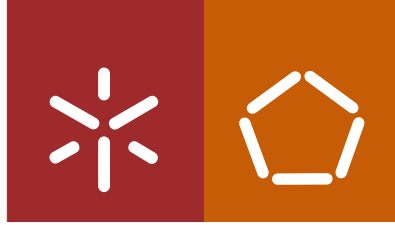




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Helder dos Santos Figueiras

Avaliação da agressividade do tráfego pesado



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Helder dos Santos Figueiras

Avaliação da agressividade do tráfego pesado

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana
Ramo de Infraestruturas Viárias

Trabalho realizado sob orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

AGRADECIMENTOS

Findando mais uma etapa do meu percurso académico, não posso deixar de expressar a minha gratidão para com as pessoas e entidades que me apoiaram até à obtenção do grau de Mestre em Engenharia. Desejo agradecer em particular.

Aos meus pais e irmão, Mário Figueiras, Mária José e Hugo Figueiras, por me terem proporcionado todas as condições necessárias para atingir este objetivo. Eles que desde sempre me transmitiram bons valores, e me acompanharam ao longo desta longa caminhada, para que nunca perdesse o foco e incentivando-me diariamente. Através de muito trabalho e sacrifício da sua parte, são sem dúvida as pessoas que mais contribuíram para a concretização deste objetivo.

À família, destacando o meu tio Enfermeiro Carlos Figueiras, com quem partilho esta sensação de enorme contentamento e realização, pelos seus bons conselhos, e por quem tenho uma enorme estima, consideração e gratidão.

Ao Professor Jorge Pais, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela importante transmissão de conhecimentos ao longo do mestrado, por todo o apoio prestado na orientação da dissertação, pela sua disponibilidade e amizade.

À Universidade do Minho e Associação Académica da Universidade do Minho, por aprovisionarem todas as condições e recursos, para tornar possível conciliar o desenvolvimento académico com o percurso desportivo. Foram muitas as pessoas que me incentivaram e ajudaram a conseguir dar o meu melhor, o meu agradecimento é geral. Foi uma honra durante o percurso representar a Universidade, nos Campeonatos Nacionais Universitários e Campeonato do Mundo Universitário, produzindo uma simbiose perfeita a finalização desta etapa académica com os resultados desportivos.

AVALIAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO TRÁFEGO PESADO

RESUMO

Os dados de tráfego integram as ações fundamentais a considerar no dimensionamento de pavimentos rodoviários. O número equivalente de eixos equivalente ao eixo padrão (NEEP) utilizado no dimensionamento de pavimentos é dado pelo tráfego acumulado de veículos pesados durante o período de vida útil do pavimento, multiplicado por um fator camião, que traduz a agressividade desses mesmos veículos.

Os veículos que circulam com cargas por eixo acima do limite máximo legal provocam danos significativos nos pavimentos, aumentando o custo da sua construção ou reabilitação.

Através de postos de pesagem e contagem de veículos pesados, instalados em vários locais da rede rodoviária, é possível fazer uma correta avaliação do tráfego, e investigar o impacto dos veículos que circulam sobrecarregados.

O presente estudo tem como principal objetivo a avaliação da agressividade do tráfego pesado recorrendo a resultados de uma campanha de pesagem de veículos pesados, utilizando para o efeito diferentes métodos no cálculo da agressividade. Para a realização deste trabalho foram usados três métodos no cálculo da agressividade, nomeadamente o método da 4ª potência, o método francês e o método desenvolvido pelo Professor Jorge Pais, designado neste trabalho por método JPais.

A investigação permitiu, a partir dos resultados obtidos, avaliar o efeito das sobrecargas no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Palavras-Chave

Pavimentos Flexíveis, Dimensionamento, Tráfego, Agressividade

EVALUATION OF THE HEAVY TRAFFIC DAMAGE ON ROAD PAVEMENTS

ABSTRACT

Traffic data constitute a fundamental input required on the road pavement design. The equivalent number of standard axles (ESAL), used in the road pavement design, is determined by the accumulated traffic of overload vehicles during the useful life of the pavement, multiplied by a truck factor, which reflects the damage of those vehicles in the pavement.

Vehicles that travel with axle loads above the maximum legal limit cause significant damage to the pavements, increasing the pavement construction and rehabilitation cost.

Through installed weigh stations, and counting trucks, installed at various locations on the road network, it is possible to make a correct assessment of the traffic, and to investigate the impact of overloaded vehicles.

This study has as main objective to evaluate the damage of overload traffic using the results of a weighing stations of heavy vehicles, using different methods for the calculation. To accomplish this work, three methods were used to calculate the damage, namely, the fourth power method, the French method and JPais method, the last developed by Professor Jorge Pais.

The investigation allowed, with the obtained results, to evaluate the effect of the overload vehicles in the design of flexible pavements.

Key words

Flexible Pavements, Design, Traffic, Damage

ÍNDICE

1. Introdução 1

1.1 Enquadramento temático.....	1
1.2 Objetivos e metodologia.....	2
1.3 Organização da tese.....	3

2. Pavimentos rodoviários flexíveis.....5

2.1 Introdução.....	5
2.2 Constituição e comportamento dos pavimentos.....	6
2.3 Dimensionamento de pavimentos.....	10
2.4 Tráfego pesado.....	13
2.4.1 Caracterização do tráfego.....	13
2.4.2 Caracterização da agressividade dos veículos pesados.....	17
2.4.3 Cálculo da Agressividade.....	21

3. Metodologia utilizada e dados de tráfego.....25

3.1 Metodologia de estudo.....	25
3.2 Dados do tráfego.....	27
3.2.1 Pesagens da classe F1.....	28
3.2.2 Pesagens da classe F2.....	30
3.2.3 Pesagens da classe H1.....	31
3.2.4 Pesagens da classe H3.....	33
3.2.5 Pesagens da classe H4.....	35
3.2.6 Pesagens da classe H5.....	38
3.2.7 Pesagens da classe H6.....	41

4. Análise da agressividade do tráfego pesado.....45

4.1 Introdução.....	45
4.2 Agressividade dos eixos da classe F1.....	45

4.2.1 Método da 4ª Potência.....	45
4.2.2 Método Francês.....	47
4.2.3 Método JPais.....	49
4.2.4 Comparação dos métodos em veículos da classe F1.....	51
4.3 Agressividade dos eixos da classe F2.....	52
4.3.1 Método JPais.....	52
4.3.2 Comparação dos métodos em eixos da classe F2.....	54
4.4 Agressividade dos eixos da classe H1.....	55
4.4.1 Método JPais.....	55
4.4.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H1.....	57
4.5 Agressividade dos eixos da classe H3.....	58
4.5.1 Método JPais.....	58
4.5.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H3.....	60
4.6 Agressividade dos eixos da classe H4.....	62
4.6.1 Método JPais.....	62
4.6.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H4.....	64
4.7 Agressividade dos eixos da classe H5.....	66
4.7.1 Método JPais.....	66
4.7.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H5.....	68
4.8 Agressividade dos eixos da classe H6.....	71
4.8.1 Método JPais.....	71
4.8.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H6.....	73
5. Análise do tráfego global.....	77
5.1 Análise pelo método da 4ª Potência.....	77
5.2 Análise pelo método Francês.....	78
5.3 Análise pelo método JPais.....	80
6. Espessura do pavimento.....	83
6.1 Método da 4ª Potência.....	83
6.2 Método Francês.....	85
6.1 Método JPais.....	86

7. Considerações finais	89
8. Referências bibliográficas	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação esquemática das solicitações e do comportamento dum pavimento rodoviário flexível.....	7
Figura 2.2 – Constituição de um pavimento flexível (LNEC, 2005).....	8
Figura 2.3 – Constituição típica dum pavimento flexível e estado de tensão resultante do carregamento do tráfego (Pereira & Picado-Santos, 2002).....	9
Figura 2.4 – Zonas críticas de ocorrência de esforços num pavimento flexível devido ao carregamento do tráfego (adaptado de Pereira & Picado-Santos, 2002)	10
Figura 2.5 – Distribuição das tensões verticais devido à passagem de uma roda.....	12
Figura 2.6 Deflexão do pavimento sob ação do tráfego, com representação das tensões de compressão e de tração nas camadas ligadas.....	12
Figura 2.7 – Esquematisação adotada para a ação de um eixo-padrão sobre o pavimento (Branco).....	19
Figura 3.1 – Carga média relativa à carga legal, para os vários eixos dos veículos pesados....	27
Figura 3.2 – Percentagem de veículos em cada classe.....	28
Figura 3.3 – Percentagem de veículos em excesso em carga.....	28
Figura 3.4 – Veículo classe F1.....	29
Figura 3.5 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F1.....	29
Figura 3.6 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F1.....	29
Figura 3.7 – Veículo classe F2.....	30
Figura 3.8 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F2.....	30
Figura 3.9 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F2.....	30
Figura 3.10 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe F2.....	31
Figura 3.11 – Veículo classe F2.....	31

Figura 3.12 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H1.....	32
Figura 3.13 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H1.....	32
Figura 3.14 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H1.....	32
Figura 3.15 – Veículo classe H3.....	33
Figura 3.16 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H3.....	33
Figura 3.17 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H3.....	34
Figura 3.18 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H3.....	34
Figura 3.19 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H3.....	35
Figura 3.20 – Veículo classe H4.....	35
Figura 3.21 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H4.....	36
Figura 3.22 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H4.....	36
Figura 3.23 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H4.....	37
Figura 3.24 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H4.....	37
Figura 3.25 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H4.....	38
Figura 3.26 – Veículo da classe H5.....	38
Figura 3.27 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H5.....	39
Figura 3.28 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H5.....	39
Figura 3.29 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H5.....	40

Figura 3.30 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H5.....	40
Figura 3.31 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H5.....	41
Figura 3.32 – Veículo da classe H6.....	41
Figura 3.33 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H6.....	42
Figura 3.34 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H6.....	42
Figura 3.35 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H6.....	43
Figura 3.36 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H6.....	43
Figura 3.37 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H6.....	44
Figura 3.38 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 6 da classe H6.....	44
Figura 4.1 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 1 da classe F1	46
Figura 4.2 – Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 2 da classe F1	46
Figura 4.3 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 1 da classe F1	46
Figura 4.4 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 2 da classe F1	47
Figura 4.5 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F1.....	47
Figura 4.6 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F1.....	48
Figura 4.7 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 1 da classe F1	48
Figura 4.8 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 2 da classe F1	49

Figura 4.9 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F1.....	49
Figura 4.10 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F1.....	50
Figura 4.11 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 1 da classe F1	50
Figura 4.12 – Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 2 da classe F1	50
Figura 4.13 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe F1	51
Figura 4.14 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe F1	51
Figura 4.15 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe F1.....	52
Figura 4.16 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F2.....	53
Figura 4.17 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F2.....	53
Figura 4.18 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe F2.....	53
Figura 4.19 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe F2.....	54
Figura 4.20 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe F2.....	54
Figura 4.21 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe F2.....	55
Figura 4.22 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe F2.....	55
Figura 4.23 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H1	56
Figura 4.24 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H1	56
Figura 4.25 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H1	56

Figura 4.26 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H1.....	57
Figura 4.27 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H1.....	57
Figura 4.28 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H1.....	58
Figura 4.29 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H1.....	58
Figura 4.30 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H3.....	59
Figura 4.31 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H3.....	59
Figura 4.32 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H3.....	59
Figura 4.33 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H3.....	60
Figura 4.34 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H3.....	60
Figura 4.35 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H3.....	61
Figura 4.36 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H3.....	61
Figura 4.37 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H3.....	61
Figura 4.38 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H3.....	62
Figura 4.39 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H3.....	62
Figura 4.40 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H3.....	63
Figura 4.41 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H3.....	63
Figura 4.42 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H3.....	63

Figura 4.43 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H3.....	64
Figura 4.44 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H4.....	64
Figura 4.45 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H4.....	65
Figura 4.46 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H4.....	65
Figura 4.47 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H4.....	65
Figura 4.48 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 5 da classe H4.....	66
Figura 4.49 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H4.....	66
Figura 4.50 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H5.....	67
Figura 4.51 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H5.....	67
Figura 4.52 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H5.....	67
Figura 4.53 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H5.....	68
Figura 4.54 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H5.....	68
Figura 4.55 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H5.....	69
Figura 4.56 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H5.....	69
Figura 4.57 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H5.....	69
Figura 4.58 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H5.....	70
Figura 4.59 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 5 da classe H5.....	70

Figura 4.60 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H5.....	71
Figura 4.61 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H6.....	71
Figura 4.62 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H6.....	72
Figura 4.63 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H6.....	72
Figura 4.64 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H6.....	72
Figura 4.65 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H6.....	73
Figura 4.66 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 6 da classe H6.....	73
Figura 4.67 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H6.....	74
Figura 4.68 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H6.....	74
Figura 4.69 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H6.....	74
Figura 4.70 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H6.....	75
Figura 4.71 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 5 da classe H6.....	75
Figura 4.72 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 6 da classe H6.....	75
Figura 4.73 –Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H6.....	76
Figura 5.1 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião para um pavimento com 10-cm de espessura da camada betuminosa e 60-Mpa do módulo de rigidez da fundação.....	77
Figura 5.2 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião.....	78
Figura 5.3 - Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa.....	78

Figura 5.4 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião para um pavimento com 10-cm de espessura da camada betuminosa e 60-Mpa do módulo de rigidez da fundação.....	79
Figura 5.5 - Influência dos veículos sobrecarregados no fator camião.....	79
Figura 5.6 - Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa.....	80
Figura 5.7 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião para um pavimento com 10-cm de espessura da camada betuminosa e 60-Mpa do módulo de rigidez da fundação.....	81
Figura 5.8 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião.....	81
Figura 5.9 - Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa.....	82
Figura 6.1 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	83
Figura 6.2 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	83
Figura 6.3 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	84
Figura 6.4 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	84
Figura 6.5 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	85
Figura 6.6 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	85
Figura 6.7 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	86
Figura 6.8 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	86
Figura 6.9 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	87
Figura 6.10 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	87
Figura 6.11 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	88
Figura 6.12 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante.....	88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Classes de veículos e caracterização dos eixos.....	14
Tabela 2.2- Classes dos veículos e peso máximo por eixo.....	15
Tabela 2.3 - Caracterização dos veículos pesados.....	16
Tabela 2.4- Pesos máximos dos veículos pesados (Portaria 1092/97)	17
Tabela 2.5 - Pesos máximos para diferentes tipos de eixo (Portaria 1092/97)	19
Tabela 2.6 – Valores dos coeficientes k e α , de acordo com a Equação 2.9, para o método Francês (LCPC, 1994).....	22
Tabela 2.7 - Parâmetro em função do tipo de eixo para a equação 2.12 – AP.....	24
Tabela 2.8 - Constantes para a equação 2.12.....	24
Tabela 3.1 – Pavimento em estudo.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NAEP	= Número Acumulado de eixos equivalentes ao Eixo Padrão
P	= Carga dum rodado
a	= Raio do círculo de aplicação duma carga
q	= Pressão (carga distribuída)
τ_t	= Tensão tangencial na superfície do pavimento
ΔT	= Variação da temperatura
BD	= Betão betuminoso em camada de desgaste
MB	= Macadame betuminoso em camada de regularização
BG	= Base granular
SbG	= Sub-base granular
E	= Módulo de deformabilidade
ν	= Coeficiente de Poisson
e	= Espessura duma camada
AASHO	= American Association of State Highways Officials
N1	= Numero de passagens de um eixo simples, com carga P1
N12	= Numero de passagens de um eixo simples, com carga P2
Np	= Numero de eixos-padrão
NEEP	= Número de eixos equivalentes ao eixo-padrão
NAVP	= Número acumulado de veículos pesados
fm	= Agressividade média
c	= Fator camião
γ	= Fator de agressividade
Pi	= carga do eixo real (kN)
Pr	= carga do eixo de referencia (kN)
α	= Coeficiente de potenciação, em função da rigidez da estrutura do pavimento
Hasp	= Espessura da camada betuminosa (m)

Hgra	= Espessura da camada granular (m)
Easp	= Modulo de deformabilidade da camada betuminosa (MPa)
EALF	= Fator equivalente à carga no eixo
ESAL	= Carga de eixo único equivalente
Esubg	= Modulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa)
AP	= Fator em função do tipo de eixo e rodado
Egra	= Módulo de deformabilidade da sub-base (Mpa)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

Uma rede rodoviária deve constituir uma infraestrutura promotora do desenvolvimento e da qualidade de vida (FEHRL, 2004). Neste contexto, é necessário que um pavimento rodoviário, como infraestrutura principal da rede, conserve determinados padrões de qualidade funcional e estrutural durante o período para o qual é dimensionado, habitualmente 20 anos.

Com a preocupação de garantir que o pavimento não apresente degradações que comprometam a comodidade, segurança e economia da circulação rodoviária durante o período de vida útil, é necessário considerar vários fatores no processo de dimensionamento, tais como: ações do tráfego solicitante previsto, condições climáticas, constituição e características mecânicas dos materiais das camadas e características da fundação.

Para a conceção de uma superfície de rolamento para veículos que garanta a observação dos condicionalismos referidos anteriormente, é necessário definir o número de camadas, respetivo material, condições de ligação e espessura. Apesar da simplicidade descrita do processo, a sua aplicação a pavimentos rodoviários é complexa, em virtude de o tráfego solicitante ser extremamente variado e difícil de caracterizar, sendo um elemento-chave para o dimensionamento de pavimentos.

O tráfego é constituído por um número de diferentes tipos de veículos com características distintas e diferentes cargas. Agrupado em onze classes, e composto por veículos que vão desde os ligeiros até aos pesados, é caracterizado pelo agrupamento dos seus eixos individuais (eixos simples, eixos duplos e eixos triplos), valores de carga por eixo (Decreto-Lei n.º 133/2010 de 22 de dezembro), e tipo de rodas (pneus de roda simples e pneus de roda dupla).

As ações do tráfego solicitante (volume, composição, intensidade, condições de aplicação da carga e velocidade) são a principal causa de degradações nos pavimentos (Sousa et al., 2002).

Os esforços produzidos nas camadas dos pavimentos, pela passagem de uma grande quantidade de veículos pesados, com curto espaço de tempo entre cada carregamento, não

permitem a possibilidade dos pavimentos (sobretudo os de tipo flexível) recuperarem da ação induzida (tensões induzidas pelo tráfego). Em consequência, vão ocorrer progressivas alterações dos materiais constituintes do pavimento, manifestando-se por determinadas degradações, em que as quais vão determinar a redução da sua qualidade. O fendilhamento por fadiga é considerado como a principal degradação, provocada pelo tráfego, como comprovam os trabalhos de investigação efetuados (de Bondt, 1995) (Pais, 1999) (Sousa et al., 2002).

A ocorrência e evolução de diversos tipos de degradações é acelerada, devido ao acréscimo imprevisto do tráfego que circula com cargas acima do limite legal. Esta situação implica um aumento nos custos de reabilitação do pavimento, de forma a conservar os níveis de qualidade pretendidos (Zaghloul e White. 1994).

Através de postos de pesagem instalados em vários locais de uma rede rodoviária, pode ser feita, para certos volumes de tráfego, uma estimativa do número e das cargas médias dos respetivos eixos, possibilitando, portanto, a avaliação do número de passagens de um eixo-padrão equivalente a uma passagem de um veículo pesado. A esse número é chamado “fator de agressividade” do veículo pesado. Através do conhecimento das cargas exatas que circulam na atualidade, é possível investigar o impacto dos veículos que circulam sobrecarregados. Neste âmbito, julga-se de todo o interesse o estudo dos dados de tráfego.

A investigação subjacente a este trabalho baseia-se na possibilidade de adotar um correto fator de agressividade no dimensionamento dos pavimentos rodoviários do tipo flexível, obter a espessura do pavimento através do tráfego solicitante, e prever as classes de veículos que provocam maior dano.

1.2 Objetivos e metodologia

Esta dissertação, intitulada de “Avaliação da agressividade do tráfego pesado”, tem como objetivo investigar o impacto das sobrecargas do tráfego nos pavimentos rodoviários flexíveis. A investigação envolveu uma parte de pesquisa bibliográfica, importante para a compreensão do tema, e uma parte de análise numérica para a avaliação da agressividade. Para atingir o objetivo proposto, foi necessário:

- Recorrer a uma campanha de pesagem de veículos pesados, que integra diferentes tipos de veículos, constituídos por diferentes tipos de eixos, número de rodas por eixo e valores de carga por eixo;
- Efetuar uma análise dos dados de tráfego, em termos de carga média observada por eixo para cada tipo de veículo, percentagem de veículos com excesso de carga e percentagem de veículos pertencente a cada uma das classes de tráfego;
- Conhecer o impacto das sobrecargas nos pavimentos rodoviários flexíveis através do estudo do fator camião para diferentes tipos de veículos.

A avaliação da agressividade do tráfego pesado, com dados reais, permite reunir um conjunto de informações essenciais para um melhor entendimento do efeito provocado pelo tráfego sobrecarregado. Através do estudo efetuado será possível obter dados concretos que permitam ampliar o conhecimento nesta temática, e desenvolver novas metodologias a aplicar no dimensionamento de pavimentos, bem como obter resposta a questões como:

- Se não circulassem veículos pesados com excesso de carga qual seria a agressividade do tráfego?
- Como evolui a agressividade em cada tipo de veículo?
- Qual a classe de veículos que mais contribui para a redução da qualidade do pavimento?
- Conhecendo o tráfego solicitante, qual a espessura da camada betuminosa apropriada para o pavimento?

1.3 Organização da dissertação

A elaboração deste documento exhibe a continuidade que foi dada ao plano de trabalhos elaborado na preparação da dissertação de mestrado. Encontram-se descritos de seguida, de forma sucinta, os cinco capítulos que o compõem.

O Capítulo 1 é composto pela introdução ao problema em estudo, fundamentando a necessidade que existe em efetuar uma avaliação rigorosa da agressividade do tráfego pesado em pavimentos flexíveis. Encontram-se também descritos os objetivos propostos a alcançar através da investigação efetuada.

O Capítulo 2 é formado por uma síntese bibliográfica relativa ao dimensionamento de pavimentos, particularmente os métodos que compõem o cálculo da agressividade do tráfego pesados em pavimentos flexíveis. É apresentada uma caracterização das solicitações dos pavimentos rodoviários, com especial foco para a caracterização do tráfego.

No Capítulo 3 apresenta-se uma abordagem generalizada sobre a metodologia aplicada para o cálculo e análise da agressividade do tráfego pesado.

O Capítulo 4 é constituído pelo cálculo da agressividade e respetiva análise, para os eixos dos veículos das diferentes classes.

O Capítulo 5 é composto pela análise do tráfego observado, através do método da 4ª Potência, método Francês e método JPais.

O Capítulo 6 é constituído pela análise da espessura do pavimento, através do método da 4ª Potência, método Francês e método JPais.

O Capítulo 7 inclui as conclusões obtidas do presente estudo e sugestões de prosseguimento do trabalho efetuado.

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

2 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

2.1 Introdução

Com o intuito de efetuar uma avaliação da agressividade do tráfego pesado em pavimentos rodoviários flexíveis, é de todo o interesse proceder a uma abordagem generalizada sobre os aspetos principais relacionados com o dimensionamento de pavimentos e as solicitações a que estes ficam sujeitos.

Ao estabelecer o dimensionamento de um pavimento, é necessário se considerar determinados fatores, de forma ao pavimento não apresentar degradações que comprometam a comodidade, segurança e economia da circulação rodoviária, durante o período de vida útil, tais como: tráfego solicitante, condições geotécnicas; condições climáticas e características mecânicas dos materiais das camadas. O dimensionamento consiste genericamente no seguinte processo:

- Definição das ações (tráfego (NAEP) e condições climáticas (temperatura das misturas betuminosas);
- Adoção de uma estrutura inicial (estabelecimento das espessuras das camadas e composição dos materiais);
- Determinação do número de eixos-padrão que vai solicitar o pavimento durante a vida útil (20 anos);
- Cálculo da rigidez do betume;
- Cálculo do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas;
- Cálculo do módulo de deformabilidade do solo de fundação;
- Cálculo do módulo de deformabilidade da sub-base;
- Cálculo do estado de tensão deformação;
- Determinação do número de eixos padrão que o pavimento suporta para o critério de fadiga e para o critério de deformação permanente;
- Comparação da vida do pavimento com o tráfego de projeto, devendo o dano estar compreendido entre 80 e 100%;

- Ajustamento da estrutura adotada nas suas dimensões ou com recurso a materiais com outras características até se verificar o dano pretendido (dimensionamento conveniente).

Resumidamente, o processo de formulação de um pavimento rodoviário tem como base, a análise mecânica da estrutura do pavimento através do cálculo dos estados de tensão/deformação nos diferentes materiais constituintes das camadas e respetiva fundação. Nesse cálculo é considerada a aplicação de uma carga correspondente à passagem do eixo padrão, representativo do tráfego pesado que solicita a estrutura do pavimento. Apesar do processo descrito, ser aparentemente simples, a sua aplicação a pavimentos rodoviários é complexa.

Neste estudo, será abordado somente um dos pontos do processo de formulação aplicado aos pavimentos rodoviários, o tráfego solicitante, extremamente variado e difícil de caracterizar (composto por veículos que vão desde os ligeiros até aos camiões articulados com reboque de diversos eixos e cargas por eixo).

2.2 Constituição e comportamento dos pavimentos

Os pavimentos rodoviários são classificados em três tipos, em função dos materiais constituintes e deformabilidade: flexíveis, semirrígidos e rígidos. Os pavimentos flexíveis são constituídos por uma camada superior de material betuminoso e a inferior por material granular, exibindo elevada deformabilidade. Os pavimentos semirrígidos apresentam na constituição das camadas superiores material betuminoso e as subjacentes por material hidráulico. Os pavimentos rígidos, apresentam uma camada superior formada por materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, com deformabilidade reduzida. Neste estudo, será abordado apenas o tipo de pavimento rodoviário flexível.

A constituição de um pavimento rodoviário flexível apresenta duas funções, a estrutural, com a finalidade de diminuir a pressão transmitida ao solo até valores admissíveis, e função funcional, de constituir uma superfície resistente à ação de desgaste dos veículos, confortável e segura. Um pavimento rodoviário flexível, é constituído por várias camadas de espessura finita, apoiadas sobre uma fundação natural, conforme o esquema que se apresenta na Figura 2.1.

A constituição das camadas é formada por uma camada superior, composta por misturas betuminosas e por um conjunto de camadas inferiores, formadas por materiais granulares, assentes sobre uma fundação natural (maciço semi-indefinido). A camada de desgaste e o corpo do pavimento (camadas estabilizadas com ligantes e camadas granulares), desempenham as funções mais importantes.

Na Figura 2.1 são visíveis as ações a que um pavimento é submetido, ações climáticas, amplitudes térmicas, e tráfego (carga por roda, pressão, tensão tangencial).

A par da progressiva redução dos esforços em profundidade, verifica-se uma redução em qualidade e resistências, dos materiais constituintes das camadas do topo para o solo de fundação (Branco et al, 2008).

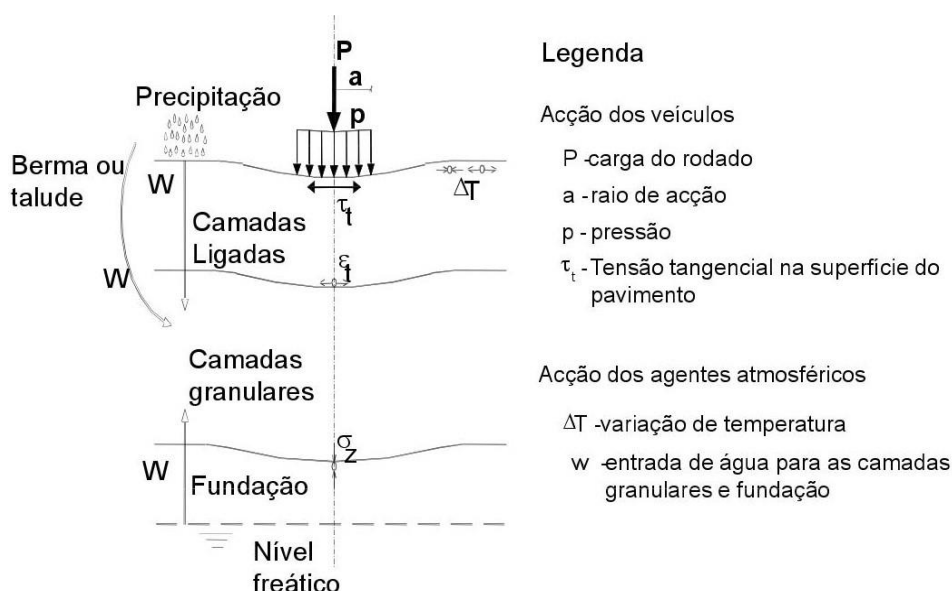


Figura 2.1 – Representação esquemática das solicitações e do comportamento dum pavimento rodoviário flexível (Pereira & Miranda, 1999)

O pavimento é constituído por uma camada superior, inferior e de fundação. A camada superior é constituída por materiais estabilizados com ligantes hidráulicos e hidrocarbonetos, e apresenta resistência à tração. A camada inferior é composta por materiais naturais/granulares estabilizados mecanicamente, que exibem resistência à compressão.

A fundação é formada por terreno natural, que quando não tem as características pretendidas tem de ser adicionada uma camada de solo de melhor qualidade, tratada com ligantes, com a designação de leito de pavimento.

Um dos fatores anteriormente referidos, com grande relevância na avaliação do estado de tensão e de extensão instalado no pavimento, é a carga por rodado, resultante da ação do tráfego.

Como é possível observar na Figura 2.2, um pavimento flexível está dependente dos materiais constituintes de cada camada, das condições de fronteira e características das respetivas interfaces.

