

**VALIDAÇÃO ESTRUTURAL DOS
PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS INDICADOS NO “MANUAL DE
CONCEÇÃO DE PAVIMENTOS PARA A
REDE RODOVIÁRIA NACIONAL”**

MARGARIDA ISABEL MATOS BRÁS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professora Doutora Cecília Maria Nogueira Alvarenga Santos do Vale

FEVEREIRO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais,
pelo apoio incondicional.

A minha Irmã Filipa,
pela amizade inigualável.

A sabedoria consiste em compreender que o tempo dedicado ao trabalho nunca é perdido

Ralph Emerson

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, é com o maior respeito e sinceridade que lhes dedico este "Obrigado".

À Senhora Professora Doutora Cecília Santos do Vale, por ter aceitado a orientação da minha tese e pela disponibilidade e amabilidade com que sempre me recebeu.

Ao Engenheiro Nuno Gouveia, pela celeridade com que me esclareceu breves questões.

A todos os Professores do Ramo de Vias de Comunicação, pela qualidade da formação prestada.

Aos meus amigos, que me acompanharam nesta etapa fantástica enquanto aluna da FEUP.

Aos meus pais, pela forma exímia como me educaram.

À minha irmã, Filipa Brás, pelo ombro sempre amigo, a palavra certa no momento oportuno e a cumplicidade que, tão bem, foi capaz de cultivar entre nós.

Ao Daniel, pelo tempo que, carinhosamente, dispendeu a ajudar-me com a formatação e revisão final do trabalho.

RESUMO

Os pavimentos flexíveis são os mais representativos na rede nacional de estradas. As exigências de desempenho e qualidade dos pavimentos rodoviários crescem a cada dia, levando a repensar as metodologias de dimensionamento utilizadas atualmente.

Nesta tese aborda-se o dimensionamento de pavimentos flexíveis através de metodologias simplificadas sob a forma de catálogo, tendo-se como principal objetivo validar as estruturas flexíveis indicadas no manual português para pré-dimensionamento de pavimentos rodoviários: *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional* da ex-JAE.

Primeiramente, é feita uma revisão do Manual e das considerações feitas para pré-dimensionamento. As estruturas de pavimento flexíveis indicadas no Manual foram definidas para algumas condições específicas, tais como a ação do eixo padrão de 80 kN.

De seguida, considerando um espectro de cargas por eixo de veículos pesados diferente, o qual inclui o eixo padrão de 130 kN, calculam-se factores de agressividade de magnitude diferente aos indicados no Manual de pré-dimensionamento em análise. A razão desta análise prende-se com o facto de atestar que diferentes configurações de carga por eixo conduzem a diferentes números acumulados de eixos padrão, os quais terão influência no dimensionamento subsequente.

Num capítulo mais prático, tendo em conta as estruturas de pavimento flexíveis catalogadas e os critérios de ruínas associados ao dimensionamento económico, propõem-se metodologias avançadas para pré-dimensionamento de pavimentos flexíveis. É intenção da autora que as propostas constituam métodos mais simples e objetivos, permitindo aos utilizadores pré-dimensionar economicamente estruturas de pavimento flexíveis para a ação de eixos padrão de 80 kN e 130 kN, independentemente do conhecimento exato de alguns dados de tráfego no ano de abertura da via rodoviária de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento de pavimentos flexíveis, Eixo padrão, Factor de agressividade, Dano, Manual de conceção de pavimentos rodoviários

ABSTRACT

Flexible pavements are the most common in national primary road network. Road pavement's performance and quality requirements grow longer by the day, leading to revise design methodologies which are currently in use.

This thesis approaches simplified design methods of flexible pavements which contain a catalogue of standardized pavement constructions. The main aim of this thesis is to validate the flexible pavement structures referred in the Portuguese Pavement Catalogue of the former and already extinct "JAE".

Firstly there is a revision about the Portuguese Catalogue and its main design considerations. Flexible pavement structures referred in this catalogue were defined for some specific conditions, such as the standard axle load of 80 kN.

Then, considering a different axle load spectrum, which include the standard axle load of 130 kN, equivalent axle load factors were determined and compared with the ones indicated in the Portuguese Catalogue. The reason for the analysis was to support the fact that different axle load configuration lead to different cumulative number of equivalent standard axle loads, which will influence the subsequent design results.

In a more practical chapter, taking into account the flexible structures in the Portuguese Catalogue and the damage criteria associated with the economic design procedure, advanced methodologies are proposed for the first design approach. It is the author's intention that these proposals could be simpler and more objective than the procedure contained in the Portuguese Catalogue. The users will be allowed to choose between the equivalent axle load of 80 kN or 130 kN for the design method, independently of the knowledge of some exact traffic data in advance.

