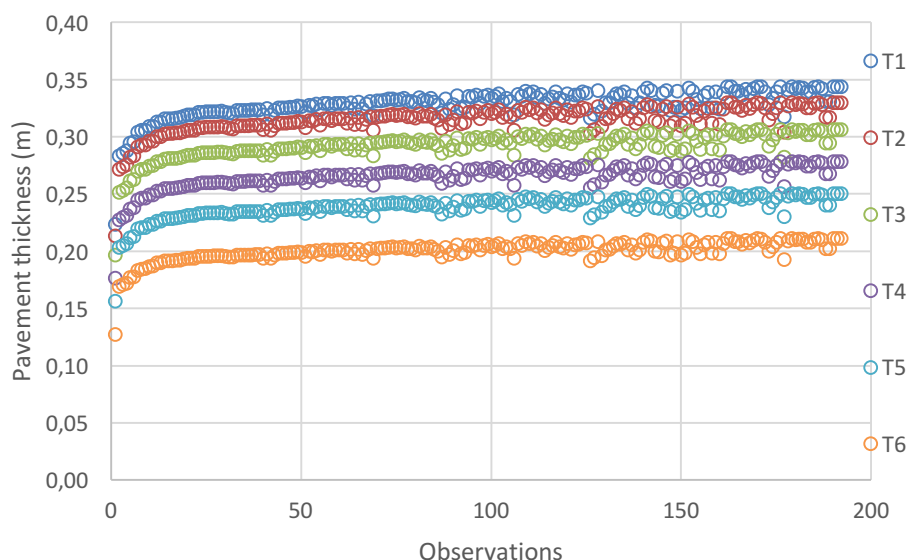


Figura 81 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo da espessura do pavimento para a Classe H5

A análise da Figura 82 revela que para a classe de tráfego T1, 48% dos veículos correspondem a um aumento da espessura da camada betuminosa em comparação com o dimensionamento considerando as cargas de todos os veículos. O aumento da espessura da camada betuminosa oscila entre 0,01 m e 0,10 m. Por sua vez, para a classe de tráfego T6, o número de veículos é 39% e a espessura da camada betuminosa varia entre 0,01 m e 0,07 m.

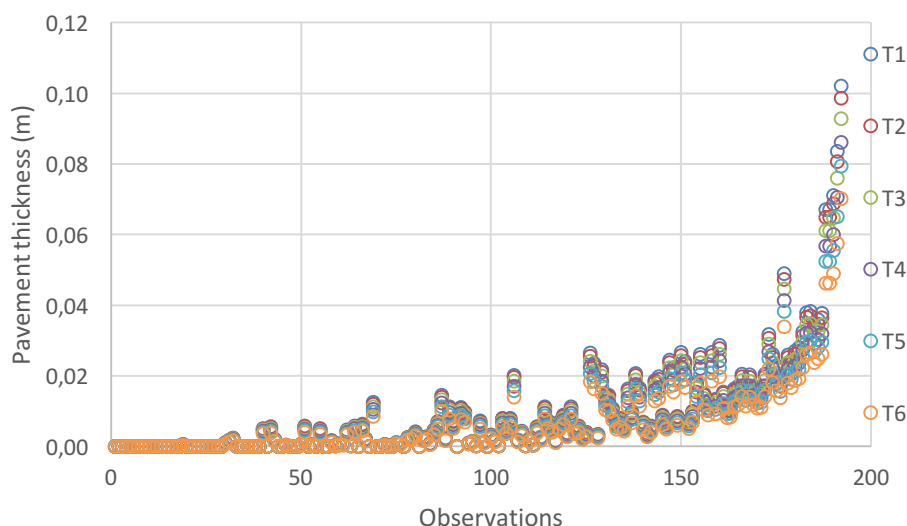


Figura 82 – Espessura do pavimento devido às sobrecargas observadas na Classe H5

6.5. Tráfego global

Considerando os dados obtidos para o fator caminhão através do Método da Quarta Potência, Método Francês e Método JPais, a espessura do pavimento necessária foi calculada para diferentes configurações de tráfego.

6.5.1. Método Quarta Potência

Os resultados são apresentados na Figura 83, na qual é possível observar que a espessura do pavimento segue uma variação logarítmica com o nível de tráfego e a diferença entre as configurações de tráfego é relativamente reduzida, o que significa que a influência das sobrecargas na espessura do pavimento, considerando todo o tráfego e não apenas uma classe de veículos, é relativamente baixa. A influência das sobrecargas de todo o tráfego na espessura do pavimento é dada na Figura 84 e varia de 3,7% a 5,3% dependendo dos níveis de tráfego considerados, o que é um valor relativamente baixo. Isto é explicado pelo facto de

haver um elevado número de veículos legais a circular que compensa o efeito dos veículos sobrecarregados.

