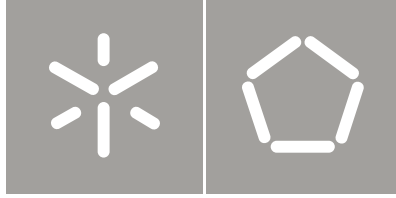




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Artur José Oliveira de Castro

Influência das Condições de Carregamento
no Dimensionamento de Pavimentos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Artur José Oliveira de Castro

Influência das Condições de Carregamento
no Dimensionamento de Pavimentos

Dissertação de Mestrado
Engenharia Urbana

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de dissertação de mestrado que apresento não teria sido possível sem a ajuda e colaboração de várias pessoas a quem quero manifestar o meu agradecimento.

Ao Professor Doutor Jorge Carvalho Pais, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, quero expressar o meu reconhecimento pela amizade, paciência, apoio e estímulo manifestado. Ao Professor Jorge Pais, devo a orientação científica, os ensinamentos e permanente incentivo, que contribuíram para a concretização deste documento.

Aos Professores do Mestrado em Engenharia Urbana da Universidade do Minho pela formação prestada, e em particular aos Professores, José Luís Silva Pinho, Elisabete Fraga de Freitas e Joel Ricardo Martins Oliveira, agradeço a disponibilidade demonstrada numa fase crucial deste percurso, que me permitiu concluir com sucesso a parte académica deste mestrado.

À Fase - Estudos e Projetos, empresa onde trabalho pelo apoio e facilidades concedidas.

A todos os colegas do curso de mestrado pelo companheirismo e em especial a Francisca Ruão e Luís Barbosa.

Aos Engenheiros Luís Fernando Pereira e Hugo Luzia, da Auto Sueco - Porto, agradeço os esclarecimentos recebidos sobre várias questões relativas aos veículos pesados bem como a disponibilidade em facultarem documentação que serviu de apoio a este trabalho.

À Transportes Nogueira e em particular ao Sr. Ricardo Fontes, pelos esclarecimentos e informações relativas à frota que a empresa tem a operar.

À minha família pelo apoio, incentivo e encorajamento imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Para finalizar dedico este trabalho à minha esposa Adelina e aos meus filhos Maria João e Alexandre.

RESUMO

A presente dissertação visa analisar a Influência das Condições de Carregamento no Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis de modo a obter dados e informações que possam ampliar o conhecimento e a aplicação de medidas práticas no âmbito do dimensionamento de pavimentos.

Carga por eixo, tipo de eixo, tipo de pneu e pressão de enchimento, são os fatores a estudar, analisando a sua influência no dimensionamento e por conseguinte no desempenho dos pavimentos. Para os dados do tráfego foram consideradas as cargas médias verificadas num posto de pesagem, sendo que o tráfego de projeto foi calculado recorrendo ao método francês e ao desenvolvimento por Pais (2013).

O trabalho tem por base um estudo de tráfego da autoestrada A3, sentido Norte - Sul (Valença - Porto), que contém informação referente à classe, número e carga por eixo e por classe de veículo. Foram definidas trinta estruturas tipo de pavimento e realizada uma análise mecanicista para determinar as respostas estruturais mais importantes no dimensionamento de pavimentos: extensão horizontal na parte inferior da camada betuminosa e extensão vertical de compressão no topo da fundação do pavimento, associadas aos efeitos que mais degradam os pavimentos respetivamente fissuração por fadiga e deformação permanente.

A análise das condições de carregamento foi realizada calculando o dano dos veículos pesados para as pressões de enchimento dos pneus e o dano provocado pelo eixo-padrão. A sobreposição destes dois valores permitiu definir o raio da carga que deve ser utilizada no dimensionamento de pavimentos.

PALAVRAS CHAVE

Dimensionamento de pavimentos; Área de contacto; Dano

ABSTRACT

The present dissertation aims to analyze the influence of loading conditions on the Design of Flexible Pavements in order to obtain data and information that can increase the knowledge and application of practical measures within the road paving.

Axle load, axle type, tire type and inflation pressure are the factors to study, analyzing its influence on the design and therefore the performance of pavements. The traffic data were considered by its average axle load obtained in a weight station using the French method and the method developed by Pais (2013).

The work is based on a traffic study of the A3 North - South direction (Valencia - Porto), which contains information regarding the class, number and axle load and vehicle class. Thirty pavements were defined and a mechanistic analysis was carried out to determine the structural responses important in the pavement design, namely the tensile strain at the bottom of the bituminous layer and vertical strain on the top of the subgrade associated to the effects which are responsible by the pavement distresses (fatigue cracking and permanent deformation).

The analysis of the loading conditions was carried out by the calculation of the damage of the heavy vehicles for the real wheel inflation pressure and the damage of the standard axle for different area of load application in the pavement design. The superposition of these values allowed to define the suitable value of the load area radius to be applied in the pavement design.

KEYWORDS

Pavement design; Contact area; Damage

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e metodologia	2
1.3	Organização da dissertação.....	3
2	Caracterização do tráfego rodoviário	5
2.1	Tráfego.....	5
2.2	Cargas	10
2.3	Agressividade do tráfego pesado	14
2.4	Pressão de enchimento dos pneus	17
2.5	Dimensionamento de pavimentos	19
3	Metodologia de trabalho.....	27
3.1	Cargas por eixo	27
3.2	Pressão de enchimento.....	29
3.3	Pavimentos estudados	33
3.4	Dano.....	34
3.5	Agressividade do tráfego	38
4	Análise das condições de carregamento	41
4.1	Introdução	41
4.2	Tráfego de projeto.....	41
4.3	Área de contacto pneu/pavimento.....	49
4.4	Dano dos veículos pesados	51
4.5	Dano do eixo-padrão.....	54
4.6	Definição da área de contacto pneu-pavimento	64

5	Considerações finais	73
5.1	Conclusões gerais do trabalho	73
5.2	Desenvolvimento de trabalhos futuros.....	74
	Referências bibliográficas	77

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Efeito das diferentes pressões de enchimento na área de contato com o pavimento	18
Figura 2.2 – Distribuição das tensões num pavimento rodoviário	20
Figura 2.3 – Ações num pavimento rodoviário (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	21
Figura 2.4 – Esquematização do rodado padrão utilizado nos métodos de dimensionamento Shell e Nottingham.....	23
Figura 2.5 – Distribuição da pressão de contacto pneu/pavimento (Vale et al., 2011) ..	24
Figura 2.6 – Configuração de pneus com/sem sulcos (Vale et al., 2011)	25
Figura 3.1 - Marcação dos pneus, índices de carga e códigos de velocidade.....	32
Figura 3.2 – Análise de dano para eixos múltiplos (Huang, 2004)	35
Figura 3.3 - Programa de cálculo do estado de tensão/deformação de pavimentos	36
Figura 4.1 – Evolução do tráfego de projeto pelo modelo JP para a carga média do tráfego função da constituição do pavimento	46
Figura 4.2 – Evolução do tráfego de projeto pelo método JP para a carga máxima legal dos eixos função da constituição do pavimento	48
Figura 4.3 – Efeito da consideração da carga máxima legal dos eixos no cálculo do tráfego de projeto pelo método JP	48
Figura 4.4 – Dano do veículo H5 com carga média no pavimento com 20 MPa de fundação.....	53
Figura 4.5 – Dano do tráfego considerando a carga média dos eixos dos veículos	53
Figura 4.6 – Dano do tráfego considerando a carga máxima legal dos eixos dos veículos	54
Figura 4.7 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 20 MPa de fundação	55
Figura 4.8 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 40 MPa de fundação	55
Figura 4.9 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 60 MPa de fundação	56
Figura 4.10 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 80 MPa de fundação	56

Figura 4.11 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 100 MPa de fundação	57
Figura 4.12 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 120 MPa de fundação	57
Figura 4.13 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 20 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR.....	58
Figura 4.14 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 40 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR.....	58
Figura 4.15 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 60 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR.....	59
Figura 4.16 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 80 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR.....	59
Figura 4.17 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 100 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR.....	60
Figura 4.18 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 120 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR.....	60
Figura 4.19 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 20 MPa de fundação	61
Figura 4.20 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 40 MPa de fundação	61
Figura 4.21 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 60 MPa de fundação	62
Figura 4.22 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 80 MPa de fundação	62
Figura 4.23 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 100 MPa de fundação	63
Figura 4.24 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 120 MPa de fundação	63
Figura 4.25 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 20 MPa de fundação	64
Figura 4.26 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 40 MPa de fundação	65
Figura 4.27 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 60 MPa de fundação	65

Figura 4.28 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 80 MPa de fundação	66
Figura 4.29 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 100 MPa de fundação	66
Figura 4.30 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 120 MPa de fundação	67
Figura 4.31 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 20 MPa de fundação	68
Figura 4.32 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 40 MPa de fundação	69
Figura 4.33 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 60 MPa de fundação	69
Figura 4.34 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 80 MPa de fundação	70
Figura 4.35 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 100 MPa de fundação	70
Figura 4.36 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 120 MPa de fundação	71
Figura 4.37 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga máxima legal dos eixos e tráfego JP, para pavimento com 60 MPa de fundação.....	72
Figura 4.38 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga máxima legal dos eixos e tráfego JP, para pavimento com 80 MPa de fundação.....	72

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação dos veículos automóveis segundo a EP	6
Tabela 2.2 – Caracterização dos veículos pesados.....	9
Tabela 2.3 – Carga máxima por eixo permitida na Europa	12
Tabela 3.1 – Tráfego pesado observado na autoestrada A3 em 2010 (Norte - Sul).....	28
Tabela 3.2 – Carga máxima legal por eixo para os veículos pesados	29
Tabela 3.3 – Tipos de Pneus e Pressões de Enchimento	30
Tabela 3.4 – Tipos de pneus existentes nos veículos pesados.....	32
Tabela 3.5 – Pavimentos analisados	33
Tabela 3.6 – Parâmetro função do tipo de eixo – AP	39
Tabela 3.7 - Constantes para a equação de k.....	39
Tabela 4.1 – Tráfego de veículos pesados observado na autoestrada A3.....	42
Tabela 4.2 – Carga máxima legal dos eixos dos veículos pesados.....	42
Tabela 4.3 – Cálculo do tráfego de projeto pelo método FR considerando a carga média dos eixos	43
Tabela 4.4 – Cálculo do tráfego de projeto pelo método FR considerando a carga máxima legal dos eixos	44
Tabela 4.5 – Cálculo do tráfego de projeto pelo modelo JP considerando a carga média dos eixos	45
Tabela 4.6 – Cálculo do tráfego de projeto pelo modelo JP considerando a carga máxima legal dos eixos	47
Tabela 4.7 – Raios das áreas de contacto	50
Tabela 4.8 – Dano do veículo H5 com carga média no pavimento com 20 MPa de fundação.....	52
Tabela 4.9 – Valores do raio (cm) para dimensionamento de pavimentos para tráfego obtido pelo modelo JP	68

Símbolos e Abreviaturas

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

AASHO - American Association of State Highways Officials

EP - Estradas de Portugal

JPAV - Programa de Cálculo Automático

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NCHRP - National Cooperative Highway Research Program

OTEP - Observatório Transfronteiriço Espanha / Portugal

A_c - Área da superfície de contato de raio r

AP - Parâmetro função do tipo de eixo e rodado (modelo JP)

c - Número de vias

BP - Constantes para a equação de k_{JP}

E_{asp} - Módulo de deformabilidade da camada betuminosa (MPa)

E_{MB} - Módulo de rigidez da mistura betuminosa (Pa)

E_{subg} - Módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa)

ESAL - Equivalent Single Axle Load

f - Fator de equivalência entre eixos

F - Carga sobre a roda (carga legal máxima)

FC - Fator camião

FR - Método francês para o cálculo da agressividade do tráfego

H_{asp} - Espessura da camada betuminosa (m)

H_{gra} - Espessura da camada granular (m)

JP - Método desenvolvido por J Pais para o cálculo da agressividade do tráfego

k - Fator dependente do tipo de eixo

k_{FR} - Fator dado pelo método FR

k_{JP} - Fator dado pelo modelo JP

K_s - Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência

n - Número de anos

N_t - Número de eixos admissível (fadiga)

N_z - Número de eixos admissível (deformação permanente)

NAV_P - Número Acumulado de Veículos Pesados

NAV_P (Ano Horizonte) - Número Acumulado de Veículos Pesados no Ano Horizonte

NAEP - Número Acumulado de Eixos Padrão

P_c - pressão de contacto (igual à pressão de enchimento P_e)

P_e - Pressão de enchimento (igual à pressão de contacto P_c)

P_i - Carga do eixo real (kN)

P_{ref} - Carga do eixo de referência (kN) pavimentos flexíveis, eixo padrão = 80 kN

t - Taxa de crescimento

TMDA (Ano Zero) - Tráfego Médio Diário Anual no Ano Zero

TMDA (Ano Ref) - Tráfego Médio Diário Anual no Ano de Referência

TMDAVP (Ano Zero) - Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados no Ano Zero

V_{bet} - Percentagem volumétrica de betume (%)

% VP - Percentagem de veículos pesados no ano zero.

γ - Fator de agressividade

γ_{eixo} - Fator de agressividade do eixo

γ_{veículo} - Fator de agressividade do veículo

α - Coeficiente de potenciação, função da rigidez da estrutura do pavimento

t - Extensão radial de tração

z - Extensão vertical de compressão

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O transporte rodoviário de mercadorias é essencial para o crescimento económico do país. É por isso importante que haja racionalização dos recursos que permitirão uma gestão sustentável das infraestruturas rodoviárias existentes e das que serão construídas no futuro.

Uma das peças dessa gestão é a fase de projeto de que faz parte integrante o dimensionamento dos pavimentos rodoviários. No dimensionamento, um dos fatores que é tido em consideração é o tráfego de projeto expresso em função do número de veículos pesados, principal causa da degradação dos pavimentos rodoviários, quer eles sejam flexíveis, semirrígidos ou rígidos, destacando-se o fendilhamento por fadiga e as deformações permanentes como as principais degradações que comprometem a vida dos pavimentos.

Este tráfego é composto por diferentes tipos de veículos, os quais apresentam diferentes tipos de eixos, diferente número de rodas por eixo, diferentes pressões de enchimento dos pneus e diferentes valores de cargas por eixo. Embora exista esta diversidade de veículos, quando se dimensiona um pavimento, consideram-se valores tipificados para os elementos referentes aos pneus (área de contato, distância entre eixos de rodas duplas e a distância entre as faces interiores do pneus), através dos quais se dá a interação entre o veículo e o pavimento.

É sobre a área de contato pneu-pavimento que são transmitidas ao pavimento as cargas aplicadas a cada eixo, pelo que a sua correta consideração influencia o resultado do dimensionamento dos pavimentos e conseqüentemente o seu desempenho ao longo do período de vida. Na realidade, estes valores variam em função da largura do pneu e das condições de carregamento, já que a larguras diferentes correspondem áreas de contato diferentes e pressões de enchimento diferentes.

A informação sobre as cargas por eixo permitidas para os veículos que circulam em Portugal está definida e fixada no Decreto-Lei n.º 133/2010 de 22 de Dezembro. Relativamente à disponibilidade de informação sobre os tipos de pneus montados nos diferentes tipos de veículos e a correspondente pressão de enchimento dos mesmos, ela é escassa e depende da fonte que a fornece. Os fabricantes das diferentes marcas de veículos indicam nas suas especificações o tipo e dimensão dos pneus recomendados e alguns ainda propõem alternativas possíveis. Como seria expetável, cada fabricante indica tipos de pneus diferentes para veículos com as mesmas características. Com os pneus acontecem situações idênticas com indicação de pressões de enchimento diferentes para tipos de pneus com as mesmas características.

Deste modo, afigura-se de importante o estudo das condições de carregamento dos pavimentos visando o seu dimensionamento, nomeadamente no que concerne à definição da área de contacto pneu-pavimento para dimensionamento de pavimentos.

1.2 Objetivos e metodologia

Perante o enquadramento acima apresentado, o presente trabalho tem como objetivo obter dados e informações que possam aumentar o conhecimento e assim contribuir para a definição de medidas práticas no apoio ao dimensionamento dos pavimentos rodoviários, nomeadamente na definição das condições de carregamento a utilizar no dimensionamento de pavimentos.

Para concretizar os objetivos propostos definiu-se a metodologia de trabalho a implementar, começando por desenvolver uma pesquisa bibliográfica sobre o tema e a compilação de elementos atuais sobre veículos e pneus.

Para este trabalho definiram-se 30 estruturas tipo de pavimento para as quais foi determinada a resposta estrutural do pavimento para a carga do eixo-padrão, a qual foi comparada com a resposta do pavimento para uma situação real de tráfego.

Para minimizar a escassez de dados sobre o tipo de pneus e a pressão de enchimento dos veículos pesados que solicitam os pavimentos, procurou obter-se de empresas

transportadoras alguns elementos adicionais que permitissem perceber se operacionalmente eram utilizados os valores indicados pelos fabricantes.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos sendo que no presente capítulo é feita uma introdução ao trabalho e descritos os objetivos a atingir.

No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte sobre o tema, com considerações sobre o tráfego de veículos, sendo apresentadas as principais características imprescindíveis para o dimensionamento e análise do desempenho de pavimentos e os limites legais previstos na legislação.

No Capítulo 3 descreve-se a pesquisa efetuada para obtenção das características dos pneus utilizados nos veículos pesados com ênfase nas suas dimensões e pressão de enchimento.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da modelação do dimensionamento dos pavimentos de modo a estudar a influência das condições de carregamento do tráfego no dimensionamento dos pavimentos.

No Capítulos 5 apresentam-se as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros sobre temas similares.

2 Caracterização do tráfego rodoviário

Neste capítulo descreve-se o estado da arte do tema da dissertação, sendo abordados o tráfego, a carga por eixo, tipo de pneu, pressão de enchimento e o dimensionamento de pavimentos.

2.1 Tráfego

O tráfego rodoviário é extremamente variado e difícil de caracterizar. Composto por veículos que vão desde os ligeiros até aos camiões rígidos, articulados com reboque de diversos eixos e cargas por eixo. O conhecimento das suas características é muito importante para o estudo do comportamento dos pavimentos rodoviários e dos danos causados à sua estrutura.

Em Portugal, a EP – Estradas de Portugal, propôs a consideração de onze categorias de veículos automóveis designadas de **a** a **k**, no sentido de organizar as diversas tipologias de veículos automóveis (Tabela 2.1).

Destas categorias, apenas as **f** a **k** correspondem a veículos pesados e por isso, as categorias a considerar no dimensionamento dos pavimentos, já que as cargas por eixo e o efeito sobre os pavimentos são mais significativos nos veículos pesados devido à maior carga transportada.

Estas cargas são transmitidas aos pavimentos pelos pneus de rodas simples ou duplas com configurações de eixos simples, duplos ou triplos. Além deste efeito, também a frequência com que o pavimento é solicitado provoca a degradação do mesmo. Os maiores danos podem ser listados como sendo:

- Degradação da camada de desgaste, com a exposição dos agregados e perda da textura superficial decorrente da abrasão provocada pelos veículos;

- Fendas que se formam e evoluem nas camadas betuminosas devido à fadiga provocada pela repetição das cargas;
- Formação de rodeiras ou ondulações na superfície ocasionadas pela acumulação de deformações em todas as camadas ou somente no revestimento, sob ação das cargas do tráfego.

Tabela 2.1 – Classificação dos veículos automóveis segundo a EP

CATEGORIA	DESCRIÇÃO
Velocípedes	
a	Velocípedes sem motor auxiliar
b	Velocípedes com motor auxiliar
Ligeiros	
c	Motociclos com ou sem “side car”
d	Automóveis com ou sem reboque incluindo, os veículos comportando o máximo de 9 lugares
e	Camionetas até 3000kg de carga com ou sem reboque
Pesados	
f	Camiónes de mais de 3000 kg sem reboque
g	Camiónes com um ou mais reboques
h	Tratores com semirreboque Tratores com semirreboque e um ou mais reboques Tratores com um ou mais reboques
i	Autocarros e trolleybus
j	Tratores agrícolas
k	Tratores sem reboque ou semirreboque e veículos especiais (cilindros, bulldozers, etc.)

O tráfego é assim um dos fatores mais importantes a ser considerado no dimensionamento dos pavimentos e na previsão de seu comportamento ao longo da sua vida útil. Em Portugal, tal como na maioria dos países europeus, para efeitos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, considera-se o tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDAVP), que corresponde ao ano de abertura da estrada e à via mais solicitada, também designada como via de projeto (em estradas com duas ou mais vias, a via de projeto corresponde, regra geral, à via mais à direita num dado sentido).

Em fase de contagem de tráfego é aferido o tráfego médio diário anual (TMDA) e a percentagem de veículos pesados (%VP) bem como a eventual taxa de crescimento destes veículos, também um dado indispensável para a determinação de tráfego de projeto.

O tráfego médio diário anual para o ano de início de exploração é dado pela atualização do tráfego médio diário anual do ano de referência, segundo a expressão:

$$TMDA_{(AnoZero)} = TMDA_{(AnoRef)} * (1+t)^n \quad (2.1)$$

Sendo,

$TMDA_{(Ano Zero)}$ - Tráfego Médio Diário Anual no Ano Zero

$TMDA_{(Ano Ref)}$ - Tráfego Médio Diário Anual no Ano de Referência

t - Taxa de crescimento

n - N° de anos

Da afetação do tráfego médio diário anual para o ano de início de exploração pela percentagem de veículos pesados aferida, acrescido do coeficiente que depende do número de vias por sentido, obtém-se o tráfego médio diário anual de veículos pesados, que constitui a base para determinação do tráfego de projeto, para o ano de início de exploração, segundo a expressão:

$$TMDAVP_{(AnoZero)} = TMDA_{(AnoZero)} * \%VP * c_{(n^{\circ}vias)} \quad (2.2)$$

Sendo,

$TMDAVP_{(Ano Zero)}$ - Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados no Ano Zero

$TMDA_{(Ano Zero)}$ - Tráfego Médio Diário Anual no Ano Zero

% VP - Percentagem de Veículos Pesados no Ano Zero.

$$c_{(n^{\circ} de vias)} \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ via por sentido, } c_{(n^{\circ}vias)} = 0,50 \\ 2 \text{ vias por sentido, } c_{(n^{\circ}vias)} = 0,45 \end{array} \right.$$

O tráfego acumulado de veículos pesados para o horizonte de projeto é determinado com base no tráfego médio diário anual de veículos pesados para o ano de início de exploração e determina-se conforme o caso pelas seguintes expressões:

a) Quando existe crescimento de tráfego:

$$NAV_{P(AnoHorizonte)} = TMDAV_{P(AnoZero)} * 365 * \frac{(1+t)^n - 1}{t} \quad (2.3)$$

b) Quando não existe crescimento de tráfego:

$$NAV_{P(AnoHorizonte)} = TMDAV_{P(AnoZero)} * 365 * n \quad (2.4)$$

Sendo,

$NAV_{P(AnoHorizonte)}$ - N° Acumulado de Veículos Pesados no Ano Horizonte

$TMDAV_{P(AnoZero)}$ - Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados no Ano Zero

% VP - Percentagem de Veículos Pesados no Ano Zero.

t - Taxa de crescimento (se t = 0)

n - Número de anos (20 anos, se a taxa de crescimento for constante)




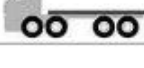




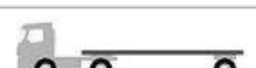
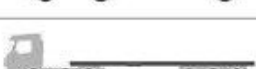
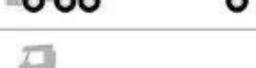


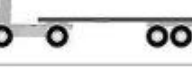

Neste trabalho pretende analisar-se o efeito do tráfego e sua caracterização, tipos de eixos e rodas por eixo dos veículos de carga sobre os pavimentos. Na Tabela 2.2 apresentam-se a classificação e caracterização dos veículos pesados, não considerando as classes j e k, já que correspondem a veículos especiais com presença insignificante no tráfego.