KEYWORD: Flexible pavement design, Equivalent standard axle load, Equivalent axle load factor, Damage, Road Pavements Catalogue

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS	4
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2. CONCEÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SEGUNDO O MACOPAV	7
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
2.2. SOLICITAÇÃO	8
2.2.1. TRÁFEGO	8
2.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	15
2.3. FUNDAÇÃO DO PAVIMENTO	18
2.4. MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO	20
2.4.1. MATERIAIS GRANULARES	20
2.4.2. MATERIAIS BETUMINOSOS	21
2.5. CRITÉRIOS DE RUÍNA	22
2.6. ESTRUTURAS DE PAVIMENTO SEGUNDO O MACOPAV	23
2.7. O MACOPAV E OUTROS CATÁLOGOS DE DIMENSIONAMENTO	26
2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
3. INFLUÊNCIA DOS FATORES DE AGRESSIVIDADE NO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS	31
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
3.2. FATORES DE AGRESSIVIDADE	31
3.3. NÚMERO ACUMULADO DE EIXOS PADRÃO PARA 20 ANOS	40
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42

4. VALIDAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS DO MACOPAV	43
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	43
4.2. DESCRIÇÃO DA MODELAÇÃO	44
4.2.1. MÉTODO DE CÁLCULO.....	44
4.2.2. MODELO ESTRUTURAL	45
4.2.3. MODELO MATERIAL	46
4.2.4. MODELO DE CARREGAMENTO	47
4.2.5. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO PARA ANÁLISE DA RESPOSTA ESTRUTURAL.....	47
4.3. VALIDAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS DO MANUAL	49
4.3.1. VALIDAÇÃO DOS PROGRAMAS DE CÁLCULO	49
4.3.2. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS CATALOGADOS NO MACOPAV	50
4.3.3. NÚMERO ACUMULADO DE EIXOS PADRÃO ADMISSÍVEIS PARA AS ESTRUTURAS MODELADAS.....	53
4.3.4 DANO	55
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5. PROPOSTAS PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	63
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	63
5.2. METODOLOGIAS PROPOSTAS PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO	64
5.2.1 PROPOSTA I	64
5.2.2 PROPOSTA II	67
5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA	77
6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	77
6.2. CONCLUSÕES	77
6.3. PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA	79
BIBLIOGRAFIA	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Constituição e comportamento de um pavimento flexível.....	2
Figura 2 – Esquematisação do eixo padrão (vista em planta).....	11
Figura 3 – Zonas climáticas de Portugal, definindo zonas com idêntica “temperatura de serviço” [13]	17
Figura 4 – Geometria das estruturas de pavimento consideradas no catálogo do MACOPAV [2]	24
Figura 5 – Estrutura de pavimento tipo catálogo de acordo com o MACOPAV [2]	25
Figura 6 – Distribuição, média para o território nacional, dos veículos pesados por categoria (%) [7]	32
Figura 7 – Distribuição do tráfego pesado por nível de carga por eixo (%) [7].....	33
Figura 8 – Fatores de agressividade considerando a carga típica por eixo	34
Figura 9 – Fatores de agressividade considerando a carga por eixo próximo do limite legal.....	35
Figura 10 – Fatores de agressividade considerando a carga máxima por eixo	35
Figura 11 – Coordenadas cilíndricas.....	46
Figura 12 – Roda simples.....	49
Figura 13 – Organigrama sobre a metodologia de pré-dimensionamento da Proposta I	65
Figura 14 – Proposta I.....	66
Figura 15 – Organigrama sobre a metodologia de pré-dimensionamento da Proposta II	69
Figura 16 – Ábaco II _{1 80kN} : a) D= 100%; b) D= 80%	70
Figura 17 – Ábaco II _{2 80kN} : a) D= 100%; b) D= 80%	71
Figura 18 – Ábaco II _{3 80kN} : a) D= 100%; b) D= 80%	72
Figura 19 – Ábaco II _{4 130kN} : a) D= 100%; b) D= 80%	73
Figura 20 – Ábaco II _{5 130kN} : a) D= 100%; b) D= 80%	74
Figura 21 – Ábaco II _{6 130kN} : a) D= 100%; b) D= 80%	75

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos veículos automóveis segundo a ex-JAE	9
Quadro 2 – Distribuição do tráfego pesado na via mais solicitada de acordo com o MACOPAV [2] ..	10
Quadro 3 – Classes de tráfego de acordo com o MACOPAV	10
Quadro 4 – Tipologia de eixos dos veículos pesados.....	12
Quadro 5 – Fatores de agressividade de tráfego para o eixo padrão de 80 kN a adotar no dimensionamento de pavimentos flexíveis de acordo com o MACOPAV [2]	13
Quadro 6 – Elementos de tráfego para o dimensionamento de pavimentos flexíveis e solicitação do eixo padrão de 80 kN de acordo com o MACOPAV [2]	15
Quadro 7 – Classes de betume a empregar em misturas betuminosas a quente de acordo com o MACOPAV [2]	18
Quadro 8 – Classes de fundação ou “plataformas” propostas pelo MACOPAV [2]	18
Quadro 9 – Definição das camadas de leito de pavimento em materiais não aglutinados e classes de fundação em função da classe de solo de fundação de acordo com o MACOPAV [2]	20
Quadro 10 – Características de deformabilidade dos materiais granulares de acordo com o MACOPAV [2]	21
Quadro 11 – Materiais granulares constituintes das estruturas de pavimento flexíveis.....	21
Quadro 12 – Materiais betuminosos aplicados nas camadas das estruturas de pavimento flexíveis catalogadas pelo MACOPAV [2].....	22
Quadro 13 – Espessura total das camadas betuminosas para cada uma das estruturas de pavimento flexíveis, em função da classe de tráfego, para a classe de fundação F3 [2].....	25
Quadro 14 – Correção da espessura total das camadas betuminosas para classes de plataforma diferentes de F3, segundo o MACOPAV [2]	26
Quadro 15 – Classes de tráfego segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos	27
Quadro 16 – Classes de fundação segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos....	27
Quadro 17 – Características mecânicas dos materiais de pavimentação segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos	28
Quadro 18 – Características geométricas das camadas constituintes das estruturas de pavimento flexíveis dos materiais de pavimentação segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos	28
Quadro 19 – Espectro modelizado de cargas por eixo (tonelas) [7].....	32
Quadro 20 – Distribuição percentual do tráfego pesado por nível de carga por eixo [7].....	33
Quadro 21 – Coeficiente de conversão de eixos tandem e tridem em eixos simples equivalentes [7] ..	34
Quadro 22 – Fatores de agressividade para o eixo padrão de 130 kN	37
Quadro 23 – Elementos relativos ao tráfego para o eixo-padrão de 80 kN.....	38