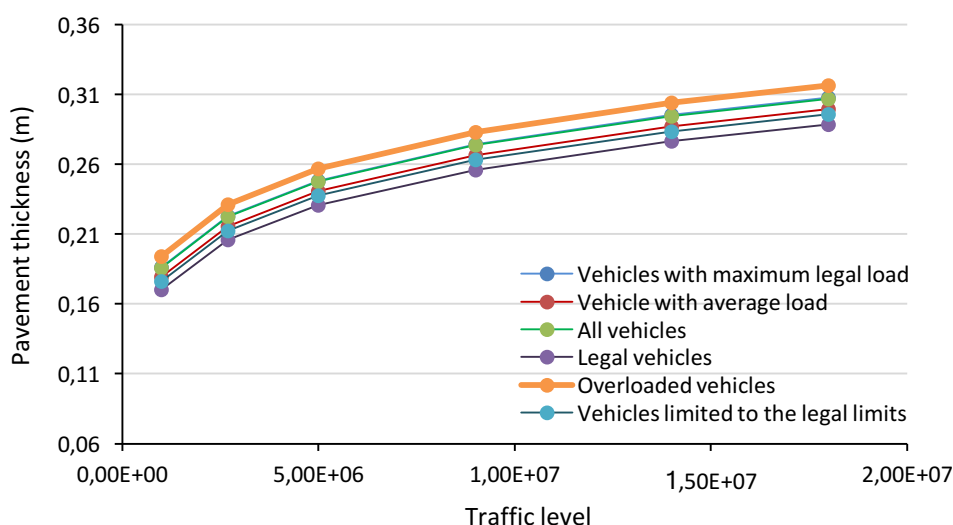


Figura 83 – Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa

Em suma, o estudo revela que a presença de veículos sobrecarregados pode aumentar a espessura da camada betuminosa num máximo de 5,3% em comparação com a espessura da camada betuminosa dos mesmos veículos com cargas legais.

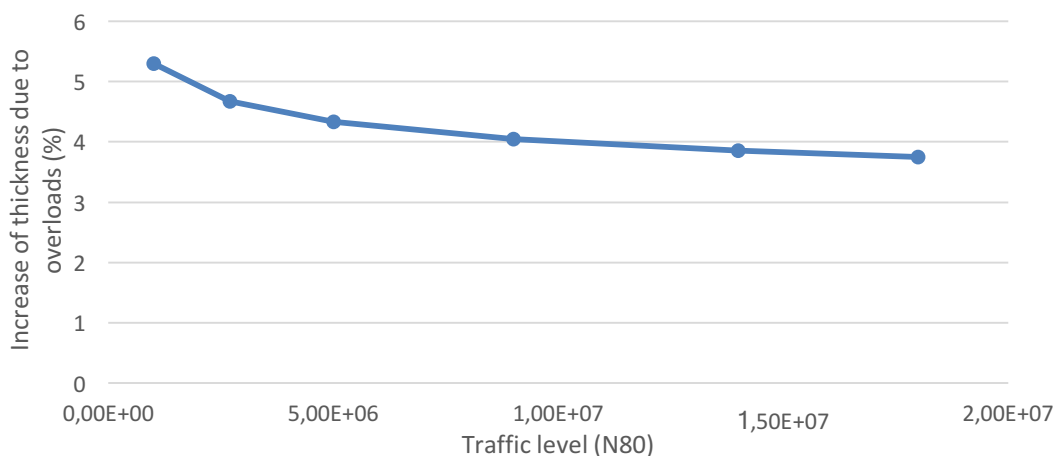


Figura 84 – Aumento da espessura da camada betuminosa devido às sobrecargas

6.5.2. Método Francês

Os resultados são apresentados na Figura 85, na qual é possível observar que a espessura do pavimento segue uma variação logarítmica com o nível de tráfego e a diferença entre as

configurações de tráfego é relativamente reduzida, o que significa que a influência das sobrecargas na espessura do pavimento, considerando todo o tráfego e não apenas uma classe de veículos, é relativamente baixa. A influência das sobrecargas de todo o tráfego na espessura do pavimento é dada na Figura 86 e varia de 3,5% a 5,0% dependendo dos níveis de tráfego considerados, o que é um valor relativamente baixo. Isto é explicado pelo facto de haver um elevado número de veículos legais a circular que compensa o efeito dos veículos sobrecarregados.