Relativamente aos vários tipos de veículos indicados na tabela, importa referir o seguinte:

- Os veículos a motor-reboque com cinco ou mais eixos que efetuem exclusivamente transporte de material lenhoso, nomeadamente toros de madeira e similares, proveniente de explorações florestais, podem circular com um peso bruto máximo de 60 t desde que estejam tecnicamente preparados para o efeito, devendo no respetivo certificado de matrícula estar fixado este valor;
- Os veículos a motor-reboque com cinco ou mais eixos que efetuem exclusivamente transporte de material lenhoso, nomeadamente toros de madeira,

aparas de madeira e similares, papel, pasta de papel e produtos cerâmicos, em carga não contentorizada, ou contentorizada em dois contentores ISO de 20 ou um contentor ISO de 40, podem circular com um peso bruto máximo de 60 t, desde que tenham origem ou destino num porto nacional;

Tabela 2.2 – Caracterização dos veículos pesados

Classes de Veículos	Nº de Eixos	Peso bruto (t)	Caraterização
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 (EDRD) 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)

(Fonte: Decreto-Lei n.º 133/2010 de 22 de Dezembro)

- Relativamente à caracterização dos veículos, importa referir que para os veículos F2, G3, H2, H5, H6 e I2, o 2º e 3º eixos foram considerados sempre com roda dupla, sabendo-se que qualquer um deles pode ter roda simples,
- De igual modo nos reboque e semirreboques poderão existir configurações diferentes das que constam na tabela.

2.2 Cargas

Em Portugal o Decreto-Lei n.º 133/2010 de 22 de Dezembro, revê o peso e a altura máxima de determinados veículos, alterando o Regulamento que fixa as Dimensões Máximas Autorizadas, o Peso Bruto Total e por eixo a serem observados por todos os veículos em circulação, aprovado pelo Decreto - Lei n.º 99/2005, de 21 de Junho, que transpôs para o direito interno a Diretiva n.º 2002/7/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Fevereiro, e que foi alterado pelo Decreto - Lei n.º 131/2006, de 11 de Julho, e pelo Decreto-Lei n.º 203/2007, de 28 de Maio.

Quanto à carga máxima por eixo, estas são definidas no Decreto-Lei n.º 133/2010 de 22 de Dezembro do seguinte modo:

- Pesos brutos máximos de um eixo simples:
 - a) Frente (automóveis) — 7,5 t;
 - b) Não motor — 10 t;
 - c) Motor — 12 t.
- No eixo duplo motor e não motor, os pesos brutos máximos relacionam-se com a correspondente distância entre eixos (d) da seguinte forma:
 - a) Se d for inferior a 1 m — 12 t;
 - b) Se d for de 1 m a 1,29 m — 17 t;
 - c) Se d for de 1,3 m a 1,79 m — 19 t;
 - d) Se d for igual ou superior a 1,8 m — 20 t.

- No eixo triplo motor e não motor, os pesos brutos máximos relacionam-se com a correspondente distância entre os dois eixos extremos (D) da seguinte forma:
 - a) Se D for inferior a 2,6 m — 21 t;
 - b) Se D for igual ou superior a 2,6 m — 24 t.

O peso bruto total nada mais é que o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, constituído pela soma do peso próprio do veículo (tara) mais a carga útil máxima, incluindo o condutor e os passageiros que ele pode transportar (lotação). Fontenele (2011) no seu trabalho refere a chamada de atenção de Fernandes Jr (1994) sobre o assunto, em que este afirma não haver uma relação direta do peso bruto total e o desempenho do pavimento, ou seja, a deterioração está ligada à carga por eixo. Se o veículo estiver pesado não significa que ele seja danoso ao pavimento, desde que a carga total esteja distribuída adequadamente entre os eixos do veículo.

Fontenele (2011) faz uso das conclusões obtidas no trabalho de Hussain e Parker (2006) para exemplificar que o desempenho está relacionado à carga por eixo. Estes verificaram que veículos com 2 eixos danificam mais que os veículos de 3 e 5 eixos. Refere também que Sadeghi e Fathali (2007) compararam veículos de 4 e 5 eixos, concluindo que o veículo com menos eixos causava maiores extensões na base das camadas betuminosas e no topo da camada de fundação, portanto sendo causador de mais deteriorações.

Na Tabela 2.3 apresentam-se valores permitidos na Europa para as cargas máximas por eixo para diferentes tipos de veículos.

Sabe-se por todas as pesquisas já efetuadas que o excesso de carga por eixo é a maior causa da degradação dos pavimentos. É um fenómeno recorrente que põe em causa a segurança no transporte e que tem implicações efetivas ao nível da deterioração das infraestruturas rodoviárias.

Tabela 2.3 – Carga máxima por eixo permitida na Europa

PERMISSIBLE MAXIMUM WEIGHTS IN EUROPE (in tonnes)							
Country	Weight per bearing axle	Weight per drive axle	Lorry 2 axles	Lorry 3 axles	Road Train 4 axles	Road Train 5 axles and +	Articulated Vehicle 5 axles and +
Albania	10		18	25	40	44	38
Austria	10	11.5	18	26	36	40	40
Azerbaijan	10				37	37	37
Belarus	10		18	25 (1)	36	38	38
Belgium	10	12	19	26	39	44	44 (2)
Bosnia-Herzegovina	10		20	26	40	40	40
Bulgaria	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Croatia	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Czech Republic	10	11.5	18	26 (1)	36	44 (1)	42 / 48
Denmark	10	11.5 (5)	18	26 (1) (5)	38	42 / 48	42 / 48
Estonia	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Finland (3)	10	11.5	18	26 (1)	36	44	42 / 48
France	13	13	19	26	38	40	40
FYR Macedonia	10		16	22	36	40	40
Georgia	10	11.5			44	44	44
Germany	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Greece	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Hungary	10	11	20	24	36	40	40
Ireland	10	10.5	17	26 (1)	35	40	40
Iceland	10	11.5	18	26 (1)	37	40	44
Italy (4)	12	12	18	26 (1)	40	44	44
Latvia	10	11.5	18	26 (1)	40	40	40
Liechtenstein	10	11.5	18	26	36	40	40
Lithuania	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Luxembourg	10	12	19	26	44	44	44
Malta	10.8	11.5	18	25	36	40	40
Moldova	10		18	24	36	40	40
Netherlands	10	11.5	21.5	33	40	50	50
Norway	10	11.5	19	26	37	46	44
Poland	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Portugal (4)	10	12	19	26	37	40	40
Romania	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Russia	10 (6)	10 (6)	18	25	36	38/44 (7)	38/40 (7)
Serbia	10		18	24	36	40	40
Slovakia	10	11.5	18	26 (1)	40	40	40
Slovenia	10	11.5	18	25		40	40
Spain (4)	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Sweden	10	11.5	18	26 (1)	38	48/60 (10)	48/60 (10)
Switzerland	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40
Turkey	10	11.5	18	25/26 (8)	36	40	40/44 (9)
Ukraine	10				38	38	38
United Kingdom	10	11.5	18	26 (1)	36	40	40 / 44

The countries in blue are those who have replied the questionnaire.

1. With air suspension or similar
2. 2 axles tractor + 3 axles semi-trailer: mechanical suspension = 43t; pneumatic suspension = 44t
3. For vehicles registered in an EEA member country
4. Increased values are applicable for certain types of transport (i.e. containers, motorcars, etc.)
5. Weight per drive axle: national traffic = 10t; international traffic = 11.5t; Lorry 3 axles: national traffic = 24t; international traffic = 26t
6. About 10-12% of existing roads were constructed based on the axle weight 10t, other roads on the weight 6t. There is a recommendation of the Ministry of Transport to base all new federal road projects on the maximum axle weight of at least 11.5t
7. National: 38t; international: 40t, and 44t for 6 axles and + only.
8. With the conditions laid down in Regulation for type approval.
9. For vehicles engaged in combined transport.
10. 5 axles = 48t; 6 axles = 58t; 7 axles = 60t

(Fonte: Fórum Internacional do Transporte, dezembro de 2007)

A grandeza dos danos causados pelo excesso de carga dos veículos pode ser avaliada pelo Fator de Equivalência “f”. Segundo Branco *et al.* (2008) este fator resulta da realização nos anos 50, de um ensaio rodoviário à escala real designado por ensaio AASHO (American Association of State Highways Officials), que permitiu concluir que, para cada tipo de pavimento, há uma relação entre os efeitos destruidores dos eixos com diferentes cargas, traduzida pela expressão que exprime, o número de passagens do eixo P_{ref} que provoca o mesmo dano de uma passagem do eixo P_i .

$$\frac{N_{Pref}}{n_{Pi}} = \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^\alpha = f \quad (2.5)$$

Sendo,

f - Fator de equivalência entre os eixos

n_{Pi} : o número de eixos de peso P_i

N_{Pref} : o número de eixos-padrão de P_{ref}

P_i - Carga eixo real (kN) eixo simples

P_{ref} - Carga eixo referência (kN) pavimentos flexíveis, eixo padrão = 80 kN

α - Coeficiente de potenciação, função da rigidez da estrutura do pavimento pavimentos flexíveis [3.0;6.0].

Fernandes Jr *et al.* (2006) referem que nos resultados do ensaio AASHO o valor para o expoente “ α ” é aproximadamente 4 para expressar os efeitos relativos de diferentes cargas sobre os eixos, e que mais importante do que a potência, que pode variar de 3 a 6, para pavimentos flexíveis, é que há um enorme aumento na degradação do pavimento quando a carga por eixo carga aumenta.

Em Portugal e em muitos outros países, é utilizado comumente o eixo padrão de 80 kN para pavimentos flexíveis. Noutros, como a Espanha e França, usam o eixo-padrão de 130 kN por ser um valor mais próximo dos máximos legais dos eixos simples desses países, embora seja indiferente usar qualquer deles para o mesmo pavimento, já que o dimensionamento é realizado considerando o comportamento elástico linear dos materiais. Além disto, o número de passagens do eixo-padrão de 80 kN pode ser convertido em passagens de 130 kN e vice-versa. Em Portugal também é usado o eixo-

padrão de 130 kN para o caso de dimensionamento de pavimentos semi-rígidos e rígidos (Branco *et al.* - 2008).

Na pesquisa efetuada encontra-se um estudo (OTEP, 2004) que surgiu da necessidade de convergência da informação produzida pelas várias fontes portuguesas e espanholas, no que se refere ao transporte de mercadorias por estrada entre os dois países.

Neste estudo verifica-se como seria expectável o tráfego de veículos com excesso de carga. No entanto, a maior percentagem de veículos com excesso de carga, não é a dos veículos que em maior número circulam (trator com semirreboque), mas a dos veículos cujo máximo de carga é de 19 toneladas e também os que pelas suas características os que mais efeito destrutivo têm nos pavimentos.

Como se pode verificar pelo estudo de tráfego que serviu de base a este trabalho, a circulação de veículos com excesso de carga é uma realidade. Esta situação, só por si, não é a única causa que pode danificar o pavimento. Um veículo que circule com carga máxima legal, pode ser tão danoso para o pavimento quanto um que circule com excesso de carga, basta para isso circular com cargas por eixo ilegais e com pressões de enchimento altas. Esta situação bem como o controle da pressão de enchimento dos pneus poderão ser resolvidos com uma ação mais eficaz das entidades responsáveis pela fiscalização e o controle.

2.3 Agressividade do tráfego pesado

A vida dos pavimentos é calculada por processos empíricos-mecanicistas e expressa em termos do número equivalente de solicitações do um eixo padrão pelo que há necessidade de converter o tráfego em cargas equivalentes ao eixo padrão.

Assim para considerar esse tráfego previsível será necessário converter as cargas dos eixos dos veículos através de um coeficiente de agressividade. Este coeficiente traduz o dano relativo de um eixo real relativamente a um dado eixo de referência, ou seja, é o coeficiente de equivalência entre o dano no pavimento provocado pela passagem de um

eixo real relativamente ao dano provocado pelo eixo-padrão, e determina-se pela seguinte expressão:

$$x = k \left(\frac{P_i}{P_{Ref.}} \right)^r \quad (2.6)$$

Sendo,

γ - Fator de agressividade

P_i - Carga eixo real simples (kN)

P_{ref} - Carga eixo referência (kN) pavimentos flexíveis, eixo padrão = 80 kN

α - Coeficiente de potenciação, função da rigidez da estrutura do pavimento.

k - Fator dependente do tipo de eixo: $k = 1$ para eixo simples; $k = 0.75$ para eixo duplo; $k = 1.1$ para eixo triplo (de acordo com o método francês).

A transformação do tráfego real em eixos padrão é realizada através do fator camião. Pode ser determinado por duas formas, dependendo dos dados disponíveis e, traduz, em média, a quantos eixos padrão corresponde um veículo pesado.

Na primeira forma, conhecendo a frequência de cada veículo pesado, é determinada a agressividade para cada veículo tipo, sendo posteriormente calculada a agressividade ponderada com base na frequência de cada veículo tipo, de acordo com as expressões seguintes.

$$x_{veículo i} = \sum_{e=1}^n k_e \left(\frac{P_{i_e}}{P_{Ref.}} \right)^r \quad (2.7)$$

$$FC = \gamma_{ponderado} = \sum_{i=1}^n \gamma_{veículo i} * f_{veículo i} \quad (2.8)$$

Na segunda forma, conhecendo a frequência de cada eixo, é determinada a agressividade para cada eixo tipo, sendo posteriormente calculada a agressividade ponderada com base na frequência de cada eixo tipo.

Para determinação do fator caminhão por este método é ainda necessário conhecer quantos eixos, em média, tem cada veículo pesado.

$$X_{eixo} = k_e \left(\frac{P_{i_e}}{P_{Ref.}} \right)^r \quad (2.9)$$

$$X_{ponderado\ eixo} = \sum_{i=1}^n X_{eixo\ i} * f_{eixo\ i} \quad (2.10)$$

$$C = X_{ponderado\ eixo} * n_{médio\ eixo\ VP} \quad (2.11)$$

Sendo,

FC - Fator caminhão

γ_{eixo} - Fator de agressividade do eixo

$\gamma_{veículo}$ - Fator de agressividade do veículo

P_i - Carga do eixo real (kN)

P_{ref} - Carga do eixo de referência (kN)

α - Coeficiente de potenciação, função da rigidez da estrutura do pavimento

$n_{médio\ eixo\ VP}$ - Número médio de eixos de veículos pesados

k - Fator dependente do tipo de eixo: $k = 1$ para eixo simples; $k = 0.75$ para eixo duplo; $k = 1.1$ (de acordo com o método francês).

$f_{eixo\ i}$ - Frequência do eixo

O tráfego de projeto é dado pelo número acumulado de eixos padrão para o final de vida útil do pavimento que se pretende dimensionar. Uma vez que a agressividade dos veículos ligeiros, quando comparada com a agressividade dos veículos pesados, é desprezável, o número equivalente de eixos padrão (NEEP), é dado pelo tráfego acumulado de veículos pesados durante o período de vida útil do pavimento, multiplicado por um fator caminhão, que traduz a agressividade desses mesmos veículos.

$$NAEP = NAVP * FC \quad (2.12)$$

Sendo,

NAEP - Número Acumulado de Eixos Padrão

NAV - Número Acumulado de Veículos Pesados

FC - Fator caminhão

2.4 Pressão de enchimento dos pneus

Segundo Fernandes Jr. (1994), a importância do tipo de pneu na análise do desempenho de um pavimento está associada à pressão de enchimento que ele pode suportar e à distribuição da pressão na superfície de contato pneu-pavimento que não é uniforme, nem atua sobre uma superfície circular, pelo contrário, distribui-se irregularmente sobre uma superfície aproximadamente elíptica. Segundo este autor, a distribuição da pressão de contato pneu-pavimento varia em função da rigidez do pneu, para a qual contribuem a rigidez da carcaça e das cintas e a própria pressão de enchimento.

Fontenele (2011) refere que no processo de interação pneu-pavimento a pressão de enchimento do pneu desempenha um significativo papel, sendo considerada como muito importante no mecanismo de aparecimento de fendas por fadiga do tipo top-down. Se a carga de um eixo/roda é mantida constante, um aumento da pressão de enchimento do pneu pode reduzir a área de contato, aumentando assim a pressão de contato entre o pneu e o pavimento. Há então um aumento nos esforços atuantes no pavimento, conseqüentemente, maiores efeitos danosos serão esperados.

O conhecimento da distribuição da pressão de contato (Figura 2.1) permite determinar respostas estruturais mais precisas dos pavimentos e a comparação dos efeitos de diferentes tipos de pneus sobre o desempenho dos pavimentos.

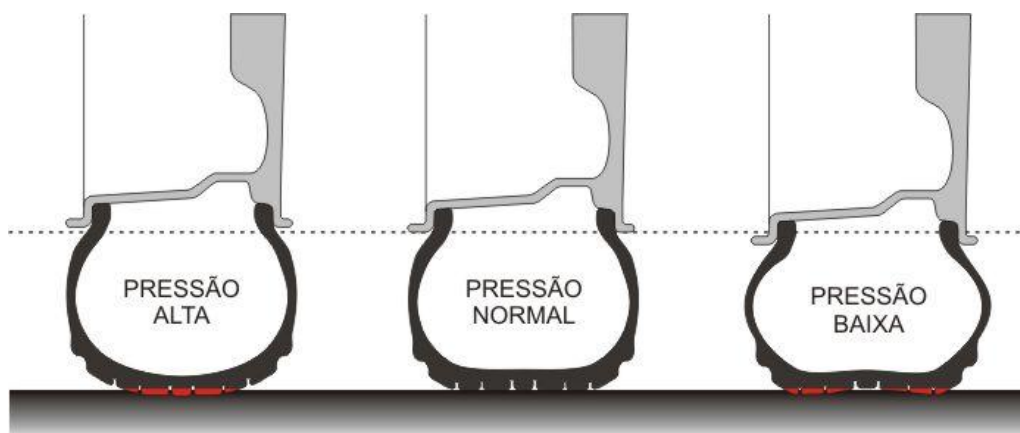


Figura 2.1 – Efeito das diferentes pressões de enchimento na área de contato com o pavimento

O excesso de pressão de enchimento dos pneus é uma fonte de preocupação para a camada de desgaste devido aos efeitos que essa pressão tem no seu desempenho.

Fernandes Jr et al. (2006) referem que no ensaio de estrada AASHO a pressão dos pneus variou de 528 a 563 kPa (75 e 80 psi). Com o surgir dos pneus radiais no início dos anos 70 houve um grande aumento na pressão dos pneus, com valores médios que variam entre 703 e 738 kPa (100 e 105 psi) nos EUA. Na Europa, os pneus supersingle são cheios com a pressão de enchimento em torno de 985 kPa (140 psi).

Fontenele (2011) refere que os efeitos do tráfego no desempenho de pavimentos resultaram maiores quando do aumento das pressões de enchimento, tendo em vista que o aumento das pressões de enchimento ocasiona um aumento nas deformações horizontais de tração na fibra inferior da camada asfáltica. Em termos percentuais, um aumento da pressão de 80 psi (573 kPa) para 120 psi (844 kPa) pode corresponder a uma variação de até 50% nos fatores de equivalência de carga.

Fernandes Jr et al. (2006) referem que a pressão de enchimento deve ser considerada no dimensionamento dos pavimentos, na formulação de misturas asfálticas, nos critérios de alocação de custos rodoviários e na regulamentação técnica, onde deveria haver a limitação da pressão de enchimento.

2.5 Dimensionamento de pavimentos

O objetivo do dimensionamento de um pavimento é evitar durante o período de vida a ocorrência de degradações estruturais, que ocorrem nas várias camadas do pavimento e respetiva fundação, ao limitar as tensões e ou extensões a valores inferiores aos máximos admissíveis (Azevedo, 1993).

Inicialmente os métodos de dimensionamento tinham por objetivo a proteção da fundação, estimando para isso, a espessura das camadas do pavimento que evitassem a instalação de tensões elevadas ao nível da fundação que pudessem originar deformações permanentes verticais ou de corte excessivas.

Numa fase posterior os métodos de dimensionamento aplicaram a metodologia empírico-mecanicista na qual a extensão de tração na base da camada betuminosa bem como a extensão de compressão vertical no topo da fundação foram considerados como os parâmetros críticos para fins de dimensionamento dos pavimentos, os quais permitiam controlar o fendilhamento por fadiga e as deformações permanentes devido à fundação do pavimento.

Embora isto representasse um desenvolvimento extraordinário, Branco et al. (2008) referem que as principais administrações rodoviárias continuavam a indicar para dimensionamento procedimentos baseados na observação de pavimentos reais e na experiência adquirida da sua construção.

Estava no entanto estabelecido um ponto de viragem, de que resultou a apresentação em Ann Arbor (1977) de métodos de dimensionamento que integravam modelos de comportamento dos materiais e do pavimento no seu conjunto, embora ainda ponderados com a experiência que resultava observação do comportamento real dos pavimentos.