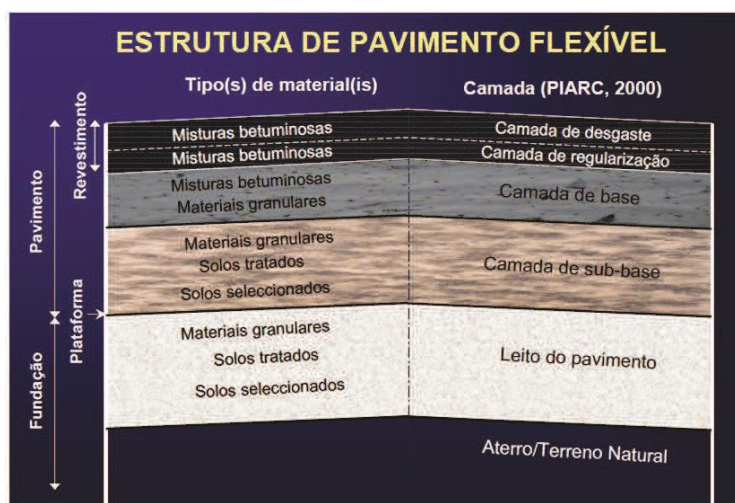


Figura 2.2 – Constituição de um pavimento flexível (LNEC, 2005)

A camada de desgaste possui uma dupla finalidade, função funcional e estrutural, e deve constituir uma superfície regular com rugosidade suficiente, resistência ao desgaste, bem como proteger as camadas inferiores das ações do clima e contribuir para a resistência global das estruturas.

A camada de regularização apresenta função estrutural e de regularização da superfície da camada de base.

A camada de base deve consistir um suporte regular e resistência para a camada de desgaste, e repartir os esforços verticais devido às cargas, para diminuir as tensões sobre o solo de fundação, para evitar assentamentos diferenciais ou a sua rutura.

Por sua vez, a sub-base, com funções idênticas às da base, como transição entre a base e a fundação, deve 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.

A fundação, solo de estabilização mecânica superficial, forma o leito do pavimento.

O estado resultante da ação do tráfego num pavimento rodoviário é apresentado na Figura 2.3.

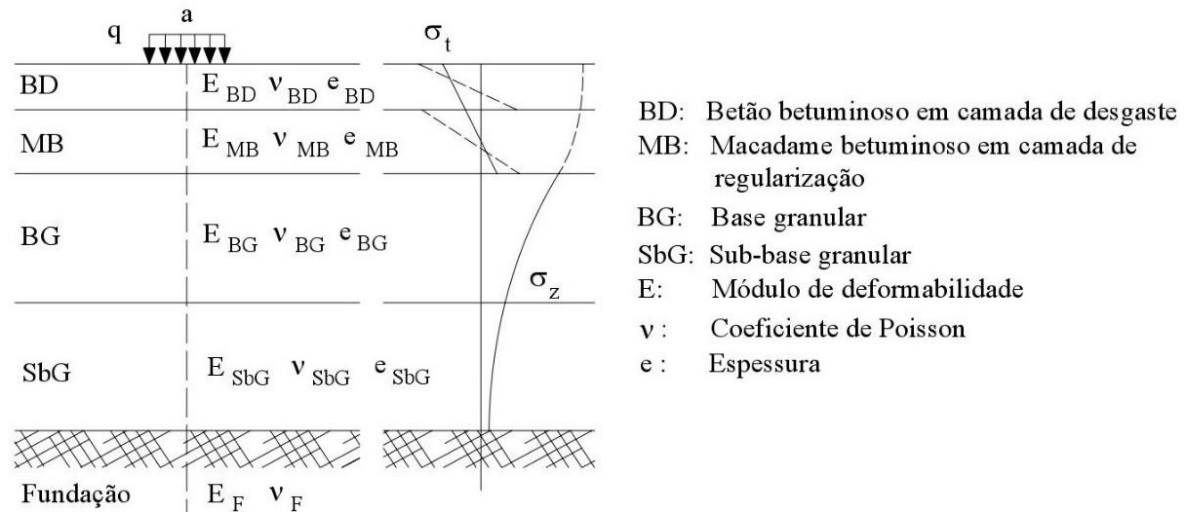


Figura 2.3 – Constituição típica dum pavimento flexível e estado de tensão resultante do carregamento do tráfego (Pereira & Picado-Santos, 2002)

As solicitações suportadas pelo pavimento, devido à aplicação de cargas sobre a sua estrutura, resultam em esforços de tensão e deformação (Figura 2.4). Nas camadas estabilizadas com ligantes, tensões e extensões de tração, e nas camadas granulares e fundação, extensões de compressão, na vertical da carga.

Em suma, a resposta estrutural do pavimento às cargas e ações a que é sujeito, depende das respetivas condições de fronteira entre as camadas, e as características dos materiais de cada uma.

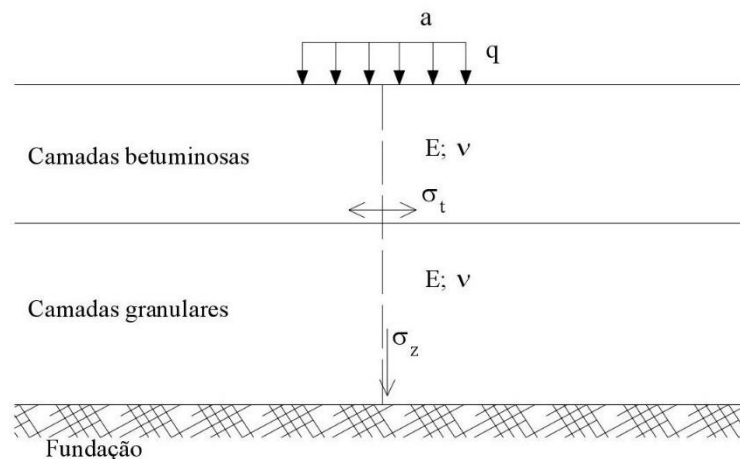


Figura 2.4 – Zonas críticas de ocorrência de esforços num pavimento flexível devido ao carregamento do tráfego (adaptado de Pereira & Picado-Santos, 2002)

2.3 Dimensionamento de pavimentos

Os pavimentos rodoviários são dimensionados, tendo em consideração a solicitação do tráfego, as condições climáticas (temperatura e teor em água nas camadas não tratadas do pavimento e solo de fundação, determinantes no comportamento dos materiais), os modelos de comportamento dos pavimentos (complexos, em que a sua validade depende fortemente da fiabilidade da caracterização das ações, carga por eixo e condições climáticas), e por fim a caracterização mecânica dos materiais (constituintes do pavimento e da sua fundação).

Até ao ano de 1920, não existia qualquer modelo preconizado para o dimensionamento de um pavimento, em consequência das cargas atuantes serem pouco intensas. Nesse contexto, foi realizado em 1920, o primeiro ensaio rodoviário em grande escala, em Illinois, EUA. O conhecimento da contribuição que diferentes materiais apresentavam no comportamento dos pavimentos, permitiu as primeiras indicações das espessuras a utilizar em situações distintas.

Após 20 anos, decorria a II Guerra mundial, e os aeródromos apresentavam um intenso tráfego aéreo militar. Com cargas por roda superiores às convencionais para as estradas da época, observou-se uma rotura rápida dos pavimentos. A necessidade de considerar o efeito de repetição das cargas na capacidade de suporte impulsionou o desenvolvimento de um método empírico de dimensionamento.

O constante crescimento do tráfego, observado no período do pós-guerra, impulsionou a realização de dois grandes ensaios de pavimentos à escala real e com tráfego real nos EUA,

WASHO (HRB, 1955) e AASHO (HRB, 1962). Esse conhecimento, divulgado numa conferência internacional em Ann Arbor (1962) permitiu um enorme avanço no dimensionamento de pavimentos.

Anos mais tarde, ficariam estabelecidos em Ann Arbor (1977), dois métodos de dimensionamento que integravam modelos de comportamento dos materiais e do pavimento no seu conjunto, aliados à experiência resultante da observação do comportamento real dos pavimentos, Shell (Claessen et al., 1977) e Universidade de Nottingham (Brown et al., 1977). Na grande maioria dos países desenvolvidos, foram adotados estes dois métodos empírico-mecanicistas.

Para além dos métodos empírico-mecanicistas, existem alguns de aplicação mais simples, como é o caso em Portugal, do “Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional” (JAE, 1995), e do Manual de Dimensionamento da AASHTO (ASSHTO, 1993), baseado no conceito de “desempenho em serviço”.

Do ponto de vista estrutural, um pavimento deve resistir e distribuir ao solo de fundação, os esforços transmitidos pelas forças tangenciais (necessárias ao rolamento dos veículos ou resultantes de derrapagem e travagem), ações tangenciais (com influencia na evolução da regularidade e textura da superfície), e as mais determinantes no comportamento dos pavimentos, as ações verticais (associadas ao peso, sob a forma de pressão uniforme, exercida na superfície de contacto).

A parte inferior da camada betuminosa, é o local onde se instalam as maiores extensões de tração, e que determinam a rotura por fadiga à tração da camada. Na Figura 2.5, encontra-se representada a distribuição das tensões verticais e horizontais das camadas de um pavimento. Na Figura 2.6, é possível observar o efeito da deflexão de um pavimento sob ação do tráfego, resultando em tensões de compressão e de tração nas camadas ligadas.

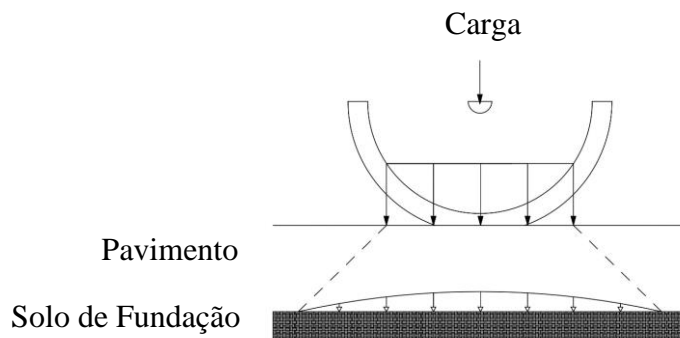


Figura 2.5 – Distribuição das tensões verticais devido à passagem de uma roda

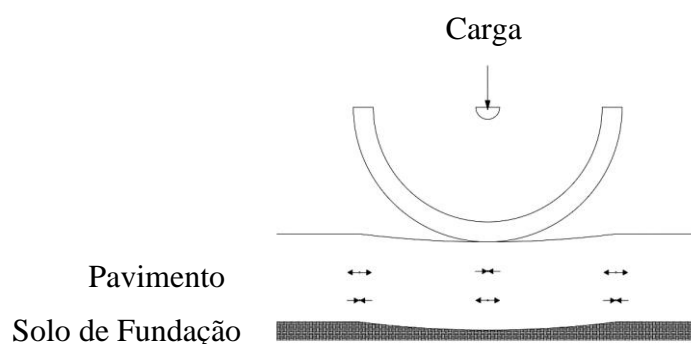


Figura 2.6 – Deflexão do pavimento sob ação do tráfego, com representação das tensões de compressão e de tração nas camadas ligadas

A determinação do estado de tensão/extensão tem como objetivo calcular o estado de tensão e deformação no pavimento. Ao determinar os valores das extensões máximas é possível verificar os critérios de ruína, considerados no dimensionamento. Estes critérios correspondem aos limites máximos de extensão de tração e de compressão vertical nas camadas ligadas e na fundação (Branco et al, 2008). O dimensionamento pretende limitar o assentamento à superfície do pavimento durante a vida de projeto, e limitar o fendilhamento devido à fadiga por tração nas camadas com coesão, até ao final da vida projeto.

Através dos valores das extensões (extensão radial de tração e extensão vertical de compressão), é possível determinar o número acumulado de eixos equivalentes ao eixo padrão que solicitarão o pavimento durante a vida útil, para os critérios de fadiga e deformação permanente.

Com o número de eixos padrão (obtidos para o tráfego de projeto) e o número de eixos padrão admissíveis, obtém-se o dano. A expressão 2.1, permite avaliar se a estruturada do pavimento está bem dimensionada, sobredimensionada ($D < 80\%$), ou subdimensionada ($D > 100\%$).

$$D = \frac{N_p}{N_a} * 100 \quad (2.1)$$

Onde: D = Dano;

N_p = Número de eixos padrão admissíveis;

N_a = Capacidade resistente do pavimento (em eixos-padrão).

2.4 Tráfego pesado

O pavimento rodoviário é dimensionado para um período de dimensionamento de 20 anos, mas nem sempre cumpre essa função devido a vários fatores. De forma a garantir comodidade e segurança aos condutores, são dispensadas grandes quantias monetárias para conservar os pavimentos, através da sua reabilitação.

O comportamento de um pavimento depende de vários fatores, tais como as características da sua estrutura (materiais e espessura de cada camada), a qualidade da construção, as condições climáticas (temperatura e teor em água) e a capacidade de fundação.

Contundo, o principal responsável por danos significativos nos pavimentos é o trafego, concretamente os veículos que circulam com cargas acima da legal admitida. Quando pelo menos um eixo tem uma carga que é maior do que o máximo permitido para esse eixo, ocorre uma sobrecarga. Para o dimensionamento dos pavimentos rodoviários apenas é considerado o efeito do tráfego de veículos pesados.

2.4.1 Caracterização do tráfego

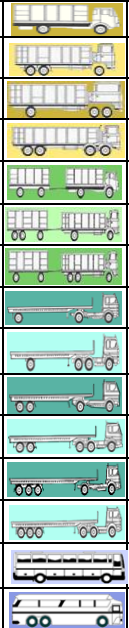












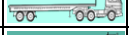


O tráfego é caracterizado através do seu volume, composição, intensidade, condições de aplicação da carga e velocidade.

Constituído por uma larga gama de veículos, com diferentes números de eixos, agrupamento dos seus eixos individuais (eixos simples, eixos duplos e eixos triplos), e combinações de vários tipos, em Portugal encontram-se agrupado em 11 categorias, de “a” a “k”.

Consideram-se veículos pesados os que pertencem às classes “f”, “g”, “h”, “i”, “j” e “k”. A classe F inclui os camiões. a classe G inclui os camiões com atrelado. A classe H inclui os semirreboques. A classe I inclui os autocarros.

Por sua vez, os veículos ligeiros, têm um efeito desprezável sobre o desempenho dos pavimentos.

Tabela 2.1 - Classes de veículos e caracterização dos eixos

Classes de Peso		Tipo de eixo					
		Ex 1	Ex 2	Ex 3	Ex 4	Ex 5	Ex 6
F1		s	s				
F2		s	d	d			
F3		d	d	s			
F4		d	d	d	d		
G1		s	s	s	s		
G2		s	s	s	d	d	
G3		s	d	d	s	s	
H1		s	s	s			
H2		s	d	d	s		
H3		s	s	d	d		
H4		s	d	d	d	d	
H5		s	s	t	t	t	
H6		s	d	d	t	t	t
I1		s	s				
I2		s	d	d			

Como mostra a Tabela 2.1, o tráfego pesado compreende autocarros, camiões com ou sem reboque ou semi-reboque, que transmitem as cargas pelos pneus de roda simples ou dupla, com eixos, simples ou duplos.

As cargas por eixo podem ser verificadas por dois métodos: pesagem estática (veículo parado) e pesagem dinâmica (veículo em movimento). No entanto, a carga dinâmica pode ser diferente da carga estática, por influência da irregularidade do perfil longitudinal.

O peso bruto é dado pela equação:

$$p = \text{carga } (q) + \text{tara } (t) - \text{soma das cargas por eixo} \quad (2.2)$$

Onde: $q = 0.60p$

$t = 0.40p$


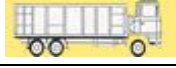

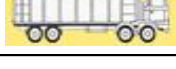

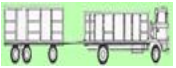







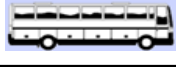
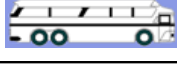
O limite de carga total de um veículo pesado é a soma da carga máxima para cada eixo. As cargas máximas legais por eixo, definidas na Tabela 2.2, correspondem aos valores dos pesos legais em veículos pesados, impostos em Portugal pela Portaria n.º 1092/97 (Diretiva 96/53/CE de 25 de julho de 1996, em vigor na União Europeia).

Tabela 2.2- Classes dos veículos e peso máximo por eixo

Classes de Peso	Carga máxima legal					
	Ex 1	Ex 2	Ex 3	Ex 4	Ex 5	Ex 6
F1	75	120				
F2	75	100	100			
F3	100	100	120			
F4	100	100	100	100		
G1	75	120	100	100		
G2	75	120	100	100	100	
G3	75	100	100	100	100	
H1	75	120	100			
H2	75	100	100	100		
H3	75	120	100	100		
H4	75	100	100	100	100	
H5	75	120	80	80	80	
H6	75	100	100	80	80	80
I1	75	120				
I2	75	100	100			

Quanto ao tipo de roda de cada eixo, a Tabela 2.3 apresenta os tipos mais habituais sem prejuízo de que possa ser diferente em alguns tipos de veículo e fabricante.

Tabela 2.3 – Caracterização dos veículos pesados

Classes de Veículos		N.º de Eixos	Peso Bruto (t)	Caracterização
F1		2	19	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2- eixo simples/roda dupla (ESRD)
F2		3	26	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2 e E3- eixo duplo/roda dupla (EDRD)
F3		3	26	E1 e E2- eixo duplo/roda simples (EDRS)
				E3- eixo simples/roda dupla (ESRD)
F4		4	32	E1 e E2- eixo duplo/roda simples (EDRS)
				E3 e E4- eixo duplo/roda dupla (EDRD)
G1		4	37	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2- eixo simples/roda dupla (ESRD)
				E3- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E4- eixo simples/roda simples (ESRS)
G2		5	40	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2- eixo simples/roda dupla (ESRD)
				E3- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E4 e E5- eixo duplo/roda simples (ESRS)
G3		5	40	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2 e E3- eixo duplo/roda dupla (EDRD)
				E4- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E5- eixo simples/roda simples (ESRS)
H1		3	29	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2- eixo simples/roda dupla (ESRD)
				E3- eixo simples/roda dupla (ESRD)
H2		4	38	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2 e E3- eixo duplo/roda dupla (EDRD)
				E4- eixo simples/roda dupla (ESRD)
H3		4	38	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2- eixo simples/roda dupla (ESRD)
				E3 e E4- eixo duplo/roda simples (EDRS)
H4		5	40	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2 e E3- eixo duplo/roda dupla (ESRD)
				E4 e E5- eixo duplo/roda simples (EDRS)
H5		5	40	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2- eixo simples/roda dupla (ESRD)
				E3, E4 e E5- eixo triplo/roda simples (ETRS)
H6		6	40	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2 e E3- eixo duplo/roda dupla (EDRD)
				E4, E5 e E6- eixo triplo/roda simples (ETRS)
I1		2	19	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2- eixo simples/roda dupla (ESRD)
I2		3	26	E1- eixo simples/roda simples (ESRS)
				E2 e E3- eixo duplo/roda dupla (EDRD)

De forma a minimizar o efeito que as cargas por eixo dos veículos pesados, provocam nos pavimentos, foi imposto em Portugal, também pela Portaria n.º 1092/97 (Diretiva 96/53/CE de 25 de julho de 1996, em vigor na União Europeia), os pesos máximos para os diversos veículos pesados de diferentes tipos de eixo (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Pesos máximos dos veículos pesados (Portaria 1092/97)

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 - semi-reboque	
De 3 eixos	29
De 4 eixos	38
De 5 ou mais eixos	40
De 5 ou mais eixos transportando um contentor ISSO 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

2.4.2 Caracterização da agressividade dos veículos pesados

Os estados de tensão e deformação no pavimento, resultantes das cargas dos eixos dos veículos, são difíceis de tratar adequadamente ao dimensionar os pavimentos. Embora nos anos 50 do séc. XX em Michigan-EUA foi realizado um ensaio rodoviário à escala real (HBR, 1962), designado por ensaio AASHO (American Association of State Highways Officials).

O ensaio AASHO, permitiu concluir que, para cada tipo de pavimento, há uma relação entre os efeitos destruidores dos eixos com diferentes cargas, traduzida por uma expressão:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^X = f \quad (2.3)$$

Em que N_1 é o número de passagens de um eixo simples de carga P_1 , que provoca no pavimento um dano análogo ao de N_2 passagens de um simples de carga P_2 .

O coeficiente “ f ”, traduz o “coeficiente de equivalência” entre os eixos, e exprime o número de passagens do eixo P_1 que provoca o mesmo dano de uma passagem do eixo P_2 .

Para efetuar a análise estrutural do pavimento, é necessário que definir a geometria das cargas que atuam sobre o pavimento. O eixo padrão considerado no dimensionamento de pavimentos, é um eixo simples, que possui em cada extremo um rodado duplo, com duas rodas gémeas que estão afastadas uma da outra a uma distância “ L ”, como mostra a Figura 2.7. O carregamento induzido pelo rodado sobre o pavimento rodoviário, é feito numa área de contacto entre a roda e o pavimento aproximadamente elíptica.

Os esforços induzidos nos pavimentos pelos eixos de veículos pesados definidos através do eixo padrão, apresentam uma geometria característica. Estes esforços são verticais, entre o pneumático e a superfície de contacto, e tangenciais, associados ao rolamento do veículo e à ocorrência de travagem e derrapagem.

Existem diferentes métodos de análise do estado de tensão/deformação nos pavimentos rodoviários, em que cada um apresenta diferentes geometrias de carga. No caso do método da Shell e Nottingham, considera-se um eixo padrão de 80kN, no entanto se este tiver o valor de 130kN, é usual a utilização dos seguintes dados:

- Shell:

$$L= 105\text{mm}, p = 0.6\text{MPa e } r \approx 105\text{mm}$$

- Nottingham:

$$L= 150\text{mm}, p = 0.5\text{MPa e } r \approx 113\text{mm}$$

- Para o eixo-padrão de 130kN:

$$L= 125\text{mm}, p = 0.662\text{MPa e } r \approx 125\text{mm}$$

Quanto às cargas máximas por eixo, estas são definidas na Portaria 1092/97 (Tabela 2.5).

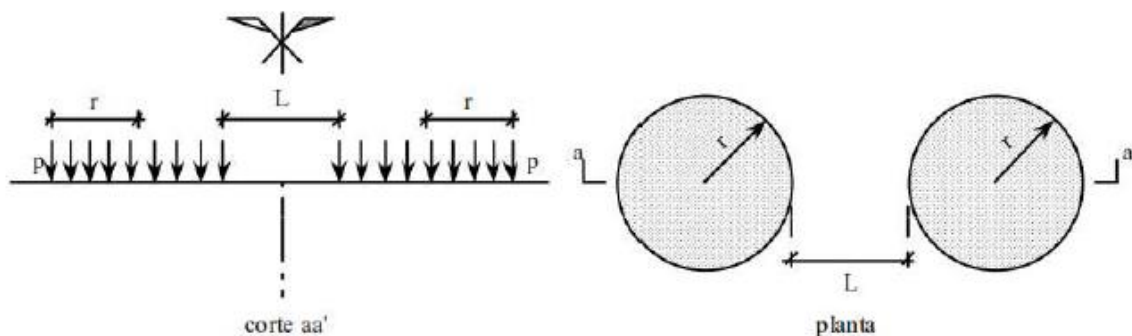


Figura 2.7 - Esquemática adotada para a ação de um eixo-padrão sobre o pavimento (Branco)

Tabela 2.5 – Pesos máximos para diferentes tipos de eixo (Portaria 1092/97)

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:	$d < 1.0\text{m}$	12
	$1.0\text{m} < d < 1.3\text{m}$	17
	$1.0\text{m} \leq d < 1.3\text{m}$	19
	$d \geq 1.0\text{m}$	20
Eixo triplo e não motor se a distância (d) entre eixos for:	$d < 2.6\text{m}$	21
	$d \geq 2.6\text{m}$	24

Uma frequente solicitação do pavimento por parte do tráfego, provoca degradação, como deformações, fendilhamento e desagregação da camada de desgaste.

Num estudo realizado em Portugal (Lima et al., 1999), foi possível avaliar a agressividade dos pesos de eixos registados num certo posto da rede rodoviária principal de Portugal. Resultou deste estudo, algumas inferências que sugerem que no tratamento da agressividade dos eixos para a transformação em eixos-padrão se deve ser mais conservador do que é geralmente aceite. Dentro desta temática, serve o presente caso de estudo, para avaliar a agressividade, e o efeito das sobrecargas do tráfego no dimensionamento de pavimentos.

Como já foi referido anteriormente, um dos principais fatores para o dimensionamento de um pavimento rodoviário é a definição das ações solicitantes (tráfego (NAEP)). O tráfego

resultante das previsões efetuadas é convertido posteriormente no número equivalente de eixos padrão.

Como tal é necessário determinar o número acumulado de eixos equivalentes ao eixo-padrão, NAEP.

Os estudos de previsão de tráfego englobam análise do trafego existente na região, previsão do trafego que a nova estrada irá atrair ou gerar e a previsão da evolução futura do tráfego na estrada e nas suas ligações com outras estradas. No caso de se tratar de uma reabilitação, de uma estrada existente, é possível já prever qual o tráfego que a utiliza.

O número acumulado de veículos pesados que solicita a estrada durante o período de vida útil, determina-se através dos processos de previsão de tráfego, analisando o trafego existente na região, previsão do trafego que a nova estrada irá atrair ou gerar e previsão futura do trafego na estrada, ate ao final da vida útil. O NAEP para “n” anos e uma taxa de crescimento do tráfego “t” é dado por:

$$NAEP = NEEP * 365 * \frac{((1+t)^n - 1)}{t} \quad (2.4)$$

Onde: TMDAvp = tráfego médio diário anual de veículos pesados na via de projeto

n: número de anos do período de vida do pavimento;

t: taxa de crescimento anual do tráfego.

A determinação da agressividade média, “fm”, para o caso do tráfego ser caracterizado por classes, é dada pela expressão:

$$fm = \frac{\sum(\%*fi)}{100} \quad (2.5)$$

O cálculo do fator camião, “c”, considerando n, o número médio de eixos por veículo pesado, é expresso através de:

$$c = fm * n \quad (2.6)$$

Onde: n = número médio de eixos por veículo pesado.

Com o número acumulado de veículos pesados, “NAVP”, que a estrada solicita, e o fator caminhão, “c”, determina-se o número acumulado de eixos equivalentes ao eixo-padrão, “NEEP”:

$$NAEP = NAVP * c \quad (2.7)$$

2.4.3 Cálculo da agressividade

Através de postos de pesagem instalados em vários locais de uma rede rodoviária, pode ser feita, para certos volumes de tráfego, uma estimativa do número e das cargas médias dos respetivos eixos, possibilitando, portanto, a avaliação do número de passagens de um eixo-padrão equivalente a uma passagem de um veículo pesado. A esse número é chamado “fator de agressividade” do veículo pesado.

Num estudo realizado em Portugal (Lima et al., 1999), foi possível avaliar a agressividade dos pesos de eixos registados num certo posto da rede rodoviária principal de Portugal. Resultou deste estudo, algumas inferências que sugerem que no tratamento da agressividade dos eixos para a transformação em eixos-padrão se deve mais conservador do que é geralmente aceite.

O método da 4ª Potência, permite determinar a relação entre o dano provocado pelos eixos com diferentes cargas, para cada tipo de pavimento, ao converter as cargas por eixo para um número equivalente de cargas, através da Equação 2.8.

$$\gamma = \left(\frac{Px}{P80}\right)^\alpha \quad (2.8)$$

onde: Px = carga do eixo real (kN)

P80 = carga do eixo de referência (kN)

α = coeficiente em função do tipo de pavimento

Os diferentes métodos para o cálculo do número equivalente de cargas por eixo, falharam por não considerarem o tipo de eixo, sendo que apenas consideravam a carga total dos eixos.

Para os eixos tandem e eixos tridem, a distância entre os eixos no grupo tem um efeito importante no estado de esforço e tensão do pavimento e, portanto, um efeito importante sobre a fator de equivalência da carga. Este efeito é considerado no manual de dimensionamento de

pavimentos Francês (LCPC 1994), onde o número de cargas equivalentes a um eixo (EALF), é expresso pela Equação 2.9.

$$EALF = k * \left(\frac{Px}{P80}\right)^\alpha \quad (2.9)$$

onde: Px = carga do eixo real (kN)

$P80$ = carga do eixo de referencia (kN)

k = coeficiente em função do tipo de eixo (Tabela 2.6)

α = coeficiente em função do tipo de pavimento (Tabela 2.6)

Tabela 2.6 – Valores dos coeficientes k e α , de acordo com a Equação 2.9, para o método Francês (LCPC, 1994)

Tipo de pavimento	α	k		
		Eixo simples	Eixo duplo	Eixo triplo
Pavimento Flexível	5	1	0.75	1.1
Pavimentos semirrígidos e rígidos	12	1	12	113

Este método não considera o efeito do tipo de pneu, seja tipo de roda simples ou dupla, o que tem uma importante influência sobre o cálculo do EALF. O coeficiente em função do tipo de eixo, não tem em conta a variedade de pavimentos flexíveis, quer em termos de espessura, quer em termos de rigidez das camadas do pavimento.

O relatório do projeto SPENS (Kokot e Gaspar2009) resume os modelos utilizados para definir o fator de equivalência da carga para vários países da Europa.

O único fator que considera o efeito do tipo de roda é o método Esloveno, definido através da Equação 2.10.

$$EALF = 10^{-8} * f0 * (fk * Lstat)^4 \quad (2.10)$$

onde: $f0$ = fator de distribuição dos eixos (simples = 2.212; tandem = 1.583)

fk = fator de distribuição da roda (único = 1; duplo = 0.9)

$Lstat$ = carga estática do eixo do veículo (kN).

Estudos de FHWA (2001) e Consultores ERES (2001) demonstraram os efeitos do tipo de esforço, critérios de rotura e outros parâmetros nos fatores de equivalência ou dano usado para calcular o número equivalente de cargas por eixo.

Zaghloul e White (1994) estudaram o efeito das cargas pesadas na rede rodoviária Indiana e desenvolveram o fator equivalente de carga por eixo, com base em uma abordagem analítica, considerando a deformação permanente de pavimentos flexíveis.

Hong et al. (2006) e Prozzi et al. (2007), mostraram que o EALF determinado, coincidia como em outros métodos de dimensionamento de pavimentos, através do método mecanicista, usando o critério de rotura com base nas leis de fadiga para fendilhamento e deformação permanente.

Mais recentemente, o método desenvolvido por Pais et al (2016), neste trabalho designado por método JPais, distinto dos anteriores, contempla a constituição do pavimento, tipo de eixo e tipo de rodado. É válido para pavimentos flexíveis compostos por três camadas (camada betuminosa, camada granular e camada de fundação), diferentes espessuras e módulos de rigidez das camadas. A camada betuminosa e a camada granular são definidas pela espessura e rigidez enquanto que a camada de fundação apenas é definida pela sua rigidez. O método JPais é expresso pela Equação 2.11.

$$\gamma = k * \left(\frac{P_i}{P_r}\right)^\alpha \quad (2.11)$$

onde: γ = fator de agressividade

P_i = carga do eixo real (kN)

P_r = carga do eixo de referência (kN)

k = coeficiente em função do pavimento e configuração dos eixos do veículo (Equação 2.12)

$$k = a_1 * (\text{Hasp})^{a_2} * (\text{Hgra})^{a_3} * (\text{Easp})^{a_4} * (\text{Esubg})^{a_5} * \exp(a_6 * AP) \quad (2.12)$$

onde: Hasp - espessura da camada betuminosa (m)

Hgra - espessura da camada granular (m)

Easp - módulo de deformabilidade da camada betuminosa (MPa)

Esubg - módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa)

AP - parâmetro em função do tipo de eixo e rodado (Tabela 2.7)

a_1 até a_6 – coeficientes definidos na Tabela 2.8, para o qual ET é dado pela Equação 2.13.