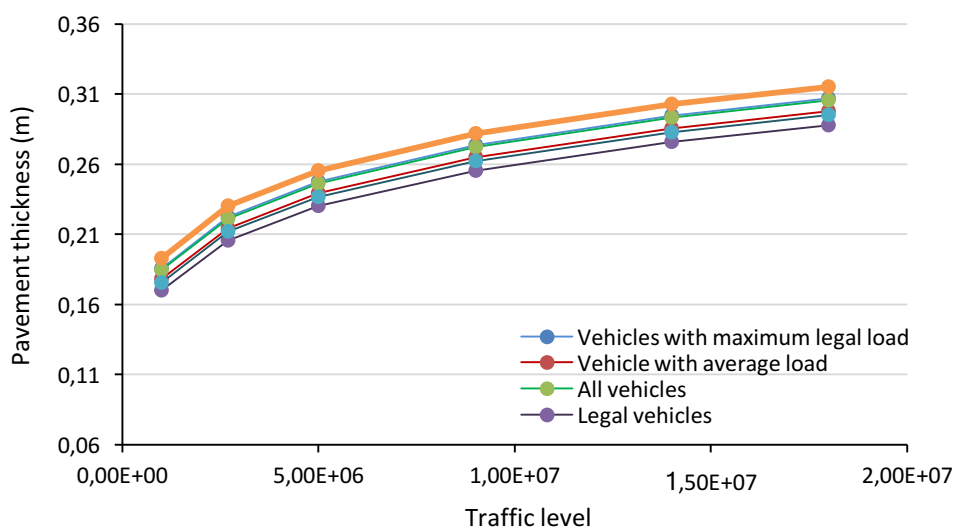


Figura 85 – Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa

Em suma, o estudo revela que a presença de veículos sobrecarregados pode aumentar a espessura da camada betuminosa num máximo de 5,0% em comparação com a espessura da camada betuminosa dos mesmos veículos com cargas legais.

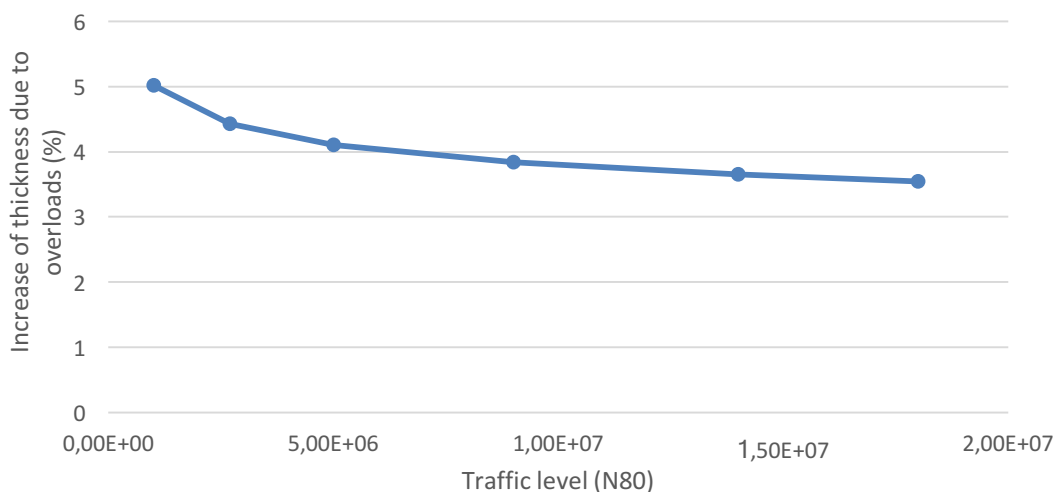


Figura 86 – Aumento da espessura da camada betuminosa devido às sobrecargas

6.5.3. Método JPais

Os resultados são apresentados na Figura 87, na qual é possível observar que a espessura do pavimento segue uma variação logarítmica com o nível de tráfego e a diferença entre as configurações de tráfego é relativamente reduzida, o que significa que a influência das sobrecargas na espessura do pavimento, considerando todo o tráfego e não apenas uma classe de veículos, é relativamente baixa. A influência das sobrecargas de todo o tráfego na espessura do pavimento é dada na Figura 88 e varia de 3,6% a 5,0% dependendo dos níveis de tráfego considerados, o que é um valor relativamente baixo. Isto é explicado pelo facto de haver um elevado número de veículos legais a circular que compensa o efeito dos veículos sobrecarregados.