Quadro 24 – Elementos relativos ao tráfego para o eixo-padrão de 130 kN.....	39
Quadro 25 – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN para o período de dimensionamento 20 anos.....	40
Quadro 26 – Número acumulado de eixos padrão de 130 kN para o período de dimensionamento 20 anos.....	41
Quadro 27 – Síntese dos dados relativos ao carregamento.....	47
Quadro 28 – Síntese comparativa das unidades usadas pelos programas de cálculo automático.....	48
Quadro 29 – Resultados obtidos para as três estruturas considerando diferentes programas de cálculo automático para a solicitação de uma roda simples.....	50
Quadro 30 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura I prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 80 kN.....	51
Quadro 31 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura II prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 80 kN.....	51
Quadro 32 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura III prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 80 kN.....	51
Quadro 33 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura I prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 130 kN.....	52
Quadro 34 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura II prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 130 kN.....	52
Quadro 35 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura II prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 130 kN.....	53
Quadro 36 – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissíveis para as estruturas de pavimento flexíveis catalogadas no MACOPAV.....	54
Quadro 37 – Número acumulado de eixos padrão de 130 kN admissíveis para as estruturas de pavimento flexíveis catalogadas no MACOPAV.....	54
Quadro 38 – Dano da estrutura I para a solicitação do eixo padrão de 80 kN (%).....	56
Quadro 39 – Dano da estrutura II para a solicitação do eixo padrão de 80 kN (%).....	57
Quadro 40 – Dano da estrutura III para a solicitação do eixo padrão de 80 kN (%).....	58
Quadro 41 – Dano da estrutura I para a solicitação do eixo padrão de 130 kN (%).....	59
Quadro 42 – Dano da estrutura II para a solicitação do eixo padrão de 130 kN (%).....	60
Quadro 43 – Dano da estrutura III para a solicitação do eixo padrão de 130 kN (%).....	60
Quadro 44 – Coeficientes de agressividade considerados na Proposta II de pré-dimensionamento.....	68

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

BD - betão betuminoso em camada de desgaste

BG - material britado sem recomposição (tout-venant) em camada de base

BGr - material britado recomposto em central em camada de base

CBR – California Bearing Ratio

EP – estradas de Portugal

F_i – fundação da plataforma

LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MB – macadame betuminoso em camada de base ou regularização

MBD – mistura betuminosa densa em camada de regularização

RRN – Rede Rodoviária Nacional

T_i – classe de tráfego

Sbg – material britado sem recomposição (tout-venant) em camada de sub-base

Sc – solo cimento

S_i – tipo de solo

X – espessura da camada granular

Y_i – espessura da camada betuminosa

C – fator de crescimento de tráfego

E – módulo de deformabilidade

E_b – módulo de deformabilidade das misturas betuminosas

K – fator de conversão dos eixos

N_{adm} – número máximo admissível de passagens de eixo padrão

N_{at} - número acumulado de eixos padrão admissíveis associado à extensão máxima de tração

N_{dp} - número acumulado de eixos padrão admissíveis associado à extensão máxima de compressão

N_{dim} – número acumulado de passagens de eixo padrão

N_{dim80 kN} - número acumulado de passagens de eixo padrão de 80 kN

N_{dim130 kN} - número acumulado de passagens de eixo padrão de 130 kN

N_p - número acumulado de passagens de eixo padrão

TMDA_p - tráfego médio diário anual de veículos pesados

e_B – espessura das camadas betuminosas

p – período de dimensionamento

t – taxa média de crescimento anual de veículos pesados

α – fature de agressividade

α_{80} - fator de agressividade para o eixo padrão de 80 kN

α_{130} - fator de agressividade para o eixo padrão de 130 kN

ν – coeficiente de Poisson

ε_{dp} - extensão máxima de compressão

ε_t - extensão máxima de tração

ε_{xx} - extensão máxima de tração

ε_{zz} - extensão máxima de compressão

$\Sigma N_{20 \text{ anos}}$ - número total de veículos pesados que solicitam o pavimento no período de dimensionamento (20 anos)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

Os pavimentos rodoviários têm como principal objetivo garantir uma superfície de rolamento livre e desempenada que permita a circulação dos veículos em condições adequadas de segurança, comodidade e economia. Um pavimento corretamente projetado e executado deverá possuir um conjunto de características funcionais e estruturais que lhe permita desempenhar convenientemente as funções para as quais foi concebido.

Numa sociedade cada vez mais exigente, as características funcionais de uma estrada, aquelas que afetam diretamente o utente, revestem-se de importância crescente. A regularidade geométrica, a aderência e a eficiente capacidade de drenagem de águas superficiais, constituem algumas das características funcionais que devem permitir satisfazer requisitos de conforto ótico, acústico e de circulação.