O coeficiente ET representa a relação entre a espessura e a rigidez das camadas do pavimento, e é determinado pela Equação 2.13.

$$ET = \sqrt[3]{\frac{(H_{asp})^{\alpha 3} * E_{asp} + (H_{gra})^3 * E_{gra}}{E_{subg}}} \quad (2.13)$$

onde: E_{gra} – módulo de deformabilidade da sub-base (Mpa)

Tabela 2.7 - Parâmetro em função do tipo de eixo para a Equação 2.12 - 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

Tabela 2.8 - Constantes para a Equação 2.12

α	ET (m)	a1	a2	a3	a4	a5	a6
3	≤ 1.2	5.02E+00	-7.67E-01	4.57E-02	-2.15E-01	2.37E-01	-1.02E+00
	≥ 1.2	3.51E+00	-2.83E-02	1.89E-03	7.24E-02	-7.56E-02	-9.93E-01
4	≤ 1.3	1.08E+01	-9.41E-01	6.69E-02	-2.85E-01	3.04E-01	-1.41E+00
	≥ 1.3	5.20E+00	3.33E-02	1.82E-03	1.15E-01	-1.17E-01	-1.33E+00
5	≤ 1.4	2.13E+01	-1.10E+00	7.50E-02	-3.37E-01	3.57E-01	-1.80E+00
	≥ 1.4	7.71E+00	1.20E-01	1.82E-03	1.60E-01	-1.60E-01	-1.67E+00
6	≤ 1.5	4.13E+01	-1.27E+00	8.87E-02	-3.84E-01	4.01E-01	-2.19E+00
	≥ 1.5	1.16E+01	1.37E-01	1.77E-03	1.89E-01	-1.89E-01	-2.01E+00

O método JPais apresenta uma maior precisão no valor do coeficiente em função do tipo de pavimento e configuração dos eixos dos veículos. Este método tem aplicação predominante em estudos sobre trechos pré-existentes e em serviço. Para um projeto novo torna-se de aplicação mais elaborada que os anteriores.

3 METODOLOGIA UTILIZADA E DADOS DE TRÁFEGO

3.1 Metodologia de estudo

Com o objetivo de efetuar uma avaliação da agressividade do tráfego pesado em pavimentos rodoviários flexíveis, é de todo o interesse proceder a uma abordagem generalizada sobre a metodologia utilizada para o cálculo da agressividade.

Para o caso em estudo, recorreu-se a uma campanha de pesagem de veículos pesados, que consistia na pesagem dos eixos de todos os veículos pesados que circulavam num determinado trecho de estrada, através de um dispositivo de pesagem dinâmica. A base de dados inclui os respetivos dados de hora, data, tipo de eixos e peso dos eixos dos veículos pesados. Foram três os métodos utilizados para o cálculo da agressividade, o método da 4ª Potência, o Método Francês, e o Método JPais.

Utilizando os três métodos anteriormente referidos, procedeu-se ao cálculo da agressividade do tráfego pesado, aplicando as fórmulas a um pavimento, com os seguintes parâmetros: coeficiente em função do tipo de pavimento de valor igual a 4, espessura da camada betuminosa de 0.05m, módulo de rigidez da camada betuminosa 2000 MPa, módulo de rigidez da camada granular 120 Mpa, e módulo de rigidez da fundação 60 MPa (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Pavimento em estudo

α	Espessura betuminoso (m)	Espessura granular (m)	Módulo betuminoso (MPa)	Módulo granular (MPa)	Módulo fundação (MPa)
4	0.05	0.20	2000	120	60

Através do ficheiro de cálculo inicial, que inclui todos os veículos e respetivas cargas, procedeu-se a uma divisão das pesagens, por classes de veículos. A base de dados inclui as seguintes classes de veículos pesados observadas e analisadas: F1; F2; H1; H3; H4; H5; H6.

Inicialmente foi efetuada uma análise dos dados de tráfego, que incluem a carga média relativa para os vários eixos dos veículos pesados, a percentagem de veículos, a percentagem de veículos em excesso em carga e a percentagem de veículos em cada classe.

A avaliação da agressividade do tráfego pesado foi realizada através do estudo do trafego. O efeito das sobrecargas nos pavimentos foi determinado ao analisar o fator caminhão, separando os veículos sobrecarregados dos veículos com peso legal, expresso pelas seguintes situações:

- Veículo com carga máxima observada em cada eixo;
- Veículo com carga média observada em cada eixo;
- Veículo com carga máxima legal em cada eixo;
- Veículo com o máximo fator caminhão observado;
- Veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal

De acordo com o método JPais, em função do tráfego de projeto, NAEP, é possível perceber a constituição do pavimento, e determinar a espessura da camada betuminosa. Assim, é relevante perceber como a espessura de pavimento varia para os vários valores de tráfego.

Os valores da expressão 3.1, permitem encontrar os coeficientes a, b, c, necessários para o cálculo da espessura de pavimento através do tráfego solicitante.

$$\log(h) = a + b (\log(N))^2 + \frac{c}{\log(N)} \quad (3.1)$$

Para um módulo de deformabilidade da camada betuminosa de 2000 MPa e módulo de deformabilidade do solo de fundação de 60 MPa, as contantes, a, b, c, adotam os seguintes valores:

$$a = 3.04E-01$$

$$b = 3.21E-03$$

$$c = -7.20E+00$$

Através do método da 4ª Potência, Método Francês e Método JPais, é analisada para cada caso a influência dos veículos anteriormente mencionados, no desempenho dos pavimentos, através da comparação dos diferentes resultados obtidos em cada método. A análise de cada um dos três métodos inclui a análise do fator caminhão e a adoção da espessura da camada betuminosa

em função do tráfego. O cálculo da agressividade pressupõe uma relação a um eixo padrão de 80KN. Foi necessário o recurso ao MACOPAV, para a adoção do Ndim.

3.2 Dados do tráfego

O tratamento dos dados de tráfego permitiu recolher várias informações e comparar o efeito do tráfego que circula sobrecarregado e com carga regulamentar.

A análise dos dados de tráfego obtidos, indicou que a carga média em função do tipo de veículo, varia entre 150% e 100% da relação carga média/carga máxima legal (Figura 3.1).

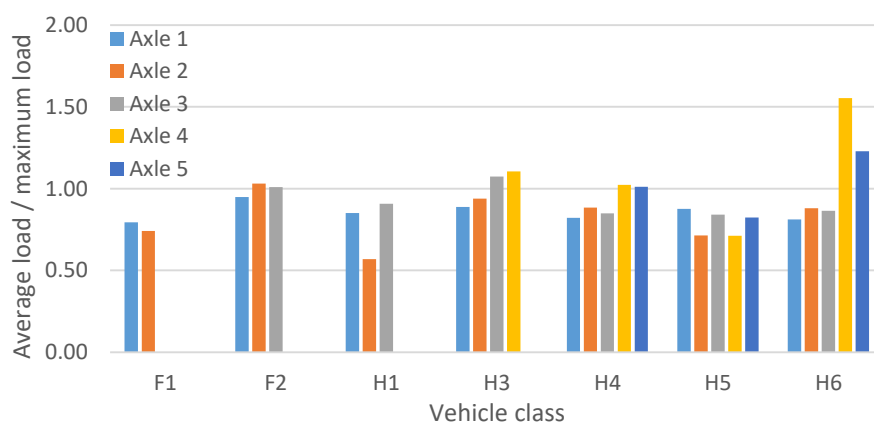


Figura 3.1 – Carga média relativa à carga legal, para os vários eixos dos veículos pesados

A carga média entre eixos das classes F1, F2, H3, H4 e H5 é manifestamente constante, ao contrário das classes H1 e H6, que apresentam uma diferença significativa entre as cargas por eixo para os diferentes eixos em relação à carga máxima legal.

O tráfego em estudo está compreendido entre as classes F1, F2, H1, H3, H4, H5 e H6, mas apenas as classes H4 e H6, têm volumes de tráfego consideráveis (Figura 3.2).

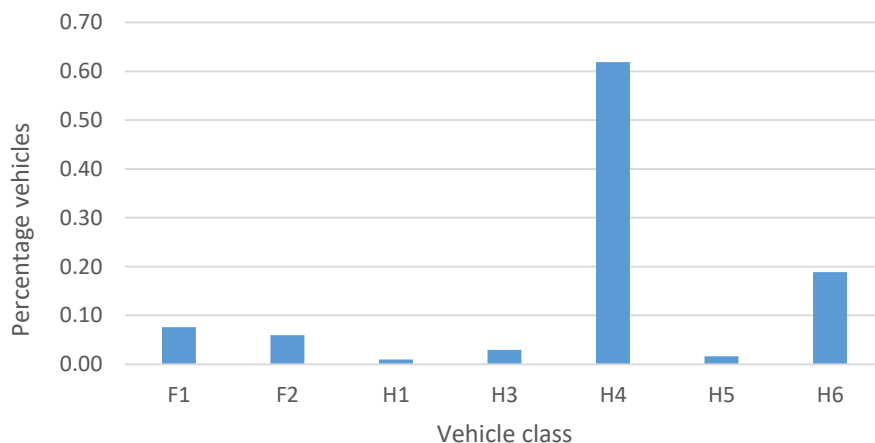


Figura 3.2 – Percentagem de veículos em cada classe

Para as classes H3, H4 e H6, mais de 50% do tráfego apresenta excesso de carga, o que se traduz num elevado impacto no pavimento (Figura 3.3).

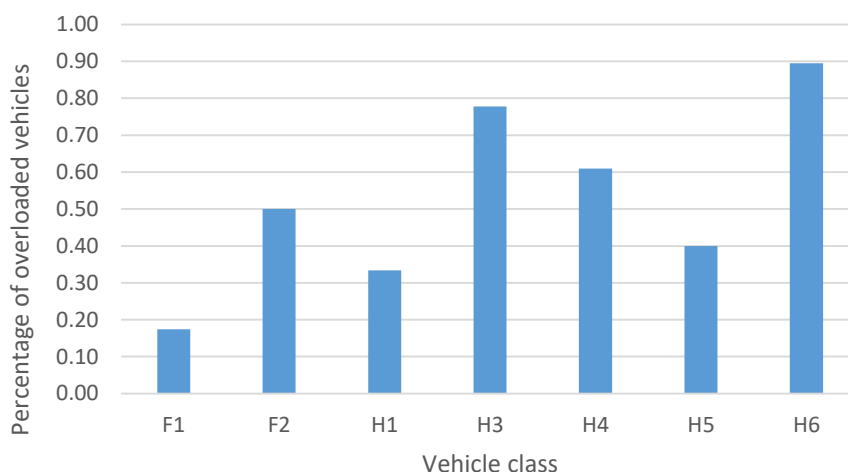


Figura 3.3 – Percentagem de veículos em excesso em carga

3.2.1 Pesagens da classe F1

Os veículos pertencentes à classe F1 possuem na sua configuração 2 eixos, como retrata a Figura 3.4.

A análise individual de cada carga por eixo permite verificar qual o número de eixo dos veículos pesados, suscetíveis a ocorrerem sobrecargas.

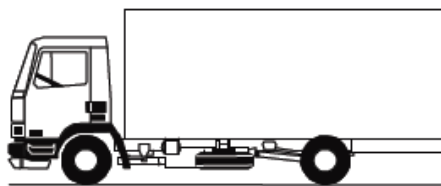


Figura 3.4 – Veículo classe F1

É possível observar na Figura 3.5, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 1.

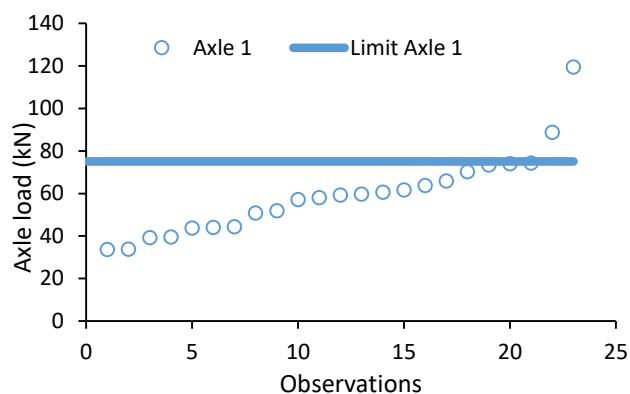


Figura 3.5 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F1

Na Figura 3.6, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 2, é superior ao eixo 1, o que significa uma maior vulnerabilidade deste eixo em relação ao anterior, de ocorrem sobrecargas.

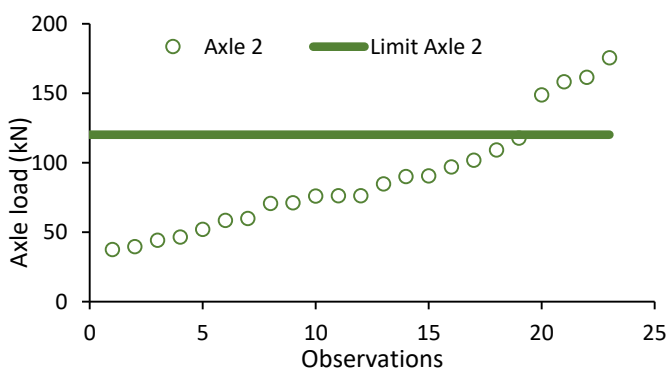


Figura 3.6 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F1

3.2.2 Pesagens da classe F2

Os veículos pertencentes à classe F2 possuem na sua configuração 3 eixos, como retrata a Figura 3.7.

A análise individual de cada carga por eixo permite verificar qual o número de eixo dos veículos pesados, suscetíveis a ocorrerem sobrecargas.

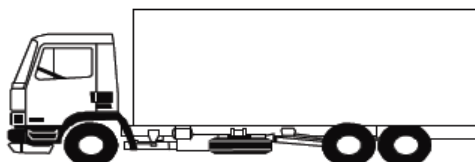


Figura 3.7 – Veículo da classe F2

É possível observar na Figura 3.8, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 1.

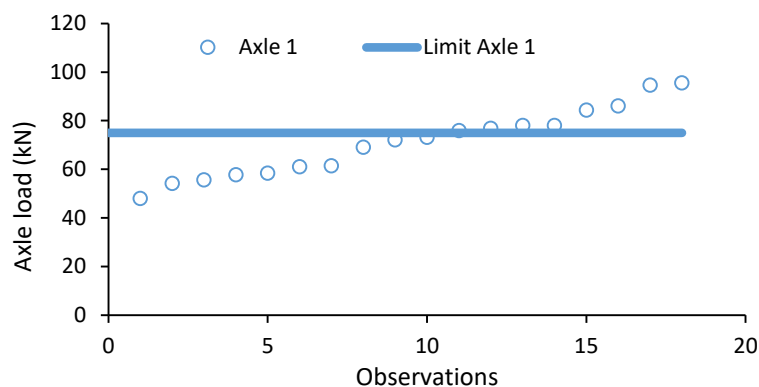


Figura 3.8 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F2

Na Figura 3.9, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 2, é aproximadamente igual ao eixo 1.

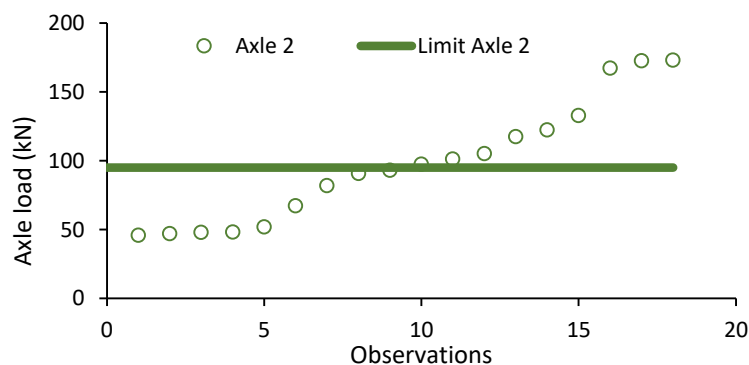


Figura 3.9 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F2

Na Figura 3.10, o número de veículos que circulam com cargas acima do permitido por lei, no eixo 3, é superior aos eixos 1 e 2, o que significa uma maior vulnerabilidade deste eixo em relação aos anteriores, de ocorrerem sobrecargas.

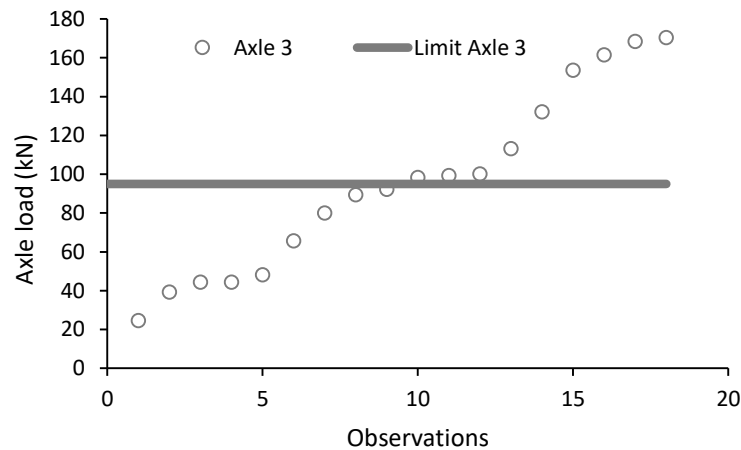


Figura 3.10 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe F2

3.2.3 Pesagens da classe H1

Os veículos pertencentes à classe H1 possuem na sua configuração 3 eixos, como retrata a Figura 3.11.

A análise individual de cada carga por eixo, permite verificar qual o número de eixo dos veículos pesados, suscetíveis a ocorrerem sobrecargas.

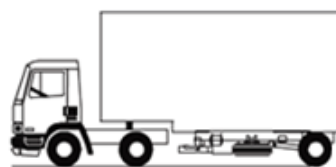


Figura 3.11 – Veículo da classe H1

É possível observar na Figura 3.12, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 1.

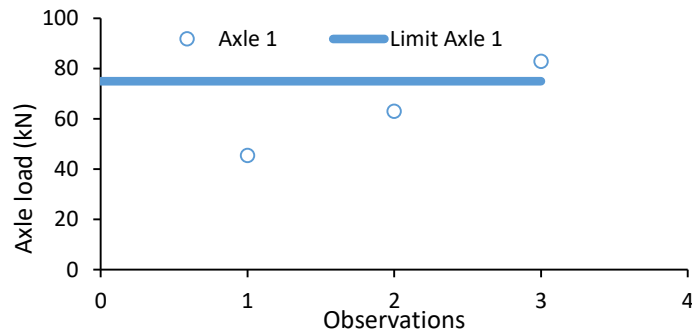


Figura 3.12 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H1

Na Figura 3.13, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 2, é nulo. No conjunto de veículos observados da classe H1, não existe sobrecarga no eixo 2.

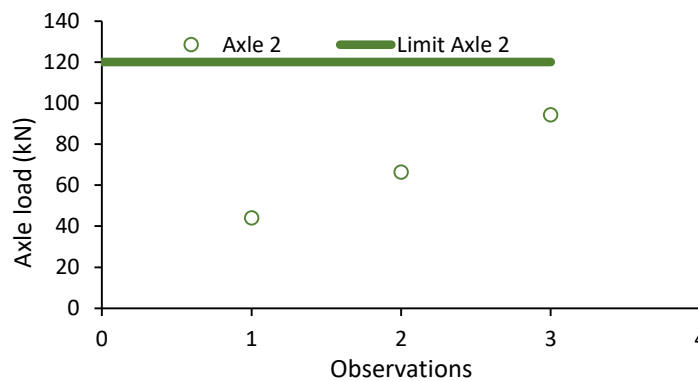


Figura 3.13 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H1

Na Figura 3.14, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 3, é igual ao eixo 1.

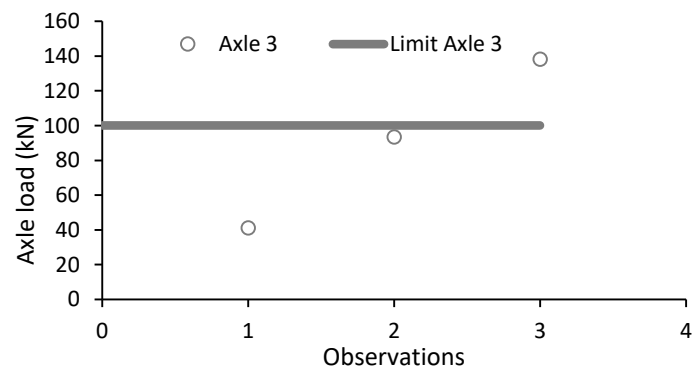


Figura 3.14 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H1

3.2.4 Pesagens da classe H3

Os veículos pertencentes à classe H3 possuem na sua configuração 4 eixos, como retrata a Figura 3.15.

A análise individual de cada carga por eixo permite verificar qual o número de eixo dos veículos pesados, suscetíveis a ocorrerem sobrecargas.

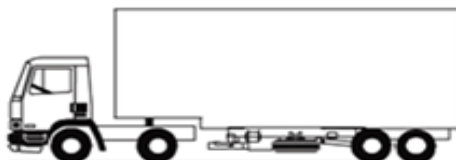


Figura 3.15 – Veículo da classe H3

É possível observar na Figura 3.16, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 1.

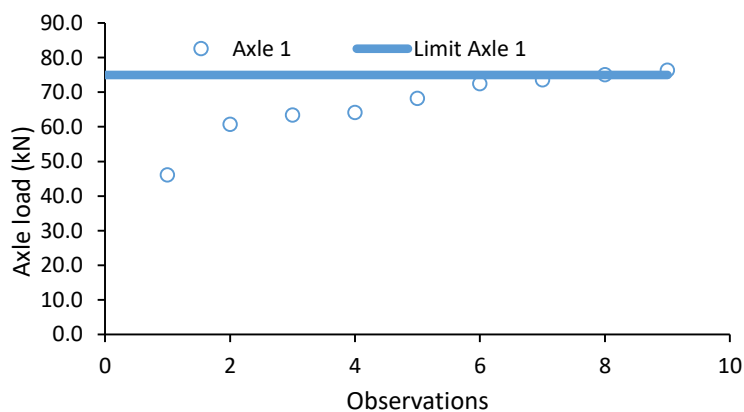


Figura 3.16 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H3

Na Figura 3.17, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 2, é superior ao eixo 1.

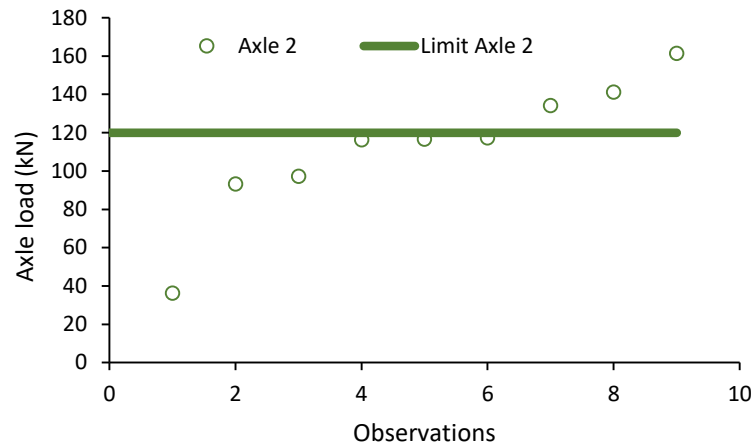


Figura 3.17 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H3

Na Figura 3.18, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 3, é superior aos eixos 1 e 2.

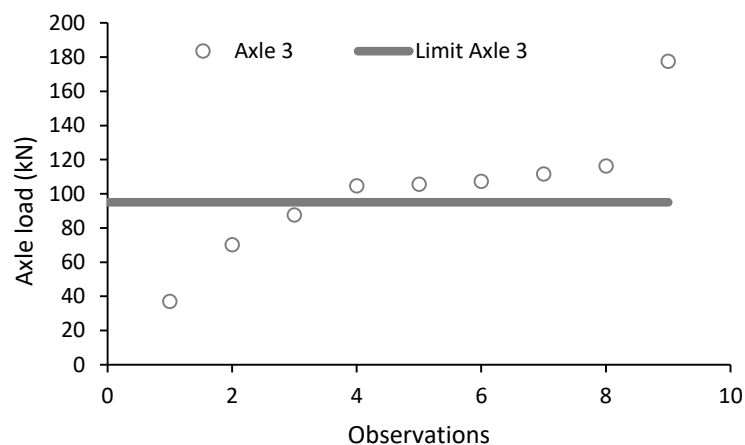


Figura 3.18 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H3

Na Figura 3.19, o número de veículos que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 4, é superior aos eixos 1, 2 e 3, o que significa uma maior vulnerabilidade deste eixo em relação aos anteriores, de ocorrem sobrecargas

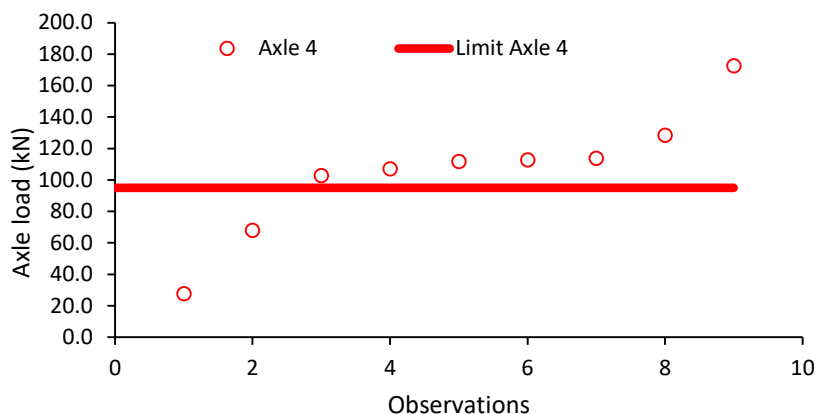


Figura 3.19 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H3

3.2.5 Pesagens da classe H4

Os veículos pertencentes à classe H4 possuem na sua configuração 5 eixos, como retrata a Figura 3.20.

A análise individual de cada carga por eixo permite verificar qual o número de eixo dos veículos pesados, suscetíveis a ocorrerem sobrecargas.

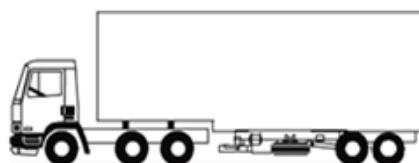


Figura 3.20 – Veículo da classe H4

É possível observar na Figura 3.21, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 1.

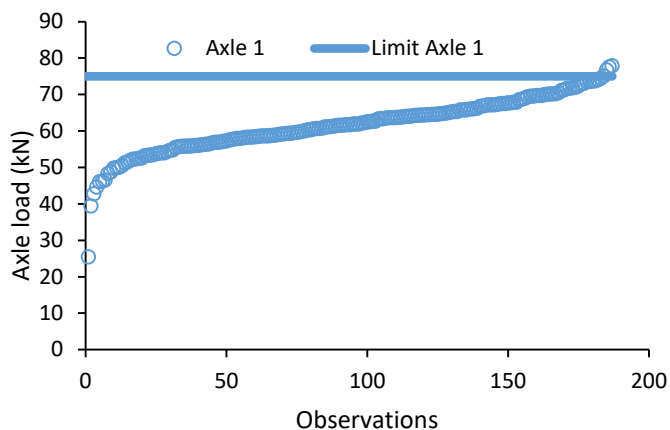


Figura 3.21 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H4

Na Figura 3.22, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 2, é superior ao eixo 1.

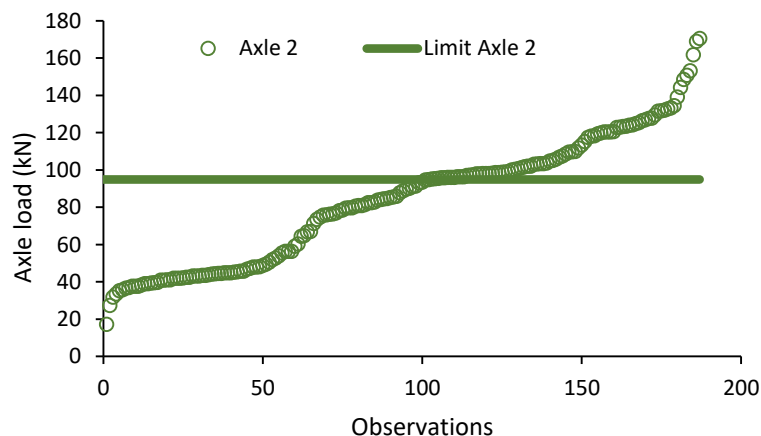


Figura 3.22 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H4

Na Figura 3.23, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 3, é aproximadamente igual ao eixo 2.

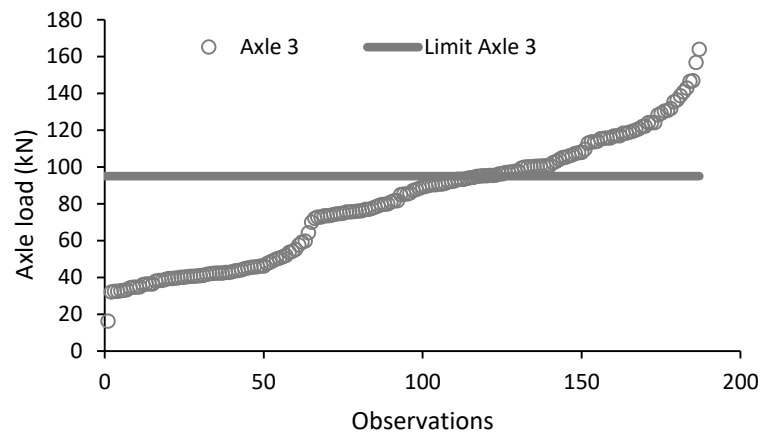


Figura 3.23 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H4

Na Figura 3.24, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 4, é superior aos eixos 1,2 e 3, o que significa uma maior vulnerabilidade deste eixo em relação ao anterior, de ocorrem sobrecargas.