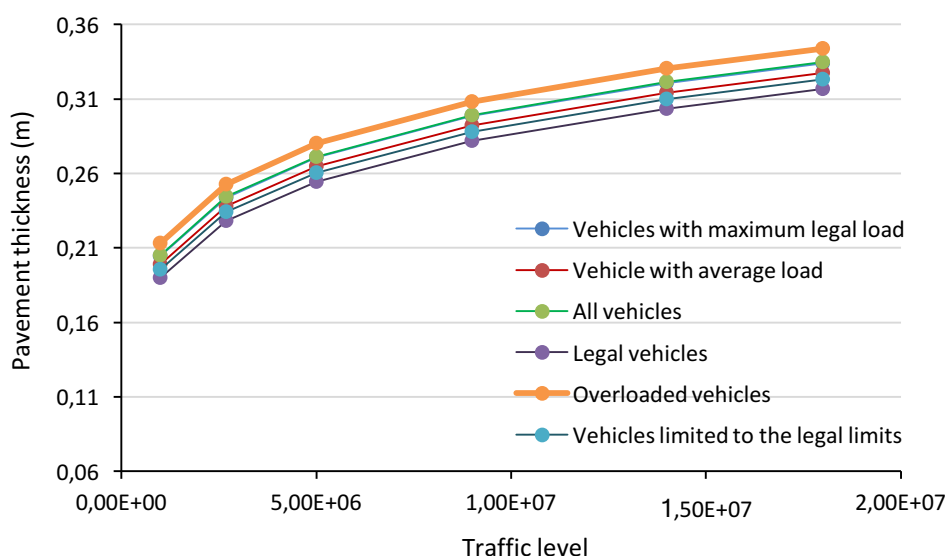


Figura 87 – Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa

Em suma, o estudo revela que a presença de veículos sobrecarregados pode aumentar a espessura da camada betuminosa num máximo de 5,0% em comparação com a espessura da camada betuminosa dos mesmos veículos com cargas legais.

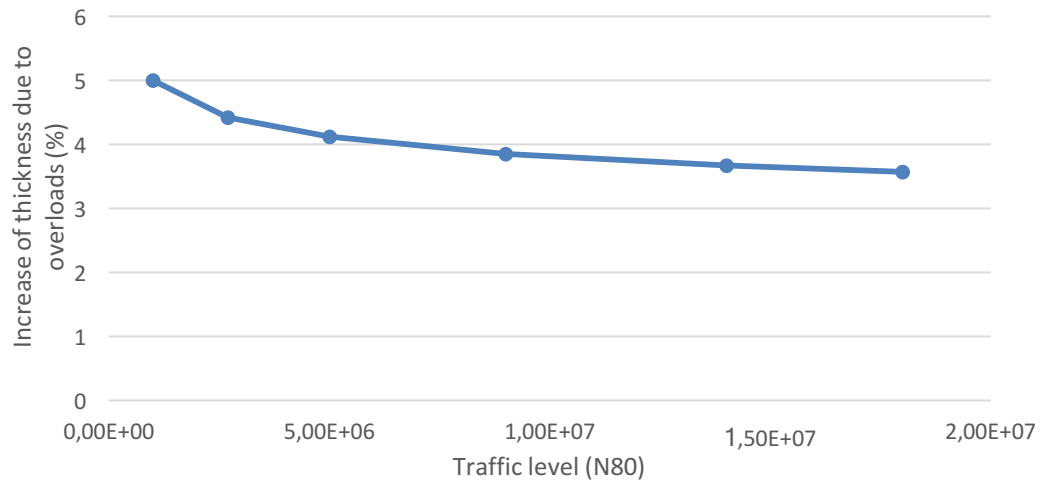


Figura 88 – Aumento da espessura da camada betuminosa devido às sobrecargas

7. Conclusões

O estudo da presente dissertação desenvolveu-se a partir de uma base de dados de pesagens de veículos pesados para estudar o efeito das sobrecargas do tráfego na constituição dos pavimentos rodoviários através do cálculo da agressividade dos eixos dos veículos e dos próprios veículos. Os valores obtidos foram utilizados para calcular a espessura necessária para a camada betuminosa considerando todo o tráfego observado e o tráfego limitado aos limites de carga legal.

A base de dados utilizada no estudo é composta pelos valores da pesagem manual de 417 veículos pesados num determinado troço de uma estrada nacional. Os veículos pesados correspondem a 1587 eixos e classificam-se em quatro diferentes classes de veículos: Classe F1 composta por veículos com dois eixos simples; Classe F2 composta por veículos com um eixo simples e um eixo tandem; Classe H3 composta por veículos com um trator com dois eixos simples e um reboque com um eixo tandem e Classe H5 composta por veículos com um trator com dois eixos simples e um reboque com um eixo tridem.