No entanto, para satisfazer as exigências de carácter funcional do pavimento, este deve ser dotado de características estruturais que lhe permita suportar, ao longo da sua vida útil, as ações de tráfego e as relativas aos agentes climáticos. Estas características devem ser tais que garantam a integridade da estrutura de pavimento, minimizando também a necessidade de intervenções de conservação.

A forma como um pavimento responde funcional e estruturalmente depende muito da sua estrutura geométrica e mecânica, isto é, depende do número, da espessura e das características materiais das camadas constituintes, bem como das características da fundação que o suporta.

Em Portugal, como na maioria dos países da Europa, os pavimentos flexíveis são os predominantes na rede nacional de estradas [1]. Compreender o seu funcionamento é essencial para a formulação de metodologias de dimensionamento adequadas e eficientes.

Os pavimentos flexíveis distinguem-se pela sua elevada deformabilidade e constituição material:

- i. misturas betuminosas nas camadas superiores, ou seja, materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, geralmente betume asfáltico;
- ii. materiais granulares em uma ou duas camadas.

As camadas betuminosas compreendem:

- i. camada de desgaste: camada diretamente em contacto com os rodados dos veículos, recebe as cargas por eles induzidas, distribuindo-as pelas camadas subjacentes;
- ii. camada de regularização: camada responsável pelo nivelamento da espessura do pavimento, recebe e degrada as cargas provenientes da camada de desgaste;
- iii. camada de base: camada responsável, essencialmente, por degradar os esforços induzidos pelo tráfego para as camadas inferiores (sub-base e fundação).

Assim, na base das camadas betuminosas, sob o ponto de aplicação da carga, são medidas as tensões e as extensões de tração (σ_{xx} e ϵ_{xx}), como se representa na Figura 1. Por aplicação de "regas de cola-gem", pretende-se que as camadas betuminosas funcionem como uma só, amenizando a severidade do estado de tensão que a ação do tráfego induz.

As camadas granulares compreendem uma base granular podendo considerar-se ainda uma sub base. Estas camadas, assim como os solos de fundação, não têm capacidade de resistir a esforços de tração. Sendo responsáveis por degradar os esforços verticais, em dimensionamento é a tensão ou a extensão de compressão (σ_{zz} ou ϵ_{zz}) medida no topo da fundação, o parâmetro determinante.

As camadas do pavimento devem dispor de qualidade e resistência decrescente, da superfície para o interior do pavimento. Note-se que cabe a cada camada a função de suportar a camada sobrejacente.

A Figura 1 exemplifica a constituição e comportamento de um pavimento flexível.

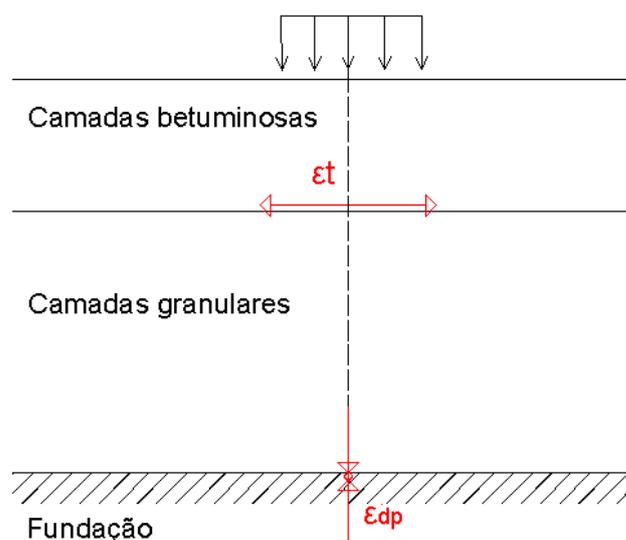


Figura 1 – Constituição e comportamento de um pavimento flexível

A estrutura de um pavimento flexível é altamente dependente da intensidade do tráfego pesado, das características dos materiais disponíveis e do solo de fundação. Por exemplo, para um nível de tráfego intenso, a estrutura de pavimento deve integrar uma significativa espessura total de camadas betuminosas, caso em que as camadas granulares e o solo de fundação sejam de fraca qualidade.

Para fins de dimensionamento, a incorporação de uma plataforma ou solo de fundação com elevada capacidade de suporte, acompanhada por material granular de boa qualidade mecânica, pode traduzir-se numa economia significativa na execução da estrutura de pavimento, uma vez que permite adotar espessuras inferiores para as camadas habitualmente mais dispendiosas: as betuminosas.

No sentido de simplificar o processo de dimensionamento de pavimentos, vários países europeus adotam guias de dimensionamento, baseados em modelos de cálculo e modelos estruturais simples, como a teoria multicamada e o modelo axissimétrico.

Em Portugal, usa-se o *Manual de Conceção de Pavimentos para Rede Rodoviária Nacional* da ex-JAE [2], adiante designado por MACOPAV. Este manual prevê a utilização de pavimentos flexíveis, rígidos e semirrígidos e apresenta uma organização e pressupostos base semelhantes ao guia de dimen-

sionamento francês do LCPC, "Conception et dimensionnement des structures de chaussée" [3], no qual se baseou a sua elaboração.