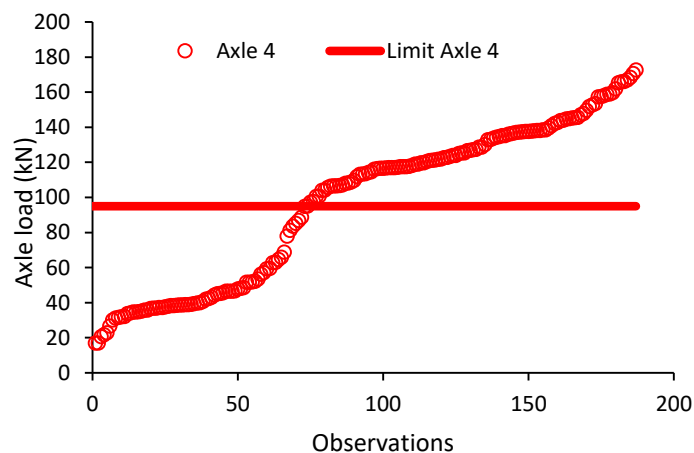


Figura 3.24 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H4

Na Figura 3.25, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 5, é aproximadamente igual ao eixo 4.

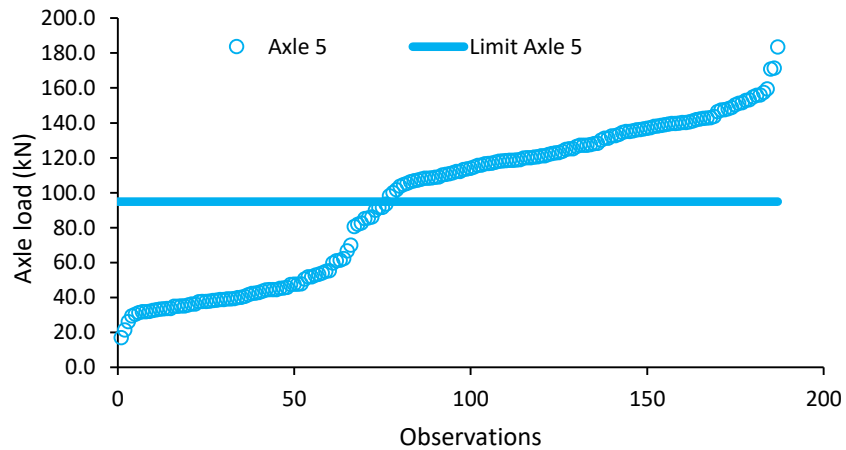


Figura 3.25 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H4

3.2.6 Pesagens da classe H5

Os veículos pertencentes à classe H5 possuem na sua configuração 5 eixos, como retrata a Figura 3.26.

A análise individual de cada carga por eixo permite verificar qual o número de eixo dos veículos pesados, suscetíveis a ocorrerem sobrecargas.

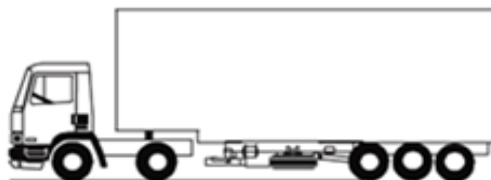


Figura 3.26 – Veículo da classe H5

É possível observar na Figura 3.27, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 1.

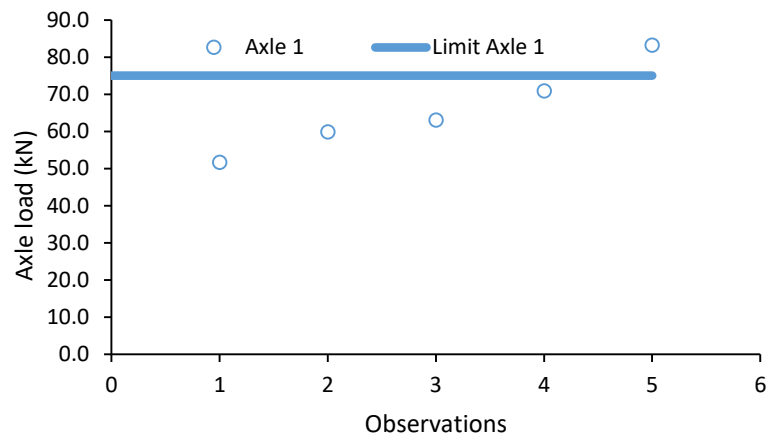


Figura 3.27 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H5

Na Figura 3.28, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 2, é igual ao eixo 1.

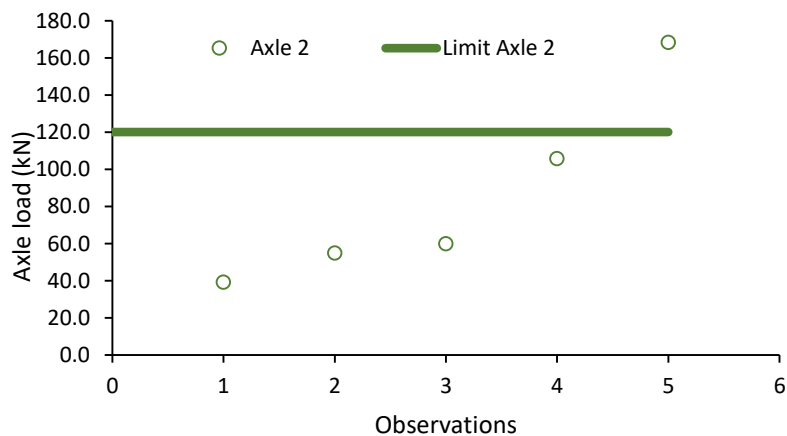


Figura 3.28 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H5

Na Figura 3.29, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 3, é superior aos eixos 1 e 2,

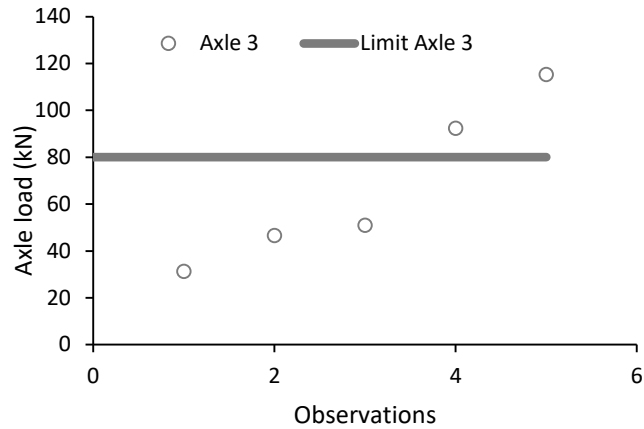


Figura 3.29 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H5

Na Figura 3.30, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 4, é inferior ao eixo 3.

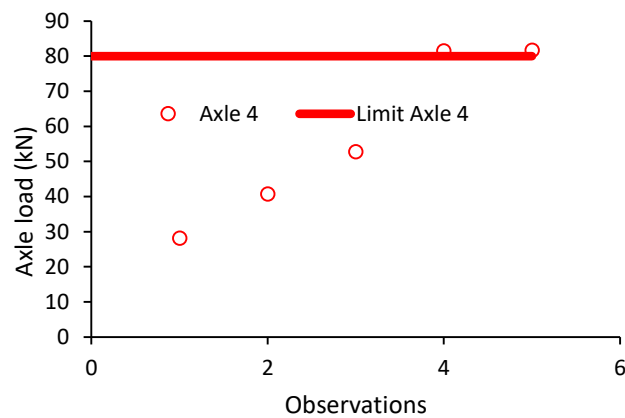


Figura 3.30 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H5

Na Figura 3.31, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 5, é igual ao eixo 3.

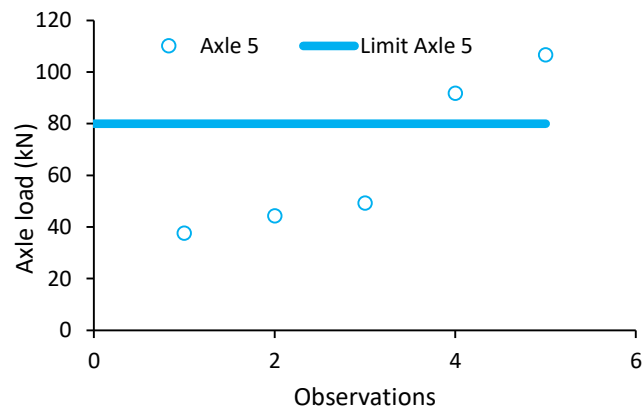


Figura 3.31 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H5

3.2.7 Pesagens da classe H6

Os veículos pertencentes à classe H6 possuem na sua configuração 6 eixos, como retrata a Figura 3.32.

A análise individual de cada carga por eixo permite verificar qual o número de eixo dos veículos pesados, suscetíveis a ocorrem sobrecargas.

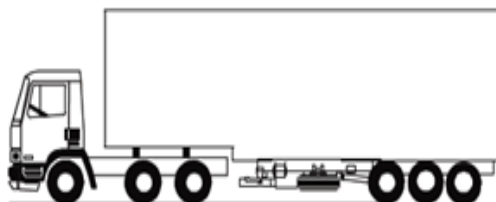


Figura 3.32 – Veículo classe H6

É possível observar na Figura 3.33, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 1.

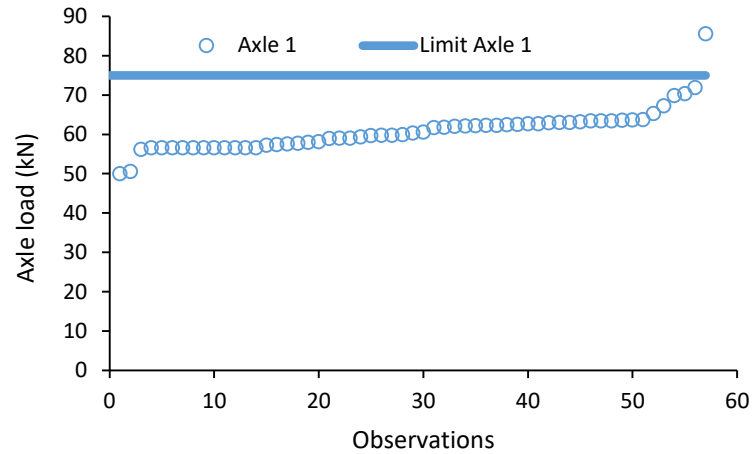


Figura 3.33 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H6

Na Figura 3.34, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 2, é superior ao eixo 1.

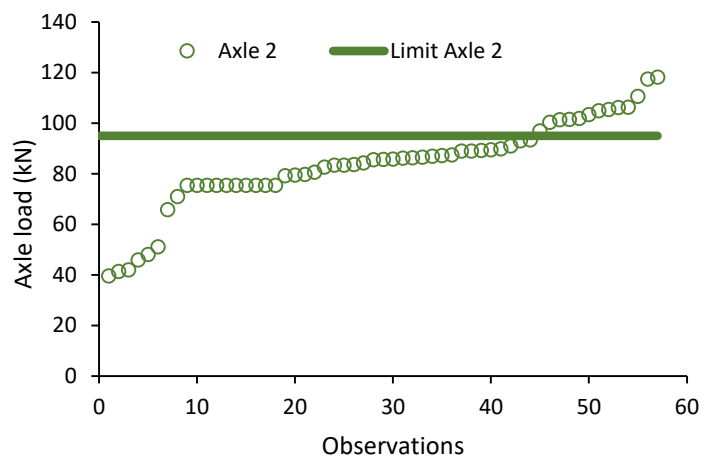


Figura 3.34 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H6

Na Figura 3.35, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 3, é aproximadamente igual ao eixo 1.

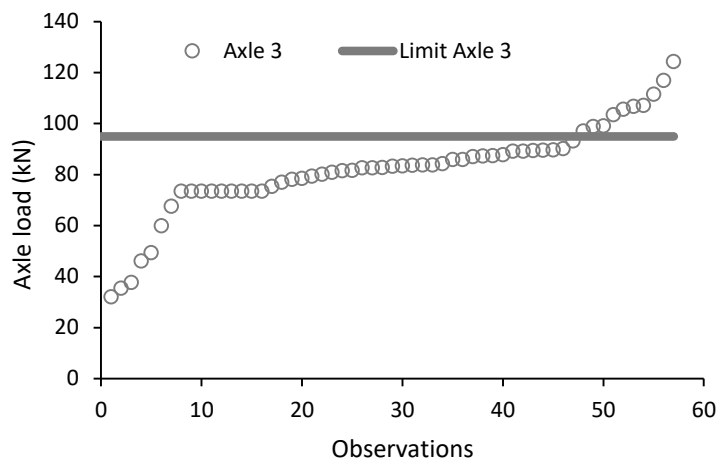


Figura 3.35 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H6

Na Figura 3.36, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 4, é superior aos eixos 1, 2 e 3.

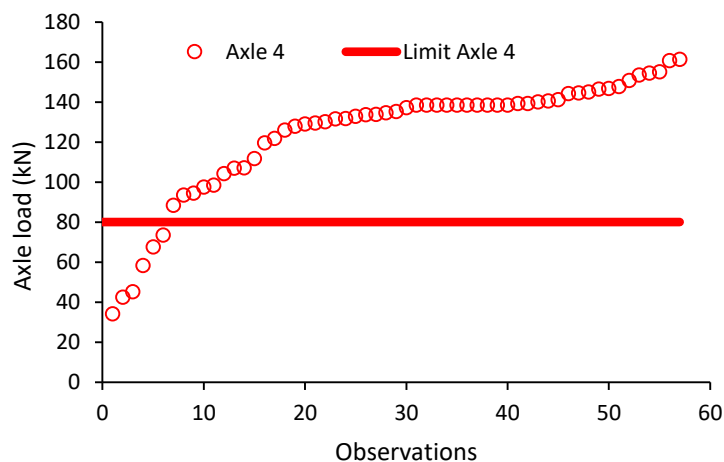


Figura 3.36 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H6

Na Figura 3.37, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 5, é superior aos eixos 1,2,3 e 4, o que significa uma maior vulnerabilidade deste eixo em relação aos anteriores, de ocorrem sobrecargas.

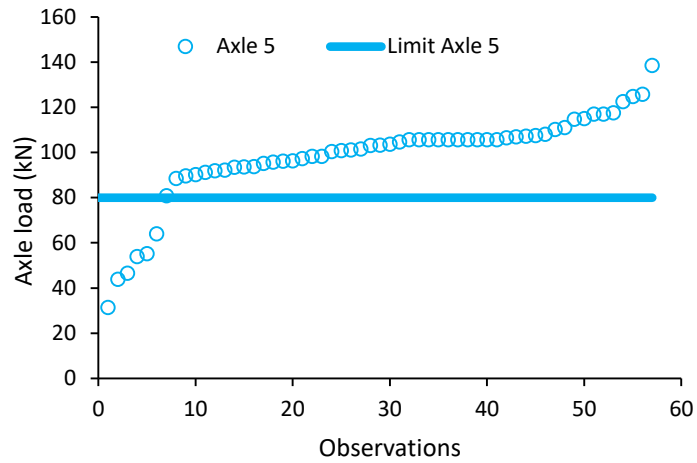


Figura 3.37 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H6

Na Figura 3.38, o número de veículos, que circulam com carga acima do permitido por lei, no eixo 6, é aproximadamente igual ao eixo 5.

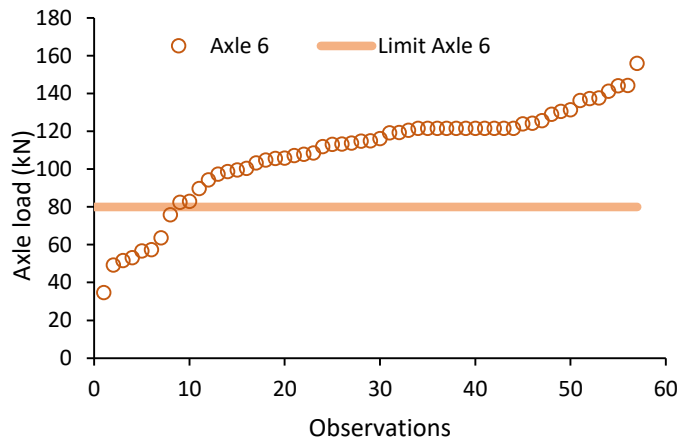


Figura 3.38 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 6 da classe H6

4 ANÁLISE DA AGRESSIVIDADE DO TRÁFEGO PESADO

4.1 Introdução

A principal causa de degradações nos pavimentos (fendas por fadiga), que obriga a uma intervenção de reabilitação, é o tráfego pesado, composto pela intensidade das cargas, a frequência, a configuração dos eixos e tipo de pneu.

Considerada a base de dados usada neste estudo, com informação de tráfego obtida num trecho de estrada, foi realizada a avaliação da agressividade provocada pelos veículos que circulam sobrecarregados. Ao aplicar os três métodos anteriormente referidos, a um coeficiente em função do tipo de pavimento, espessura de camada betuminosa e módulo de rigidez da camada betuminosa previamente estabelecidos, obteve-se uma combinação importante de resultados para análise.

No presente capítulo apresenta-se a análise do cálculo da agressividade, para os veículos com carga legal, veículos sobrecarregados e veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal.

4.2 Agressividade dos eixos da classe F1

4.2.1 Método da 4ª Potência

A análise realizada do Método da 4ª Potência, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1 e eixo 2, permite verificar na Figura 4.1 e 4.2, o efeito das cargas observadas no cálculo do tráfego.

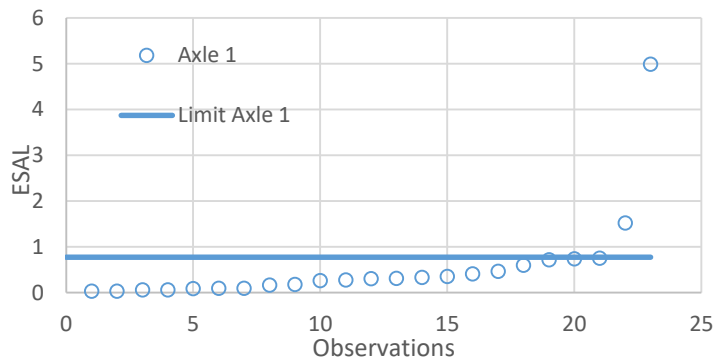


Figura 4.1 - Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 1 da classe F1

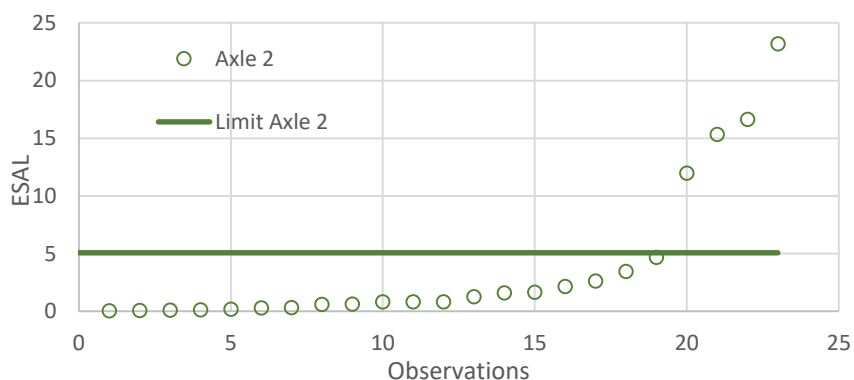


Figura 4.2 - Efeito da consideração das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 2 da classe F1

Na Figura 4.3 e 4.4, encontra-se representada as observações de ESALS, calculados pelo método da 4ª potência, através da análise individual das cargas distribuídas no eixo 1 e eixo 2 em função do limite legal, para os veículos sobrecarregados transformados em veículos legais. Ao analisar as duas figuras é possível perceber a diminuição acentuada do tráfego que ultrapassa os limites obrigatórios.

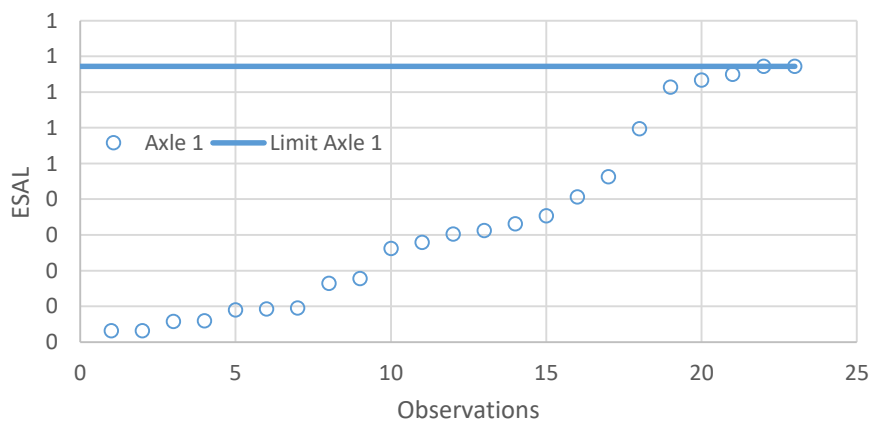


Figura 4.3 - Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 1 da classe F1

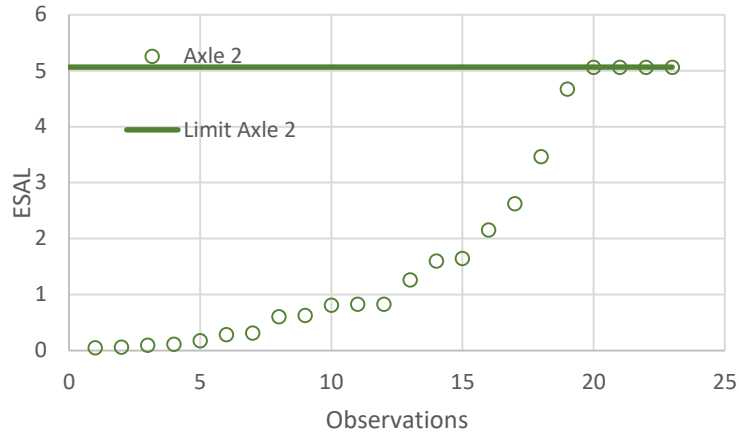


Figura 4.4 - Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 2 da classe F1

4.2.2 Método Francês

A análise realizada do Método Francês, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1 e eixo 2, permite verificar na Figura 4.5 e 4.6, para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

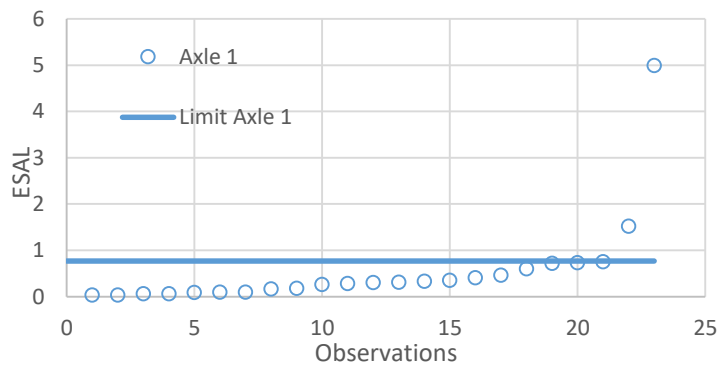


Figura 4.5 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F1

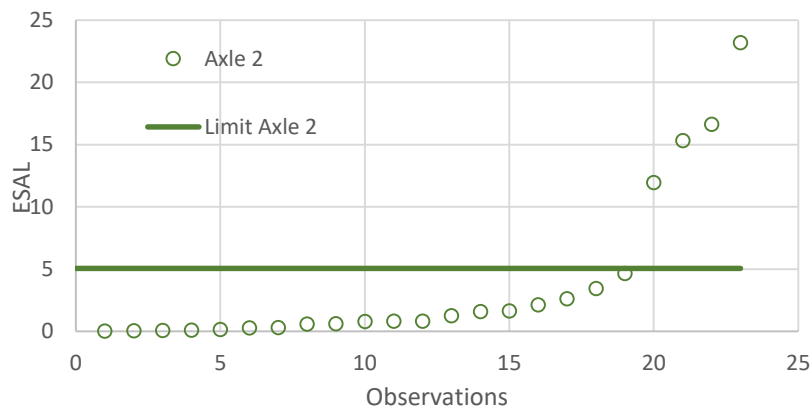


Figura 4.6 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F1

Na Figura 4.7 e 4.8, encontra-se representada a evolução do tráfego calculado pelo método da Francês, através da análise individual das cargas distribuídas no eixo 1 e eixo 2 em função do limite legal, para os veículos sobrecarregados transformados em veículos legais. Ao analisar as duas figuras é possível perceber a diminuição acentuada do tráfego que ultrapassa os limites obrigatórios.

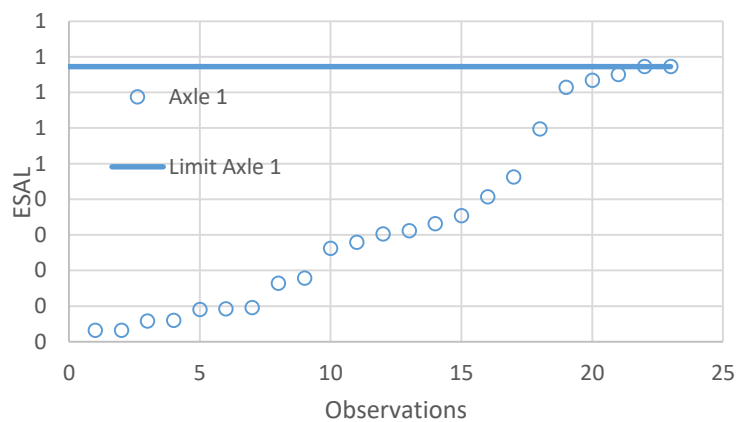


Figura 4.7 - Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 1 da classe F1

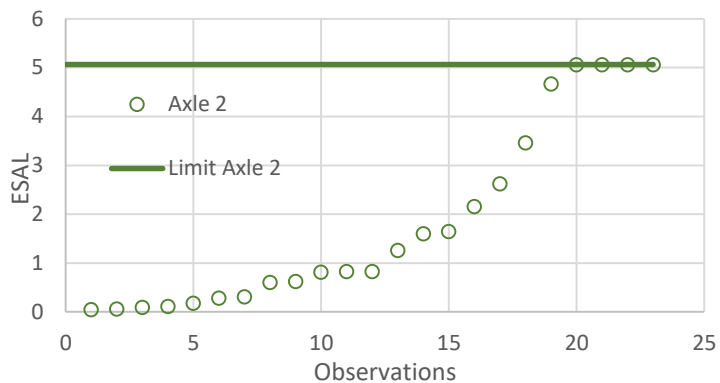


Figura 4.8 - Efeito do limite legal das cargas observadas no cálculo do tráfego no eixo 2 da classe F1

4.2.3 Método JPais

A análise realizada do Método JPais, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1 e eixo 2, permite verificar na Figura 4.9 e 4.10, para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

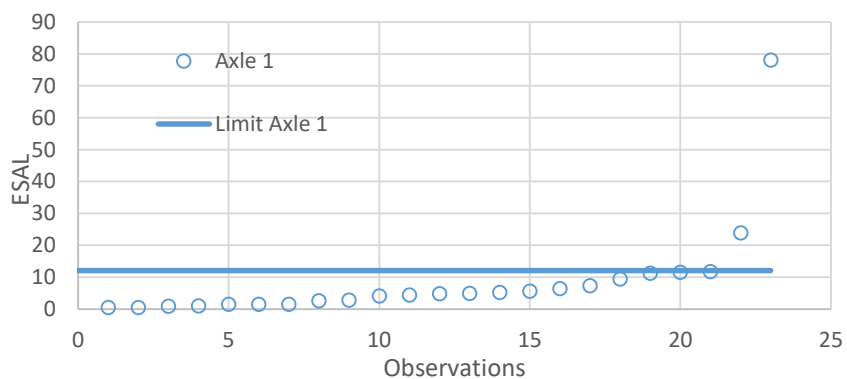


Figura 4.9 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F1

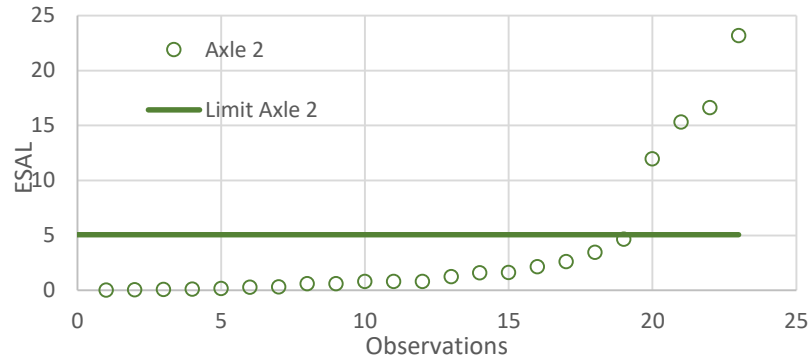


Figura 4.10 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F1

Na Figura 4.11 e 4.12, encontra-se representada a evolução do tráfego calculado pelo método da JPais, através da análise individual das cargas distribuídas no eixo 1 e eixo 2 em função do limite legal, para os veículos sobrecarregados transformados em veículos legais. Ao analisar as duas figuras é possível perceber a diminuição acentuada do tráfego que ultrapassa os limites obrigatórios.