Dois dos métodos de dimensionamento mais conhecidos apresentados nessa altura, foram o da Shell e o da Universidade de Nottingham. Nos anos seguintes foram divulgados alguns trabalhos que traduziam a evolução dos processos de cálculo já

conhecidos, e procedimentos que a consideração de comportamentos não lineares para materiais granulares e misturas betuminosas.

Apesar da evolução que entretanto foi conseguida, o facto é que o dimensionamento de pavimentos flexíveis ainda é atualmente realizado recorrendo a métodos empírico - mecanicistas como acontece em Portugal.

Do ponto de vista estrutural, o pavimento deve resistir e distribuir ao solo de fundação os esforços verticais produzidos pelo tráfego, sendo que tanto a camada granular como a camada do revestimento betuminoso contribuem para essa função.

Na Figura 2.2 pode observar-se a distribuição das tensões verticais e horizontais, que ocorrem no pavimento, sob o efeito da passagem da roda de um veículo. Analisando a figura, verifica-se que a tensão à superfície do pavimento (P_0) é muito maior do que a tensão no topo do solo de fundação (P_1), devido à redistribuição de cargas no pavimento, resultado da sua espessura e da rigidez das diferentes camadas do pavimento.

A espessura e o módulo de rigidez das camadas que constituem o pavimento, reflete-se na redistribuição das cargas, que se traduz numa maior ou menor pressão ao nível do solo de fundação.

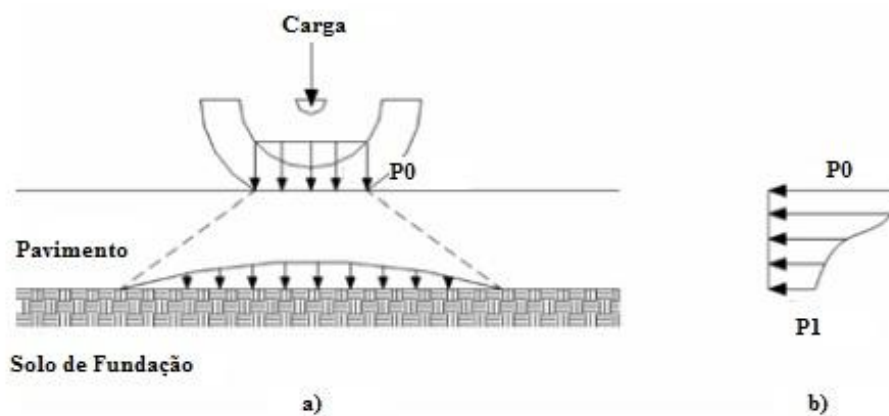


Figura 2.2 – Distribuição das tensões num pavimento rodoviário
 (a) Verticais; (b) Horizontais (Branco et al., 2008)

Um pavimento rodoviário está sujeito às ações provocadas pelos veículos e às ações dos agentes climáticos. Na Figura 2.3 estão representadas essas ações, sendo possível destacar as três zonas que interessa analisar num pavimento, nomeadamente:

1. Superfície do pavimento, onde ocorrem as tensões tangenciais;
2. Fundo das camadas ligadas, onde ocorrem esforços horizontais de tração;
3. Topo do solo de fundação, onde ocorrem os esforços de compressão verticais.

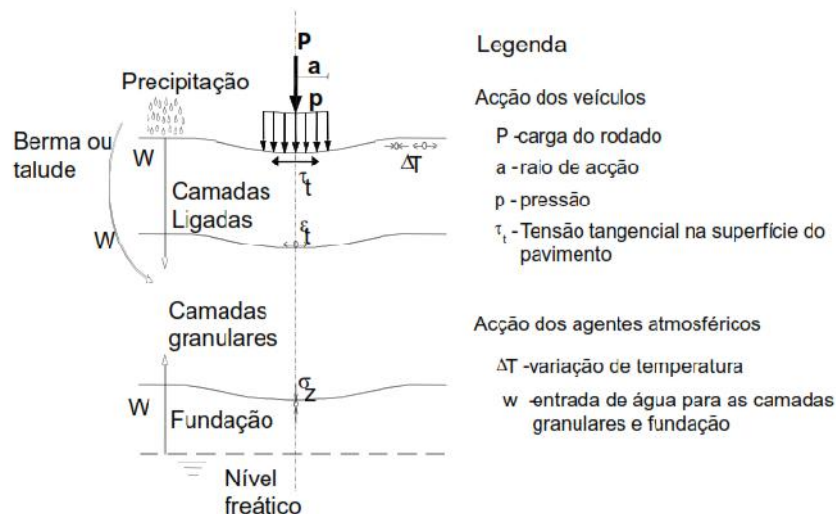


Figura 2.3 – Ações num pavimento rodoviário (Branco *et al.*, 2008)

O método empírico-mecanístico para o dimensionamento de pavimentos flexíveis apresenta uma parte comum com métodos empíricos, e uma parte específica, sendo que os passos a seguir no dimensionamento são:

- Determinação do Tráfego de Projeto - NAEP (comum com outros métodos);
- Caracterização das camadas previstas para o pavimento, atribuindo-lhe espessuras e materiais constituintes, para os quais corresponde uma determinada rigidez;
- Determinação das extensões previstas para cada um dos critérios de rotura do pavimento:
 - a) Critério de Fadiga – Extensão radial de tração - ϵ_t ;
 - b) Critério de Deformação Permanente – Extensão Vertical de Compressão - ϵ_z .

- Determinação do Tráfego Máximo Admissível para a estrutura de pavimento considerada;
- Comparação do Tráfego Admissível com o Tráfego de Projeto – validação da solução preconizada.

Fontenele (2011) refere que com a tendência atual de substituição da tradicional base puramente empírica-mecanicista pela mecanicista, vários métodos de dimensionamento foram desenvolvidos sendo o mais recente, o AASHTO 2002, proposto pelo National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) no projeto 1-37 A, que introduziu uma nova forma para a caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (Axle Load Spectra).

A mesma autora refere que o novo método de dimensionamento de pavimentos proposto pelo NCHRP é uma mudança radical do método empírico-mecanicista baseado nos ESALs (Equivalent Standard Axle Load). Assim, a partir da quantificação das características do tráfego usando diretamente todas as cargas por eixo, ao invés de convertê-las em ESALs, é possível analisar os impactos das variações das cargas de tráfego no pavimento e prover um adequado dimensionamento da estrutura do pavimento (Jiang *et al*, 2008).

Os esforços são transmitidos ao pavimento através da superfície de contato entre este e o pneu. A forma desta superfície é aproximadamente elítica e as suas dimensões dependem do tipo de pneu, pressão de enchimento e da carga descarregada na roda. Para efeitos de dimensionamento, considera-se a superfície de contato um círculo, sendo a área das superfícies de contato dadas pela expressão seguinte.

$$A_c = \frac{F}{P_e} \quad (2.13)$$

Sendo,

P_e - pressão de enchimento (igual à pressão de contacto P_c);

F - carga sobre a roda (carga legal máxima);

A_c - área da superfície de contato de raio r ;

Considerando a área de contacto circular tem-se que:

$$A_c = \pi r^2 \quad (2.14)$$

donde o raio da área da superfície de contacto pode ser definido por:

$$r = \sqrt{\frac{F}{P_e \cdot \pi}} \quad (2.15)$$

A Figura 2.4 mostra o esquema utilizado pelos métodos de dimensionamento da Shell e Nottingham, em que é considerada a carga dos pneus sobre o pavimento a descarregar em duas áreas circulares com configuração para o eixo-padrão de 80 kN, sendo que o raio da área de contacto é definido em 105 mm no método da Shell e 113 mm no método da Universidade de Nottingham.

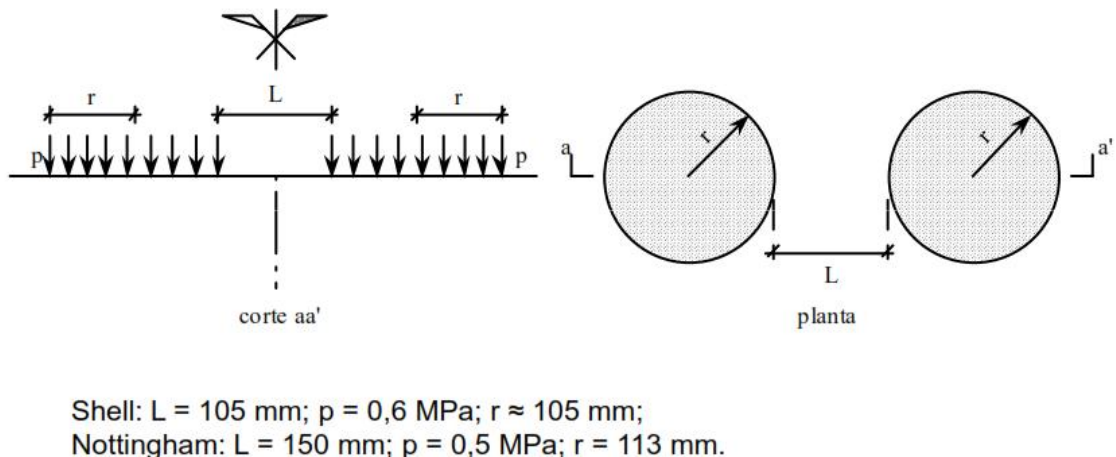


Figura 2.4 – Esquemática do rodado padrão utilizado nos métodos de dimensionamento Shell e Nottingham

Vários estudos teóricos e experimentais desenvolvidos nos últimos anos têm verificado que a área de contacto pneu-pavimento depende do tipo, tamanho ou estado do pneu, considerando ainda o efeito dos sulcos presentes nestes, pode apresentar configurações, aproximadamente circulares ou retangulares, e que as pressões de contacto do pneu não se distribuem de modo uniforme nas áreas de contacto pneu-pavimento.

Vale et al. (2011), apresentaram um trabalho onde estudaram a ação dos veículos pesados na avaliação do comportamento do pavimento. Consideraram a carga dos veículos pesados modelada de forma mais aproximada da real, tendo em conta os sulcos

dos pneus e a variação não uniforme da pressão de contacto pneu-pavimento. Neste trabalho são referidas diversas investigações (Blackman et al., 2000; Blad e Harvey, 2002; Hua e White, 2002) sobre a distribuição da pressão de contacto dos pneus dos veículos pesados no pavimento.

Estes estudos mostraram, também, que as cargas não são igualmente distribuídas no pavimento de acordo com a Figura 2.5, para o caso de um veículo ligeiro de passageiros e dois veículos pesados.

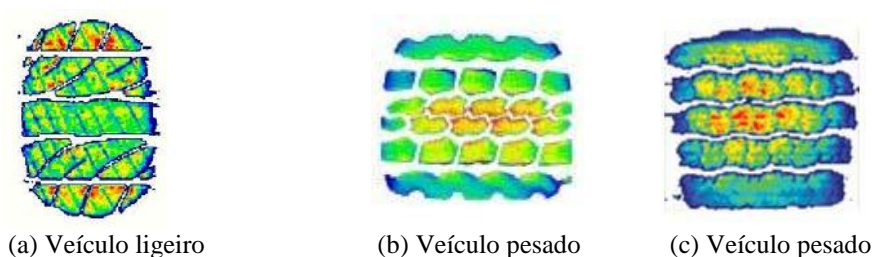


Figura 2.5 – Distribuição da pressão de contacto pneu/pavimento (Vale et al., 2011)

Os mesmos autores referem uma investigação realizada por Elseifi et al. (2005) em que foi avaliado o comportamento do pavimento quando aplicados carregamentos de veículos pesados com pneus duplos (275/80R22,5) e extralargos (simples) (445/50R22,5) em que se observou o estado de tensão e extensão instalado no pavimento devido à aplicação dos dois tipos de pneus, concluindo que os pneus extralargos apresentaram maiores danos no pavimento em comparação aos pneus duplos.

Vale et al. (2011), utilizaram um programa de elementos finitos, consideraram o comportamento elástico linear dos materiais das várias camadas, e um pneu duplo com 245 mm de largura, admitindo duas configurações de pressão de contacto: pressão uniforme; pressão não-uniforme, e duas geometrias de carregamento: retangular; arredondada.

Os pneus foram modelados com e sem sulcos e considerados cinco valores para a pressão de enchimento (700, 800, 900, 1200 e 1500 kPa), tendo duas formas diferenciadas de aplicação da pressão. A Figura 2.6, ilustra a modelação da área de contacto pneu/pavimento e as diferentes configurações de pressão de enchimento para o

caso da pressão nominal de enchimento de 700 kPa. Para as restantes pressões de enchimento, obtiveram a configuração da carga de forma proporcional à considerada para a de 700 kPa, aplicando uma força de 40 kN, correspondente a um eixo-padrão de 80 kN em cada configuração de pneu duplo.

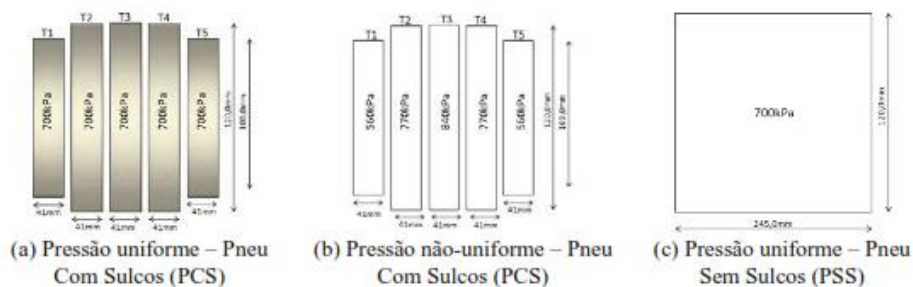


Figura 2.6 – Configuração de pneus com/sem sulcos (Vale et al., 2011)

Para o modelo de pavimento considerado e para a configuração de um veículo pesado com pneus duplos, foram investigados vários parâmetros, e dos resultados obtidos puderam concluir que os parâmetros analisados foram semelhantes considerando as variações geométricas de pneus duplos com sulcos (PCS). Entretanto, os resultados para a variação geométrica dos pneus duplos sem sulcos (PSS) foram relativamente superiores em comparação às outras configurações de pneus duplos.

Constataram também que é possível optar por uma configuração geométrica de pneus duplos com sulcos (PCS) independente da distribuição uniforme ou não-uniforme da pressão de enchimento, pois conduz a resultados semelhantes quando se analisa as camadas mais profundas da estrutura do pavimento. Porém ao analisar o comportamento do pavimento à sua superfície verifica-se uma elevada diferença no estado de tensões de corte localizadas na borda externa da configuração de pneu duplo.

Verificaram ainda, que a variação do estado de tensão no pavimento com a pressão de contacto, segue uma lei linear, dado a modelação do pavimento ter sido realizada considerando o comportamento elástico linear dos materiais. Observaram também que a distribuição não-uniforme da pressão de enchimento da configuração de pneus duplos com sulcos (PCS) induziu um fluxo de corte no sentido da borda externa do pneu e uma elevada concentração de extensões de corte sob os pneus duplos próximo à superfície do pavimento.

Por fim, verificaram que as degradações nos pavimentos podem ser controladas através da distribuição adequada da carga na área de contacto pneu/pavimento, minimizando, dessa forma, as tensões críticas e consequentes danos nessa região.

3 Metodologia de trabalho

O presente capítulo descreve a metodologia utilizada neste trabalho e analisa os dados utilizados para a elaboração deste trabalho, os quais foram obtidos por informação do site da Estradas de Portugal, de pesquisa bibliográfica e de informação obtida junto de transportadores relativa à frota em operação.

O objetivo da pesquisa realizada visou reunir informação atual sobre os veículos referidos no estudo de tráfego quanto à dimensão dos pneus recomendados e os valores das pressões de enchimento.

3.1 Cargas por eixo

Dada a inexistência de informação sobre cargas por eixo na bibliografia, foram contactadas várias empresas com frotas de veículos de mercadorias e passageiros, no sentido de obter os elementos referidos e se possível o valor das cargas por eixo, o que permitiria comparar a informação do estudo de tráfego com a informação operacional dos veículos que circulam nas estradas.

Esta iniciativa não obteve os resultados pretendidos porque só uma das empresas contactadas se mostrou disponível para colaborar neste trabalho. Consequentemente, as informações recolhidas não foram consideradas suficientes para incluir nesta dissertação como era objetivo inicial.

Contudo, foi possível verificar que de uma frota com mais de uma centena de veículos, cerca de 85% são da Classe H5 e os restantes das Classes F1 e F2. Relativamente ao tipo (dimensões) de pneus montados nos veículos e à pressão de enchimento, seguem de modo geral o especificado para o tipo de veículos em causa, não havendo no entanto, distinção entre eixos anteriores e posteriores no que se refere à pressão de enchimento.

No que se refere a cargas por eixo, não houve uma resposta conclusiva, isto porque o valor da carga depende do tipo de produto e da sua acomodação para ser transportado com segurança.

A inexistência de mais informação sobre o assunto levou a considerar como suficiente a obtida na literatura consultada sobre a classe de veículos pesados, tipos de pneus e pressão de enchimento. Assim, quanto às cargas por eixo dos veículos pesados foram considerados neste trabalho os valores obtidos no *site* da Estradas de Portugal para a autoestrada A3 no ano de 2010, no posto de pesagem de Valença, no sentido Norte-Sul, indicados na Tabela 3.1.





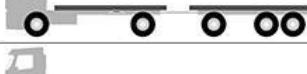

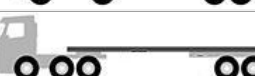



Tabela 3.1 – Tráfego pesado observado na autoestrada A3 em 2010 (Norte - Sul)

Classes	Volume	TMDA	Peso Bruto Médio (t)	Peso Médio (t)					
				1º Eixo	2º Eixo	3º Eixo	4º Eixo	5º Eixo	6º Eixo
F1	49918	137	50.3	23.5	26.8	0.0	0.0	0.0	0.0
F2	7282	20	177.3	57.4	70.8	49.1	0.0	0.0	0.0
F3	458	1	118.0	30.9	32.5	54.6	0.0	0.0	0.0
F4	1120	3	259.4	50.6	53.0	86.8	69.0	0.0	0.0
G1	1169	3	158.6	43.5	64.3	25.8	24.9	0.0	0.0
G2	177	0	243.1	57.0	86.2	37.8	30.0	32.1	0.0
G3	544	1	242.9	55.7	59.6	48.2	40.1	39.3	0.0
H1	2784	8	117.4	40.1	38.1	39.1	0.0	0.0	0.0
H2	17	0	104.2	29.4	26.3	21.2	27.4	0.0	0.0
H3	40895	112	170.9	52.2	52.3	32.9	33.5	0.0	0.0
H4	1903	5	285.1	56.3	74.8	54.5	48.3	51.2	0.0
H5	100837	276	294.8	59.5	82.0	50.5	51.3	51.6	0.0
H6	554	2	324.3	51.8	49.1	60.2	52.8	54.6	55.8
I1	16383	45	126.5	49.1	77.4	0.0	0.0	0.0	0.0
I2	1175	3	182.7	63.6	72.6	46.4	0.0	0.0	0.0
Totais	225216	616							

(Fonte: site da Estradas de Portugal)

Na Tabela 3.2 são apresentados os valores correspondentes à carga máxima legal por eixo.

Tabela 3.2 – Carga máxima legal por eixo para os veículos pesados

Classes de Veículos		Carga Máxima por Eixo (kN)					
		1º Eixo	2º Eixo	3º Eixo	4º Eixo	5º Eixo	6º Eixo
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	-	-	-

3.2 Pressão de enchimento

Para determinação da pressão de enchimento dos pneus dos veículos pesados, fez-se uma consulta a vários construtores (Daf, Volvo, Iveco, Mercedes e Scania) para obter especificações de veículos que permitissem obter os dados pretendidos.

Estas especificações permitiram saber os pneumáticos recomendados pelos construtores, e por igual procedimento as pressões de enchimento adequadas ao tipo de veículo e dimensão de pneu.

Para este estudo considerou-se como referencia os veículos da Volvo e os pneumáticos da Michelin, cujos resultados se apresentam na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Tipos de Pneus e Pressões de Enchimento

Classe	Veículo		Tamanho e Tipo de Pneu	Pressão de Enchimento	
	Tipo de Eixo	Nº de rodas/eixo		bar	kPa
F1	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
F2	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	8.0	816
F3	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	3º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
F4	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	7.0	714
	2º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	7.0	714
	3º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
	4º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
G1	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	6.5	663
	4º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	6.5	663
G2	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	7.0	714
	4º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	7.0	714
	5º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	7.0	714
G3	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	4º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	9.0	918
	5º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	9.0	918

Veículo			Tamanho e Tipo de Pneu	Pressão de Enchimento	
Classe	Tipo de Eixo	Nº de rodas/eixo		bar	kPa
H1	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RD	4	275/70 R22.5	8.5	867
H2	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.0	816
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
	3º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
	4º Eixo - RD	4	275/70 R22.5	8.5	867
H3	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	9.0	918
	4º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	9.0	918
H4	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.0	816
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
	3º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
	4º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	9.0	918
	5º Eixo - RS	2	385/55 R22.5	9.0	918
H5	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.0	816
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RS	2	385/65 R22.5	9.0	918
	4º Eixo - RS	2	385/65 R22.5	9.0	918
	5º Eixo - RS	2	385/65 R22.5	9.0	918
H6	1º Eixo - RS	2	315/80 R22.5	8.0	816
	2º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
	3º Eixo - RD	4	315/80 R22.5	6.5	663
	4º Eixo - RS	2	385/65 R22.5	9.0	918
	5º Eixo - RS	2	385/65 R22.5	9.0	918
	5º Eixo - RS	2	385/65 R22.5	9.0	918
I1	1º Eixo - RS	2	295/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	295/80 R22.5	7.5	765
I2	1º Eixo - RS	2	295/80 R22.5	8.5	867
	2º Eixo - RD	4	295/80 R22.5	7.5	765
	3º Eixo - RD	4	295/80 R22.5	7.5	765

Relativamente ao tipo de pneu, todas as especificações consultadas recomendam pneus do tipo radial. Pela análise da Tabela 3.3, às 15 classes de veículo correspondem 58 eixos e um total de 164 rodas onde estão montados pneus com 5 dimensões diferentes como se mostra na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Tipos de pneus existentes nos veículos pesados

Nº de Eixos	Nº de Rodas	Tamanho	Tipo	Pressão de Enchimento
2	8	275/70 R22.5	radial	[8.5]
5	16	295/80 R22.5	radial	[7.5-8.5]
34	106	315/80 R22.5	radial	[6.5-7.0-7.5-8.0-8.5]
11	22	385/55 R22.5	radial	[6.5-7.0-9.0]
6	12	385/65 R22.5	radial	[9.0]

Na Figura 3.1 estão representadas algumas das marcações que são possíveis de encontrar na parede lateral dos pneus.