O MACOPAV destina-se a ser aplicado em fase de pré-dimensionamento, devendo as estruturas de pavimento com ele determinadas ser retificadas e reajustadas, por meio de cálculo, em fase de projeto de execução. A sua organização tipo catálogo permite facilmente selecionar uma estrutura de pavimento adequada às exigências da via rodoviária a projetar. As estruturas propostas pelo Manual foram definidas em função da "classe de tráfego", da deformabilidade da fundação de suporte ao pavimento e dos materiais de pavimentação utilizados. Na base do cálculo estrutural estiveram considerações empírico-mecanicistas, onde as leis de fadiga dos materiais betuminosos e de deformação permanente dos materiais granulares, constituem as leis de ruína. Relativamente ao dimensionamento de pavimentos flexíveis, o MACOPAV prevê o dimensionamento para um período de vida útil de 20 anos, sob a ação da carga de um eixo com carga total de 80 kN, ou seja, 40 kN aplicados numa "roda dupla". No período de 20 anos, o Manual considera ser mínima a necessidade de intervenções de conservação economicamente significativas. Uma descrição mais detalhada deste Manual é apresentada no Capítulo 2.

Também em Espanha e França, se utilizam guias de dimensionamento como metodologia simplificada de dimensionamento de estruturas de pavimentos, baseados em considerações empíricas e métodos analíticos, respetivamente, [4], [3]. Em Espanha, França e Reino Unido, os pavimentos flexíveis são dimensionados para a ação de veículos com carga total por eixo de 130 kN, por se tratar do nível de carga mais próximo do peso máximo dos eixos dos veículos pesados [1]. Ainda que em Portugal já se projetem pavimentos para este nível de carga, o MACOPAV, documento que serve de base ao dimensionamento, não prevê ainda estruturas de pavimento flexíveis para a ação de eixos de veículos pesados de 130 kN.

Para além dos citados países, vários outros consideram um "eixo padrão" com carga superior a 80 kN por eixo. De acordo com os resultados do COST 333 [1], a maioria dos países europeus realiza o dimensionamento de pavimentos flexíveis para a ação de cargas por eixo compreendidas entre 100 kN e 130 kN.

No sentido de aproximar as metodologias nacionais à realidade europeia, é conveniente que se incluam diferentes níveis de solicitação e agressividade dos veículos pesados nos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis usualmente utilizados, nomeadamente a ação do eixo de carga total de 130 kN.

É de referir que os guias de dimensionamento com estrutura tipo catálogo, constituem meios expeditos de pré-dimensionamento de pavimentos rodoviários. No entanto, no que concerne ao MACOPAV, este manual carece de detalhes importantes relativos, por exemplo, às ações de dimensionamento e aos materiais de pavimentação. Por esta razão, é oportuno que se reavaliem as considerações e os pressupostos que estiveram na base da sua elaboração.

Uma notícia recentemente publicada em 10 de novembro de 2011 pelo Jornal de Notícias e intitulada "Portugal pouparia com pavimentos de estradas mais espessos" [5], alerta para a necessidade de revisão e reformulação dos processos de dimensionamento de estruturas de pavimento atualmente utilizados.

Para o dimensionamento (mais rigoroso) de pavimentos flexíveis, existem outros métodos mais complexos e sofisticados, que permitem determinar a resposta estrutural do pavimento com um maior grau de fiabilidade que é exigido no projeto de execução. Cita-se, como exemplo, o método dos elementos finitos, uma abordagem de elevada robustez que permite simular aspetos importantes do comportamento dos pavimentos sob a ação dos rodados dos veículos, aos quais os modelos multicamada não

conseguem dar resposta. Porém, a sua aplicação em fase de pré-dimensionamento é pouco acessível e prática à generalidade dos projetistas devido ao grau de dificuldade associado à sua aplicação [6].

Neste contexto, com esta tese, pretende-se, por um lado, validar as estruturas propostas pelo MACOPAV para os eixos padrão de 80 kN e de 130 kN e, por outro lado, apontar alguns contributos para consideração num futuro desenvolvimento do atual Manual de pré-dimensionamento.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

Neste trabalho será abordado o dimensionamento de pavimentos flexíveis por meios de dimensionamento simplificados e expeditos sob a forma de catálogo, como o proposto pelo MACOPAV, elaborado em 1995 pela JAE (atual EP) [2]. Deve referir-se que os pavimentos rígidos e semirrígidos não são estudados no presente trabalho.

Os objetivos gerais do trabalho são:

- 1) avaliar a influência do fator de agressividade dos veículos pesados no dimensionamento de pavimentos, nomeadamente no que se refere ao cálculo do número acumulado de eixos padrão de 80 kN e 130 kN, passíveis de solicitar as estruturas de pavimento no seu período de vida útil;
- 2) validar, com recurso a programas de cálculo automático, o comportamento estrutural dos pavimentos flexíveis propostos pelo MACOPAV sob a ação dos eixos padrão de 80 kN e de 130 kN, considerando-se os fatores de agressividade de tráfego indicados no manual e outros fatores de agressividade;
- 3) identificar o critério de ruína condicionante, para efeitos de dimensionamento, nas estruturas de pavimentos flexíveis catalogadas;
- 4) validar o dimensionamento das estruturas de pavimentos flexíveis catalogadas, por quantificação da percentagem de dano induzido nestas estruturas pela passagem acumulada de eixos padrão com diferentes níveis de agressividade;
- 5) propor metodologias avançadas para pré-dimensionamento das estruturas de pavimentos flexíveis indicadas no MACOPAV, a partir do número de eixos padrão acumulado (na vida útil do pavimento), da percentagem de dano e do coeficiente de agressividade.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese está organizada em seis capítulos, incluindo este capítulo de "Introdução," onde se enquadra o tema em estudo, se evidencia a relevância do âmbito em que se insere, se explicita os objetivos que se pretende atingir e se mostra a organização da tese.