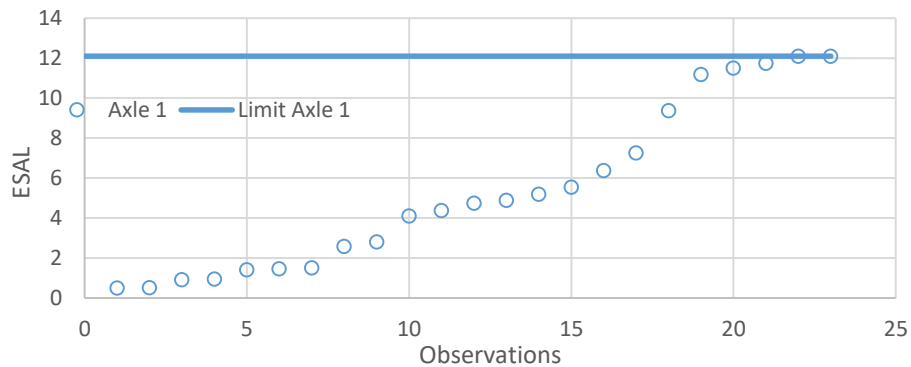


Figura 4.11 - Efeito do limite legal das cargas observadas no calculo do tráfego no eixo 1 da classe F1

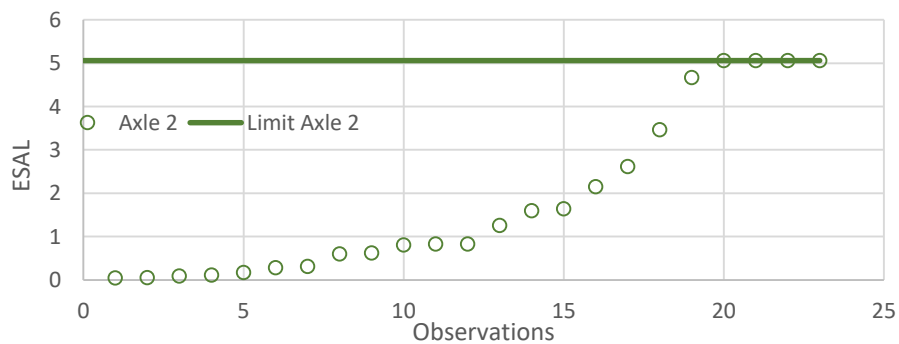


Figura 4.12 - Efeito do limite legal das cargas observadas no calculo do tráfego no eixo 2 da classe F1

4.2.4 Comparação dos métodos em veículos da classe F1

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, apresentam a comparação do tráfego calculado pelo método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, em função do observado. Em todos os casos, verifica-se uma proximidade entre os valores do modelo JPais, o método da 4ª Potência e o método Francês. No entanto, é o modelo JPais que apresenta valores mais altos.

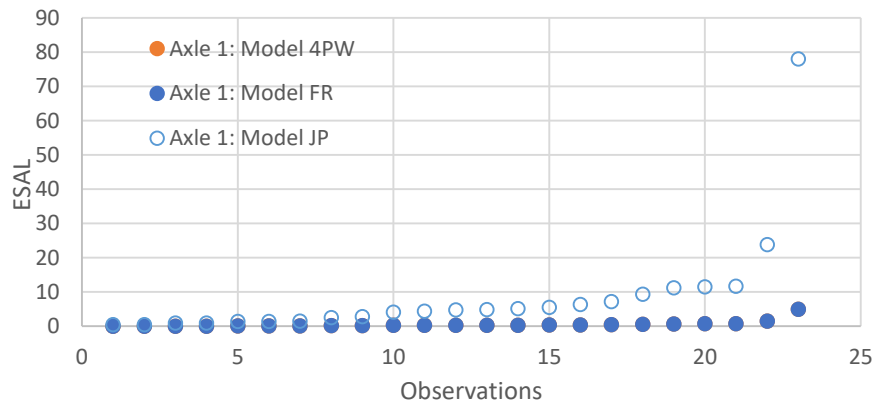


Figura 4.13 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe F1

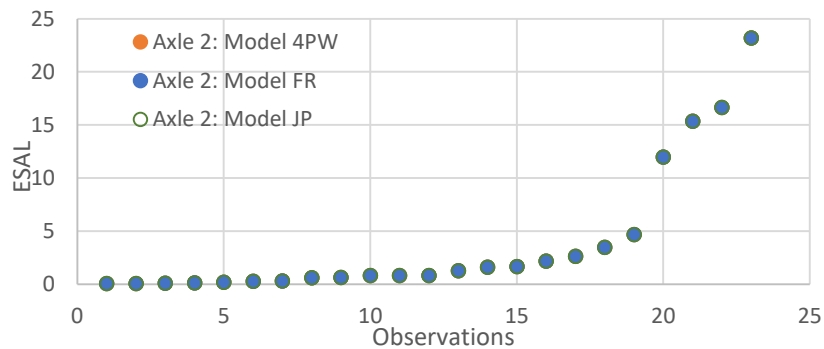


Figura 4.14 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe F1

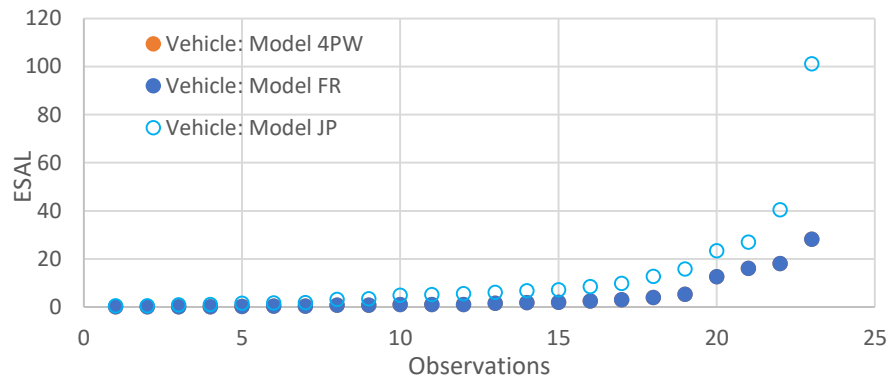


Figura 4.15 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe F1

4.3 Agressividade dos eixos da classe F2

Para a análise da agressividade dos eixos desta classe 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.

4.3.1 Método JPais

A análise realizada do Método JPais, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1, 2 e 3, permite verificar na Figura 4.16, 4.17 e 4.18, para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

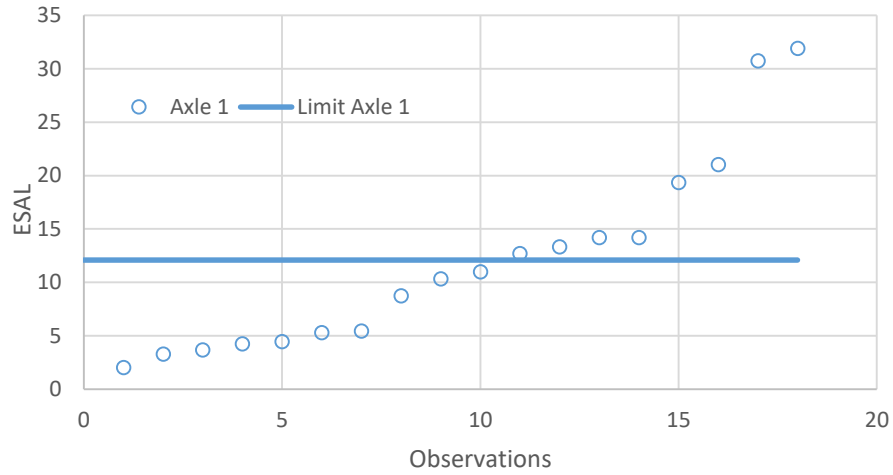


Figura 4.16 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe F2

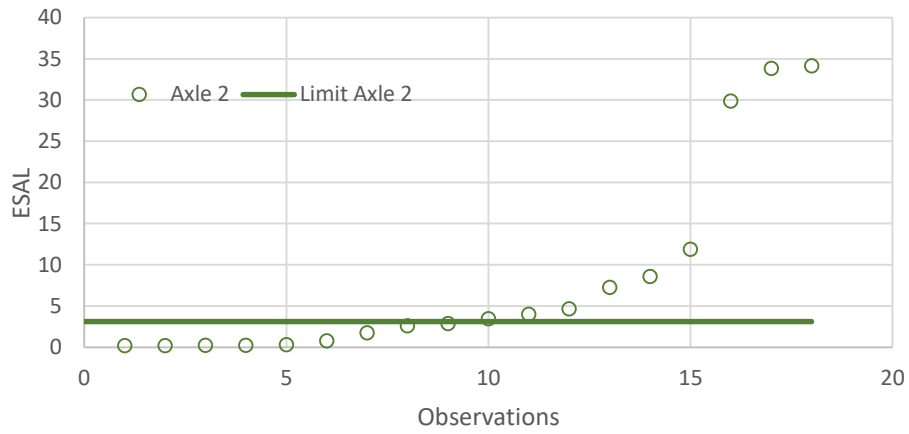


Figura 4.17 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe F2

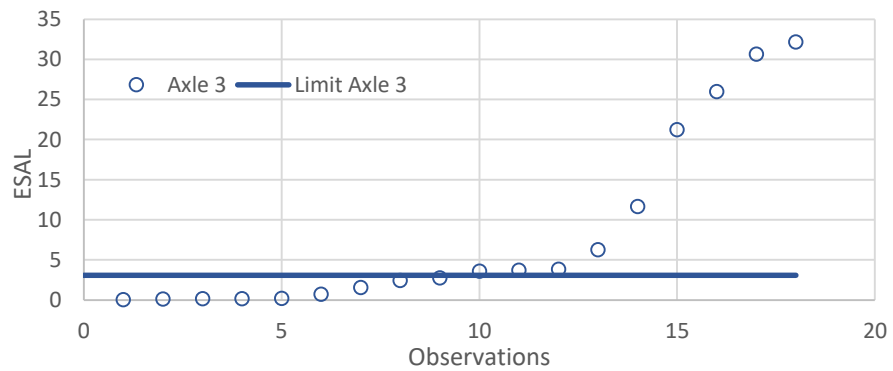


Figura 4.18 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe F2

4.3.2 Comparação dos métodos em eixos da classe F2

As Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22, apresentam a comparação do tráfego calculado pelo método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, em função do observado. Em todos os casos, verifica-se uma proximidade entre os valores do modelo JPais, o método da 4ª Potência e o método Francês. No entanto, é o modelo JPais que apresenta valores mais altos.

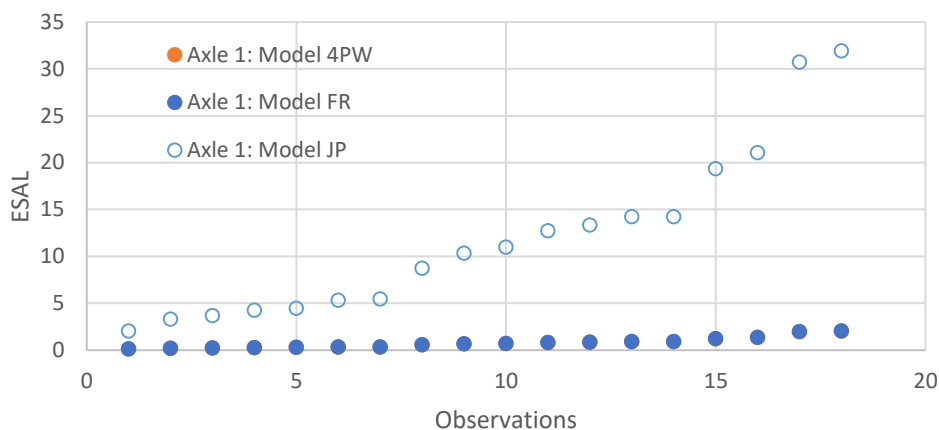


Figura 4.19 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe F2

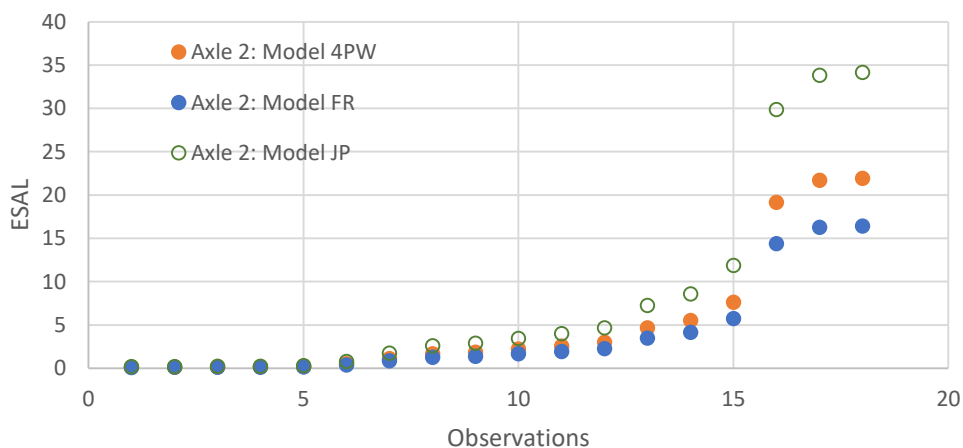


Figura 4.20 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe F2

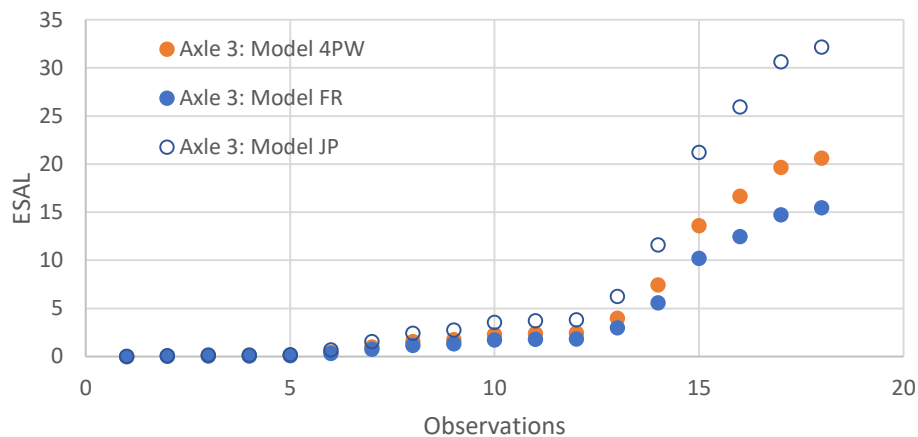


Figura 4.21 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe F2

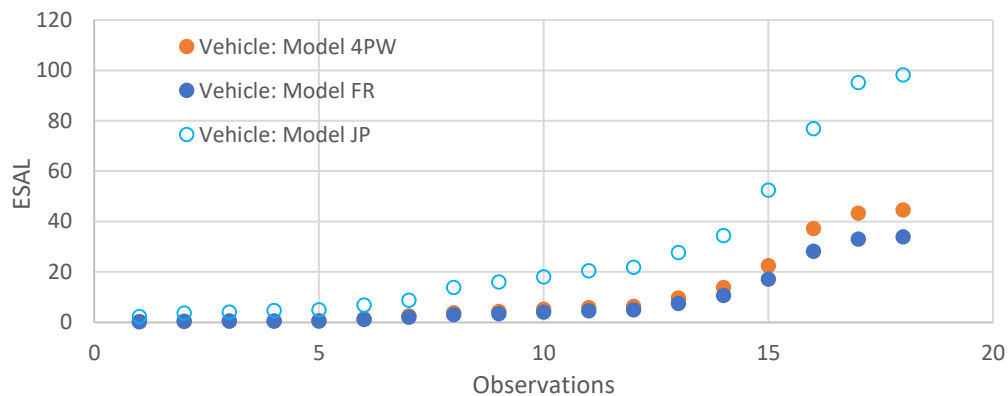


Figura 4.22 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe F2

4.4 Agressividade dos eixos da classe H1

4.4.1 Método JPais

A análise realizada do Método JPais, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1, 2 e 3, permite verificar na Figura 4.23 4.24 e 4.25, para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

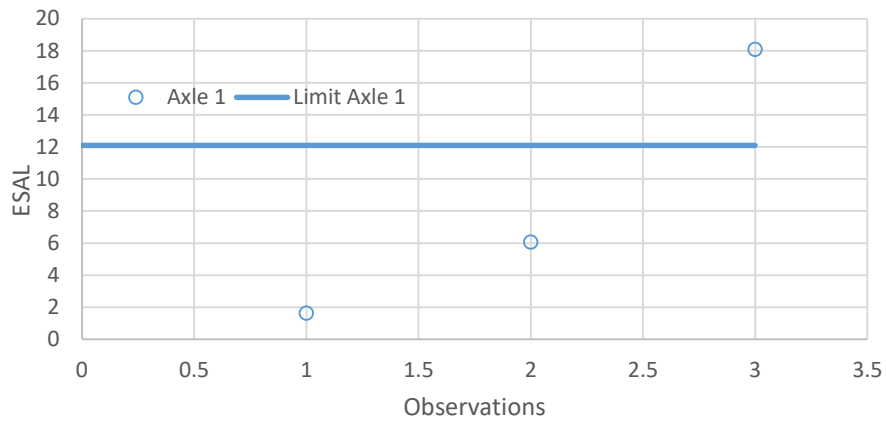


Figura 4.23 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H1

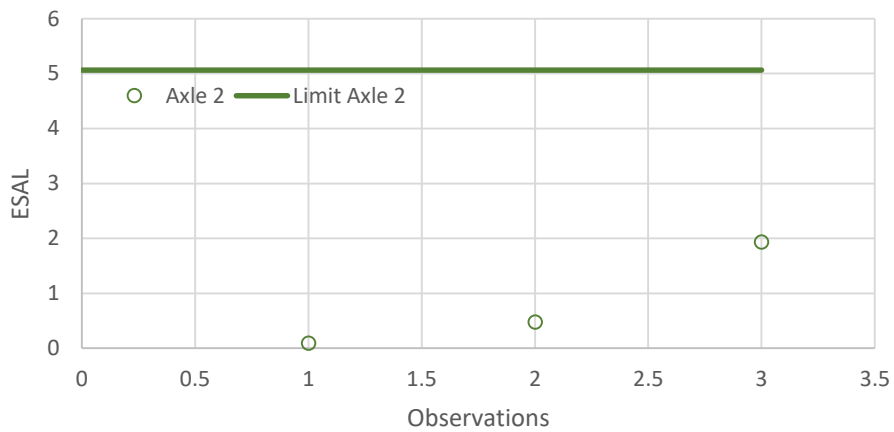


Figura 4.24 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H1

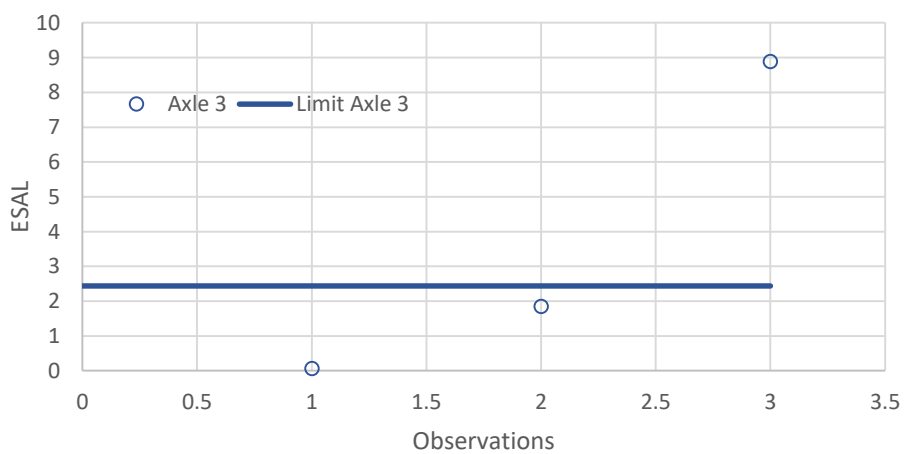


Figura 4.25 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H1

4.4.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H1

As Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29, apresentam a comparação do tráfego calculado pelo método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, em função do observado. Em todos os casos, verifica-se uma proximidade entre os valores do modelo JPais, o método da 4ª Potência e o método Francês. No entanto, é o modelo JPais que apresenta valores mais altos.

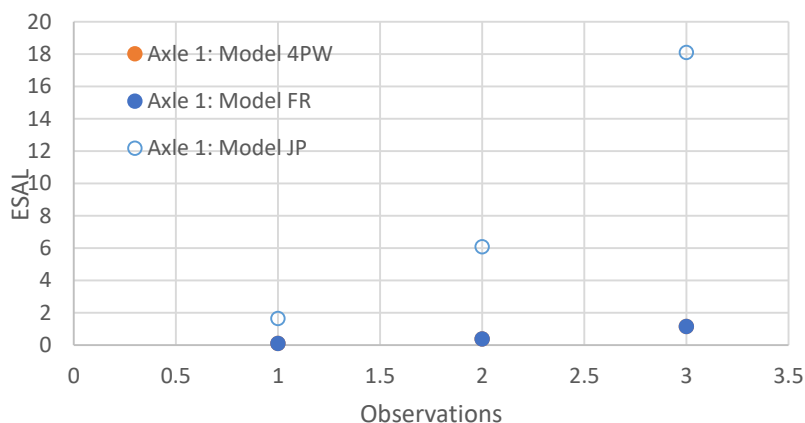


Figura 4.26 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H1

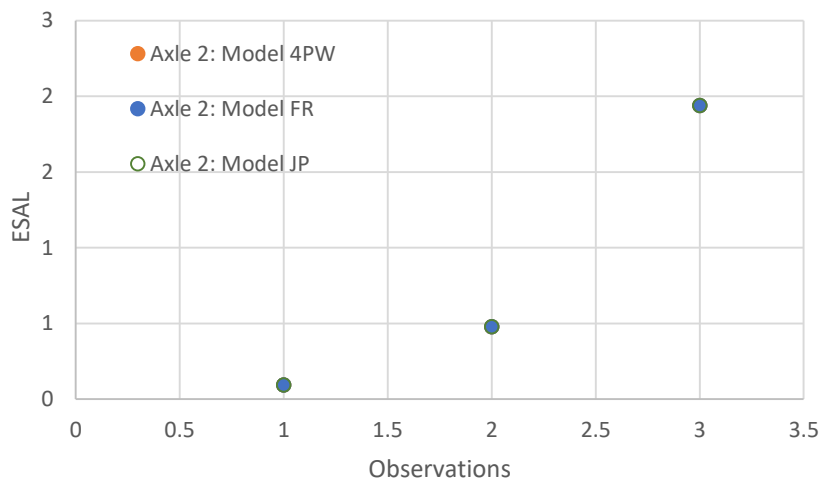


Figura 4.27 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H1

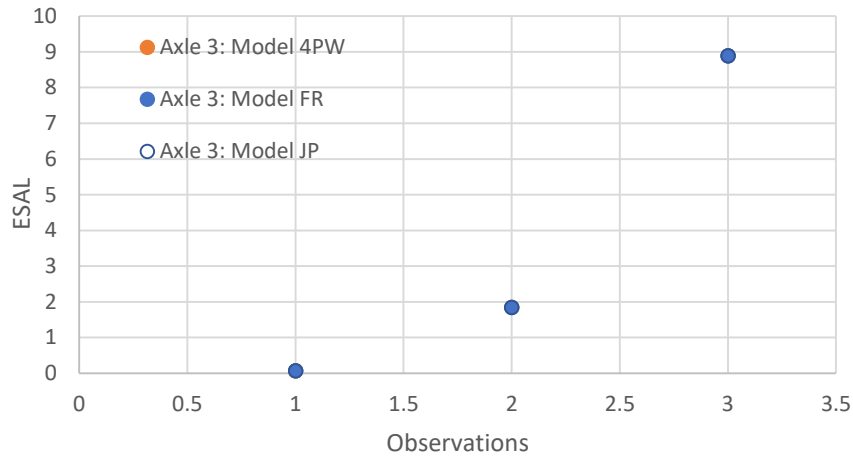


Figura 4.28 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H1

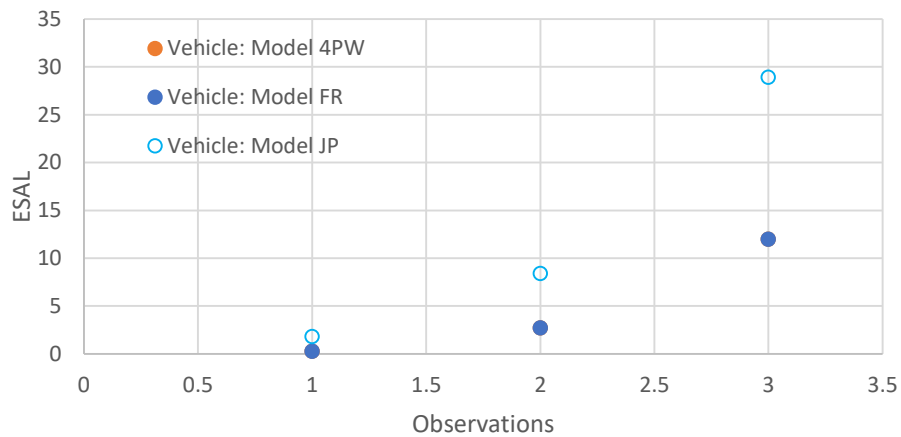


Figura 4.29 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H1

4.5 Agressividade dos eixos da classe H3

4.5.1 Método JPais

A análise realizada do Método JPais, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1, 2, 3 e 4, permite verificar na Figura 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33, para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

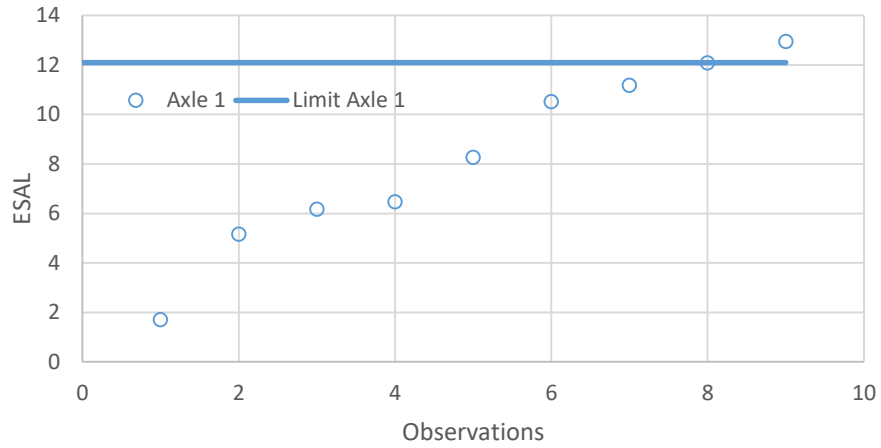


Figura 4.30 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H3

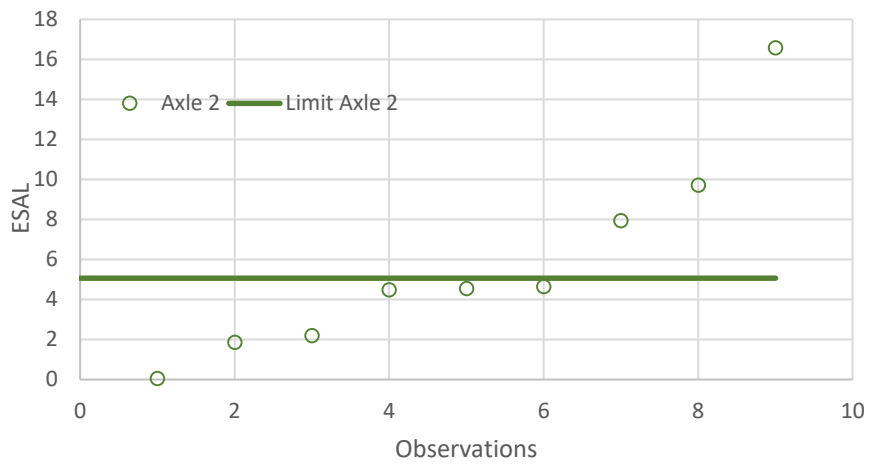


Figura 4.31 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H3

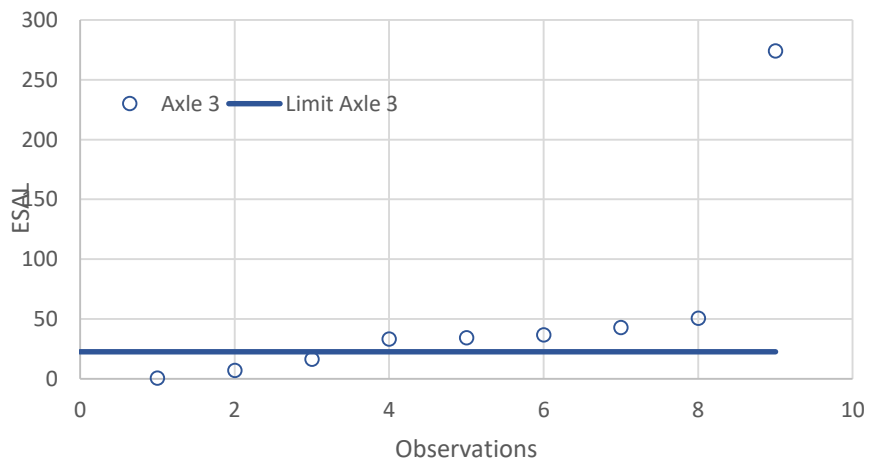


Figura 4.32 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H3

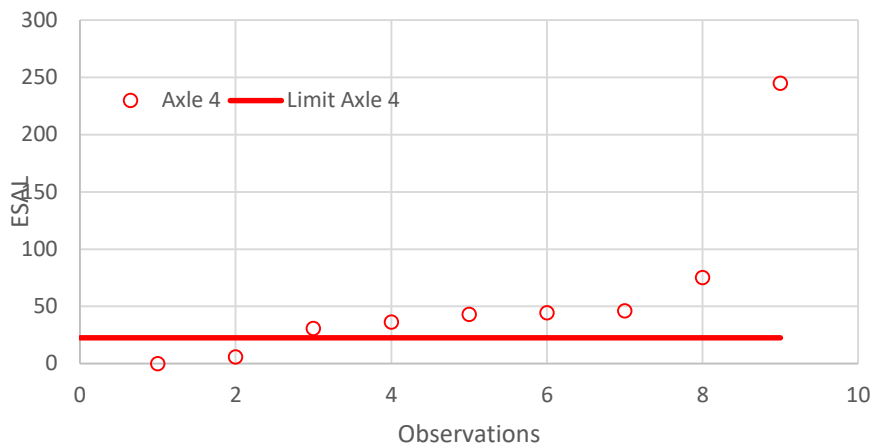


Figura 4.33 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H3

4.5.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H3

As Figuras 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38, apresentam a comparação do tráfego calculado pelo método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, em função do observado. Em todos os casos, verifica-se uma proximidade entre os valores do modelo JPais, o método da 4ª Potência e o método Francês. No entanto, é o modelo JPais que apresenta valores mais altos.