Figura 3.1 - Marcação dos pneus, índices de carga e códigos de velocidade

Os pneus radiais além das vantagens de uma maior durabilidade e menor consumo de combustível, também permitem o uso de maiores pressões de enchimento, possibilitando assim transportar cargas mais elevadas.

Como se pode verificar pelos resultados apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4, para pneus com dimensões iguais a pressão de enchimento é diferente, variando em função do tipo de veículo e da posição do eixo em que está montado.

Os veículos F2, F4 e G3 com eixo traseiro duplo foram considerados para este estudo com rodado duplo, embora existam configurações com rodado simples no 2º ou no 3º eixo. O veículo I2, com eixo traseiro duplo foi considerado para este estudo com rodado duplo. As configurações conhecidas têm rodado simples no 2º ou no 3º eixo.

O veículo F3 não consta de nenhuma das especificações analisadas (Daf, Volvo, Iveco, Mercedes e Scania). Para este caso foi adotada para a dimensão dos pneus a especificação de F4 e para a pressão de enchimento a que consta no manual da Michelin.

3.3 Pavimentos estudados

Neste trabalho foram definidas 30 estruturas tipo constituídas por uma camada em betão betuminoso e uma camada granular com as combinações e módulos apresentados na Tabela 3.5. A designação adotada (por exemplo H1-S4), refere-se à espessura da camada betuminosa (10 cm) e do módulo de deformabilidade da camada de fundação (80 MPa). Para o módulo da camada betuminosa foi considerado o valor de 5000 MPa enquanto que para a camada granular considerou-se um módulo igual ao dobro do atribuído para a camada de fundação.

Tabela 3.5 – Pavimentos analisados

Pavimento	Espessura betuminoso (m)	Espessura granular (m)	Módulo betuminoso (MPa)	Módulo granular (MPa)	Módulo fundação (MPa)
H1-S1	0.10	0.20	5000	40	20
H2-S1	0.15				
H3-S1	0.20				
H4-S1	0.25				
H5-S1	0.30				
H1-S2	0.10	0.20	5000	80	40
H2-S2	0.15				
H3-S2	0.20				
H4-S2	0.25				
H5-S2	0.30				

Pavimento	Espessura betuminoso (m)	Espessura granular (m)	Módulo betuminoso (MPa)	Módulo granular (MPa)	Módulo fundação (MPa)
H1-S3	0.10	0.20	5000	120	60
H2-S3	0.15				
H3-S3	0.20				
H4-S3	0.25				
H5-S3	0.30				
H1-S4	0.10	0.20	5000	160	80
H2-S4	0.15				
H3-S4	0.20				
H4-S4	0.25				
H5-S4	0.30				
H1-S5	0.10	0.20	5000	200	100
H2-S5	0.15				
H3-S5	0.20				
H4-S5	0.25				
H5-S5	0.30				
H1-S6	0.10	0.20	5000	240	120
H2-S6	0.15				
H3-S6	0.20				
H4-S6	0.25				
H5-S6	0.30				

3.4 Dano

O dimensionamento de pavimentos é realizado através do cálculo do dano que o tráfego de projeto provoca na estrutura do pavimento comparativamente à capacidade resistente do pavimento, recorrendo à expressão:

$$Dano = \frac{\text{Tráfego de projeto}}{\text{Capacidade resistente do pavimento}} \quad (3.1)$$

O dimensionamento é conseguido quando a estrutura do pavimento considerada apresenta uma capacidade de carga superior ao tráfego de projeto, sendo aceitáveis danos superiores a 80% e menores que 100%.

O tráfego de projeto é calculado de acordo como os procedimentos apresentados no capítulo anterior. A capacidade resistente do pavimento é calculada pela aplicação da carga do eixo-padrão na estrutura considerada e recorrendo às leis de fadiga que controlam o fendilhamento por fadiga e a deformação permanente devido à fundação do pavimento.

Como ficou expresso no capítulo anterior, o tráfego que solicita o pavimento é considerado em projeto pela sua transformação em número de eixos equivalentes ao eixo-padrão, o qual é aplicado à estrutura do pavimento para obtenção da sua capacidade resistentes.

O eixo-padrão típico considerado no dimensionamento de pavimentos é o eixo simples constituído por roda dupla, o qual tem correspondência direta com os eixos simples de roda dupla dos veículos pesados.

No entanto, quando se pretende dimensionar um pavimento modelando os eixos duplos e triplos, tanto de roda simples como de roda dupla, a extensão provocada no pavimento pelo trem dos eixos duplos ou triplos é dada pela extensão sob cada um dos eixos do trem retirando a extensão residual devido à passagem dos eixos anteriores.

Neste trabalho foi considerado o método proposto por Huang (2004) para considerar o efeito de eixos múltiplos. O método consiste no cálculo das extensões instaladas no pavimento de acordo com as posições indicadas na Figura 3.2. Para o primeiro eixo, a extensão deve ser obtida sob o primeiro eixo (ϵ_a). Para o segundo e terceiro eixos, a extensão deve ser a diferença entre a extensão sob o primeiro eixo (ϵ_a) e a extensão a meio da distância entre os dois eixos (ϵ_b), resultando em $\epsilon_a - \epsilon_b$.

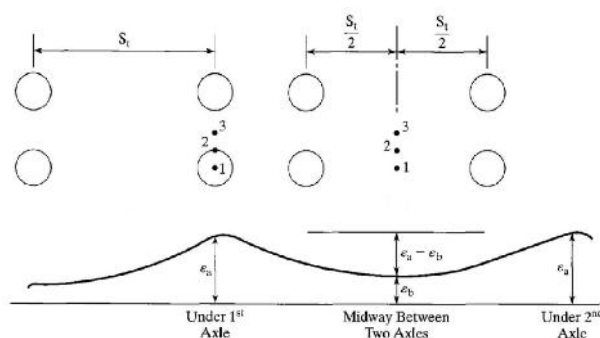


Figura 3.2 – Análise de dano para eixos múltiplos (Huang, 2004)

A determinação das extensões referentes a cada um dos critérios de ruína (fadiga e deformação permanente) para o cálculo do dano dos pavimentos foi realizada recorrendo ao programa de cálculo automático JPAV (Figura 3.3).

Para obtenção do estado de tensão/deformação instalado num pavimento, o programa de cálculo JPAV exige a introdução de três tipos de dados. A caracterização da carga, a constituição do pavimento e os locais de cálculo do estado de tensão/deformação.

Quanto à caracterização da carga, é necessário definir:

- número de cargas
- magnitude das cargas
- raio
- distância entre rodas
- distância entre eixos

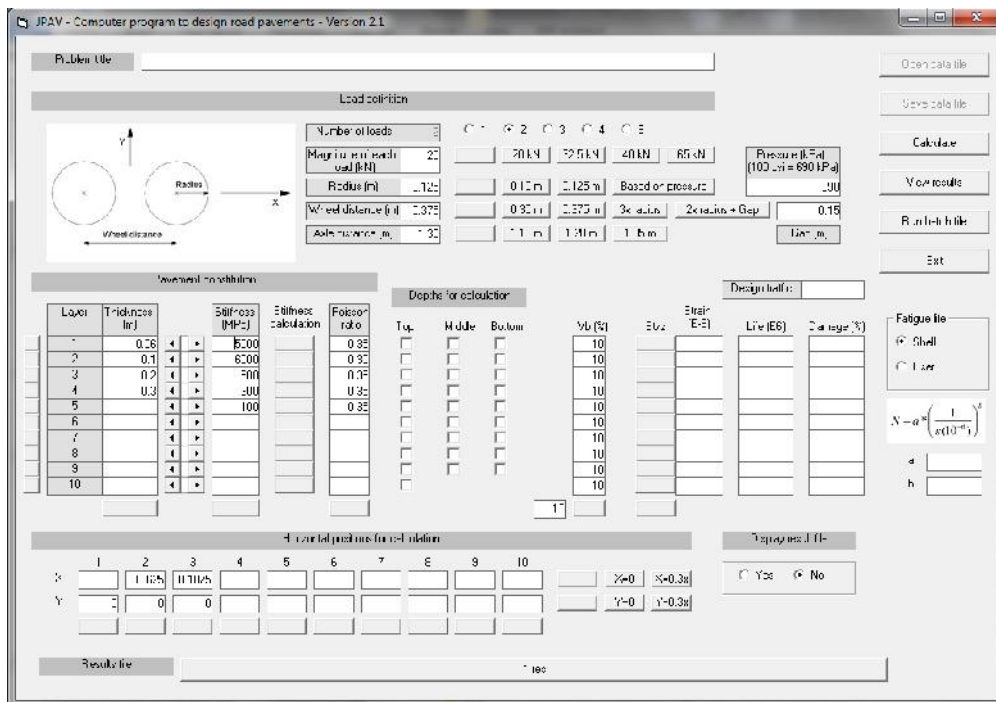


Figura 3.3 - Programa de cálculo do estado de tensão/deformação de pavimentos

Quanto à configuração do pavimento, é necessário definir:

- número de camadas
- espessura de cada uma das camadas

- módulo de rigidez de cada uma das camadas
- coeficiente de Poisson.

O programa permite a determinação das extensões em qualquer face, de qualquer camada que compõe o pavimento. A escolha das faces em que se determina as respectivas extensões está intimamente ligada com os critérios de ruína considerados.

A extensão radial de tração controla o fendilhamento com início nas zonas mais tracionadas das camadas ligadas e foi determinada na base das camadas betuminosas. A extensão vertical de compressão controla o assentamento excessivo à superfície do pavimento e foi determinada no topo do solo de fundação.

Segundo o método Shell, a relação entre a extensão radial de tração e o número máximo de eixos que podem solicitar o pavimento sem que ocorra ruína do pavimento por fadiga, é dada pela expressão:

$$N_t = \frac{0,459588 \times (V_{bet} + 1,26165)^5}{\varepsilon_t^5 \times E_{MB}^{1,8}} \quad (3.2)$$

Em que:

ε_t - Extensão radial de tração

V_{bet} - Percentagem volumétrica de betume (%)

E_{MB} - Módulo de rigidez da mistura betuminosa (Pa)

N_t - Número de eixos admissível

Para a mistura betuminosa dos pavimentos tipo foi considerado para o volume de betume (V_{bet}) uma percentagem de 10% e um módulo de rigidez de 5000 MPa. Pelo mesmo método, a relação entre a extensão vertical de compressão e o número máximo de eixos que podem solicitar o pavimento sem que ocorra ruína do pavimento por deformação permanente, é dada pela expressão:

$$N_z = \frac{K_s^4}{\varepsilon_z^4} \quad (3.3)$$

Sendo,

z - Extensão vertical de compressão

K_s - Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência (50% - $2,8 \cdot 10^{-2}$;
85% - $2,1 \cdot 10^{-2}$; 95% - $1,8 \cdot 10^{-2}$)

N_z - Número de eixos admissível

3.5 Agressividade do tráfego

O tráfego de projeto para este estudo foi calculado utilizando o modelo francês, adiante designado por modelo FR, nomeadamente através da expressão:

$$X = k_{FR} \left(\frac{P_i}{P_{Ref.}} \right)^\alpha \quad (3.4)$$

Sendo,

γ - Fator de agressividade

P_i - Carga do eixo real (kN) - peso de cada eixo

P_{ref} - Carga do eixo de referência (kN)

α - Coeficiente de potenciação, função da rigidez da estrutura do pavimento

k_{FR} - Fator dependente do tipo de eixo: $k_{FR} = 1$ para eixo simples; $k_{FR} = 0.75$ para eixo duplo; $k_{FR} = 1.1$ para eixo triplo (de acordo com o método francês).

Além deste modelo, também foi utilizado o modelo desenvolvido por Pais (2013), adiante designado por modelo JP, em que é considerada a constituição do pavimento e o tipo de rodado, nomeadamente através da expressão:

$$X = k_{JP} \left(\frac{P_i}{P_{Ref.}} \right)^\alpha \quad (3.5)$$

Sendo,

γ - Fator de agressividade

P_i - Carga do eixo real (kN) - peso do trem de eixos

P_{ref} - Carga do eixo de referência (kN)

α - Coeficiente de potenciação, função da rigidez da estrutura do pavimento

k_{JP} - Fator dado pela Equação 3.6. (de acordo com o modelo JP).

$$k_{JP} = a_1 \times (H_{asp})^{a_2} \times (H_{gra})^{a_3} \times (E_{asp})^{a_4} \times (E_{subg})^{a_5} \times \exp(a_6 \times AP) \quad (3.6)$$

Sendo,

H_{asp} - Espessura da camada betuminosa (m)

H_{gra} - Espessura da camada granular (m)

E_{asp} - Módulo de deformabilidade da camada betuminosa (MPa)

E_{subg} - Módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa)

AP - Fator função do tipo de eixo e rodado, dado pelos coeficientes da Tabela 3.6;

a_i - Coeficientes dados pela Tabela 3.7, para o qual BP é dado pela Equação 3.7.

Tabela 3.6 – Parâmetro função do tipo de eixo – AP

Eixo simples	Eixo simples	Eixo tandem	Eixo tandem	Eixo tridem	Eixo tridem
Roda simples	Roda dupla	Roda simples	Roda dupla	Roda simples	Roda dupla
1.0	2.2	2.7	4.1	3.6	5.1

Tabela 3.7 - Constantes para a equação de k

BP	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1.7	1.275E+01	-9.307E-01	8.280E-02	-2.939E-01	2.963E-01	-1.421E+00
>1.7	6.682E+00	1.010E-01	-1.724E-04	1.136E-01	-1.335E-01	-1.381E+00

$$BP = \frac{(H_{asp})^3 \times E_{asp} + (H_{gra})^3 \times E_{gra}}{E_{subg}} \quad (3.7)$$

4 Análise das condições de carregamento

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a parte prática deste trabalho a qual inclui o cálculo do tráfego de projeto através dos dois modelos apresentados no capítulo anterior, tanto para as cargas médias por eixo observadas autoestrada A3, em 2010 no sentido Norte-Sul do posto de pesagem de Valença, de acordo com o registo apresentado no site da Estradas de Portugal, como para as cargas máximas legais por eixo.

O passo seguinte neste capítulo inclui o cálculo do dano provocado pelos veículos pesados no conjunto de pavimentos em análise neste trabalho, o qual foi realizado considerando condições de aplicação da carga expressas por uma área de contacto pneu-pavimento que foi calculada função da pressão de enchimento recomendada para cada tipo de pneu.

De seguida neste capítulo apresenta-se o cálculo do dano provocado por um eixo-padrão de 80 kN para diferentes valores da área de contacto pneu-pavimento, considerando o tráfego calculado pelo método FR e JP tanto para a carga média observada para cada eixo dos veículos pesados como para a carga máxima legal de cada eixo.

Por fim neste capítulo faz-se a sobreposição do dano dos veículos pesados com o dano do eixo-padrão de modo a definir o raio da área de aplicação da carga no dimensionamento de pavimentos.

4.2 Tráfego de projeto

O cálculo do tráfego de projeto para a realização deste trabalho foi desenvolvido utilizando os modelos FR e JP apresentados capítulo anterior, partindo do tráfego que passou na autoestrada A3, sentido Norte-Sul, no ano 2010, de acordo com o registo

apresentado no site da Estradas de Portugal, e reproduzido na Tabela 4.1, sendo que o peso dos vários eixos dos trens duplos e triplos é discriminado por eixo elementar.

Tabela 4.1 – Tráfego de veículos pesados observado na autoestrada A3

Classes de veículo	Volume anual	Peso médio do eixo (kN)					
		1º	2º	3º	4º	5º	6º
F1	49918	23.5	26.8				
F2	7282	57.4	70.8	49.1			
F3	458	30.9	32.5	54.6			
F4	1120	50.6	53.0	86.8	69.0		
G1	1169	43.5	64.3	25.8	24.9		
G2	177	57.0	86.2	37.8	30.0	32.1	
G3	544	55.7	59.6	48.2	40.1	39.3	
H1	2784	40.1	38.1	39.1			
H2	17	29.4	26.3	21.2	27.4		
H3	40895	52.2	52.3	32.9	33.5		
H4	1903	56.3	74.8	54.5	48.3	51.2	
H5	100837	59.5	82.0	50.5	51.3	51.6	
H6	554	51.8	49.1	60.2	52.8	54.6	55.8
I1	16383	49.1	77.4				
I2	1175	63.6	72.6	46.4			

A análise das condições de carregamento realizada neste trabalho considerou, além do tráfego expresso através da carga média dos eixos, as cargas máximas legais dos eixos dos veículos pesados, as quais são indicadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Carga máxima legal dos eixos dos veículos pesados

Classes de veículo	Volume anual	Peso máximo do eixo (kN)					
		1º	2º	3º	4º	5º	6º
F1	49918	75	120				
F2	7282	75	100	100			
F3	458	100	100	120			
F4	1120	100	100	100	100		
G1	1169	75	120	80	80		
G2	177	75	120	80	80	80	
G3	544	75	100	100	80	80	
H1	2784	75	120	100			
H2	17	75	100	100	100		
H3	40895	75	120	100	100		
H4	1903	75	100	100	100	100	
H5	100837	75	120	80	80	80	
H6	554	75	100	100	80	80	80
I1	16383	75	120				
I2	1175	75	100	100			

O cálculo do tráfego de projeto, expresso em termos de número equivalente de eixos padrão de 80 kN, é apresentado na Tabela 4.3 pela aplicação do modelo FR às cargas médias do tráfego, sendo que se obteve um tráfego de $4.92E^6$ para um período de 20 anos, sem consideração de crescimento do tráfego.

Tabela 4.3 – Cálculo do tráfego de projeto pelo método FR considerando a carga média dos eixos

Classes de veículo	Volume anual	Peso médio do eixo (kN)						Tipo de eixo						kFR						
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	1º	2º	3º	4º	5º	6º	1º	2º	3º	4º	5º	6º	
F1	49918	23.5	26.8					s	s						1.00	1.00				
F2	7282	57.4	70.8	49.1				s	d	d					1.00	0.75	0.75			
F3	458	30.9	32.5	54.6				d	d	s					0.75	0.75	1.00			
F4	1120	50.6	53.0	86.8	69.0			d	d	d	d				0.75	0.75	0.75	0.75		
G1	1169	43.5	64.3	25.8	24.9			s	s	s	s				1.00	1.00	1.00	1.00		
G2	177	57.0	86.2	37.8	30.0	32.1		s	s	s	d	d			1.00	1.00	1.00	0.75	0.75	
G3	544	55.7	59.6	48.2	40.1	39.3		s	d	d	s	s			1.00	0.75	0.75	1.00	1.00	
H1	2784	40.1	38.1	39.1				s	s	s					1.00	1.00	1.00			
H2	17	29.4	26.3	21.2	27.4			s	d	d	s				1.00	0.75	0.75	1.00		
H3	40895	52.2	52.3	32.9	33.5			s	s	d	d				1.00	1.00	0.75	0.75		
H4	1903	56.3	74.8	54.5	48.3	51.2		s	d	d	d	d			1.00	0.75	0.75	0.75	0.75	
H5	100837	59.5	82.0	50.5	51.3	51.6		s	s	t	t	t			1.00	1.00	1.10	1.10	1.10	
H6	554	51.8	49.1	60.2	52.8	54.6	55.8	s	d	d	t	t	t		1.00	0.75	0.75	1.10	1.10	1.10
I1	16383	49.1	77.4					s	s						1.00	1.00				
I2	1175	63.6	72.6	46.4				s	d	d					1.00	0.75	0.75			

Classes de veículo	Coeficiente de agressividade						NAEP						NAEP (1 ano)	NAEP (20 anos)
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	1º	2º	3º	4º	5º	6º		
F1	0.007	0.013					372	628					1.00E+03	2.00E+04
F2	0.265	0.460	0.106				1927	3348	775				6.05E+03	1.21E+05
F3	0.017	0.020	0.217				8	9	99				1.16E+02	2.33E+03
F4	0.120	0.144	1.041	0.414			134	162	1166	464			1.93E+03	3.85E+04
G1	0.087	0.418	0.011	0.009			102	489	13	11			6.15E+02	1.23E+04
G2	0.259	1.349	0.050	0.015	0.019		46	239	9	3	3		2.99E+02	5.99E+03
G3	0.235	0.231	0.099	0.063	0.058		128	126	54	34	32		3.73E+02	7.46E+03
H1	0.063	0.052	0.057				176	144	159				4.79E+02	9.58E+03
H2	0.018	0.009	0.004	0.014			0	0	0	0			7.54E-01	1.51E+01
H3	0.181	0.183	0.021	0.023			7404	7471	874	947			1.67E+04	3.34E+05
H4	0.246	0.572	0.161	0.099	0.126		468	1088	307	189	240		2.29E+03	4.58E+04
H5	0.307	1.102	0.175	0.185	0.190		30928	111074	17653	18688	19135		1.97E+05	3.95E+06
H6	0.176	0.106	0.240	0.209	0.239	0.260	97	59	133	116	132	144	6.82E+02	1.36E+04
I1	0.142	0.878					2321	14391					1.67E+04	3.34E+05
I2	0.399	0.509	0.085				469	599	100				1.17E+03	2.34E+04
NAEP (1 ano)							2.46E+05						2.46E+05	4.92E+06
NAEP (20 anos)							4.92E+06							

Quanto ao caso da carga máxima legal de cada eixo, o tráfego de projeto conduz a $3.61E^7$ eixos de 80 kN para um período de 20 anos, tal como se observa na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Cálculo do tráfego de projeto pelo método FR considerando a carga máxima legal dos eixos

Classes de veículo	Volume anual	Peso máximo do eixo (kN)						Tipo de eixo						kFR							
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	1º	2º	3º	4º	5º	6º	1º	2º	3º	4º	5º	6º		
F1	49918	75	120					s	s							1.00	1.00				
F2	7282	75	100	100				s	d	d						1.00	0.75	0.75			
F3	458	100	100	120				d	d	s						0.75	0.75	1.00			
F4	1120	100	100	100	100			d	d	d	d					0.75	0.75	0.75	0.75		
G1	1169	75	120	80	80			s	s	s	s					1.00	1.00	1.00	1.00		
G2	177	75	120	80	80	80		s	s	s	d	d				1.00	1.00	1.00	0.75	0.75	
G3	544	75	100	100	80	80		s	d	d	s	s				1.00	0.75	0.75	1.00	1.00	
H1	2784	75	120	100				s	s	s						1.00	1.00	1.00			
H2	17	75	100	100	100			s	d	d	s					1.00	0.75	0.75	1.00		
H3	40895	75	120	100	100			s	s	d	d					1.00	1.00	0.75	0.75		
H4	1903	75	100	100	100	100		s	d	d	d	d				1.00	0.75	0.75	0.75	0.75	
H5	100837	75	120	80	80	80		s	s	t	t	t				1.00	1.00	1.10	1.10	1.10	
H6	554	75	100	100	80	80	80	s	d	d	t	t	t	t		1.00	0.75	0.75	1.10	1.10	1.10
I1	16383	75	120					s	s							1.00	1.00				
I2	1175	75	100	100				s	d	d						1.00	0.75	0.75			

Classes de veículo	Coeficiente de agressividade						NAEP						NAEP (1 ano)	NAEP (20 anos)
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	1º	2º	3º	4º	5º	6º		
F1	0.772	5.063					38560	252710					2.91E+05	5.83E+06
F2	0.772	1.831	1.831				5625	13334	13334				3.23E+04	6.46E+05
F3	1.831	1.831	5.063				839	839	2319				4.00E+03	7.99E+04
F4	1.831	1.831	1.831	1.831			2051	2051	2051	2051			8.20E+03	1.64E+05
G1	0.772	5.063	1.000	1.000			903	5918	1169	1169			9.16E+03	1.83E+05
G2	0.772	5.063	1.000	0.750	0.750		137	896	177	133	133		1.48E+03	2.95E+04
G3	0.772	1.831	1.831	1.000	1.000		420	996	996	544	544		3.50E+03	7.00E+04
H1	0.772	5.063	2.441				2151	14094	6797				2.30E+04	4.61E+05
H2	0.772	1.831	1.831	2.441			13	31	31	42			1.17E+02	2.34E+03
H3	0.772	5.063	1.831	1.831			31590	207031	74881	74881			3.88E+05	7.77E+06
H4	0.772	1.831	1.831	1.831	1.831		1470	3484	3484	3484	3484		1.54E+04	3.08E+05
H5	0.772	5.063	1.100	1.100	1.100		77894	510487	110921	110921	110921		9.21E+05	1.84E+07
H6	0.772	1.831	1.831	1.100	1.100	1.100	428	1014	1014	609	609	609	4.28E+03	8.57E+04
I1	0.772	5.063					12655	82939					9.56E+04	1.91E+06
I2	0.772	1.831	1.831				908	2151	2151				5.21E+03	1.04E+05
NAEP (1 ano)							1.80E+06						1.80E+06	3.61E+07
NAEP (20 anos)							3.61E+07							

Quanto ao cálculo do tráfego de projeto de acordo com o modelo JP, o procedimento pode ser observado na Tabela 4.5 para o caso das cargas médias do tráfego, considerando um pavimento com 0.30 m de espessura da camada betuminosa, 0.20 m de espessura da camada granular, 5000 MPa de módulo de rigidez da camada betuminosa, 240 MPa de módulo da camada granular e 120 MPa de módulo da fundação.