No Capítulo 2, "Conceção de Pavimentos Flexíveis segundo o MACOPAV" é descrito o processo de pré-dimensionamento de estruturas de pavimento flexíveis preconizado pelo referido manual de dimensionamento. Apresentam-se os pressupostos considerados para a definição de i) ações de dimensionamento, ii) características do solo de fundação e materiais de pavimentação, iii) estruturas de pavimento flexíveis sugeridas pelo MACOPAV em forma de catálogo. Ainda neste capítulo, é feita uma breve comparação entre o MACOPAV e os manuais de pré-dimensionamento espanhol e francês.

No Capítulo 3, "Influência de fatores de agressividade no dimensionamento de estruturas de pavimento flexíveis", comparam-se os fatores de agressividade previstos no MACOPAV para pavimentos flexíveis sob a ação do eixo padrão de 80 kN, com os fatores de agressividade para a configuração padrão do espectro de cargas por eixo de veículos pesados, com base no estudo de tráfego realizado

pelo Instituto da Construção (1993) [7]. Para as configurações de carga por eixo de veículos pesados apresentadas no estudo do IC, analisam-se dois cenários extremos: os veículos que circulam em condições de agressividade máxima e os que induzem agressividade mínima. Para estes dois cenários extremos, calcula-se o número acumulado de eixos padrão para o período de dimensionamento de 20 anos. Define-se, assim, para cada classe de tráfego, um intervalo de valores de passagens de eixos padrão previstas na vida útil do pavimento, a ser comparado com a previsão do MACOPAV.

No Capítulo 4, "Validação das estruturas de pavimento flexíveis do MACOPAV", modelam-se as estruturas de pavimento flexíveis catalogadas no MACOPAV com recurso ao programa de cálculo *ALIZE*. Para validar os resultados da resposta estrutural obtidos com este programa, recorre-se ao software *ELSYM 5*. Seguidamente, a análise do comportamento das estruturas em estudo face à ação quer do eixo padrão de 80 kN, quer do eixo padrão de 130 kN, é feita com base nos resultados obtidos com o *ALIZE*, exclusivamente. Desta análise, obtém-se o número máximo admissível de eixos padrão quer de 80 kN quer de 130 kN, que as estruturas de pavimento flexíveis do MACOPAV suportam, de acordo com as suas características geométricas e mecânicas. Finalmente, é feita a validação das estruturas de pavimento em estudo, através da quantificação da percentagem de dano, considerando-se os diferentes níveis de agressividade determinados no Capítulo 3.

No Capítulo 5, "Propostas para pré-dimensionamento de pavimentos flexíveis", apresentam-se duas metodologias alternativas para o pré-dimensionamento da espessura das camadas betuminosas indicadas no MACOPAV. Estas propostas permitem ao utilizador pré-dimensionar as estruturas de pavimento flexíveis para o eixo padrão de 80 kN ou de 130 kN a partir de: i) o número de eixos-padrão acumulado (na vida útil do pavimento); ii) a percentagem de dano; iii) fator de agressividade. A metodologia exposta é efetivada com a apresentação de ábacos para pré-dimensionamento.

No Capítulo 6, "Conclusões e perspetivas para futura investigação", referem-se as principais conclusões do trabalho realizado. Por fim, fazem-se algumas sugestões para eventuais trabalhos futuros.

2

CONCEÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SEGUNDO O MACOPAV

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, descreve-se o procedimento de dimensionamento de pavimentos flexíveis segundo o Manual de Conceção de Pavimentos da ex-JAE [2], designado por MACOPAV. Este Manual permite, em fase de estudo prévio, seleccionar uma estrutura de pavimento flexível, em função do nível de tráfego previsto para a via rodoviária a dimensionar.

A organização do MACOPAV é simples, lógica e sequencial. O documento está dividido em duas grandes partes:

- 1) primeiros cinco capítulos, que dizem respeito à recolha e sistematização dos dados necessários para o pré-dimensionamento;
- 2) dois restantes, referentes à definição das estruturas de pavimento possíveis (flexíveis, semirrígidos e rígidos), as quais devem ser seleccionadas de acordo com a sua adequabilidade a cada caso em estudo.

Este capítulo da dissertação inicia-se com a descrição das ações de dimensionamento. O tráfego e as condições climáticas são as que, determinantemente, condicionam o dimensionamento de pavimentos flexíveis segundo o MACOPAV. No que se refere ao tráfego, as cargas por eixo, o número de repetições de carga, a área de contacto dos pneus e a velocidade dos veículos são os aspetos tidos em conta. Relativamente às condições climáticas, o MACOPAV destaca a importância das condições hídricas e térmicas no comportamento dos materiais de pavimentação.

De seguida, apresenta-se o processo de definição da classe de plataforma segundo o MACOPAV. Depois, é feita a caracterização mecânica dos materiais de pavimentação (misturas betuminosas, misturas com ligantes hidráulicos e materiais granulares) a aplicar em pavimentos flexíveis, à luz do Manual.