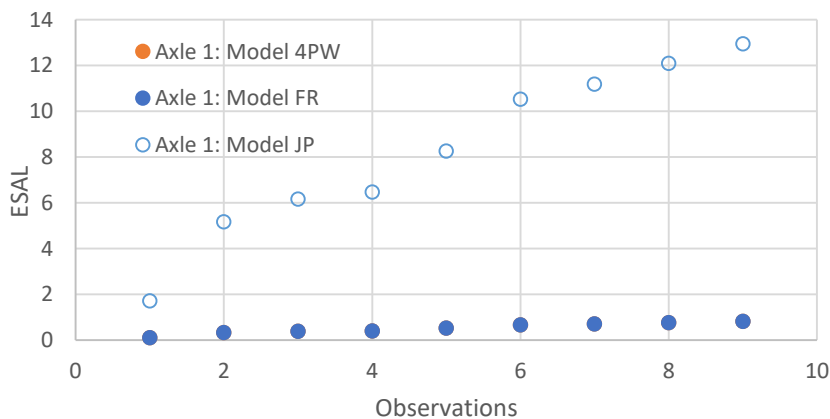


Figura 4.34 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H3

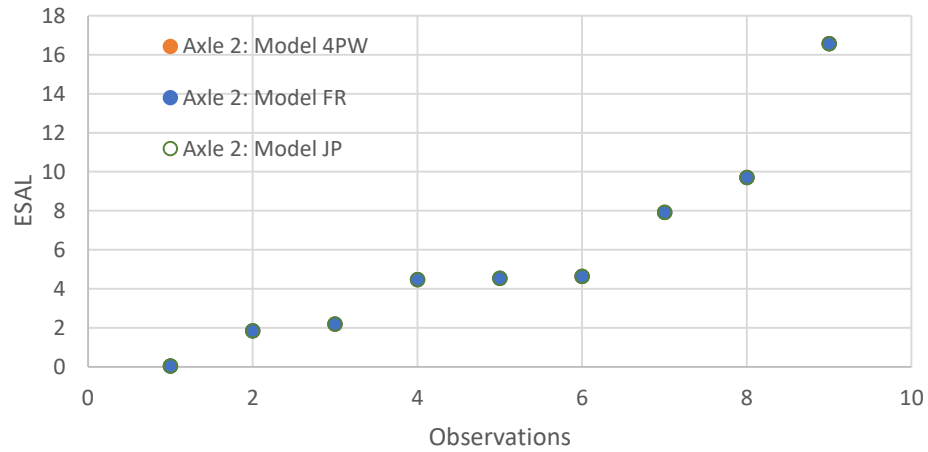


Figura 4.35 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H3

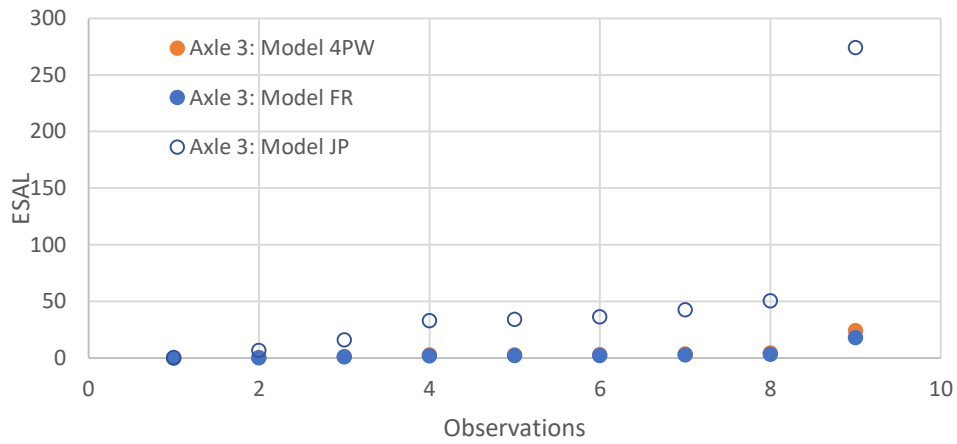


Figura 4.36 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H3

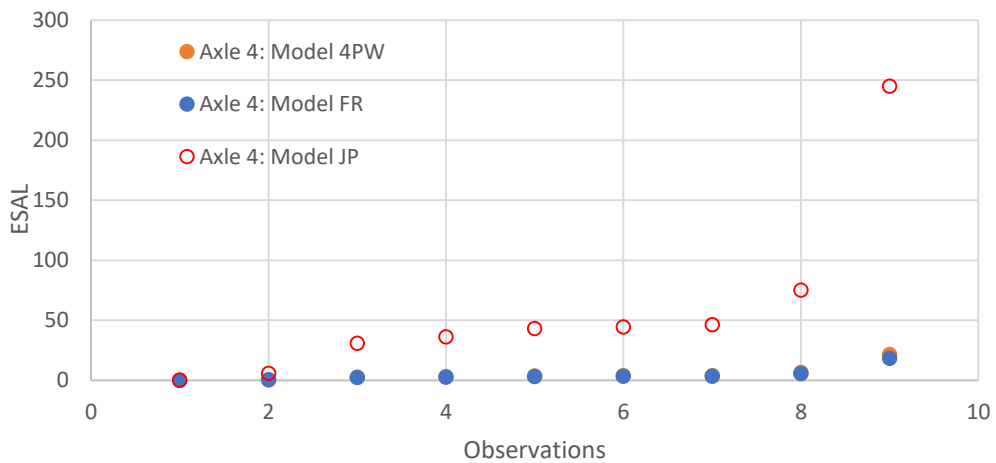


Figura 4.37 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H3

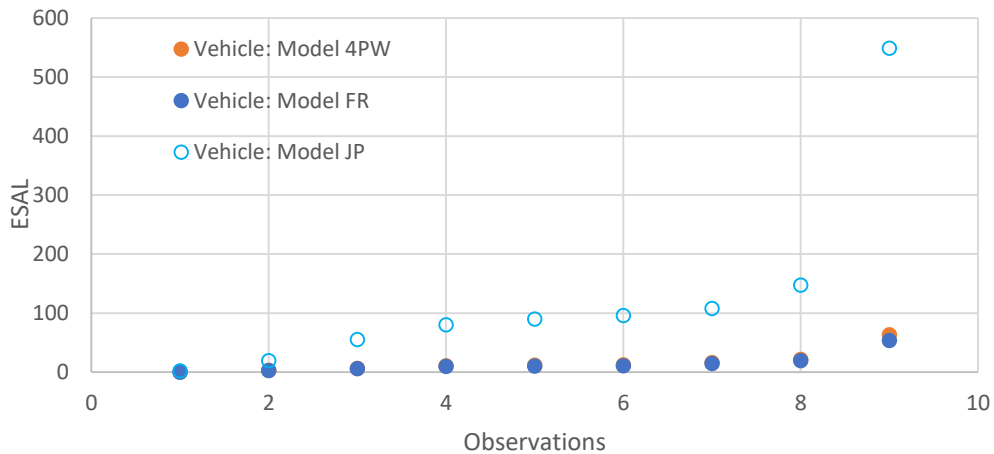


Figura 4.38 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H3

4.6 Agressividade dos eixos da classe H4

4.6.1 Método JPais

A análise realizada do Método JPais, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1, 2, 3, 4 e 5, permite verificar na Figura 4.39, 4.40, 4.41, 4.42 e 4.43, para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

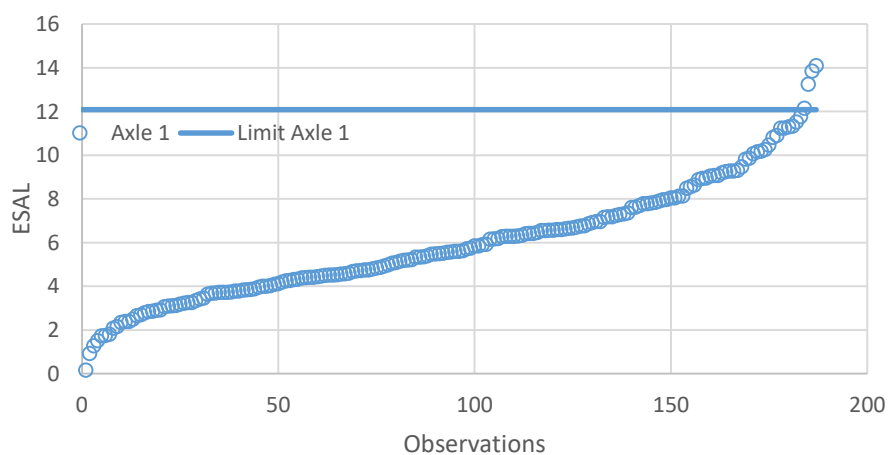


Figura 4.39 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H3

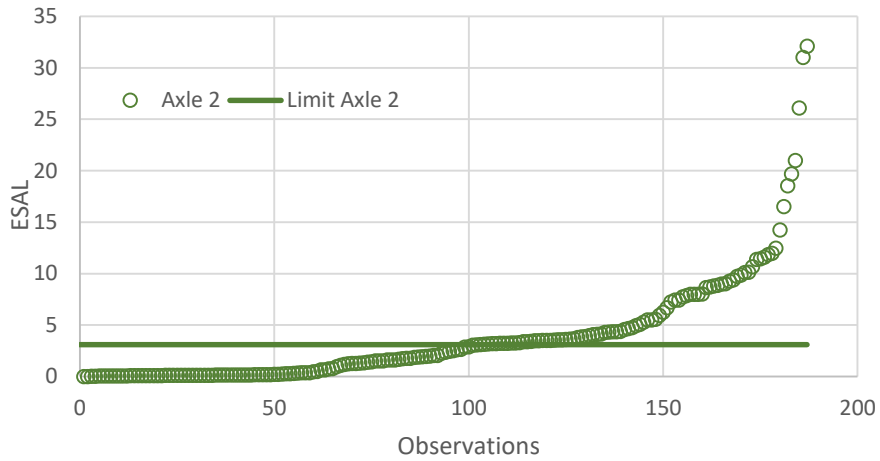


Figura 4.40 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H3

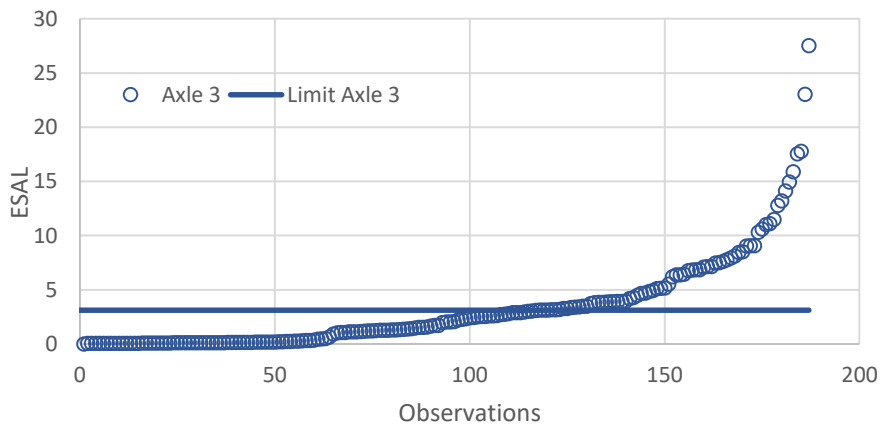


Figura 4.41 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H3

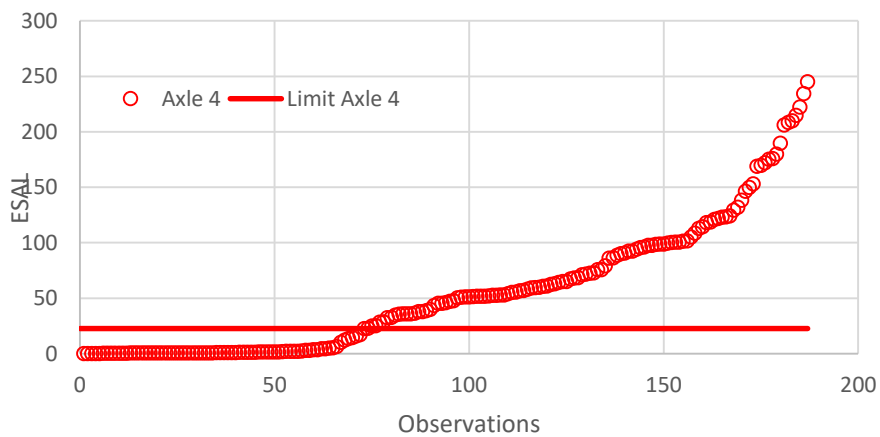


Figura 4.42 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H3

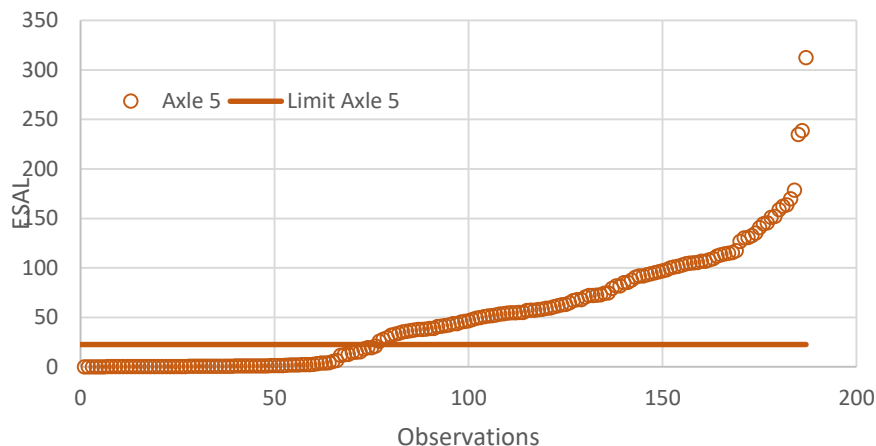


Figura 4.43 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H3

4.6.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H4

As Figuras 4.44, 4.45, 4.46, 4.47 e 4.48, apresentam a comparação do tráfego calculado pelo método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, em função do observado. Em todos os casos, verifica-se uma proximidade entre os valores do modelo JPais, o método da 4ª Potência e o método Francês. No entanto, é o modelo JPais que apresenta valores mais altos.

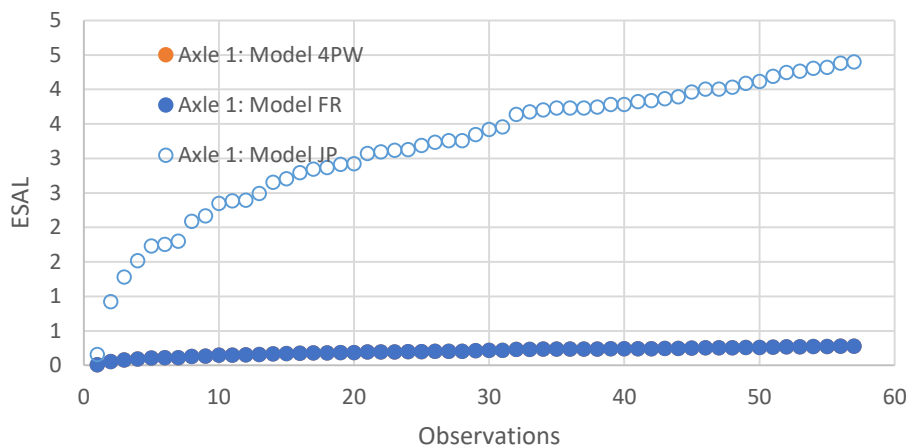


Figura 4.44 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H4

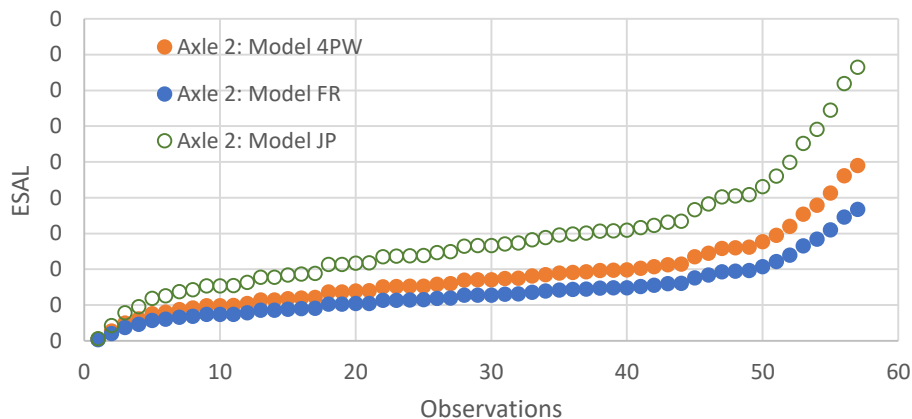


Figura 4.45 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H4

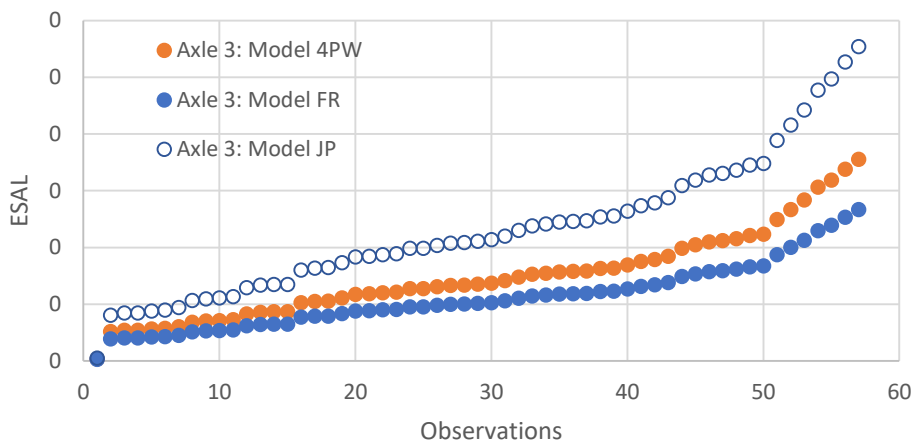


Figura 4.46 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H4

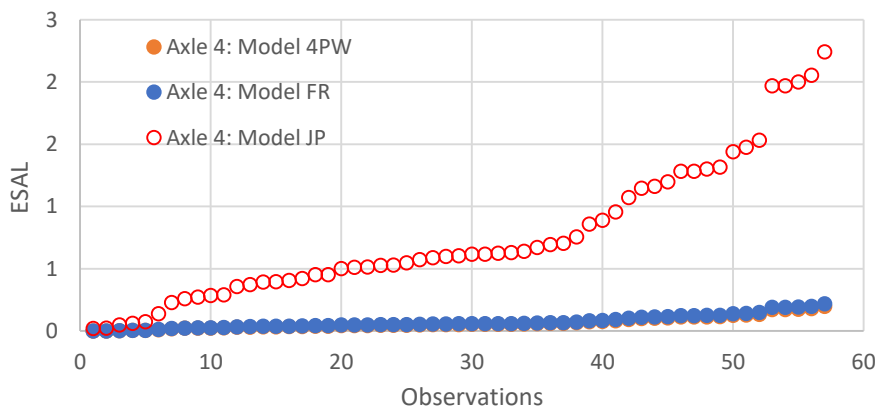


Figura 4.47 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H4

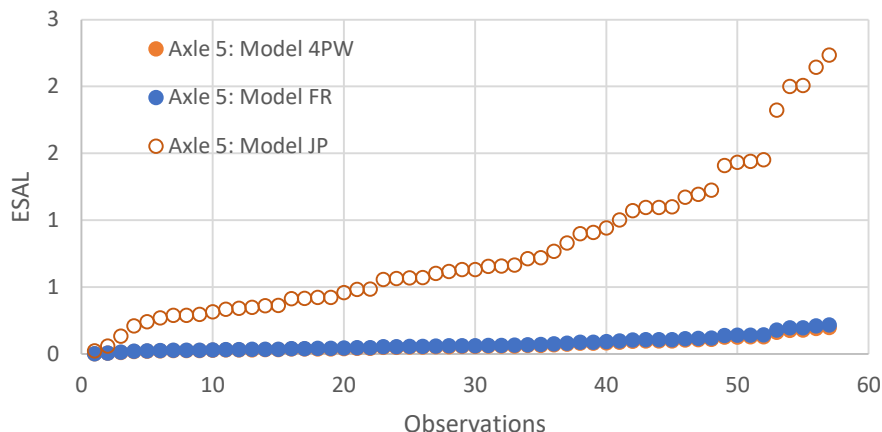


Figura 4.48 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 5 da classe H4

A Figura 4.49, apresenta a comparação da evolução do tráfego, através do método da 4ª Potência, método Francês e método JPais.

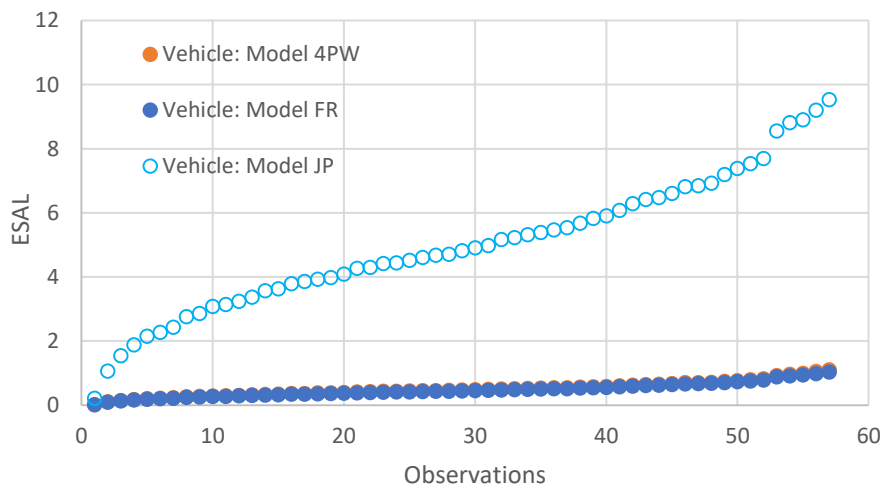


Figura 4.49 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H4

4.7 Agressividade dos eixos da classe H5

4.7.1 Método JPais

A análise realizada do Método JPais, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1, 2, 3, 4 e 5, permite verificar na Figura 4.50, 4.51, 4.52, 4.53 e 4.54,

para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

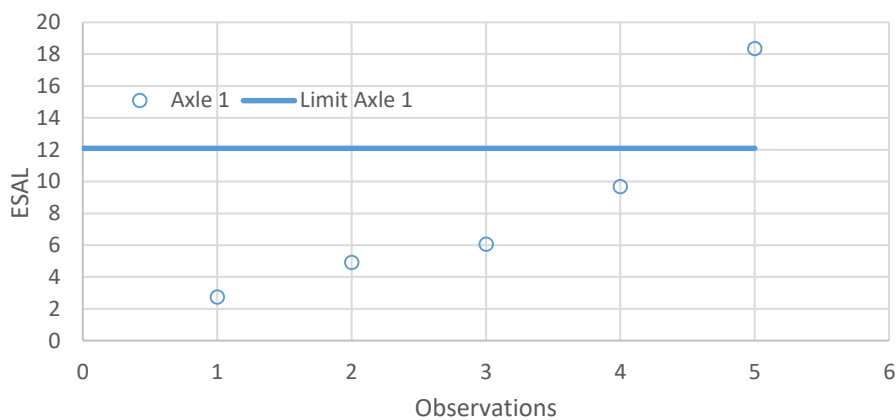


Figura 4.50 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H5

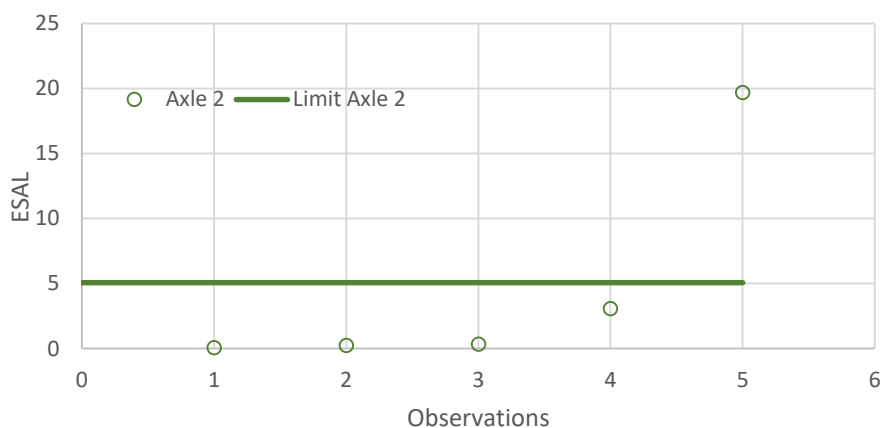


Figura 4.51 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H5

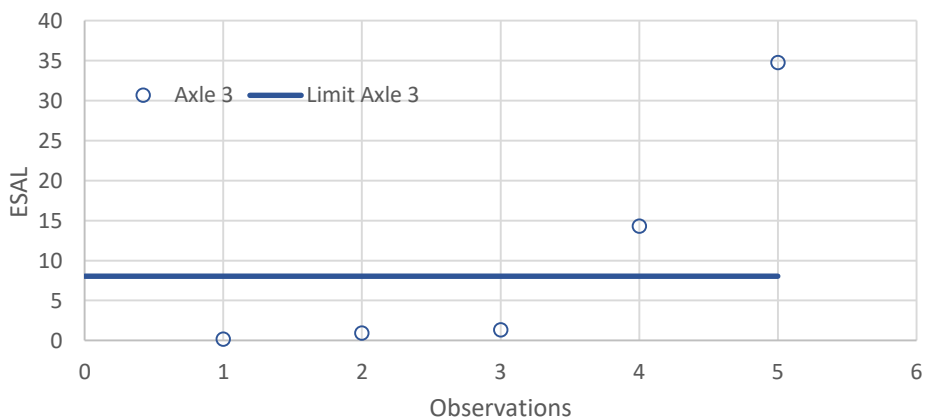


Figura 4.52 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H5

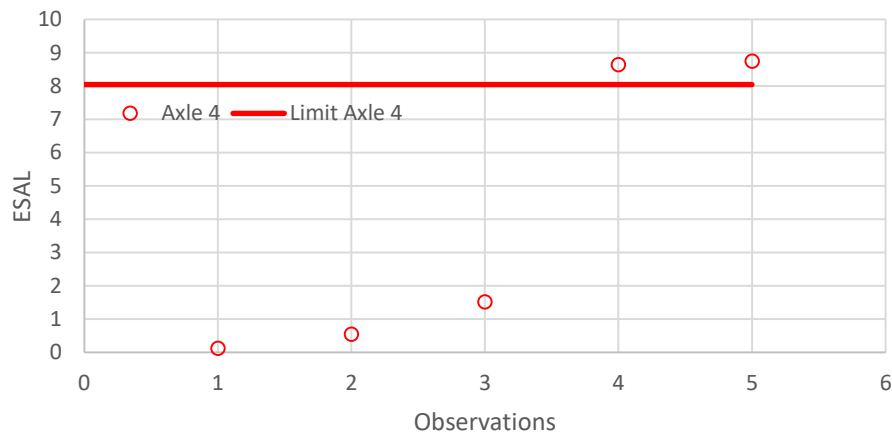


Figura 4.53 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H5

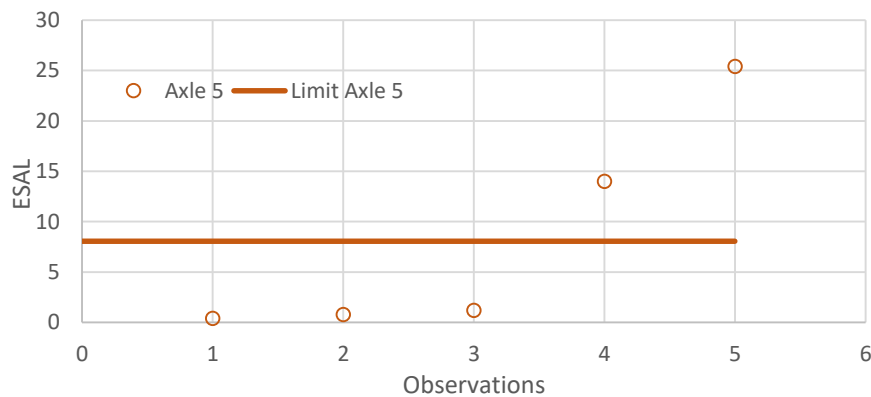


Figura 4.54 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H5

4.7.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H5

As Figuras 4.55, 4.56, 4.57, 4.58 e 4.59, apresentam a comparação do tráfego calculado pelo método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, em função do observado. Em todos os casos, verifica-se uma proximidade entre os valores do modelo JPais, o método da 4ª Potência e o método Francês. No entanto, é o modelo JPais que apresenta valores mais altos.