Tabela 4.5 – Cálculo do tráfego de projeto pelo modelo JP considerando a carga média dos eixos

Classes de veículo	Volume	peso por eixo				tipo eixo				tipo roda				AP			
F1	49918	23.5	26.8			s	s			s	d			1.0	2.2		
F2	7282	57.4	119.9			s	d			s	d			1.0	4.1		
F3	458	63.4	54.6			d	s			s	d			2.7	2.2		
F4	1120	103.6	155.8			d	d			s	d			2.7	4.1		
G1	1169	43.5	64.3	25.8	24.9	s	s	s	s	s	d	s	s	1.0	2.2	1.0	1.0
G2	177	57.0	86.2	37.8	62.0	s	s	s	d	s	d	s	s	1.0	2.2	1.0	2.7
G3	544	55.7	107.8	40.1	39.3	s	d	s	s	s	d	s	s	1.0	4.1	1.0	1.0
H1	2784	40.1	38.1	39.1		s	s	s		s	d	d		1.0	2.2	2.2	
H2	17	29.4	47.4	27.4		s	d	s		s	d	d		1.0	4.1	2.2	
H3	40895	52.2	52.3	66.4		s	s	d		s	d	s		1.0	2.2	2.7	
H4	1903	56.3	129.2	99.5		s	d	d		s	d	s		1.0	4.1	2.7	
H5	100837	59.5	82.0	153.3		s	s	t		s	d	s		1.0	2.2	3.7	
H6	554	51.8	109.3	163.2		s	d	t		s	d	s		1.0	4.1	3.7	
I1	16383	49.1	77.4			s	s			s	d			1.0	2.2		
I2	1175	63.6	119.1			s	d			s	d			1.0	4.1		

Classes de veículo	kjp				Coef agressividade				NAEP				NAEP (1 ano)	NAEP (20 anos)		
F1	2.80	1.00			0.02	0.01			1041	628			1.67E+03	3.34E+04		
F2	2.80	0.03			0.74	0.17			5387	1255			6.64E+03	1.33E+05		
F3	0.25	1.00			0.10	0.22			45	99			1.45E+02	2.89E+03		
F4	0.25	0.03			0.70	0.49			786	551			1.34E+03	2.67E+04		
G1	2.80	1.00	2.80	2.80	0.24	0.42	0.03	0.03	285	489	35	31	8.41E+02	1.68E+04		
G2	2.80	1.00	2.80	0.25	0.72	1.35	0.14	0.09	128	239	25	16	4.07E+02	8.14E+03		
G3	2.80	0.03	2.80	2.80	0.66	0.11	0.18	0.16	357	61	96	89	6.03E+02	1.21E+04		
H1	2.80	1.00	1.00		0.18	0.05	0.06		493	144	159		7.96E+02	1.59E+04		
H2	2.80	0.03	1.00		0.05	0.00	0.01		1	0	0		1.17E+00	2.34E+01		
H3	2.80	1.00	0.25		0.51	0.18	0.12		20699	7471	4850		3.30E+04	6.60E+05		
H4	2.80	0.03	0.25		0.69	0.23	0.60		1309	443	1136		2.89E+03	5.78E+04		
H5	2.80	1.00	0.06		0.86	1.10	0.81		86459	111074	82137		2.80E+05	5.59E+06		
H6	2.80	0.03	0.06		0.49	0.12	1.05		272	66	579		9.18E+02	1.84E+04		
I1	2.80	1.00			0.40	0.88			6487	14391			2.09E+04	4.18E+05		
I2	2.80	0.03			1.12	0.17			1311	197			1.51E+03	3.02E+04		
									NAEP (1 ano)				3.51E+05		3.51E+05	7.03E+06
									NAEP (20 anos)				7.03E+06			

O modelo JP permite o cálculo do tráfego de projeto função da constituição do pavimento, pelo que é importante perceber como o tráfego de projeto varia para os vários pavimentos que são considerados neste trabalho. Assim, a Figura 4.1 apresenta esta evolução para o caso da carga média do tráfego, podendo observar-se a extrema diferença entre o tráfego calculado por este modelo e o tráfego calculado pelo modelo FR (série ESAL FR na figura).

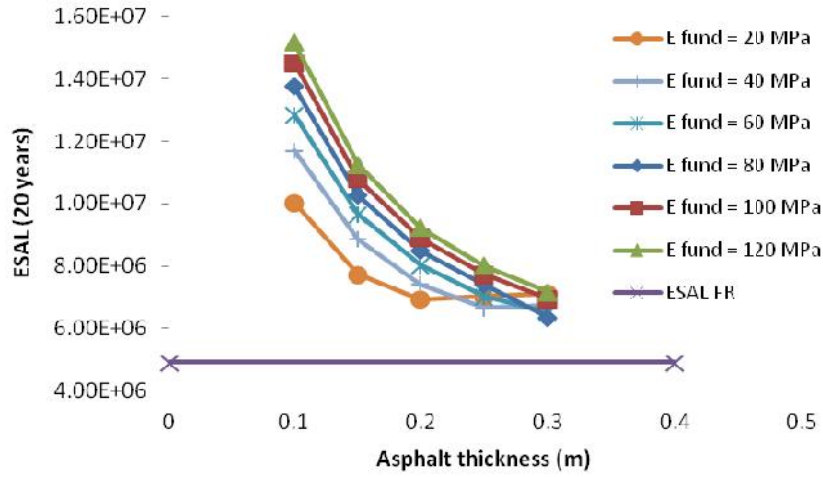


Figura 4.1 – Evolução do tráfego de projeto pelo modelo JP para a carga média do tráfego função da constituição do pavimento

Quanto ao caso da carga máxima legal dos eixos, o tráfego de projeto calculado de acordo com o modelo JP considerando um pavimento com 0.30 m de espessura da camada betuminosa, 0.20 m de espessura da camada granular, 5000 MPa de módulo de rigidez da camada betuminosa, 240 MPa de módulo da camada granular e 120 MPa de módulo da fundação é observado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Cálculo do tráfego de projeto pelo modelo JP considerando a carga máxima legal dos eixos

Classes de veículo	Volume	peso por eixo				tipo eixo				tipo roda				AP			
F1	49918	75	120			s	s			s	d			1.0	2.2		
F2	7282	75	200			s	d			s	d			1.0	4.1		
F3	458	200	120			d	s			s	d			2.7	2.2		
F4	1120	200	200			d	d			s	d			2.7	4.1		
G1	1169	75	120	80	80	s	s	s	s	s	d	s	s	1.0	2.2	1.0	1.0
G2	177	75	120	80	160	s	s	s	d	s	d	s	s	1.0	2.2	1.0	2.7
G3	544	75	200	80	80	s	d	s	s	s	d	s	s	1.0	4.1	1.0	1.0
H1	2784	75	120	100		s	s	s		s	d	d		1.0	2.2	2.2	
H2	17	75	200	27		s	d	s		s	d	d		1.0	4.1	2.2	
H3	40895	75	120	200		s	s	d		s	d	s		1.0	2.2	2.7	
H4	1903	75	200	200		s	d	d		s	d	s		1.0	4.1	2.7	
H5	100837	75	120	240		s	s	t		s	d	s		1.0	2.2	3.7	
H6	554	75	200	240		s	d	t		s	d	s		1.0	4.1	3.7	
I1	16383	75	120			s	s			s	d			1.0	2.2		
I2	1175	75	200			s	d			s	d			1.0	4.1		

Classes de veículo	kJP				Coef agressividade				NAEP				NAEP (1 ano)	NAEP (20 anos)
F1	2.80	1.00			2.16	5.06			107796	252710			3.61E+05	7.21E+06
F2	2.80	0.03			2.16	1.34			15725	9725			2.54E+04	5.09E+05
F3	0.25	1.00			9.76	5.06			4469	2319			6.79E+03	1.36E+05
F4	0.25	0.03			9.76	1.34			10929	1496			1.24E+04	2.49E+05
G1	2.80	1.00	2.80	2.80	2.16	5.06	2.80	2.80	2524	5918	3268	3268	1.50E+04	3.00E+05
G2	2.80	1.00	2.80	0.25	2.16	5.06	2.80	4.00	382	896	495	707	2.48E+03	4.96E+04
G3	2.80	0.03	2.80	2.80	2.16	1.34	2.80	2.80	1175	726	1521	1521	4.94E+03	9.89E+04
H1	2.80	1.00	1.00		2.16	5.06	2.44		6012	14094	6797		2.69E+04	5.38E+05
H2	2.80	0.03	1.00		2.16	1.34	0.01		37	23	0		5.96E+01	1.19E+03
H3	2.80	1.00	0.25		2.16	5.06	9.76		88312	207031	399067		6.94E+05	1.39E+07
H4	2.80	0.03	0.25		2.16	1.34	9.76		4109	2541	18570		2.52E+04	5.04E+05
H5	2.80	1.00	0.06		2.16	5.06	4.89		217755	510487	492893		1.22E+06	2.44E+07
H6	2.80	0.03	0.06		2.16	1.34	4.89		1196	740	2708		4.64E+03	9.29E+04
I1	2.80	1.00			2.16	5.06			35379	82939			1.18E+05	2.37E+06
I2	2.80	0.03			2.16	1.34			2537	1569			4.11E+03	8.21E+04
	NAEP (1 ano)								2.52E+06				2.52E+06	5.04E+07
	NAEP (20 anos)								5.04E+07					

A evolução do tráfego de projeto com o tipo de pavimento considerando a carga máxima legal dos eixos é observada na Figura 4.2, verificando-se que o tráfego de projeto aumenta quando se diminui a espessura da camada betuminosa e aumenta com o aumento da rigidez da fundação. Também se verifica neste caso que o tráfego calculado pelo método JP é consideravelmente superior ao obtido pelo método FR (referenciado por ESAL FR).

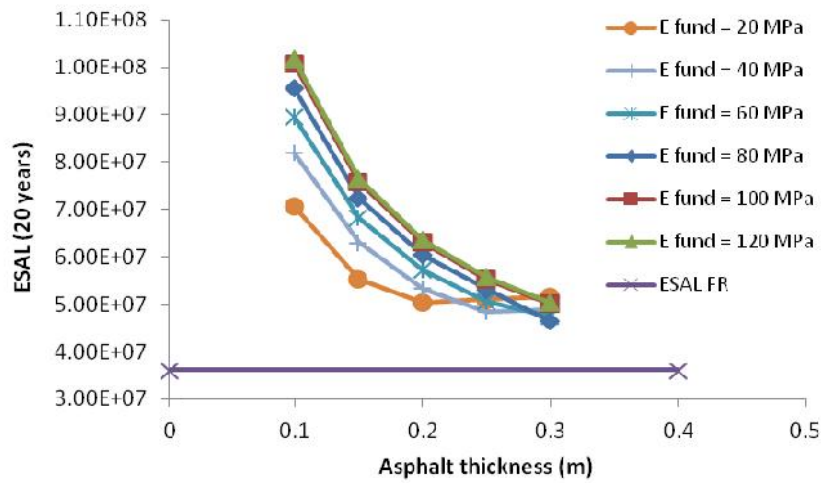


Figura 4.2 – Evolução do tráfego de projeto pelo método JP para a carga máxima legal dos eixos função da constituição do pavimento

A sobreposição das Figuras 4.1 e 4.2, representada na Figura 4.3, permite verificar a efeito da consideração da carga máxima legal dos eixos no cálculo do tráfego de projeto. Este efeito é traduzido por um fator de escala de 10 vezes.

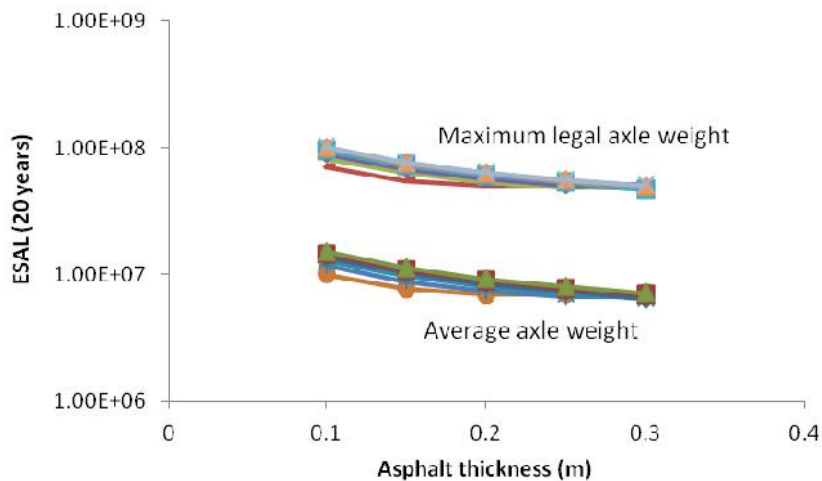


Figura 4.3 – Efeito da consideração da carga máxima legal dos eixos no cálculo do tráfego de projeto pelo método JP

4.3 Área de contacto pneu/pavimento

De acordo com os resultados das pesquisas desenvolvidas por vários autores, a pressão de contato pneu/pavimento deve ser entendida como a pressão média no contacto uma vez que esta não se distribui uniformemente sobre a área de contacto.

Assim, a pressão de contacto e a área de contacto que serão consideradas neste trabalho terão valores calculados com base nos modelos clássicos, os quais consideram as áreas de contacto circulares e as pressões uniformemente distribuídas.

As pressões de contacto P_c e de enchimento P_e serão consideradas de valor igual, à semelhança do que é considerado em muitos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Ao considerarem-se valores médios para a pressão de contacto pneu/pavimento, é possível escrever a equação:

$$P_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.1)$$

Em que: P_c - Pressão de contacto (igual à pressão de enchimento P_e);

F - Carga sobre a roda (carga legal máxima);

A_c - Área de contacto.

Considerando a área de contacto circular, resulta que o raio da área de contacto pode ser definido pela equação:

$$r = \sqrt{\frac{F}{P_c * \pi}} \quad (4.2)$$

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores do raio da área de contacto para todos os eixos e tipos de veículos. Estes valores foram obtidos pela aplicação da carga máxima legal por roda pois considera-se que a pressão de enchimento dos pneumáticos dos veículos é a recomendada para as situações de carga máxima. Analisando os resultados verifica-se que o valor do raio varia entre 0.096 m (H1 e H2) e 0.155 m (G2). O valor médio do raio da área de contacto é de 0.117 m.

Tabela 4.7 – Raios das áreas de contacto

Classe de Veículo	Pneu		Nº de cargas	Magnitude de cada carga por roda (kN)	Raio (m)
	Tamanho e Tipo	Pressão de enchimento (kPa)			
F1	315/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	315/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
F2	315/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	315/80 R22.5	765	4	25.00	0.100
	315/80 R22.5	816	4	25.00	0.100
F3	315/80 R22.5	867	2	50.00	0.136
	315/80 R22.5	867	2	50.00	0.136
	315/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
F4	315/80 R22.5	714	2	50.00	0.149
	315/80 R22.5	714	2	50.00	0.149
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
G1	315/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	315/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
	385/55 R22.5	663	1	50.00	0.155
	385/55 R22.5	663	1	50.00	0.155
G2	315/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	315/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
	385/55 R22.5	714	1	50.00	0.149
	385/55 R22.5	714	2	50.00	0.149
	385/55 R22.5	714	2	50.00	0.149
G3	315/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	315/80 R22.5	765	4	25.00	0.102
	315/80 R22.6	765	4	25.00	0.102
	385/55 R22.5	918	1	50.00	0.132
	385/55 R22.5	918	1	50.00	0.132
H1	315/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	315/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
	275/70 R22.5	867	2	25.00	0.096
H2	315/80 R22.5	816	1	37.50	0.121
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
	275/70 R22.5	867	2	25.00	0.096
H3	315/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	315/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
	385/55 R22.5	918	2	50.00	0.132
	385/55 R22.5	918	2	50.00	0.132

Classe de Veículo	Pneu		Nº de cargas	Magnitude de cada carga por roda (kN)	Raio (m)
	Tamanho e Tipo	Pressão de enchimento (kPa)			
H4	315/80 R22.5	816	1	37.50	0.121
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
	385/55 R22.5	918	2	25.00	0.132
	385/55 R22.5	918	2	25.00	0.132
H5	315/80 R22.5	816	1	37.50	0.121
	315/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
	385/65 R22.5	918	3	40.00	0.118
	385/65 R22.5	918	3	40.00	0.118
	385/65 R22.5	918	3	40.00	0.118
H6	315/80 R22.5	816	1	37.50	0.121
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
	315/80 R22.5	663	4	25.00	0.110
	385/65 R22.5	918	3	40.00	0.118
	385/65 R22.5	918	3	40.00	0.118
	385/65 R22.5	918	3	40.00	0.118
I1	295/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	295/80 R22.5	765	2	30.00	0.112
I2	295/80 R22.5	867	1	37.50	0.117
	295/80 R22.5	765	4	25.00	0.102
	295/80 R22.5	765	4	25.00	0.102

4.4 Dano dos veículos pesados

Para o desenvolvimento deste trabalho foi calculado o dano de cada veículo pesado tanto para a carga média como para a carga máxima legal dos eixos. O procedimento passou pelo cálculo das extensões horizontais de tração na base da camada betuminosa e no topo da camada de fundação, as quais foram utilizadas para determinar a capacidade resistente do pavimento, ao que se seguiu o cálculo do dano provocado pelo veículo. O tráfego para o cálculo do dano de cada veículo pesado foi o correspondente ao registo apresentado na Tabela 4.1.

Este procedimento é ilustrado na Tabela 4.8 onde se apresenta o dano do veículo H5, para a carga média observada no pavimento com fundação de 20 MPa, para as várias espessuras betuminosas consideradas.

Para a simulação dos veículos pesados foram utilizados os dados indicados na Tabela 4.7, nomeadamente quanto ao número de rodas e raio da área de contacto pneu-pavimento. No caso de roda dupla, a distância entre centro de pneus foi considerada igual a 0.351 m.

A designação utilizada para o eixo corresponde a:

- Os dois primeiros caracteres representam o tipo de veículo;
- Os dois conjuntos de caracteres seguintes correspondem ao pavimento, de acordo com a Tabela 3.5;
- Os dois caracteres seguintes correspondem ao número do eixo;
- A designação Pos1, quando existe, corresponde ao primeiro eixo do trem de eixo duplo ou triplo;
- A designação Pos2, quando existe, corresponde a meio de dois eixos do trem de eixo duplo ou triplo.