Segue-se a descrição dos critérios de ruína que determinam o dimensionamento das estruturas de pavimento que se apresentam no Manual.

Finalmente, são apresentadas as características geométricas das estruturas de pavimento flexíveis indicadas no MACOPAV.

A título comparativo e informativo, apresenta-se também uma breve descrição das considerações de tráfego, materiais e geométricas consideradas pelos catálogos de dimensionamento de pavimentos espanhol e francês.

2.2. SOLICITAÇÃO

2.2.1. TRÁFEGO

CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO

Segundo o Código da Estrada [8] um "Automóvel é o veículo com motor de propulsão, dotado de pelo menos quatro rodas, com tara superior a 550 kg, cuja velocidade máxima é, por construção, superior a 25 km/h, e que se destina, pela sua função, a transitar na via pública, sem sujeição a carris."

No sentido de organizar e agrupar as diversas tipologias de veículos automóveis, a ex-JAE (atual EP) propôs a consideração de onze categorias de veículos automóveis designadas de *a* a *k* como se indica no Quadro 1. Note-se que, apenas as classes *f* a *k* correspondem a veículos pesados. São, por isso, estas categorias que interessa considerar no dimensionamento de pavimentos, uma vez que as cargas por eixo dos veículos das classes inferiores (veículos ligeiros) têm sobre estes um efeito desprezável.

Quadro 1 – Classificação dos veículos automóveis segundo a ex-JAE

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

Em Portugal, tal como na maioria dos países europeus, para efeitos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, considera-se, como dado de dimensionamento, o tráfego médio diário anual de veículos pesados ($TMDA_p$) [1]. Segundo o MACOPAV, o $TMDA_p$ a considerar 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 função do número de vias por sentido, o MACOPAV considera a repartição do tráfego pesado na via mais solicitada, como se indica no Quadro 2.

Quadro 2 – Distribuição do tráfego pesado na via mais solicitada de acordo com o MACOPAV [2]

Número de vias	Via mais solicitada (%)
2	90
3 ou mais	80

O conhecimento do tráfego pesado médio diário anual, $TMDA_p$, e da sua evolução obtém-se pela análise dos dados obtidos nos recenseamentos quinquenais realizados pela EP, em postos de contagem distribuídos ao longo da rede, e cuja representatividade é significativa. Com base nestes dados, para cada quinquénio, é definida uma taxa média de crescimento anual de veículos pesados que se denomina t .

Tal como outros catálogos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, por exemplo os Catálogos Francês [3] e Espanhol [4], também o MACOPAV se baseia na tendência nacional de distribuição e evolução do tráfego pesado para classificar as rodovias. Em função do $TMDA_p$, o Manual considera oito classes de tráfego (T_i , $i=0, \dots, 7$; sendo T_7 é a classe de tráfego de menor intensidade) para a caracterização das estradas da RNR. Adicionalmente, a cada classe de tráfego, associa-se uma taxa geométrica média anual de crescimento de pesados, dado fundamental para a previsão do tráfego pesado que solicitará o pavimento a projetar no período de dimensionamento. Para os pavimentos flexíveis, o período de dimensionamento fixado pelo manual é de 20 anos, valor habitual na maioria dos países europeus [1]. No entanto, por questões de ordem económica, pode considerar-se um período de dimensionamento inferior a 20 anos para as classes de tráfego com menor $TMDA_p$ (T_5 , T_6 e T_7).

O Quadro 3 apresenta a classificação das rodovias proposta pelo MACOPAV, em função do $TMDA_p$, bem como a respetiva taxa média de evolução anual de veículos pesados prevista. É de referir que quando o tráfego é muito elevado ou muito baixo, é seguida a realização de uma análise de tráfego específica.

Quadro 3 – Classes de tráfego de acordo com o MACOPAV [2]

Classe de tráfego	$TMDA_p$	Taxa média de crescimento anual (%)
T_7	< 50	Estudo específico
T_6	50 – 150	3
T_5	150 – 300	
T_4	300 – 500	4
T_3	500 – 800	
T_2	800 – 1200	5
T_1	1200 – 2000	
T_0	> 2000	Estudo específico

FATOR DE AGRESSIVIDADE

A heterogeneidade das correntes de tráfego pesado induz nos pavimentos um espectro de cargas bastante variado. No sentido de exprimir o efeito de um dado número acumulado de passagens de veículos pesados com geometria e configuração de carga por eixo variados, recorre-se ao conceito de "eixo padrão", o qual permite quantificar as ações devidas ao tráfego durante o período de vida útil do pavimento. Vários métodos de dimensionamento de pavimentos, tais como Shell [12], AASHTO [10], entre outros, definem o eixo padrão como um eixo simples com carga total igual a 80 kN, cujo rodado apresenta duas rodas gémeas em cada extremidade (Figura 2). O eixo padrão é função do tipo de pavimento, da sua espessura, capacidade estrutural e critérios de ruína considerados na avaliação do mesmo.