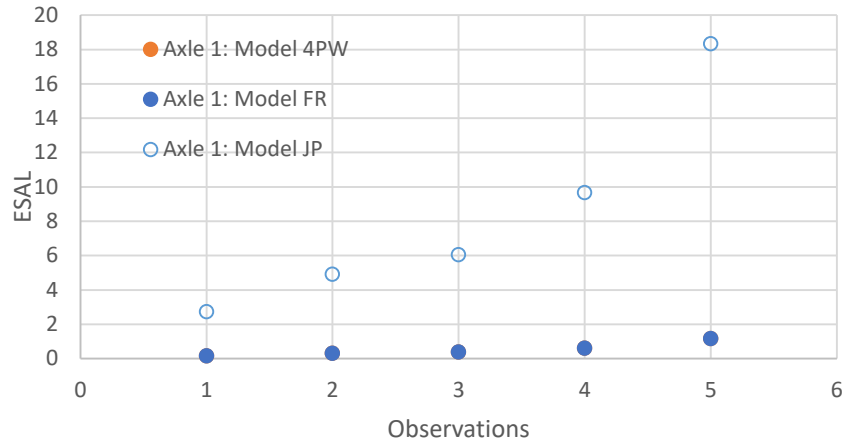


Figura 4.55 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H5

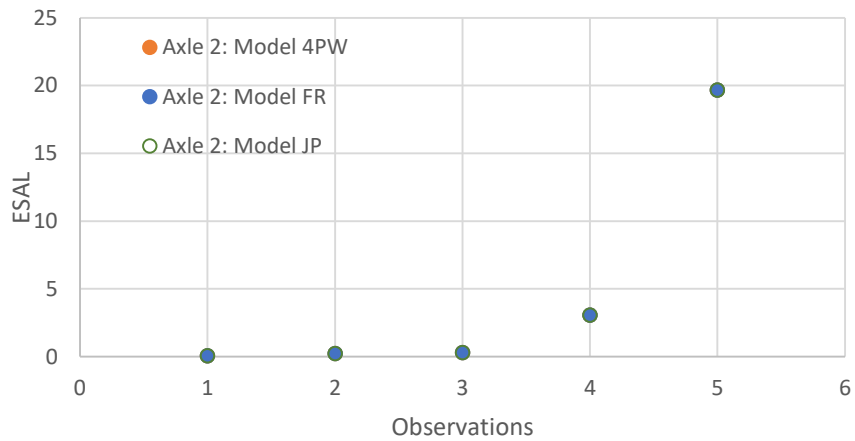


Figura 4.56 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H5

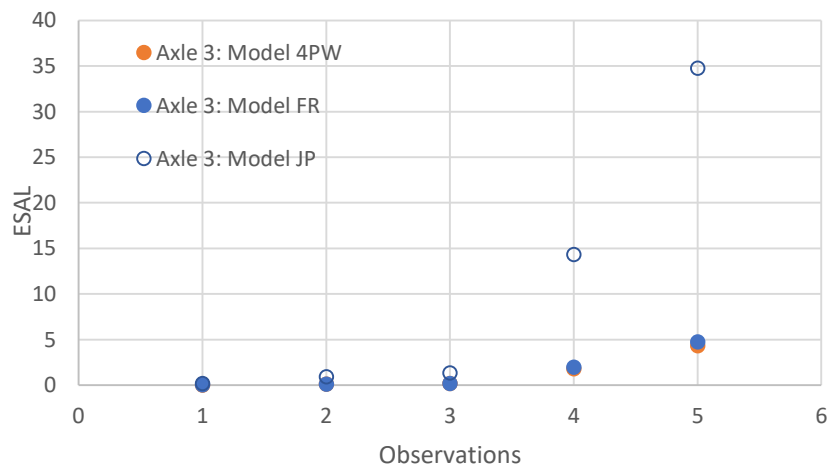


Figura 4.57 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H5

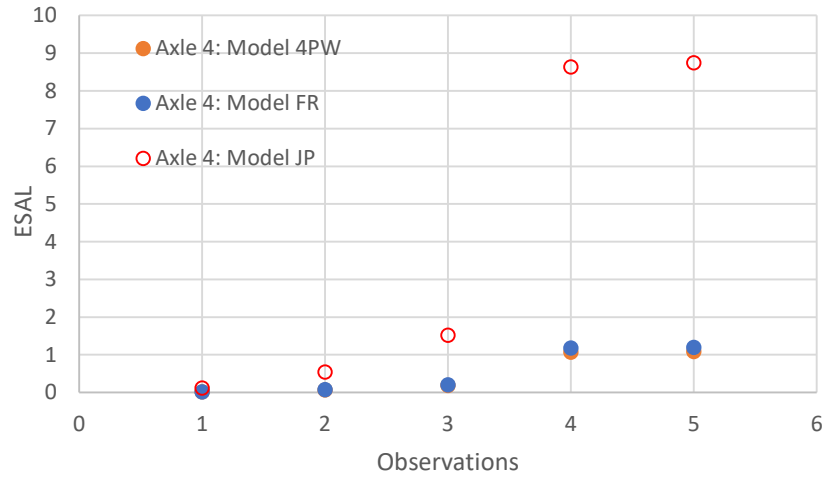


Figura 4.58 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H5

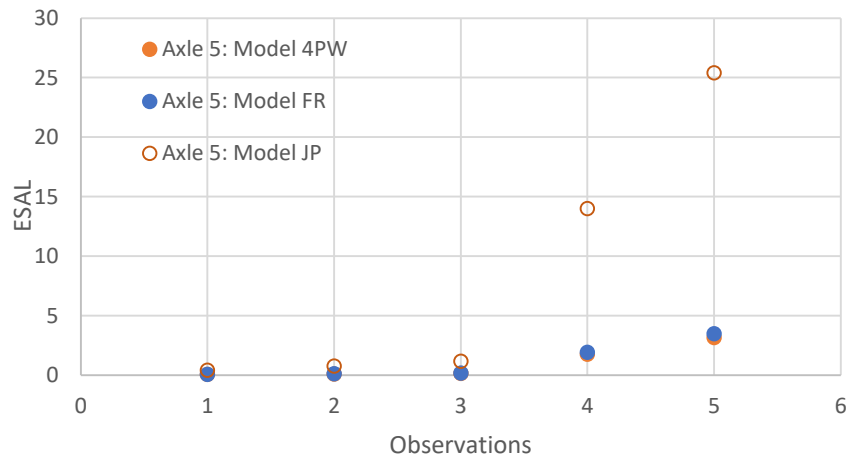


Figura 4.59 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 5 da classe H5

A Figura 4.60, apresenta a comparação da evolução do tráfego, através do método da 4ª Potência, método Francês e método JPais.

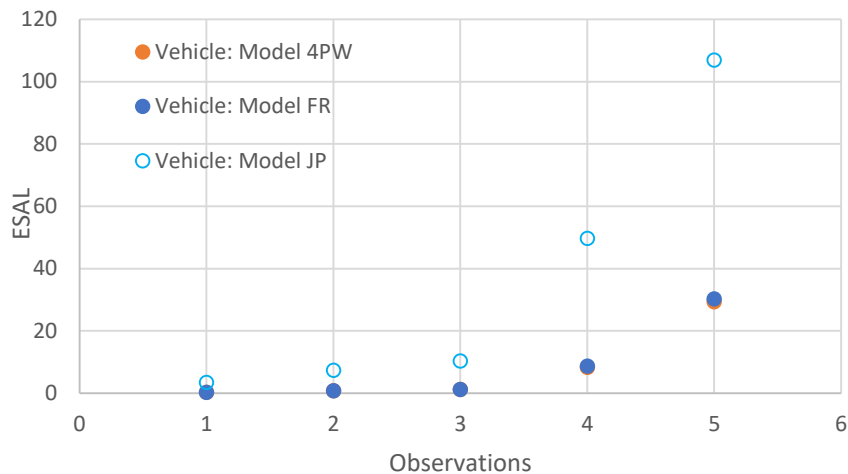


Figura 4.60 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H5

4.8 Agressividade dos eixos da classe H6

4.8.1 Método JPais

A análise realizada do Método JPais, através da observação das cargas distribuídas individualmente no eixo 1, 2, 3, 4, 5 e 6, permite verificar na Figura 4.61, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65 e 4.66, para todos os veículos observados, qual a dimensão do tráfego que ultrapassa o limite legal em cada um dos eixos.

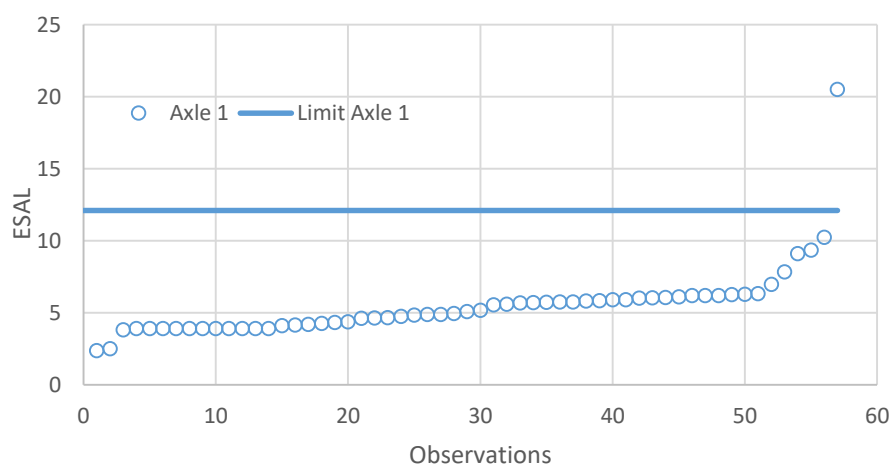


Figura 4.61 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 1 da classe H6

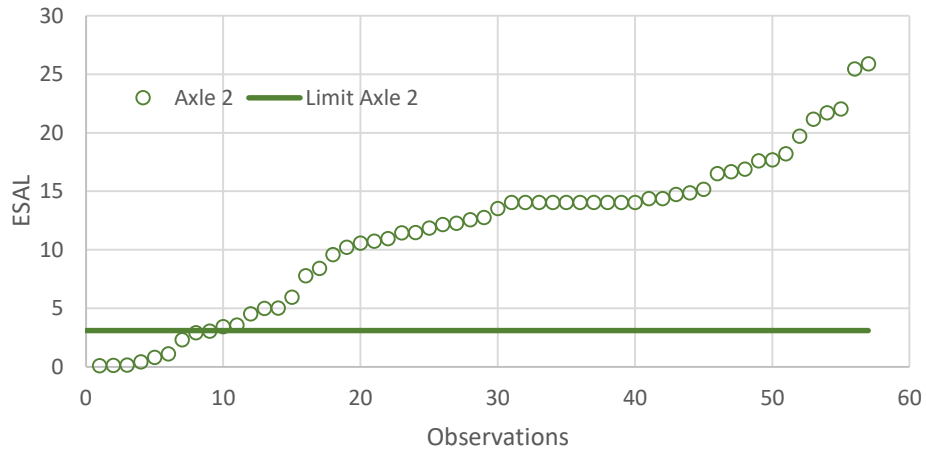


Figura 4.62 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 2 da classe H6

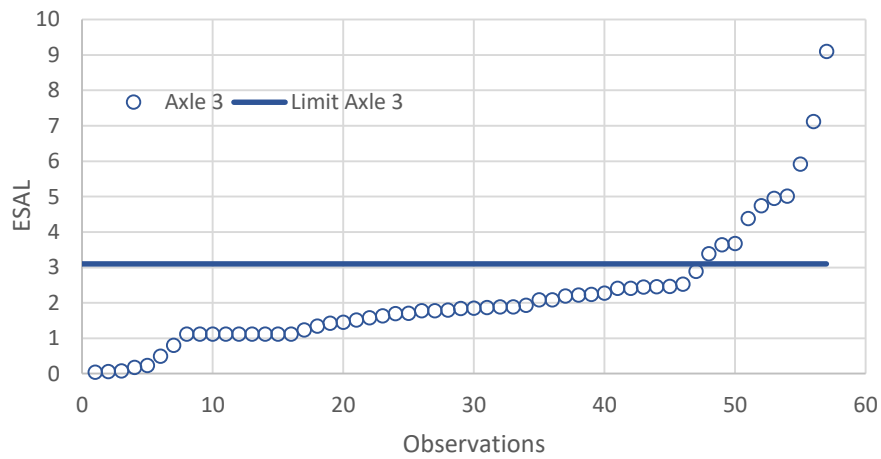


Figura 4.63 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 3 da classe H6

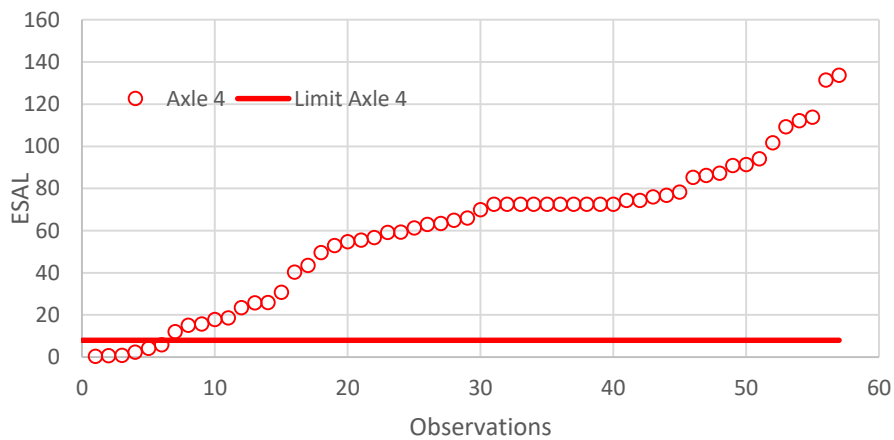


Figura 4.64 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 4 da classe H6

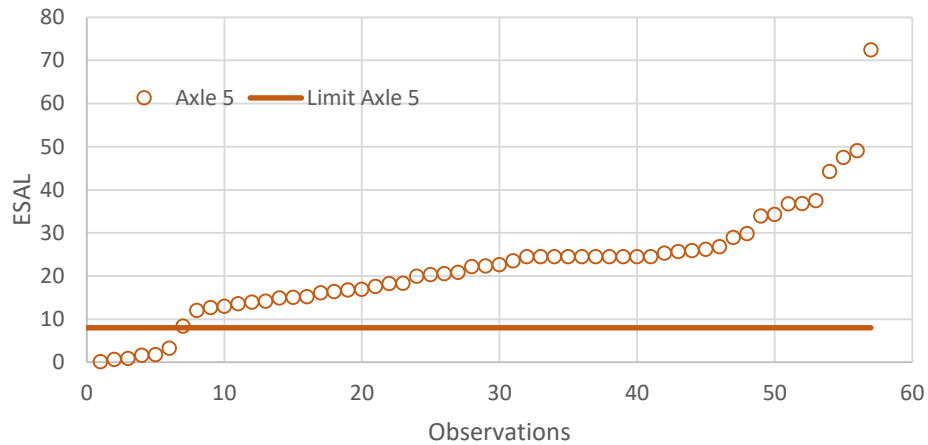


Figura 4.65 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 5 da classe H6

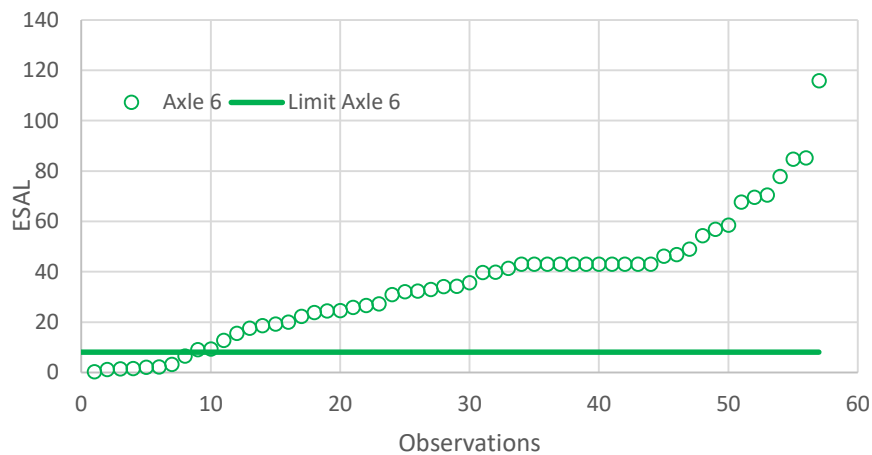


Figura 4.66 – Relação do limite das cargas por eixo e cargas observadas no eixo 6 da classe H6

4.8.2 Comparação dos métodos em veículos da classe H6

As Figuras 4.67, 4.68, 4.69, 4.70, 4.71, 4.72 e 4.73, apresentam a comparação do tráfego calculado pelo método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, em função do observado. Em todos os casos, verifica-se uma proximidade entre os valores do modelo JPais, o método da 4ª Potência e o método Francês. No entanto, é o modelo JPais que apresenta valores mais altos.

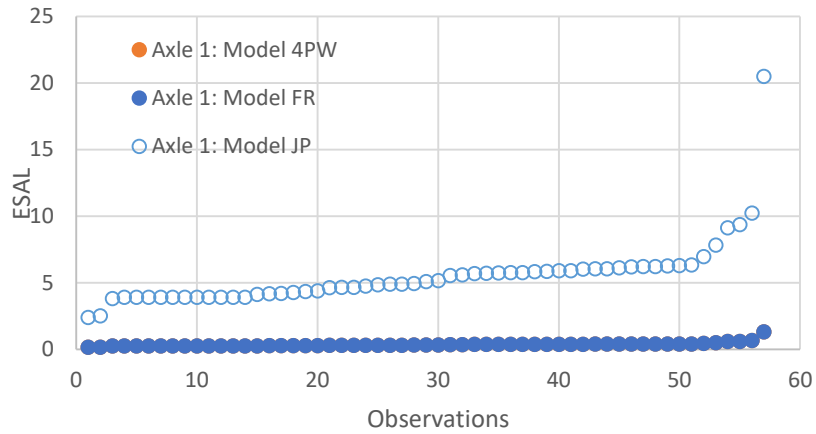


Figura 4.67 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 1 da classe H6

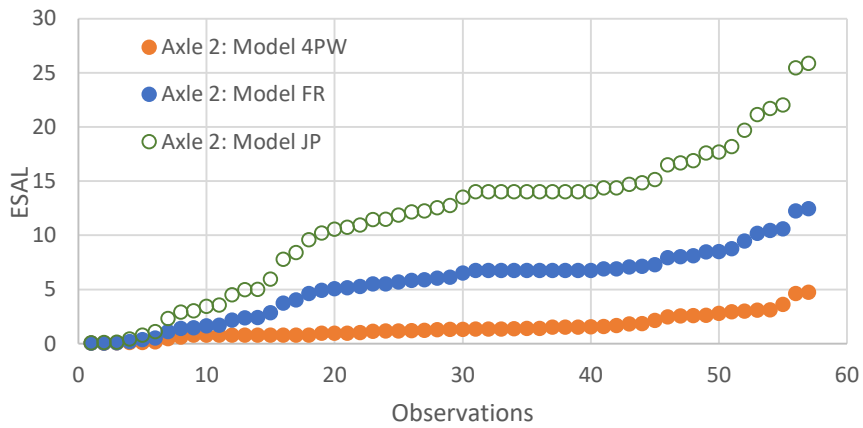


Figura 4.68 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 2 da classe H6

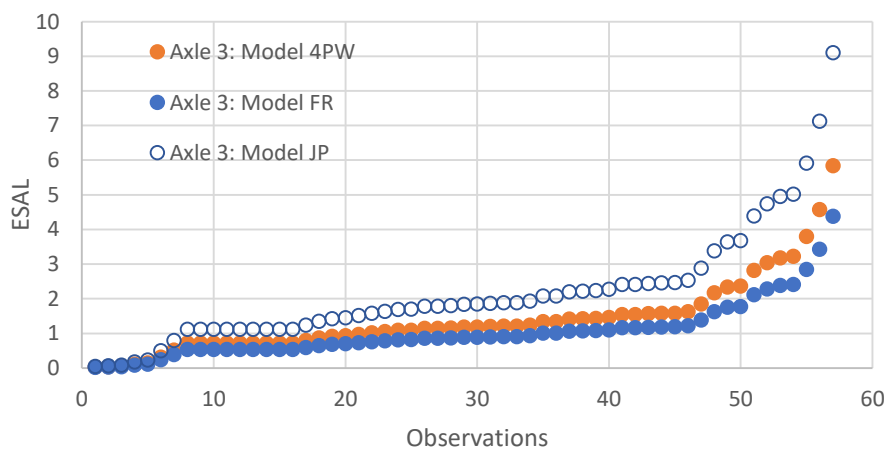


Figura 4.69 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 3 da classe H6

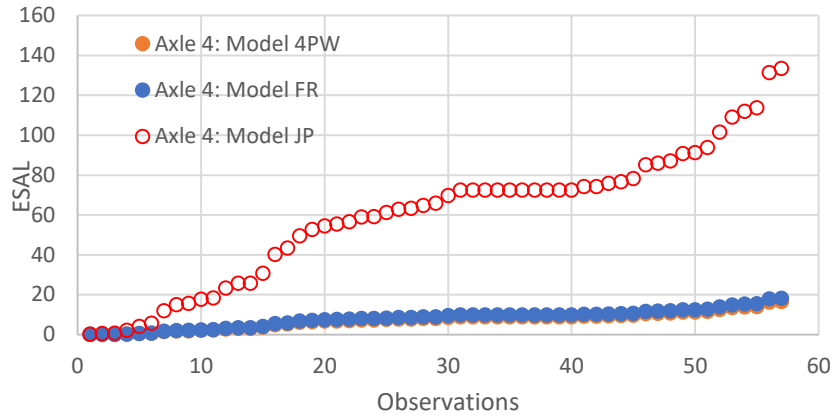


Figura 4.70 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 4 da classe H6

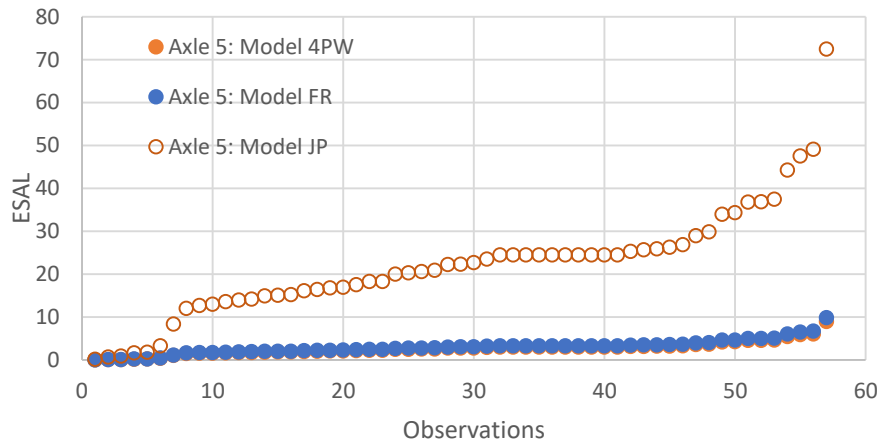


Figura 4.71 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 5 da classe H6

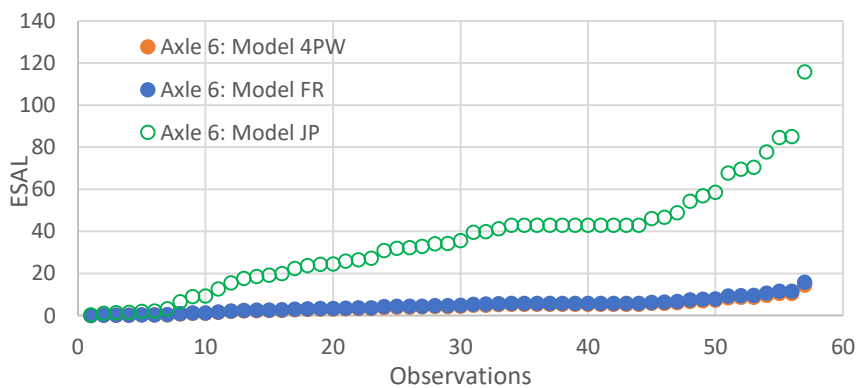


Figura 4.72 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, no eixo 6 da classe H6

A Figura 4.73, apresenta a comparação da evolução do tráfego, através do método da 4ª Potência, método Francês e método JPais.

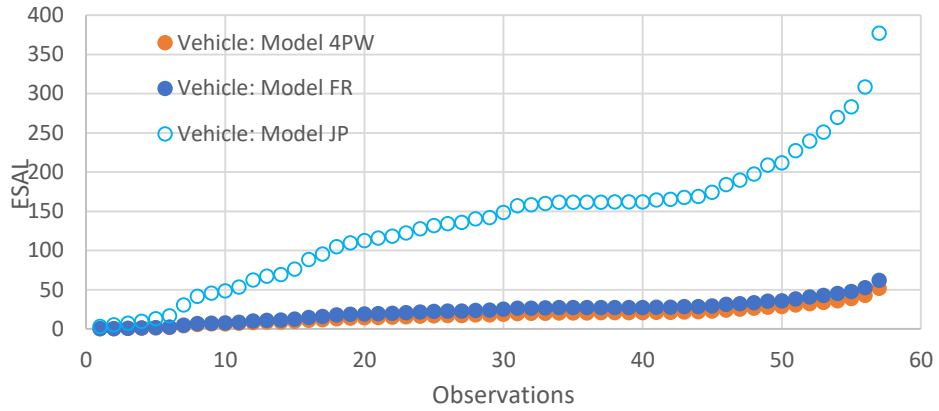


Figura 4.73 - Evolução do ESAL para método da 4ª Potência, método Francês e método JPais, nos veículos da classe H6

5 ANÁLISE DO TRÁFEGO GLOBAL

5.1 Análise pelo método da 4ª Potência

Os resultados expressos na Figura 5.1 indicam que as sobrecargas aumentam o fator camião, como por exemplo na classe F2, H3 e H4. Nas classes com maior tráfego, o fator camião aumenta mais de cinco vezes em relação aos veículos com carga legal, devido à sobrecarga. Em média, o fator camião observado para veículos sobrecarregados é mais de 10 vezes superior ao dos veículos com carga legal.

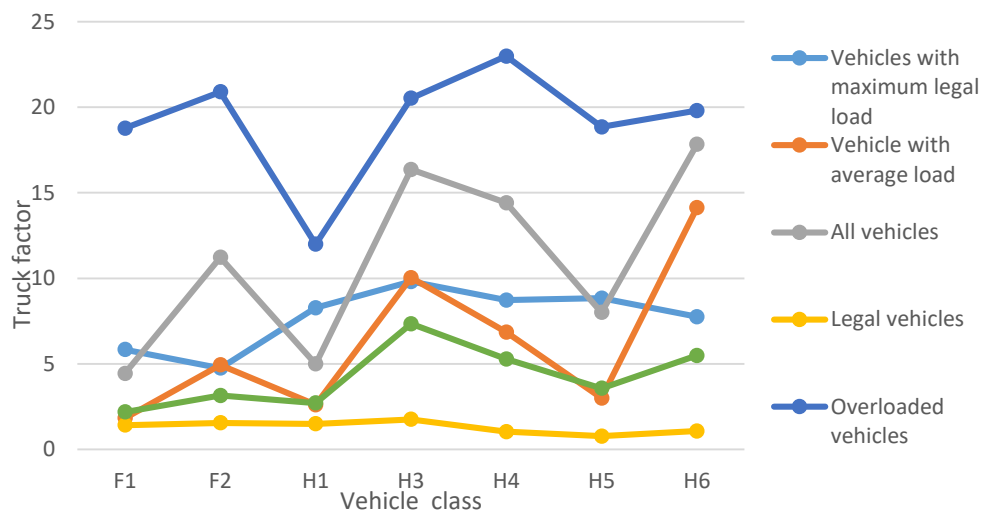


Figura 5.1 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião para um pavimento com 10-cm de espessura da camada betuminosa e 60-Mpa do módulo de rigidez da fundação

A influência das sobrecargas no fator camião máximo (Figura 5.2), evidencia mais uma vez a importância que as sobrecargas apresentam. As sobrecargas podem aumentar o fator camião em 250 %, como é o caso da classe F2, aproximadamente 200% na classe H6.

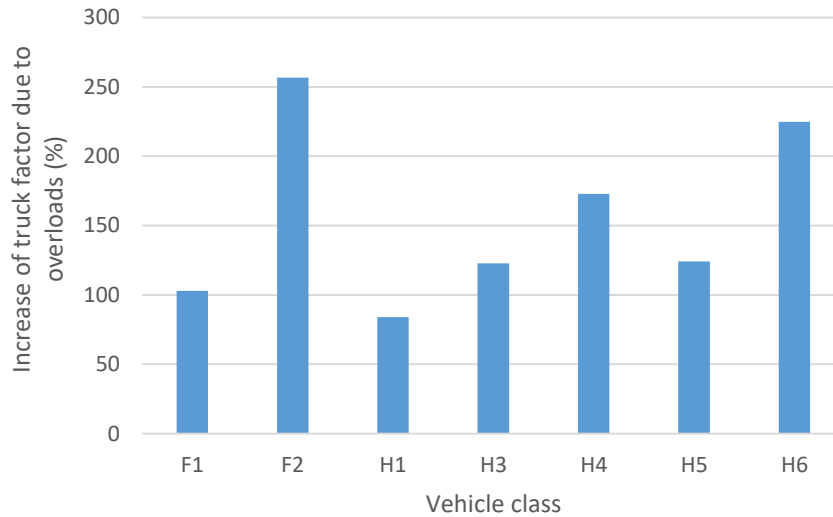


Figura 5.2 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião

A Figura 5.3 apresenta a influência das sobrecargas dos veículos sobrecarregados no dimensionamento de pavimentos. Os veículos sobrecarregados obrigam visivelmente a um aumento dos custos de pavimentação, devido ao aumento da espessura da camada betuminosa.

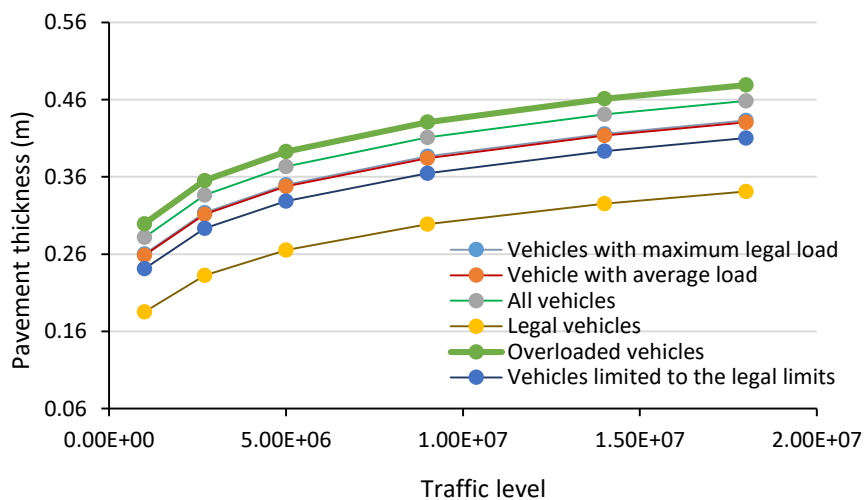


Figura 5.3 - Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa

5.2 Análise pelo método Francês

Os resultados expressos na Figura 5.4, indicam que as sobrecargas aumentam o fator camião, como por exemplo na classe F2, H3 e H4. Nas classes com maior tráfego, o fator camião

aumenta mais de cinco vezes em relação aos veículos com carga legal, devido à sobrecarga. Em média, o fator caminhão observado para veículos sobrecarregados é mais de 10 vezes superior ao dos veículos com carga legal.