Tabela 4.8 – Dano do veículo H5 com carga média no pavimento com 20 MPa de fundação

Eixo	Extensão Radial de Tração ξt	Extensão Vertical de Compressão ξz	Número de Eixos Admissíveis $Nt (10^6)$	Número de Eixos Admissíveis $Nz (10^6)$	$Ntz (10^6)$	Trafego (10^6)	Dano	Dano veículo
H5-H1-S1-E1	384.6759	1146.3940	0.03	0.09	0.03	2.0167	58.5992	170.5111
H5-H1-S1-E2	384.9082	1291.3680	0.03	0.06	0.03	2.0167	58.7764	
H5-H1-S1-E3-Pos1	352.0538	959.7085	0.05	0.19	0.05	2.0167	37.6238	
H5-H1-S1-E3-Pos2	95.3440	277.7074	0.26	0.74	0.26	2.0167	15.5117	
H5-H2-S1-E1	219.3811	597.0766	0.57	1.26	0.57	2.0167	3.5352	11.8257
H5-H2-S1-E2	232.4716	712.9965	0.43	0.62	0.43	2.0167	4.7235	
H5-H2-S1-E3-Pos1	214.2792	539.7142	0.64	1.89	0.64	2.0167	3.1428	
H5-H2-S1-E3-Pos2	89.3047	283.4639	9.51	37.11	9.51	2.0167	0.4242	
H5-H3-S1-E1	140.4802	365.4557	5.30	8.97	5.30	2.0167	0.3806	1.5171
H5-H3-S1-E2	155.4726	449.3476	3.19	3.92	3.19	2.0167	0.6320	
H5-H3-S1-E3-Pos1	147.1002	368.5686	4.21	8.67	4.21	2.0167	0.4792	
H5-H3-S1-E3-Pos2	75.9742	240.7320	159.25	599.10	159.25	2.0167	0.0253	
H5-H4-S1-E1	96.8713	247.2886	33.98	42.79	33.98	2.0167	0.0593	0.2847
H5-H4-S1-E2	111.4034	309.7147	16.89	17.39	16.89	2.0167	0.1194	
H5-H4-S1-E3-Pos1	108.3000	275.8608	19.46	27.63	19.46	2.0167	0.1036	
H5-H4-S1-E3-Pos2	64.0020	199.6513	1699.47	4743.33	1699.47	2.0167	0.0024	
H5-H5-S1-E1	70.5008	178.8562	166.44	156.35	156.35	2.0167	0.0129	0.0751
H5-H5-S1-E2	83.8573	226.9999	69.91	60.26	60.26	2.0167	0.0335	
H5-H5-S1-E3-Pos1	83.6311	216.5271	70.86	72.79	70.86	2.0167	0.0285	
H5-H5-S1-E3-Pos2	54.3399	165.9484	13444.54	24448.34	13444.54	2.0167	0.0003	

Para este mesmo veículo, na Figura 4.4 é apresentada a evolução do dano do veículo função das características do pavimento, sendo visível que o dano aumenta com a diminuição da rigidez da fundação bem como com a diminuição da espessura betuminosa.

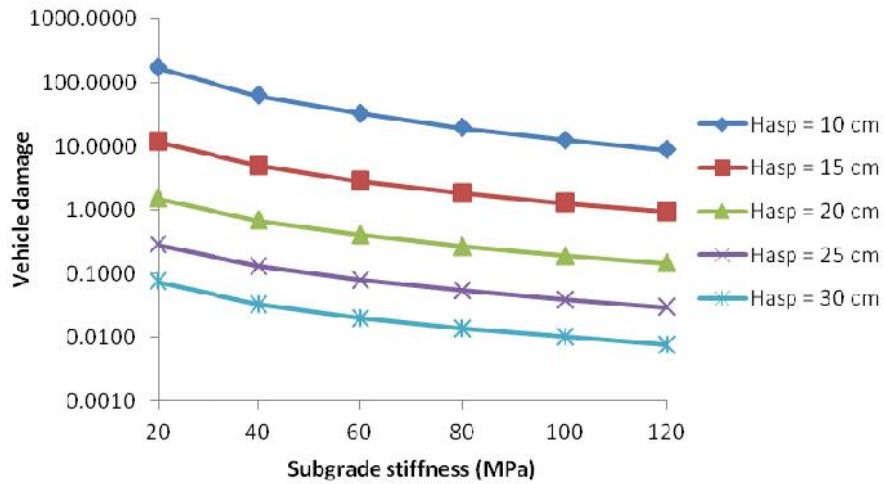


Figura 4.4 – Dano do veículo H5 com carga média no pavimento com 20 MPa de fundação

O somatório do dano de cada veículo e para cada pavimento permite conhecer o dano do tráfego, obtendo-se para o caso da carga média do tráfego os resultados da Figura 4.5.

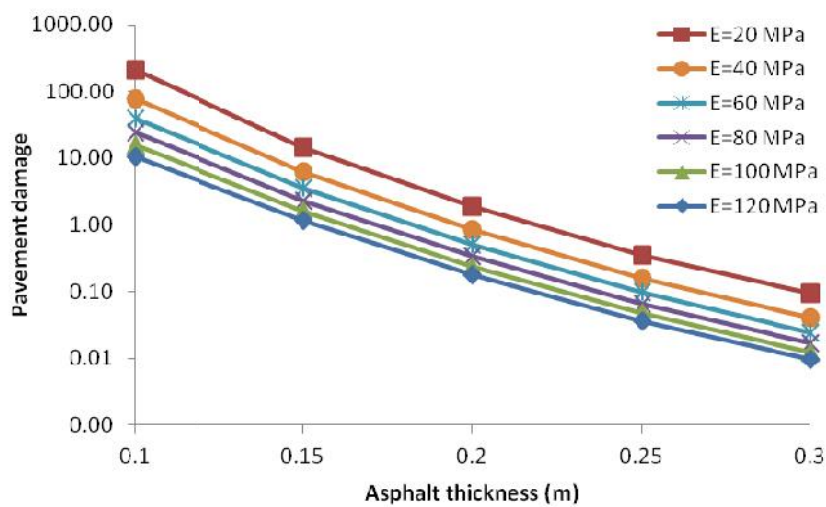


Figura 4.5 – Dano do tráfego considerando a carga média dos eixos dos veículos

Quanto à carga máxima legal por eixo, o dano do tráfego é apresentado na Figura 4.6, sendo que este é aproximadamente 10 vezes superior ao obtido para a carga média dos eixos.

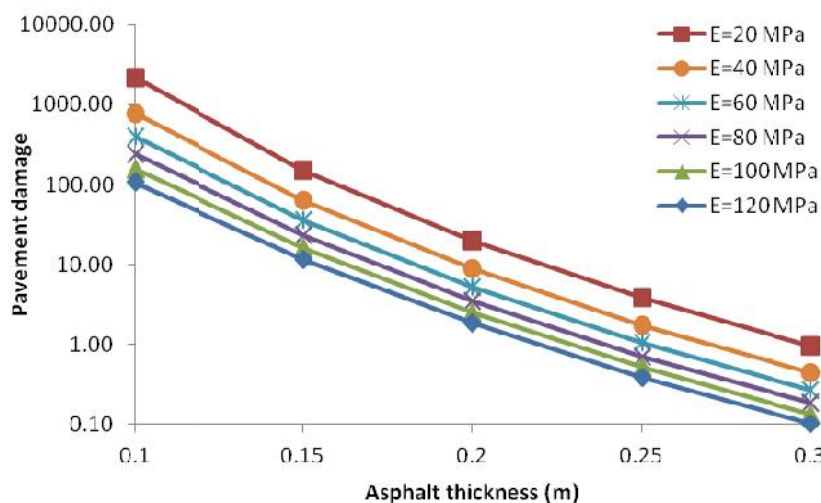


Figura 4.6 – Dano do tráfego considerando a carga máxima legal dos eixos dos veículos

4.5 Dano do eixo-padrão

Para o cálculo do dano provocado por um eixo-padrão perante diferentes condições de aplicação da carga, nomeadamente em termos de área de contacto pneu-pavimento, foram considerados raios de 0.06 m a 0.20 m (com incrementos de 0.01m), tendo-se calculado para todos os pavimentos em análise as extensões horizontais de tração na base das camadas betuminosas e verticais de compressão no topo do solo de fundação.

As Figuras 4.7 a 4.11 apresentam, para as várias classes de fundação, as extensões horizontais de tração na base das camadas betuminosas sendo possível observar a extrema variação que elas apresentam para os vários pavimentos considerados neste trabalho. A escala vertical dos gráficos destas figuras apresenta os mesmos limites inferior e superior para melhor comparação dos valores obtidos.

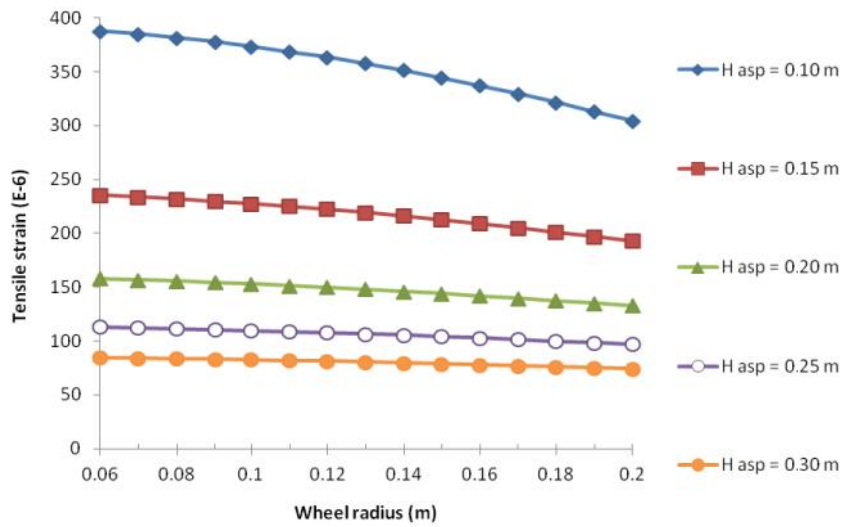


Figura 4.7 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 20 MPa de fundação

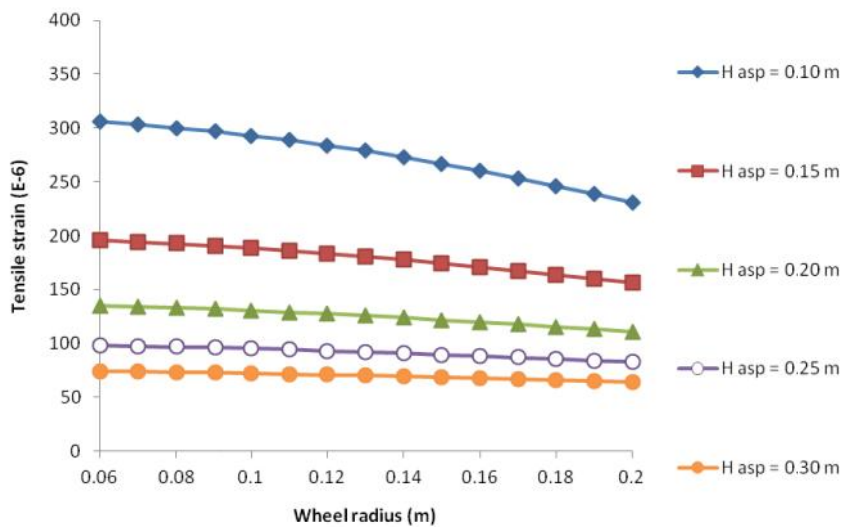


Figura 4.8 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 40 MPa de fundação

Da análise das Figuras 4.7 e 4.8 verifica-se que o aumento do módulo da fundação do pavimento origina uma pequena variação das extensões horizontais na base das camadas betuminosas mais espessas, enquanto que na camada mais delgada (espessura de 10 cm e 15 cm), a variação é significativa.

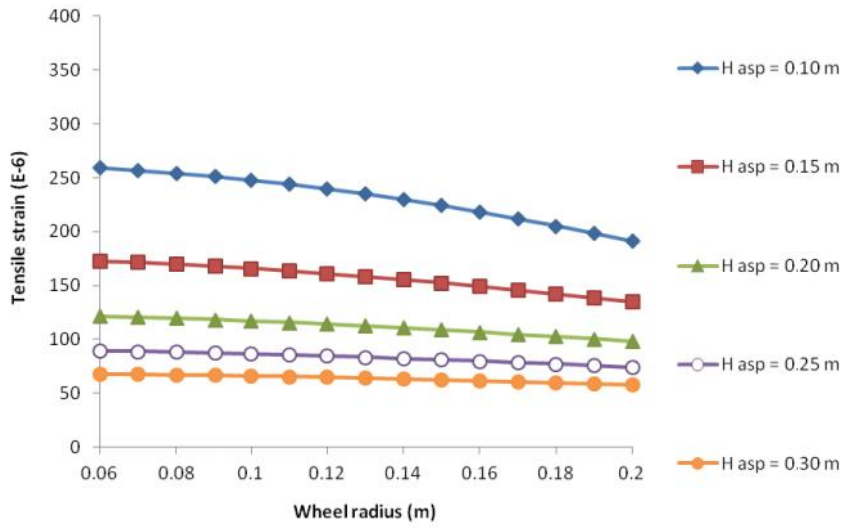


Figura 4.9 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 60 MPa de fundação

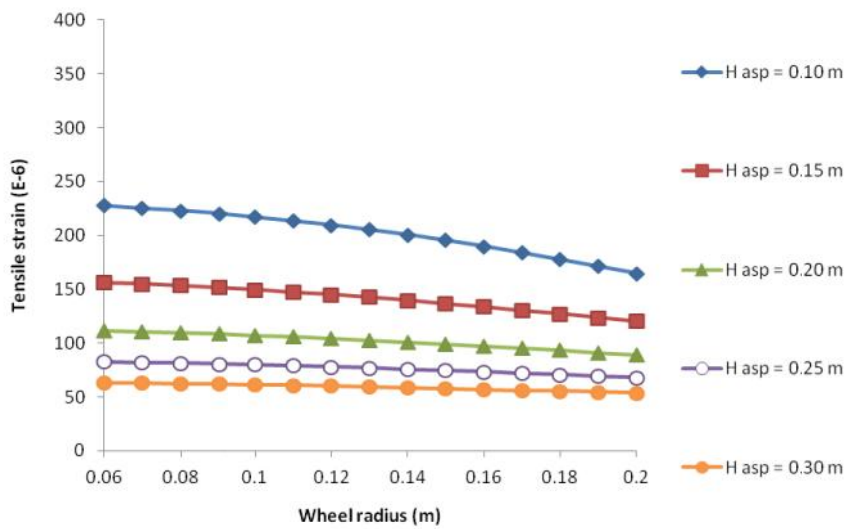


Figura 4.10 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 80 MPa de fundação

Nas Figuras 4.9 e 4.10 a variação do módulo da fundação continua a ter uma influência mais significativa na extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas mais delgadas.

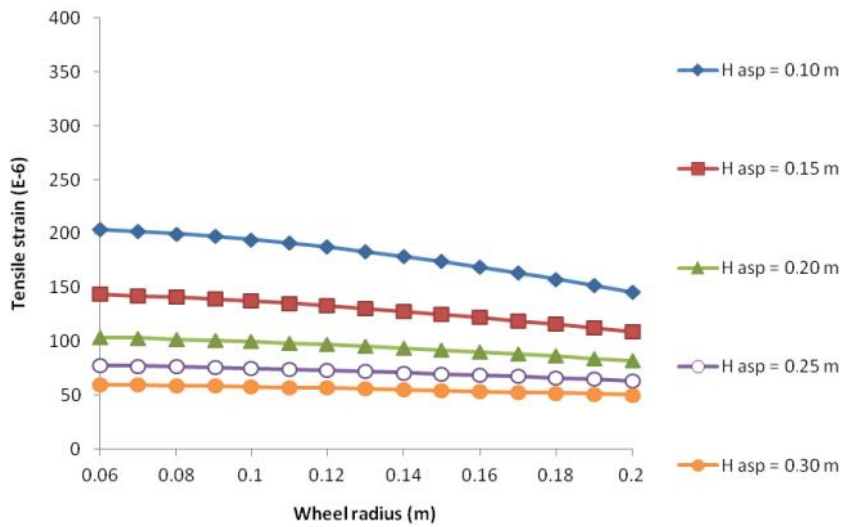


Figura 4.11 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 100 MPa de fundação

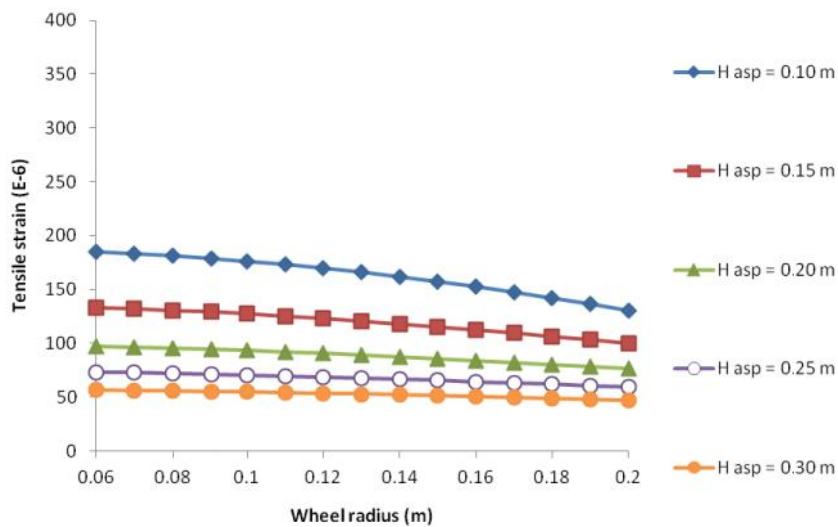


Figura 4.12 – Extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 120 MPa de fundação

Nas Figuras 4.11 e 4.12 verifica-se que para os pavimentos com espessuras da camada betuminosa entre 20 cm e 30 cm, a variação do módulo da fundação não tem significado na extensão horizontal de tração na base da camada betuminosa.

Com as extensões apresentadas foi calculado o dano que o eixo padrão provoca no pavimento, tanto para o tráfego calculado pelo método FR como pelo método JP. Pelo método FR, o dano é apresentado nas Figuras 4.13 a 4.18 para as várias classes de fundação estudadas.

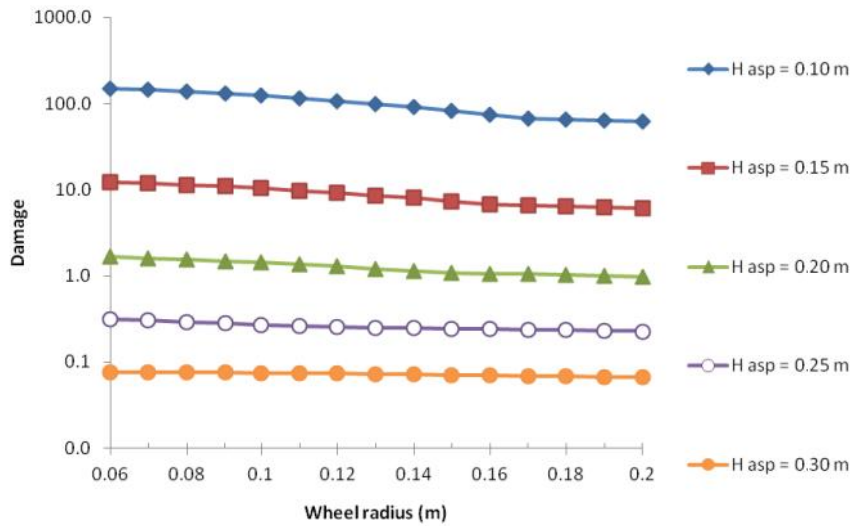


Figura 4.13 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 20 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR

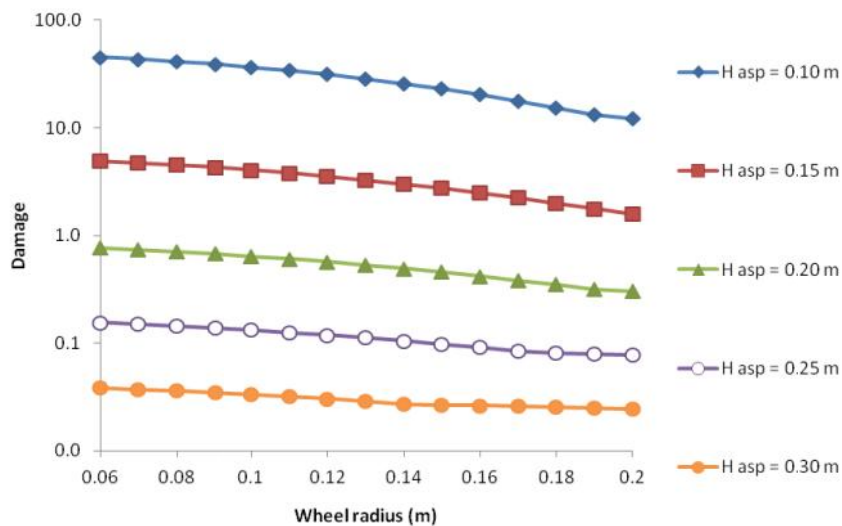


Figura 4.14 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 40 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR

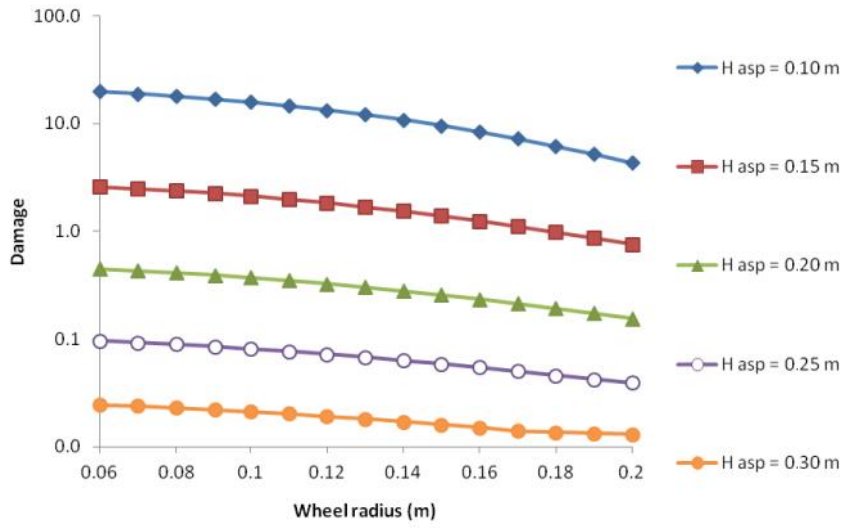


Figura 4.15 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 60 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR

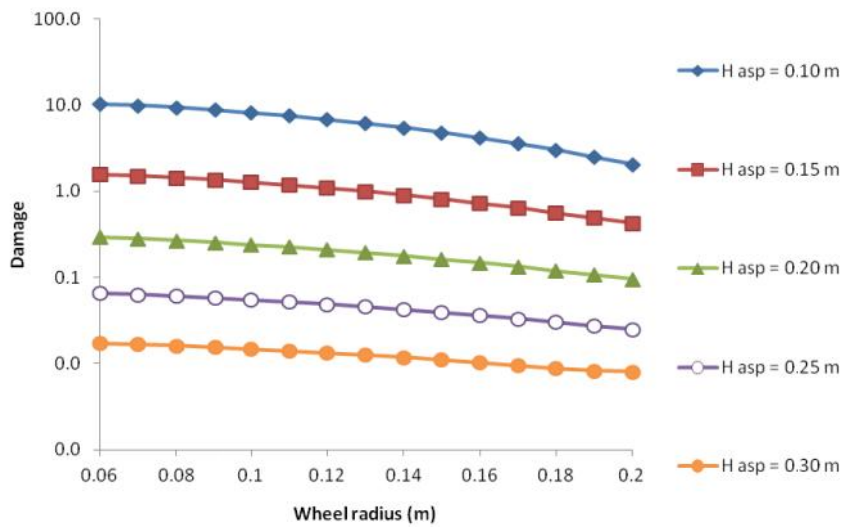


Figura 4.16 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 80 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR

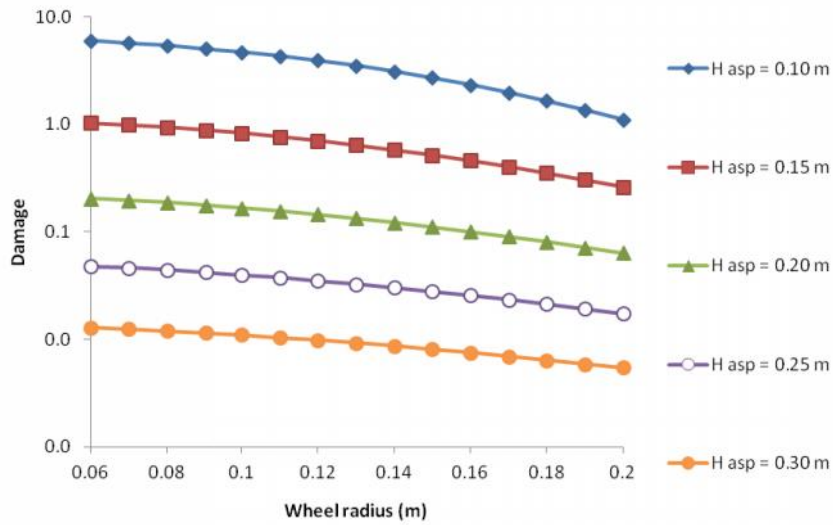


Figura 4.17 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 100 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR

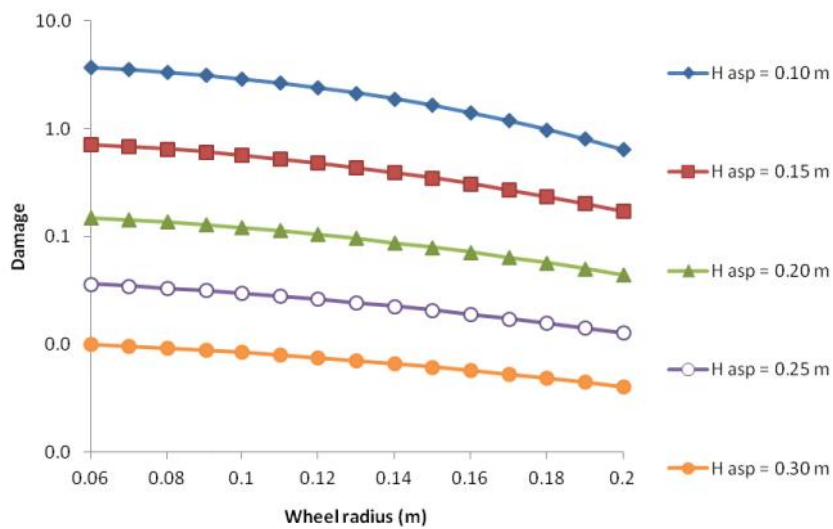


Figura 4.18 – Dano do eixo-padrão com carga média para fundação de 120 MPa considerando o tráfego de projeto do método FR

O procedimento de cálculo das extensões e posterior cálculo do dano do pavimento, foi realizado também para o tráfego calculado pelo método JP e depois repetido para o caso da carga máxima legal por eixo, tendo-se obtido tendências iguais às apresentadas para a evolução das extensões como para o dano.

Também as extensões verticais de compressão no topo da camada de fundação apresentam uma tendência idêntica para todos os casos estudados, nomeadamente para o tráfego calculado pelo método FR e JP bem como para a carga média dos eixos e carga máxima legal, sendo que a tendência é a que se observa nas Figuras 4.19 a 4.24 para as várias classes de fundação. Também nestas figuras se optou por ter a mesma escala no eixo das ordenadas de modo a permitir uma fácil comparação da evolução das extensões para as várias classes de fundação.

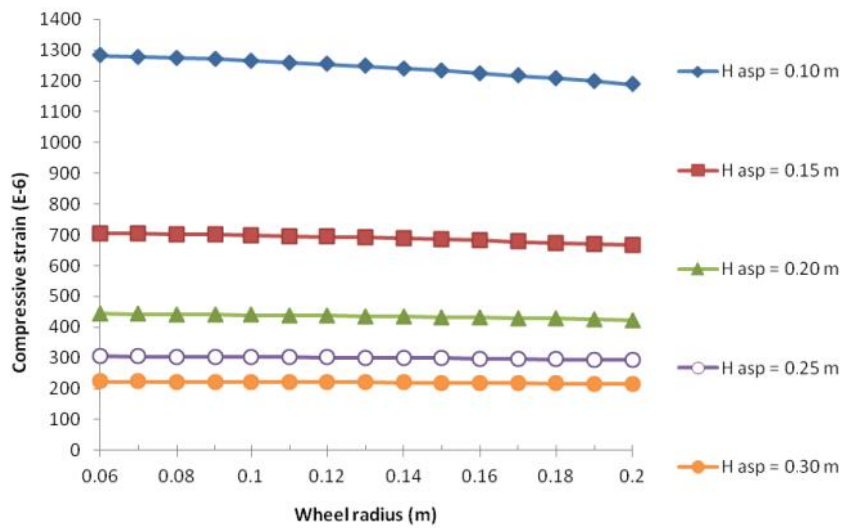


Figura 4.19 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 20 MPa de fundação

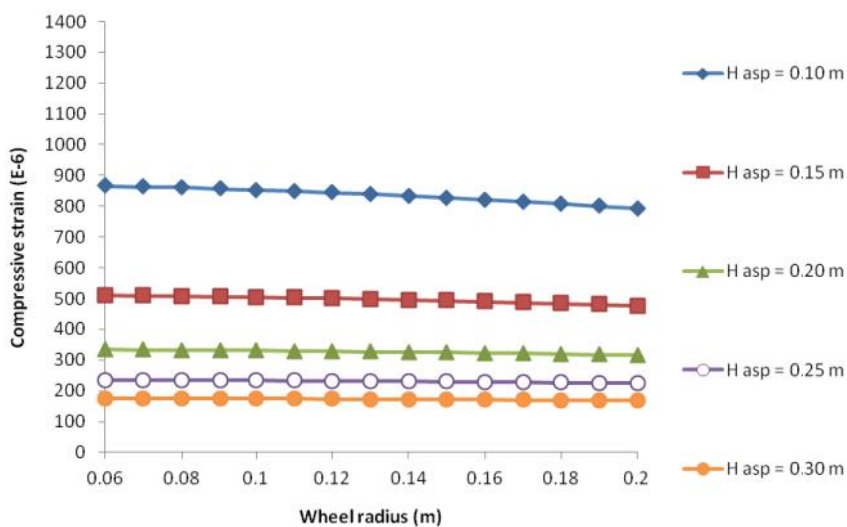


Figura 4.20 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 40 MPa de fundação

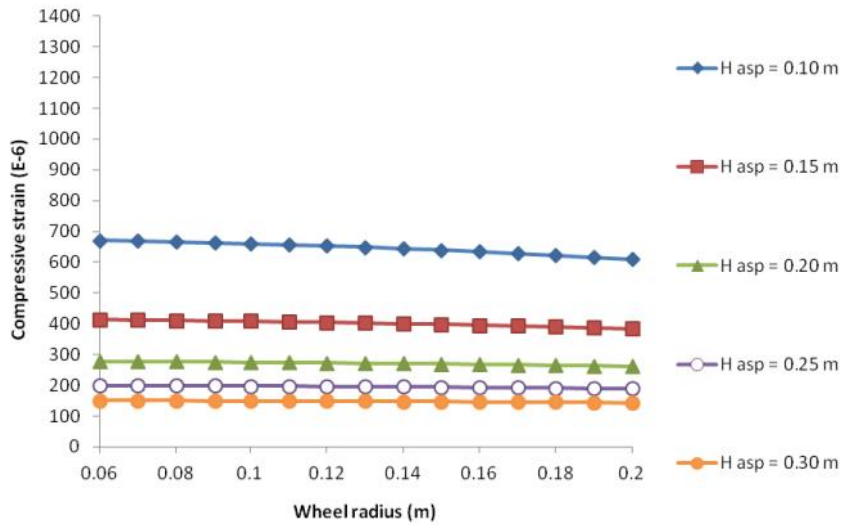


Figura 4.21 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 60 MPa de fundação

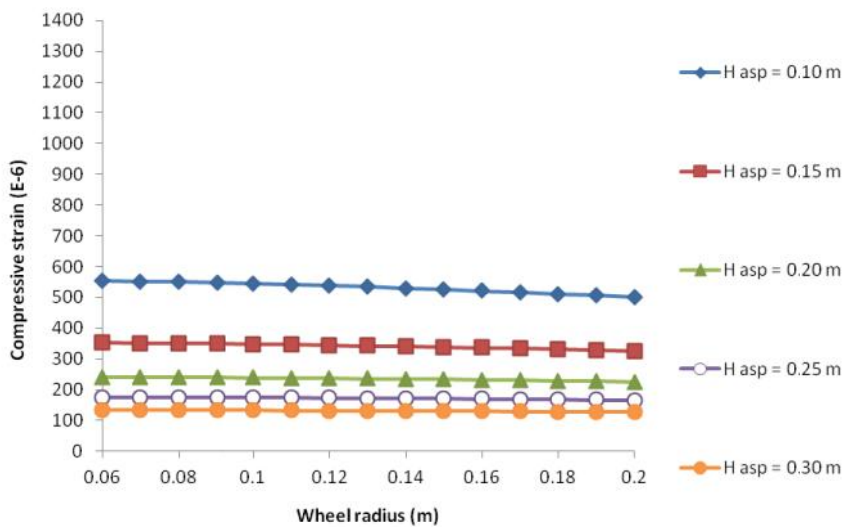


Figura 4.22 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 80 MPa de fundação

Nas Figuras 4.19 e 4.22 verifica-se que para os pavimentos com espessuras da camada betuminosa de 10 cm e 15 cm, a variação do módulo da fundação, tem significado na extensão vertical de compressão no topo da fundação do pavimento, diminuindo o seu valor com o aumento do módulo da fundação.

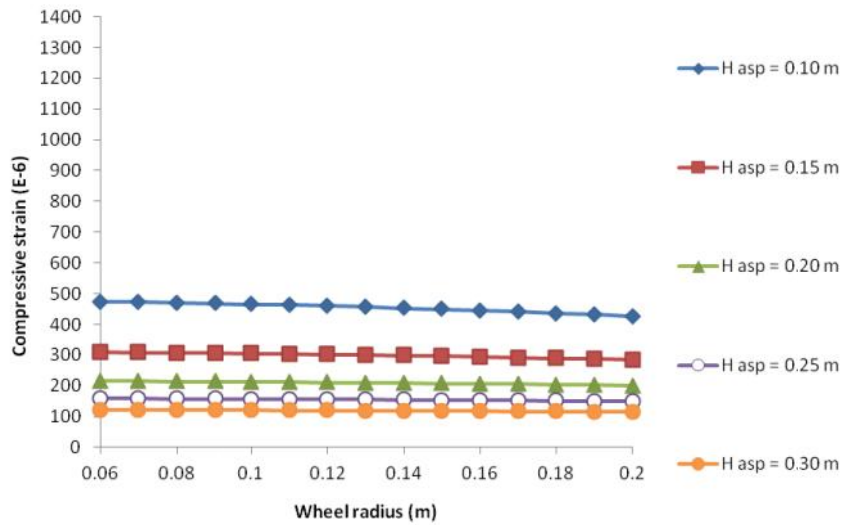


Figura 4.23 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 100 MPa de fundação

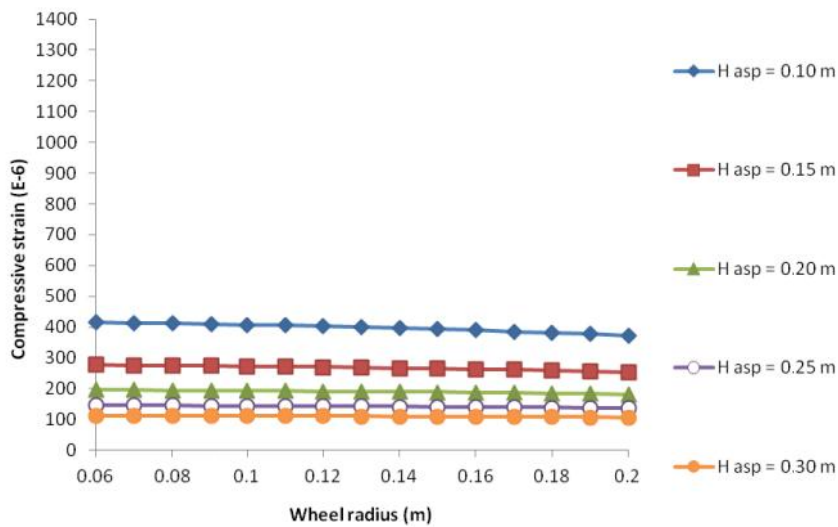


Figura 4.24 – Extensão vertical de compressão no topo da fundação, calculada com carga média e tráfego FR para pavimento com 120 MPa de fundação

Nas Figuras 4.23 e 4.24 verifica-se que para os pavimentos com espessuras da camada betuminosa entre 20 cm e 30 cm, a variação do módulo da fundação, não tem significado na extensão vertical de compressão no topo da fundação do pavimento, mantendo-se inalterável para módulos da fundação entre 100 e 120MPa.

4.6 Definição da área de contacto pneu-pavimento

A sobreposição do dano dos veículos pesados com o dano do eixo-padrão permite definir as condições ideais para o dimensionamento dos pavimentos, nomeadamente quanto ao raio a aplicar para a área pneu-pavimento. Esta sobreposição foi realizada para todas as condições de carga (média observada e máxima legal), conjugada com o tráfego de projeto calculado pelos modelos FR e JP.

Para o caso da carga dos veículos pesados ser a carga média observada e o tráfego calculado pelo método FR, os resultados são apresentados nas Figuras 4.25 a 4.30, sendo possível observar que para qualquer classe de fundação, os danos obtidos para os pavimentos até 20 cm de espessura betuminosa não há sobreposição dos danos dos veículos com o dano do eixo-padrão, levando a concluir que para estes pavimentos, o dimensionamento deveria ser realizado com raios da carga inferiores a 6 cm. Só para as espessuras de 25 e 30 cm é que se observa que os danos apresentam valores iguais, verificando-se isto para raios de 6 a 8 cm, aumentando o raio com o aumento da rigidez da fundação. Também se verifica que o aumento da espessura betuminosa contribui para o aumento do raio da carga.

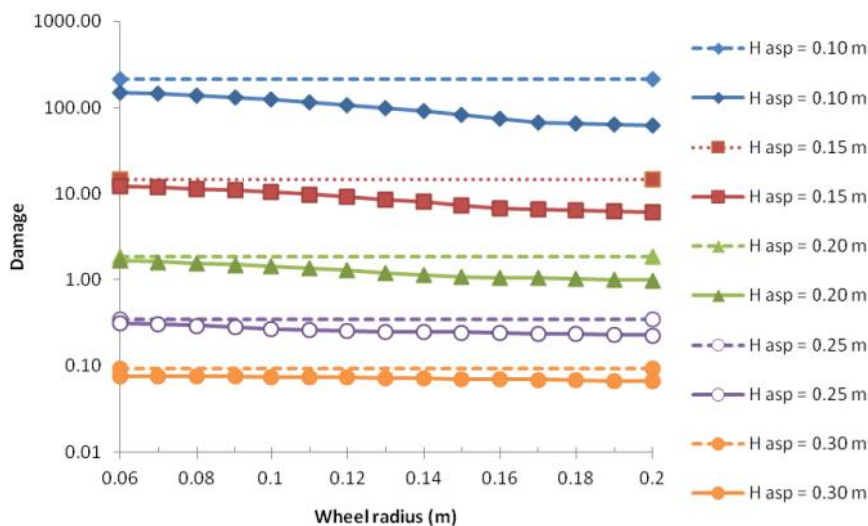


Figura 4.25 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 20 MPa de fundação

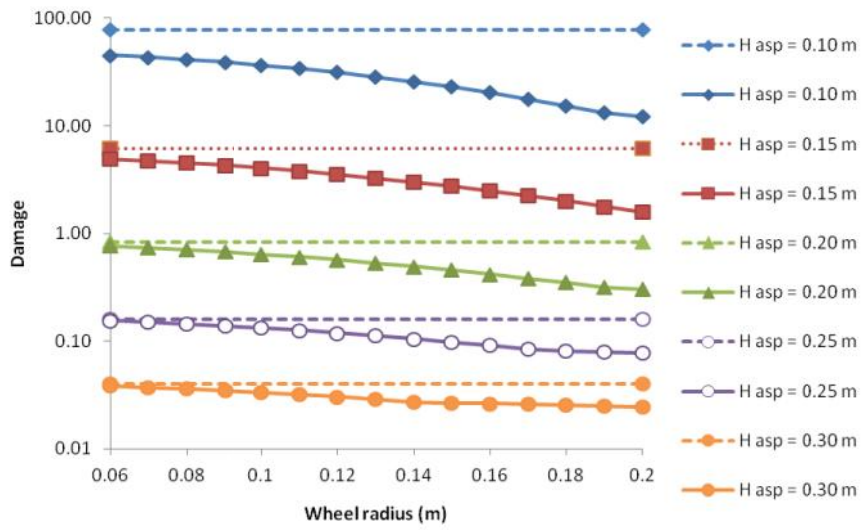


Figura 4.26 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 40 MPa de fundação

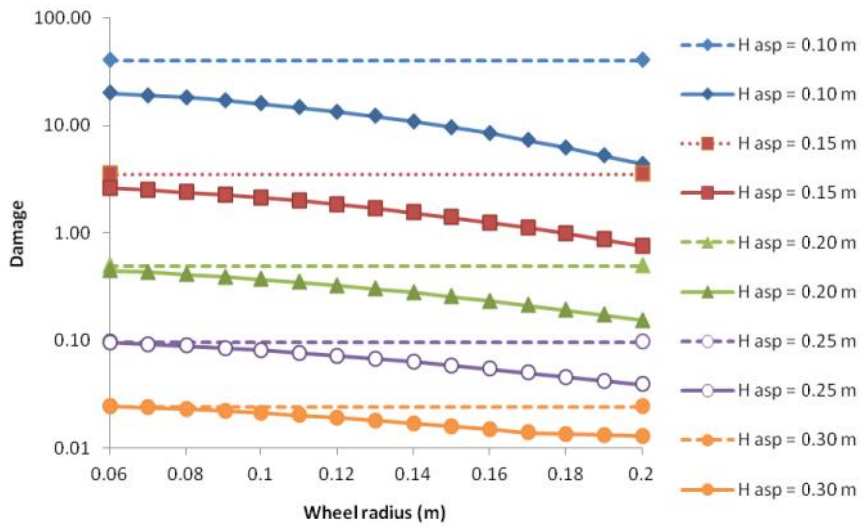


Figura 4.27 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 60 MPa de fundação

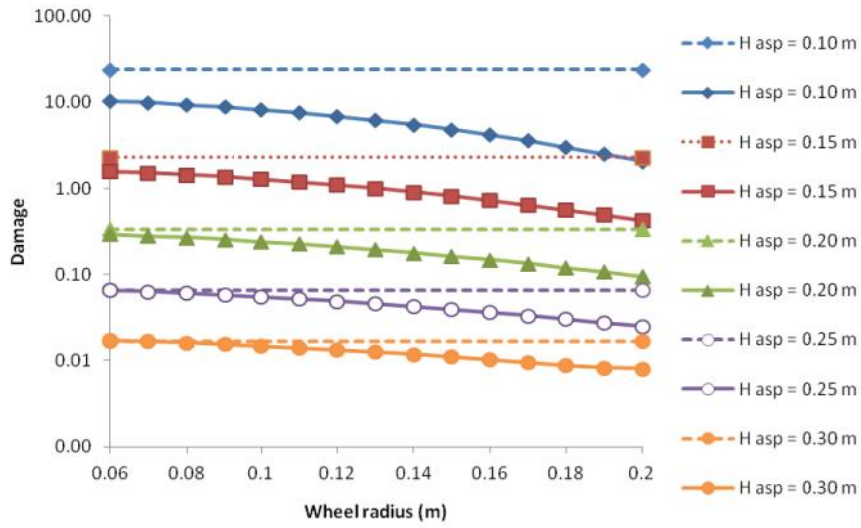


Figura 4.28 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 80 MPa de fundação

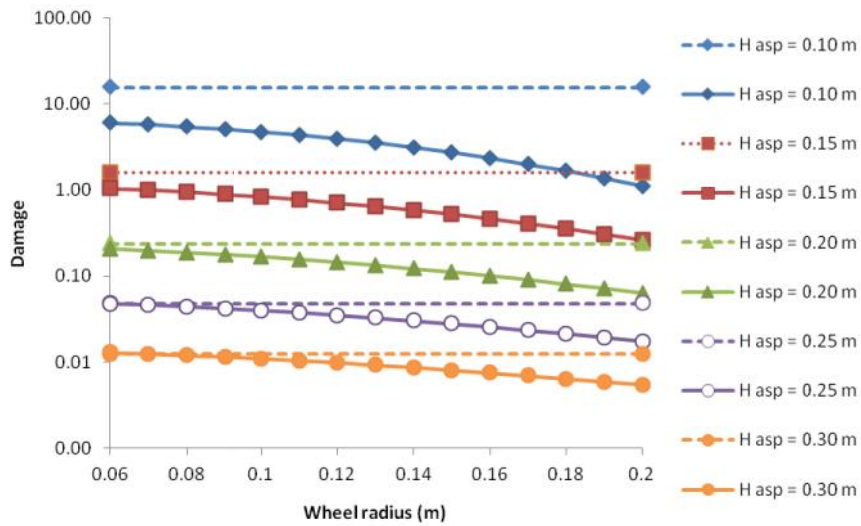


Figura 4.29 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 100 MPa de fundação

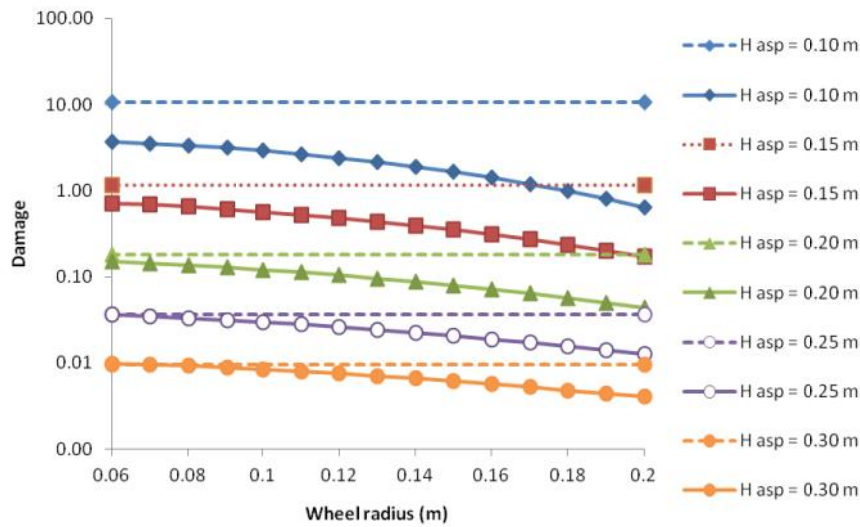


Figura 4.30 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego FR, para pavimento com 120 MPa de fundação

Na análise destas figuras é possível observar que para qualquer classe de fundação, não há sobreposição dos danos dos veículos com o dano do eixo-padrão para os pavimentos até 20 cm de espessura da camada betuminosa, o que indicia que para estes casos o raio da carga a adotar seria inferior a 6 cm.