A análise das cargas dos eixos dos veículos pesados possibilitou concluir que a percentagem de veículos sobrecarregados, ou seja, veículos com pelo menos um eixo com carga superior ao limite legal para esse eixo, é superior a 60% e para as classes F2 e H3 atinge os 80%. Estes resultados justificam-se com o facto de a carga média dos eixos ser aproximadamente a carga legal máxima. Em cenário oposto, apresenta-se a classe F1 com quase todos os veículos a circular com cargas legais e muito abaixo desse limite. O estudo demonstrou, ainda, que o eixo 3 da classe H3 circula com o mais elevado valor de excesso de carga.

A análise do tráfego foi realizada através do cálculo da agressividade, ESAL, para todos os eixos observados utilizando três métodos diferentes: o Método da Quarta Potência, o Método Francês que considera o efeito do tipo de eixo e o Método JPais que contempla o efeito do tipo de eixo e de roda e ainda as características do pavimento rodoviário.

Os métodos produzem resultados diferentes, função do eixo e tipo de roda. Apesar das diferenças entre os diferentes métodos, a tendência é quase análoga, senão vejamos:

- para eixos simples, o Método JPais apresenta valores superiores quando comparado com o Método da Quarta Potência e o Método Francês;

- para eixos simples com roda dupla, os valores ESAL são iguais para as três metodologias. Este facto relaciona-se com a configuração do eixo ser simples com roda dupla. No Método Francês, o coeficiente k para esta configuração é igual à unidade, assim como para o Método JPais;
- a presença de roda dupla nos eixos resulta num valor ESAL menor, uma vez que a carga é dividida pelas duas rodas e o efeito do dano no pavimento é reduzido;
- eixos duplos/triplos compostos por rodas simples originam valores ESAL mais elevados, dado provocarem mais dano nos pavimentos.

Para calcular a espessura de pavimento necessária para diferentes níveis de tráfego foi desenvolvido um modelo que expressa as leis de fadiga da Shell. Este modelo permitiu um cálculo rápido da espessura do pavimento para qualquer nível de tráfego.

No que concerne à espessura de pavimento necessária para suportar um determinado nível de tráfego considerando os veículos observados neste trabalho, pode concluir-se que a espessura do pavimento devido às sobrecargas atinge no máximo 0,12 m.

Para a classe F1, apenas uma reduzida percentagem de veículos pesados, 13%, necessitaria de um aumento do pavimento, a qual atinge um máximo de 0,06 m. Este facto relaciona-se com o número reduzido de veículos desta classe que circulam com excesso de carga. Situação oposta verifica-se para os veículos das classes F2, H3 e H5, pois trata-se de veículos que em regra circulam próximo do limite legal ou com excesso de carga.

Em termos de fator camião, a análise realizada neste trabalho permitiu concluir que ele aumenta consideravelmente devido às sobrecargas e pode chegar a 100% para a classe H3, devido à presença de um reboque com um eixo tandem composto por rodas simples.

Para a análise da influência das sobrecargas na espessura do pavimento, o estudo revelou que dependendo do nível de tráfego, a presença de veículos sobrecarregados pode aumentar a espessura da camada betuminosa num máximo de 5,3% em comparação com a espessura da camada betuminosa dos mesmos veículos com cargas legais. Consequentemente, a presença de veículos sobrecarregados aumenta os custos de pavimento em comparação com o custo dos mesmos veículos com cargas legais.

8. Referências bibliográficas

Sara I.R. Amorim, Jorge C. Pais, Aline C. Vale & Manuel J.C. Minhoto (2014): A model for equivalent axle load factors, International Journal of Pavement Engineering

Pais, J., Amorim, S., and Minhoto, M. (2013), Impact of Traffic Overload on Road Pavement Performance, J. Transp. Eng.

Cordeiro, M., 2010, Análise do tráfego de veículos pesados em Portugal para o cálculo do fator da agressividade, Tese submetida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico

JAE, 1995, Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa

JAE/ LNEC, 1999, Caracterização do fator de agressividade do tráfego de veículos pesados em Portugal, Trabalho no âmbito do Protocolo JAE/ LNEC, Lisboa

Branco, Fernando E. F., 2000, Notas sobre a Agressividade do Tráfego de Veículos Pesados em Portugal. 1.º Congresso Rodoviário Português, LNEC

R. R. Addis, 2000, Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres, COST 334

Huang, Yang H., Pavement Analysis Design, 2.ª Edição