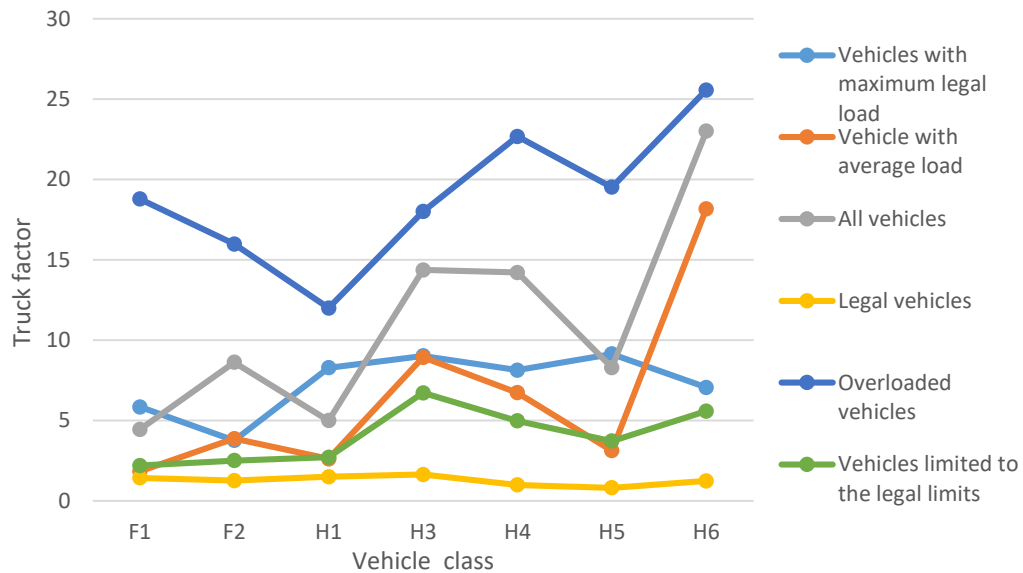


Figura 5.4 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor caminhão para um pavimento com 10-cm de espessura da camada betuminosa e 60-Mpa do módulo de rigidez da fundação

A influência das sobrecargas no fator caminhão máximo, Figura 5.5, evidencia mais uma vez a importância que as sobrecargas apresentam. As sobrecargas podem aumentar o fator caminhão em aproximadamente 250 %, como é o caso da classe F2, um valor superior a 300% na classe H6.

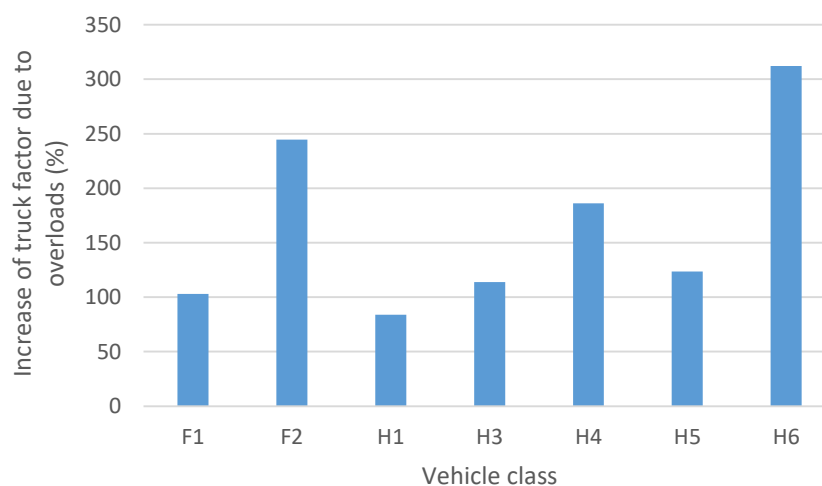


Figura 5.5 - Influência dos veículos sobrecarregados no fator caminhão

A Figura 5.6 apresenta a influência das sobrecargas dos veículos sobrecarregados no dimensionamento de pavimentos. Os veículos sobrecarregados obrigam visivelmente a um aumento dos custos de pavimentação, devido ao aumento da espessura da camada betuminosa.

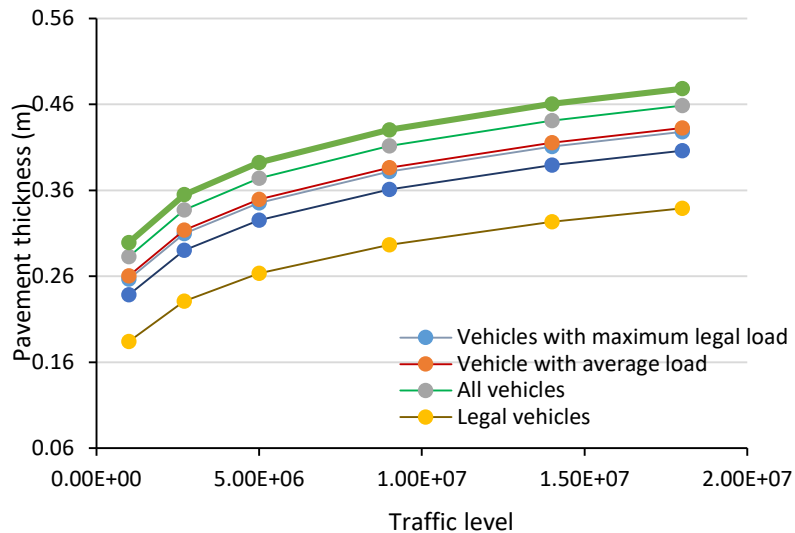


Figura 5.6 - Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa

5.3 Análise pelo método JPais

Os resultados expressos na Figura 5.7, indicam que as sobrecargas aumentam o fator caminhão, como por exemplo na classe H3, H4 e H6. Nas classes com maior tráfego, o fator caminhão aumenta mais de cinco vezes em relação aos veículos com carga legal, devido à sobrecarga. Em média, o fator caminhão observado para veículos sobrecarregados é mais de 10 vezes superior ao dos veículos com carga legal.

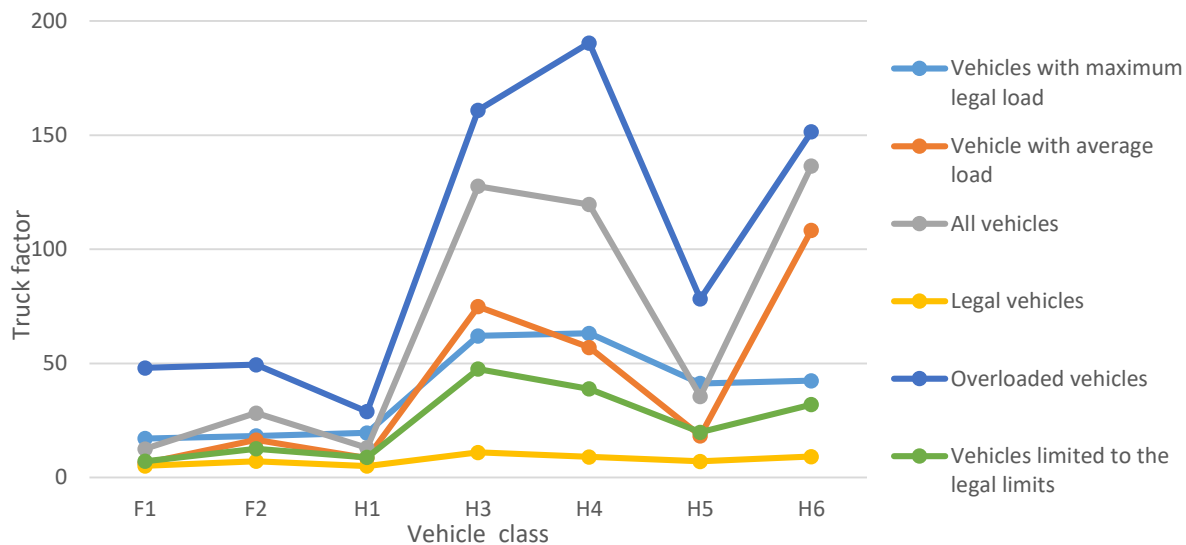


Figura 5.7 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião para um pavimento com 10-cm de espessura da camada betuminosa e 60-Mpa do módulo de rigidez da fundação

A influencia das sobrecargas no fator camião máximo, (Figura 5.8), evidencia mais uma vez a importância que as sobrecargas apresentam. As sobrecargas podem aumentar o fator camião em 200 %, como é o caso da classe H4, e aproximadamente 300% na classe H6.

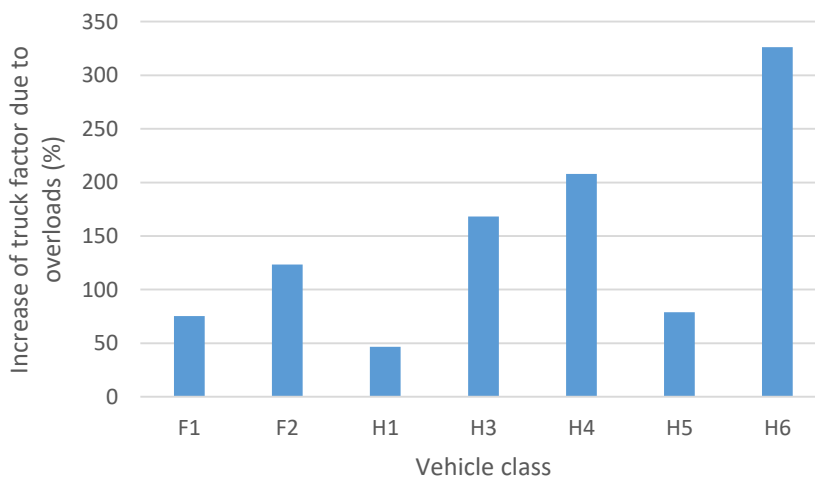


Figura 5.8 - Influência dos veículos sobrecarregados no factor camião

A Figura 5.9, apresenta a influencia das sobrecargas dos veículos sobrecarregados no dimensionamento de pavimentos. Os veículos sobrecarregados obrigam visivelmente a um

aumento dos custos de pavimentação, devido ao aumento da espessura da camada betuminosa.

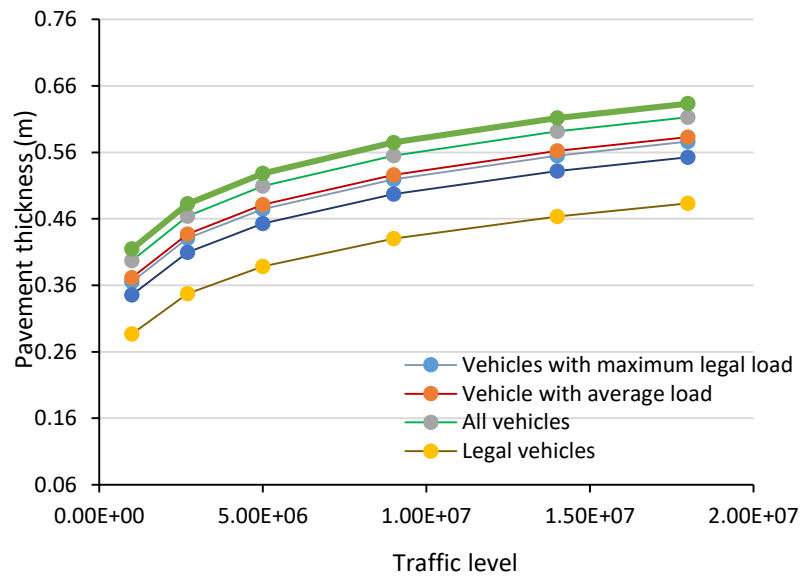


Figura 5.9 - Influência do tráfego sobrecarregado no aumento da espessura da camada betuminosa

6 ESPESSURA DO PAVIMENTO

6.1 Método da 4ª potência

As Figuras 6.1 e 6.2 exibem respetivamente, a espessura da camada betuminosa exigida para o tráfego previsto para veículos sobrecarregas e veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal.

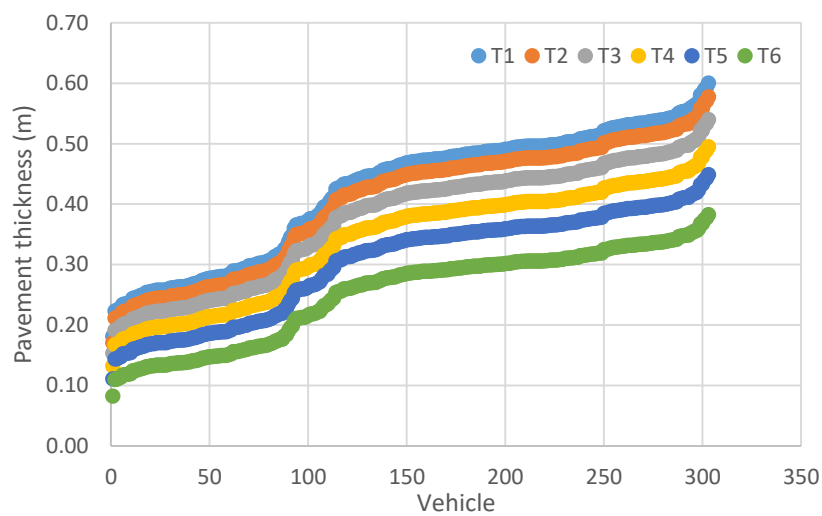


Figura 6.1 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

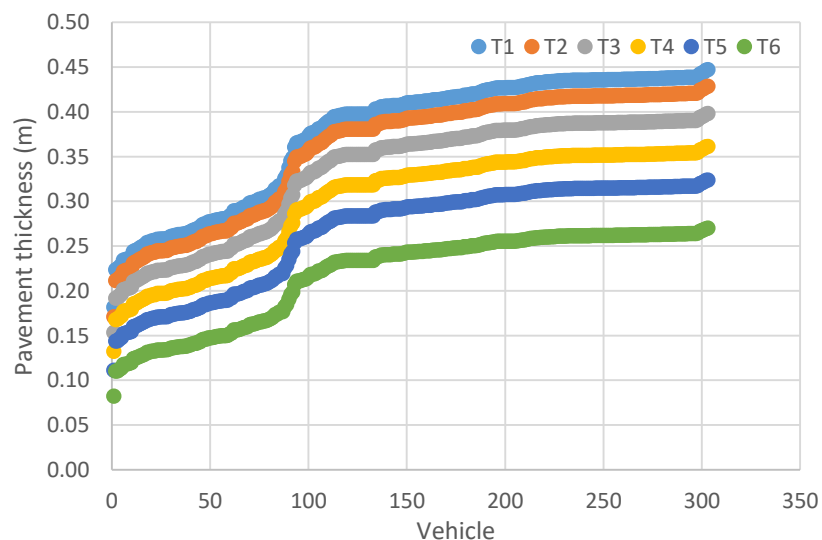


Figura 6.2 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

A Figura 6.3 exibe a espessura da camada betuminosa exigida para o tráfego previsto para a diferença entre os veículos sobrecarregas e veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal.

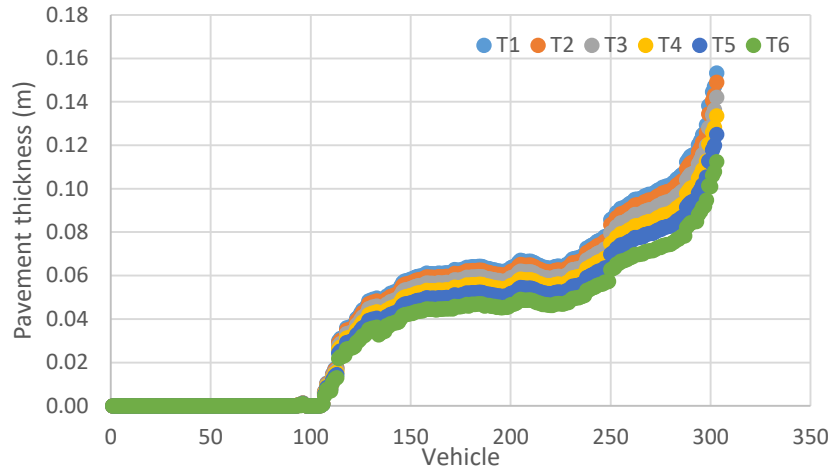


Figura 6.3 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

A Figura 6.4, mostra o crescimento da percentagem de pavimento para cada veículo e tráfego previsto.

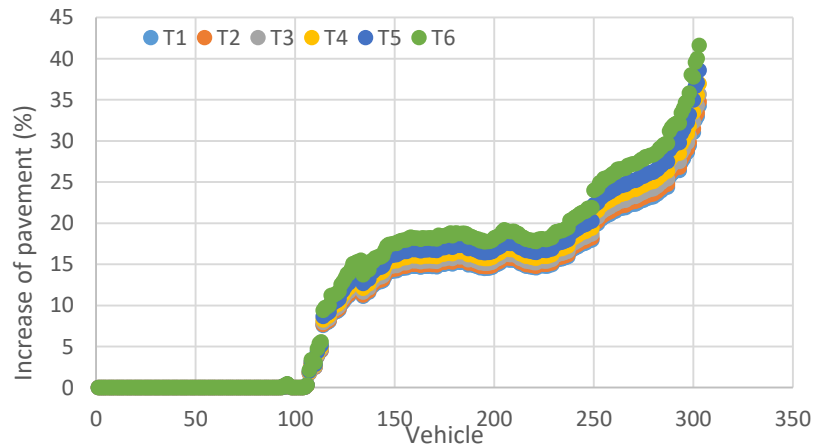


Figura 6.4 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

6.2 Método Francês

As Figuras 6.5 e 6.6, exibem respetivamente, a espessura da camada betuminosa exigida para o tráfego previsto para veículos sobrecarregas e veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal.

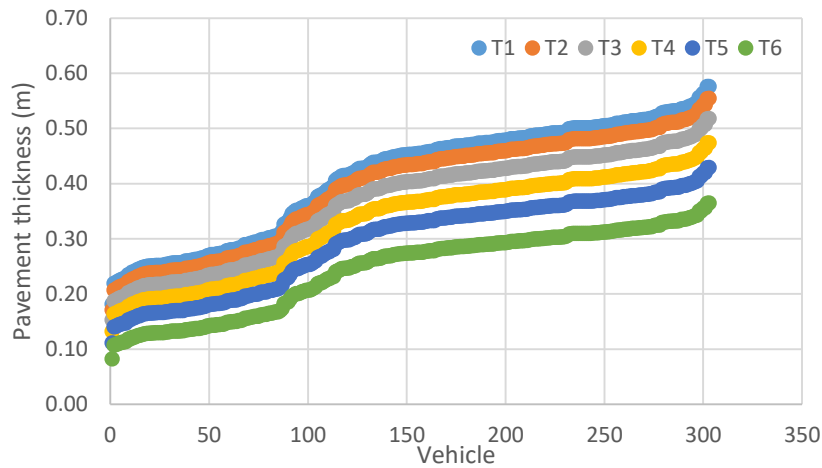


Figura 6.5 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

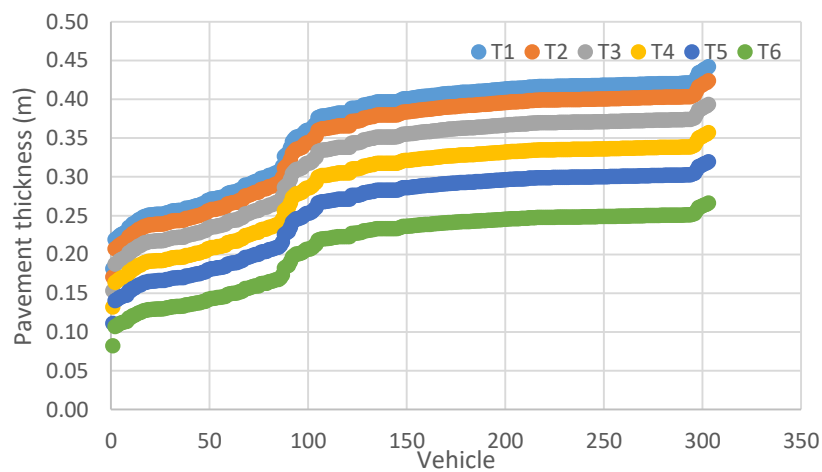


Figura 6.6 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

A Figura 6.7, exibe a espessura da camada betuminosa exigida para o tráfego previsto para a diferença entre os veículos sobrecarregas e veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal.

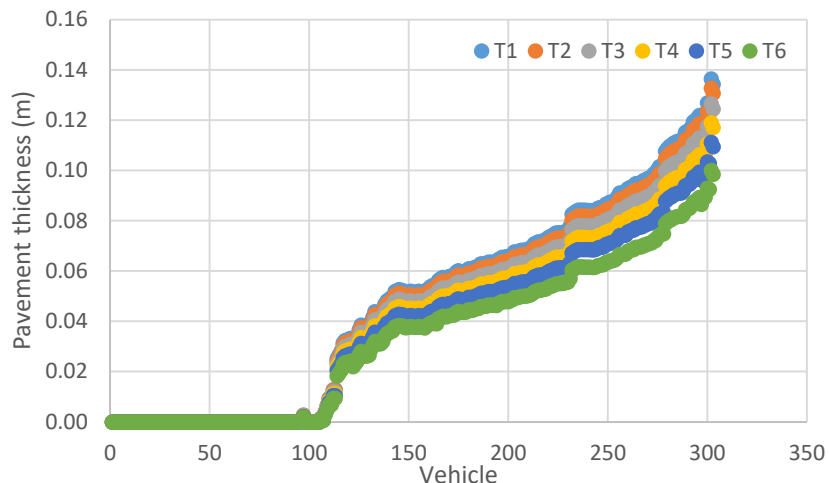


Figura 6.7 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

A Figura 6.8, mostra o crescimento da percentagem de pavimento para cada veículo e tráfego previsto.

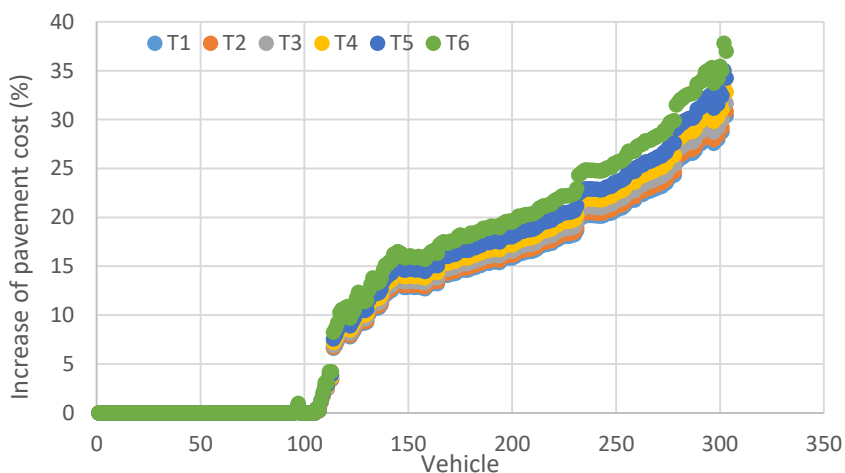


Figura 6.8 – Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

6.3 Método JPais

As Figuras 6.9 e 6.10, exibem respetivamente, a espessura da camada betuminosa exigida para o tráfego previsto para veículos sobrecarregas e veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal.

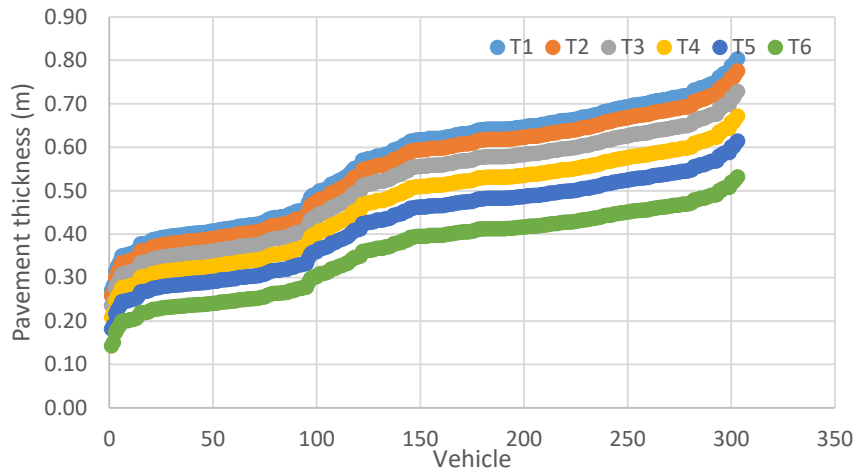


Figura 6.9 - Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

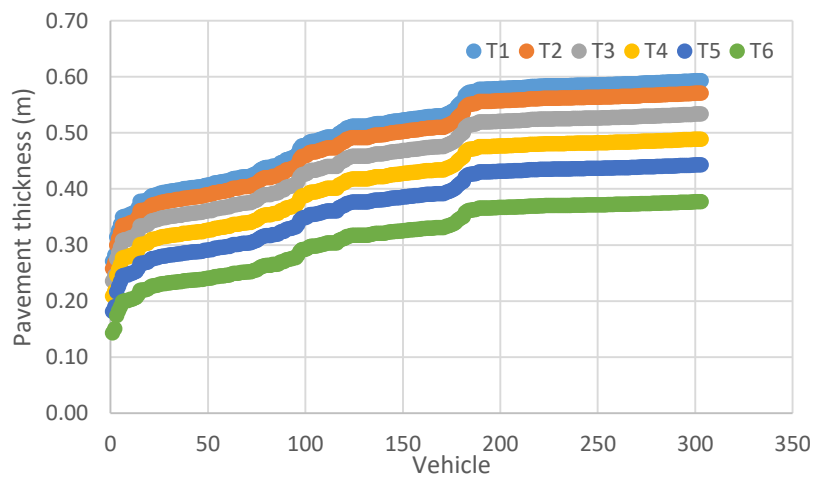


Figura 6.10 - Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

A Figura 6.11, exibe a espessura da camada betuminosa exigida para o tráfego previsto para a diferença entre os veículos sobrecarregados e veículos sobrecarregados transformados em veículos com carga legal.

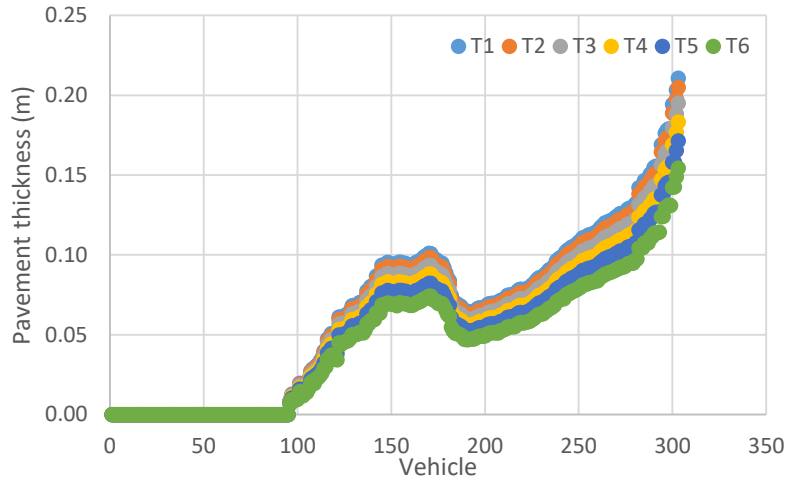


Figura 6.11 - Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

A Figura 6.12, mostra o crescimento da percentagem de pavimento para cada veículo e tráfego previsto.

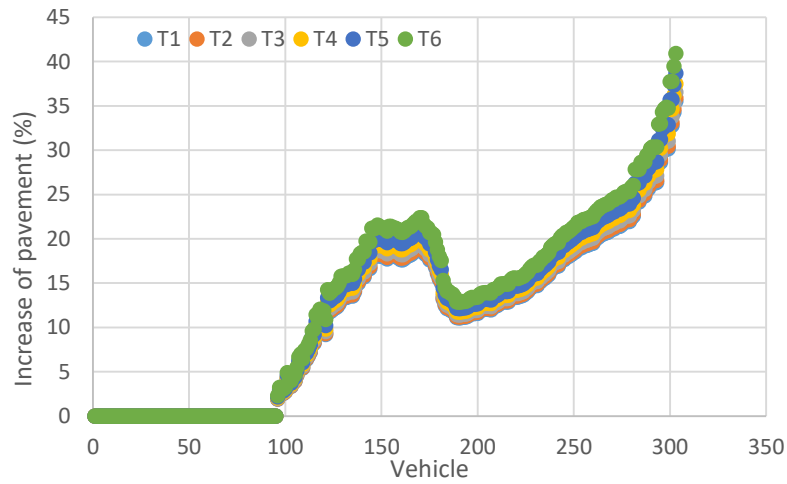


Figura 6.12 - Relação entre a espessura do pavimento e tráfego solicitante

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentam-se as conclusões do estudo efetuado sobre o impacto dos veículos que circulam sobrecarregados em pavimentos rodoviários, ao analisar o fator camião de diferentes tipos de veículos. Por fim, serão referidas considerações sobre a utilização dos resultados para estudos a desenvolver futuramente.

Para a realização deste trabalho recorreu-se aos resultados de uma campanha de pesagem de veículos pesados, onde constavam diversos dados, desde a hora, número de eixos e peso por eixo. Não foi possível comparar com dados de semanas/anos transatos no mesmo local, o que seria de todo o interesse para efeitos de avaliação da evolução do tráfego.

O tráfego analisado em estudo permitiu concluir que grande parte dos veículos observados circulam com cargas acima da máxima legal. A análise dos dados de tráfego obtidos indicou que a carga média em função do tipo de veículo varia função da carga máxima legal. Por sua vez, as classes apresentam todas um elevado número de veículos sobrecarregados.

Recorrendo aos resultados obtidos na campanha de pesagem, procedeu-se ao cálculo e análise do fator camião dos veículos pesados, recorrendo a diferentes modelos de cálculo da agressividade.

Os resultados do método da 4ª Potência e do método Francês são similares, o que não acontece em relação ao método JPais, que são superiores. Caso não circulassem veículos com excesso de carga, a agressividade estaria na gama de valores legais, o que sintomatiza o efeito claro dos veículos sobrecarregados no desempenho dos pavimentos.

A presente dissertação pretendeu contribuir para um melhor entendimento do efeito das sobrecargas do tráfego pesado nos pavimentos rodoviários flexíveis. O trabalho conduziu a resultados e conclusões pertinentes, tendo em vista o desenvolvimento de ações e medidas a tomar de forma a controlar o tráfego pesado. Com a contribuição deste trabalho, sugere-se que se prossiga à implementação de medidas obrigatórias por lei, ao tamanho do recipiente dos

camiónes, de forma a restringir o transporte de cargas superior ao permitido. De outra forma deve-se ponderar incluir no dimensionamento de pavimentos, e na sua reabilitação, fatores que permitam simular o acréscimo da agressividade de veículos sobrecarregados, para que estes suportem de forma eficaz a realidade diária destas cargas que provocam um grande impacto e degradações na sua estrutura.

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.*

Branco, F., Pereira, P. e Picado Santos, L., 2008. *Pavimentos Rodoviários*. Almedina. Coimbra

Castro, A., 2013. *Influência das condições de carregamento no dimensionamento de pavimentos*. Tese submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana, Universidade do Minho

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

AASHTO, 1986. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C..