Para os pavimentos com camadas betuminosas mais espessas (25 e 30 cm) e para todas as classes de fundação, a sobreposição dos danos dos veículos com o dano do eixo-padrão verifica-se para valores do raio de carga entre os 6 e 8 cm.

Para o caso do tráfego ser calculado pelo modelo JP, a sobreposição do dano dos veículos pesados com o dano do eixo padrão é apresentada nas Figuras 4.31 a 4.36. Neste caso já se verifica uma sobreposição entre os dois danos, o que permite definir um valor para o raio da carga para dimensionamento. A análise destas figuras permite concluir que o raio deve aumentar com o acréscimo da espessura da camada betuminosa, não se verificando influência significativa do módulo da fundação, a não ser para o caso de 10 cm de espessura da camada betuminosa, facto que está relacionado com o fator condicionante do dano (fendilhamento por fadiga vs deformação permanente).

A sobreposição do dano dos veículos pesados com o dano do eixo-padrão conduziu aos valores do raio para dimensionamento expressos na Tabela 4.9. Tendo em conta que a fundação dos pavimentos habitualmente construídos se encontra entre os 40 a 100 MPa e que para os níveis de tráfego atuais os pavimento têm pelo menos 15 cm de espessura betuminosa, o raio da carga para dimensionamento de pavimentos deve estar entre 12 e 14 cm, sendo que a utilização de um valor de 12 cm se afigura mais adequado para pavimentos mais delgados e 13 cm para pavimentos mais espessos.

Tabela 4.9 – Valores do raio (cm) para dimensionamento de pavimentos para tráfego obtido pelo modelo JP

Fundação (MPa)	Espessura betuminosa (cm)				
	10	15	20	25	30
20	12	12	12	15	20
40	12	12	13	12	12
60	11	12	13	13	13
80	10	12	13	13	13
100	9	12	13	14	14
120	7	12	13	14	14

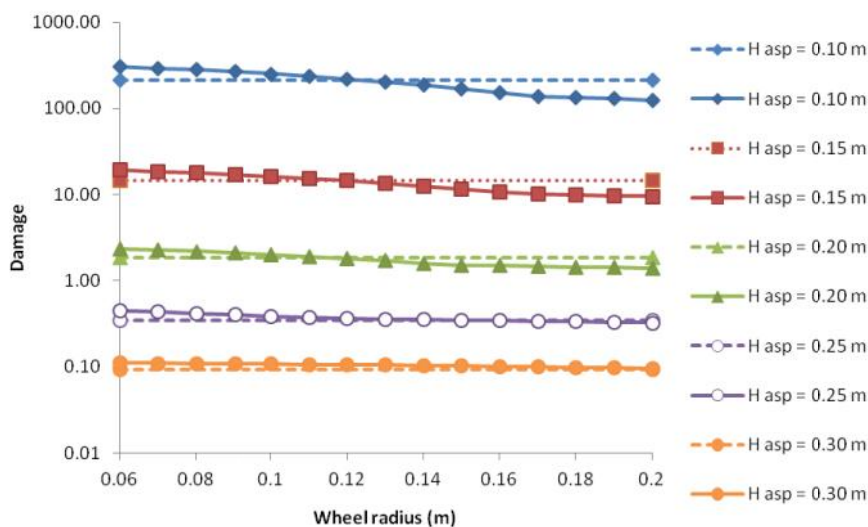


Figura 4.31 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 20 MPa de fundação

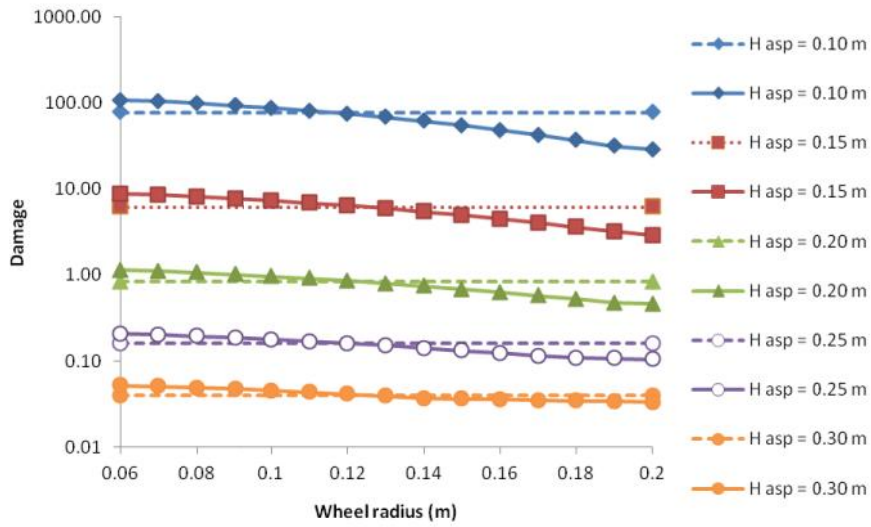


Figura 4.32 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 40 MPa de fundação

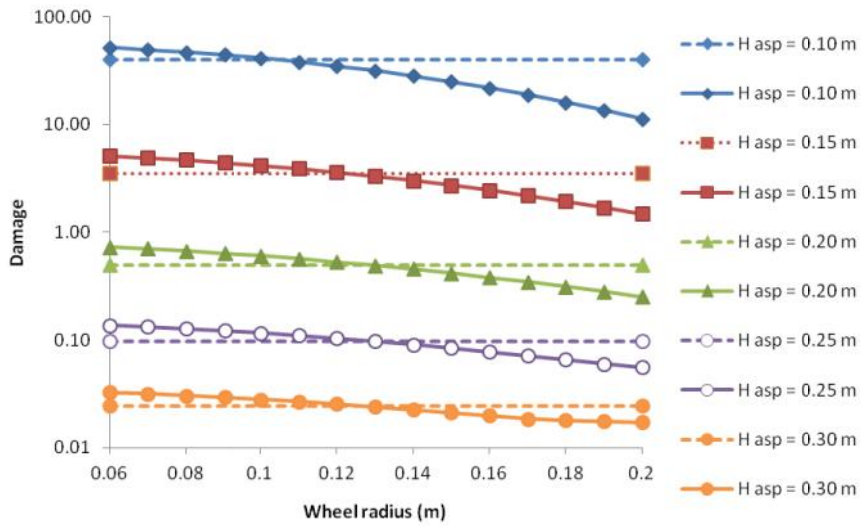


Figura 4.33 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 60 MPa de fundação

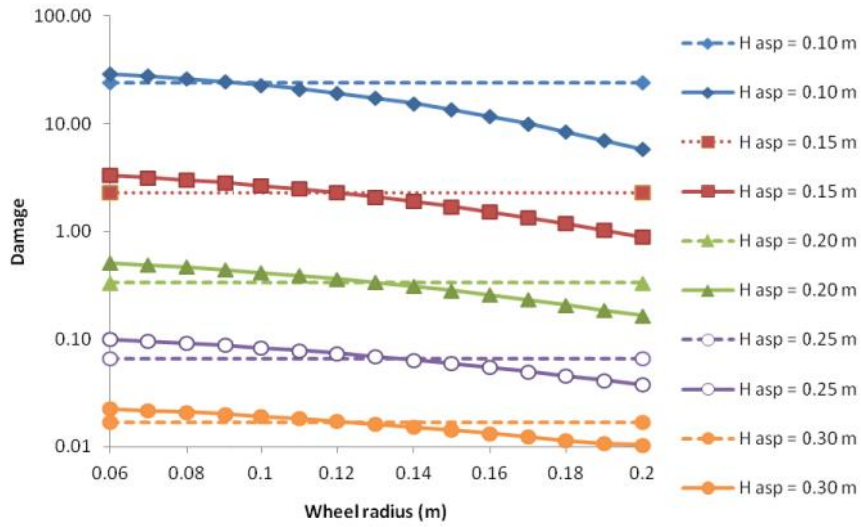


Figura 4.34 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 80 MPa de fundação

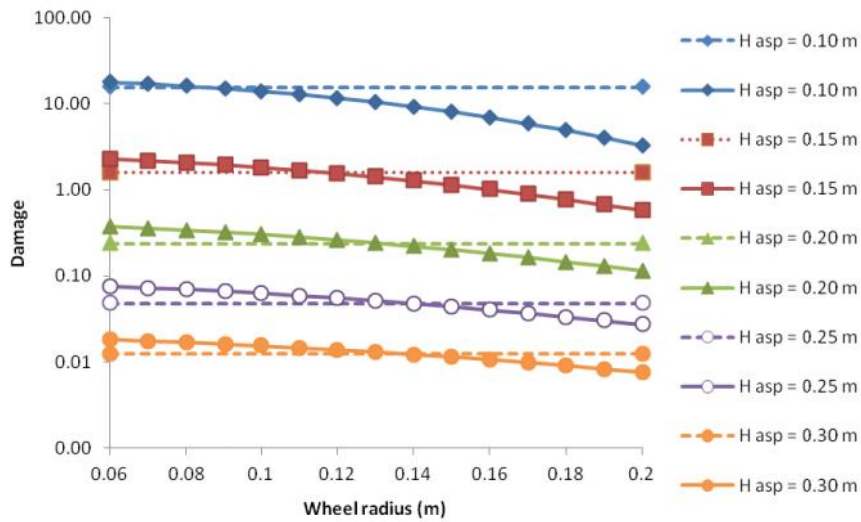


Figura 4.35 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 100 MPa de fundação

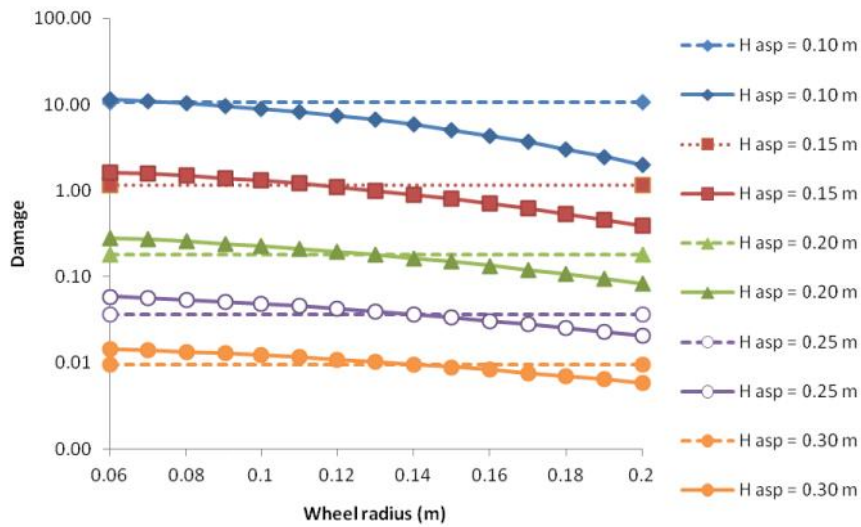


Figura 4.36 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga média e tráfego JP, para pavimento com 120 MPa de fundação

A sobreposição do dano dos veículos pesados com o dano do eixo-padrão permite verificar a evolução do raio da carga em cada uma das estruturas.

No caso em que a estrutura tem uma camada betuminosa com 10 cm de espessura, verifica-se que à medida que o módulo da fundação aumenta o valor do raio diminui, chegando a ter quase o valor mínimo estabelecido, para um módulo da fundação de 120MPa.

Esta situação não se verifica para as estruturas com camadas betuminosas mais espessas levando a concluir que, para estas o módulo da fundação não tem influência significativa. Nestes casos, o raio da carga varia com a espessura da camada betuminosa, mantendo um valor idêntico quer o módulo da fundação tenha 20 ou 120MPa, com exceção dos pavimentos com camadas betuminosas de 25 cm e 30 cm de espessura e módulo da fundação de 20 MPa, que apresentam valores para o raio de carga desajustados dos restantes valores.

Quanto ao tráfego ser considerado pela carga máxima legal dos eixos dos veículos pesados, cujos resultados para a fundação com 60 e 80 MPa são apresentados

respetivamente nas Figuras 4.37 e 4.38, verifica-se que a sobreposição do dano dos veículos pesados com o dano do eixo-padrão não permite definir um valor adequado para o raio da área de aplicação da carga.

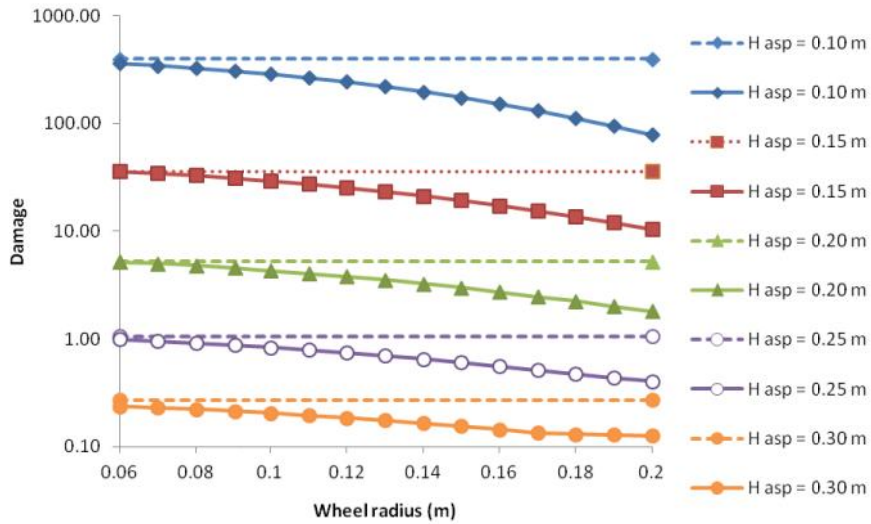


Figura 4.37 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga máxima legal dos eixos e tráfego JP, para pavimento com 60 MPa de fundação

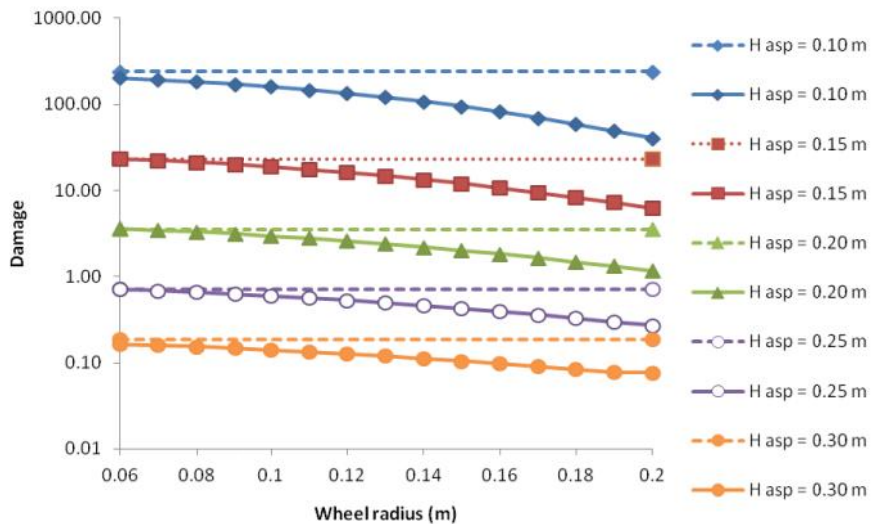


Figura 4.38 – Dano dos veículos pesados e eixo-padrão, calculado com carga máxima legal dos eixos e tráfego JP, para pavimento com 80 MPa de fundação

5 Considerações finais

Este capítulo constitui o fecho do estudo proposto na dissertação com o objetivo de avaliar a Influência das Condições de Carregamento no Dimensionamento de Pavimentos.

As conclusões serão apresentadas de acordo com o desenvolvimento do trabalho, sendo também apresentadas algumas considerações sobre a utilização dos resultados obtidos para estudos ou pesquisas a desenvolver no futuro.

5.1 Conclusões gerais do trabalho

Para a realização deste trabalho, apesar de importante, não foi possível obter informação suficiente junto das empresas consultadas de transporte de mercadorias e passageiros sobre valores operacionais para as cargas por eixo, tipos e dimensões de pneus utilizados, pressões de enchimento de pneus, que completassem a informação do estudo de tráfego para os veículos aí referidos. Esta dificuldade foi contornada com recurso a especificações e recomendações dos construtores de veículos e pneus.

Relativamente ao tipo de pneu, todas as especificações consultadas recomendam pneus do tipo radial. Quanto às dimensões dos pneus, para as 15 classes de veículos são recomendados cinco tamanhos diferentes dos quais três são referentes aos reboques e semirreboques.

A pressão de enchimento recomendada pelos fabricantes de pneus é diferente consoante o eixo em que estão montados (simples, duplo ou triplo) e se o rodado é simples ou duplo.

A análise do trabalho desenvolvido está assim limitada à contagem de veículos pesados do estudo de tráfego da A3 sentido Norte - Sul (Valença - Porto) e aos dados obtidos na pesquisa efetuada aos construtores de veículos e pneus.

Com as pressões de enchimento dos pneus recomendadas pelos fabricantes, verificou-se que aumentando a pressão de enchimento dos pneus, os valores dos raios da área de contacto diminuem mas que as extensões de tração, compressão e o dano aumentam, o que está em linha com estudos existentes que demonstram que maiores pressões nos pneus produzem de forma mais acentuada a rotura da camada betuminosa por fadiga e a evolução do aparecimento de rodeiras decorrentes de deformações permanentes.

O coeficiente de agressividade calculado com recurso ao modelo JP altera significativamente o valor do tráfego de projeto e o valor do dano.

Da análise dos resultados obtidos quando considerados os valores médios da carga por eixo verifica-se que os valores mais significativos para o valor do raio a adotar no dimensionamento dos pavimentos são obtidos recorrendo ao modelo JP em comparação com o modelo FR.

A sobreposição do dano dos veículos pesados com o dano do eixo-padrão conduziu aos valores do raio para dimensionamento que variam entre 12 e 14 cm, sendo que a utilização de um valor de 12 cm se afigura mais adequado para pavimentos mais delgados e 13 cm para pavimentos mais espessos.

5.2 Desenvolvimento de trabalhos futuros

No que respeita à continuação dos estudos iniciados apresenta-se algumas sugestões para pesquisas futuras.

É importante prosseguir com estudos nesta área de forma sistemática de modo a obter um maior número de parâmetros que permitam face à dimensão dos efeitos provocados pela ação simultânea da carga por eixo e pela pressão de enchimento dos pneus minimizar os danos provocados na estrutura dos pavimentos.

Uma das dificuldades encontradas foi a falta de estudos a nível nacional sobre este tema. Dados sobre veículos que circulam nas estradas, relativamente a configuração de

eixos, cargas reais totais e por eixo com que operam, qual o tipo de pneus, dimensão e pressão de enchimento, foi outra da dificuldade encontrada. Sugere-se neste caso:

- Uma abordagem às entidades que gerem as infraestruturas rodoviárias, de modo a complementarem os estudos de tráfego das vias mais importantes com elementos adicionais.
- Implementação de programas que permitam em laboratório ou em local adequado para a realização de testes, obter para os tipos de pneus mais representativos do tipo de veículos em circulação, todos os dados necessários às pesquisas futuras.

Referências bibliográficas

- Azevedo, M.C.M., 1993. Características Mecânicas para Camadas de Base de Pavimentos. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado Santos, L., 2008. Pavimentos Rodoviários. Almedina. Coimbra.
- Fernandes Jr, J. L., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., & Transportation Research Board. (2006). Effects of Traffic Loading on Portuguese and Brazilian Pavement Performance
- Fontenele, H. B., 2011. Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes.
- Huang, Y.H., 2004. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall.
- Jiang, Y.; Li, S.; Nantung, T.; Mangold, K.; MacArthur, S. A. Creation of Truck Axle Load Spectra Using Weigh-in-Motion Data. Journal of The Transportation Research Forum, vol. 47, n. 4, pp. 45-61. Transportation Research Forum, 2008.
- NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) - Transportation Research Board of the National Research Council 2004. Guide for Mechanistic – Empirical Design – Part 2. Design Inputs – Chapter 4 – Traffic.

Observatório Transfronteiriço Espanha/Portugal (OTEP) 2004. Estudo Piloto de Pesagem de Veículos Pesados de Mercadorias nas Fronteiras entre Portugal e Espanha.

Pais, J.C., 2013. A Model for Equivalent Axle Load Factor. Artigo submetido à revista International Journal of Pavement Engineering.

Vale, A. C., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., 2011. O Tipo de Modelação dos Pneus dos Veículos na Avaliação do Desempenho dos Pavimentos. Trabalho técnico apresentado no XVI CILA – Congresso Ibero-Latino-Americano do Asfalto.