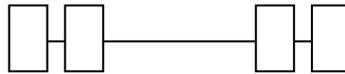


Figura 2 – Esquemática do eixo padrão (vista em planta)

Em Portugal, apesar de existirem postos de pesagens instalados em vários pontos da rede rodoviária, a distribuição do espectro das cargas dos veículos pesados não é conhecida de forma suficientemente rigorosa e fidedigna [9]. No entanto, tem-se conseguido fazer face a esta problemática através de algumas pesagens de eixos e contagens em certos locais da rede. Com estes dados é possível fazer uma estimativa do número e das cargas médias dos eixos, o que permite às administrações rodoviárias avaliar, para certos volumes de tráfego, o número de passagens de um eixo padrão equivalente a uma passagem de um veículo pesado [9]. Este fator de equivalência designa-se por *fator de agressividade*, α . De acordo com o Guia de dimensionamento de pavimentos da AASHTO [10], o fator de agressividade é calculado através duma expressão do tipo (2.1):

$$\frac{N_{EP}}{N_i} = \left(\frac{P_{EP}}{P_i} \right)^x \quad (2.1)$$

Pela expressão (2.1), pode dizer-se que o efeito destrutivo das N_i passagens de um eixo simples de carga P_i e área de contacto pneumático-pavimento A_i , é equivalente a N_{EP} passagens de um eixo padrão com carga P_{EP} por rodado e área A_{EP} . Ou seja, a agressividade α pode ser definida pelo cociente entre o número de passagens de dois eixos distintos que originam a rotura do pavimento.

A agressividade de um certo tipo de veículo com n eixos simples é dada por:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{EP}} \right)^x \quad (2.2)$$

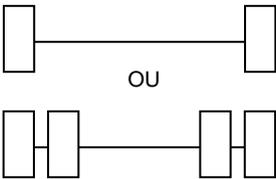
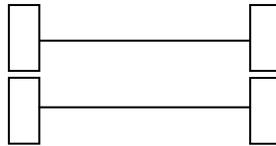
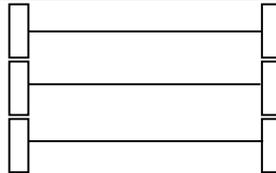
A metodologia da AASHTO [10] considera o eixo padrão de 80kN. No entanto, a aplicação das expressões (2.1) e (2.2) pode estender-se a eixos padrão de diferente carga, nomeadamente 130 kN. Para pavimentos flexíveis, ainda sobre as expressões (2.1) e (2.2), é corrente adotar-se o valor de 4 para o expoente x [10]. O valor deste parâmetro deve ser atribuído em função do mecanismo de degradação que se está a considerar. Em estudos específicos realizados sobre pavimentos flexíveis em pistas de ensaio à escala real no projeto FORCE [6], verificou-se, por exemplo, que x varia de 2 a 9 de acordo com o tipo de degradação e severidade considerados [6]. Por outro lado, em outros tipos de

pavimentos (rígidos e semirrígidos), o espectro de valores adotados para x varia desde 11 a 33. De acordo com este procedimento [9], faz todo o sentido, uma vez que os pavimentos rígidos e semirrígidos têm uma maior resistência estrutural, o nível de agressividade que estas estruturas podem suportar é, à partida, maior do que o registado para os pavimentos flexíveis.

Note-se que, as expressões (2.1) e (2.2) são válidas para eixos simples. Porém, num único veículo pesado podem coexistir eixos de categoria simples, dupla ou tripla. O Quadro 4 clarifica, sucintamente, as diferenças entre os vários tipos de eixo. A distância entre os rodados em cada eixo pode variar de acordo com a marca dos veículos pesados, porém, essa distância deverá cumprir, sempre, as disposições da Portaria 1092/97 [11].

Uma vez que o conceito de eixo padrão remete para um eixo simples, é necessário transformar os eixos duplos e triplos em eixos simples para que as expressões (2.1) e (2.2) possam ser aplicadas a qualquer tipo de eixo e a homogeneização do tráfego pesado seja realizada por completo. De acordo com vários estudos [9] que atendem à sobreposição dos efeitos dos rodados e na ausência de registos relativos ao tráfego pesado sobre a agressividade de cada tipo de eixo, é usual considerar-se que um eixo tandem de peso P corresponde a 1,4 eixos simples de peso $P/2$ e que um eixo triplo equivale a 2,3 eixos simples de peso $P/3$. Por outras palavras, a agressividade de um eixo tandem de peso P equivale a 70% da agressividade de um eixo simples com o mesmo peso P . Relativamente a um eixo tridem de peso P , considera-se a sua agressividade equivalente a 77% da agressividade induzida no pavimento por um eixo simples de peso P . Designando este fator de conversão dos eixos por K , a expressão (2.1) e, conseqüentemente, a (2.2) transformam-se em (2.3) e (2.4) respetivamente.

Quadro 4 – Tipologia de eixos dos veículos pesados

Tipologia do eixo	Descrição	Configuração (em planta)
Simplex	Eixo com um rodado em cada extremidade; o rodado pode ser simples ou duplo; geralmente o eixo dianteiro apresenta-se com uma só roda.	
Duplo ou tandem	Dois eixos com dois rodados próximos, um atrás do outro, em cada extremidade.	
Triplo ou tridem	Três eixos com três rodados próximos, um atrás do outro, em cada extremidade.	

$$\frac{N_{EP}}{N_i} = \left(\frac{K \cdot P_{EP}}{P_i} \right)^x \quad (2.3)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \left(\frac{K \cdot P_i}{P_{EP}} \right)^x \quad (2.4)$$

Contudo, um estudo mais recente [6] registou a agressividade do peso dos eixos dos veículos pesados num certo posto de pesagem da rede rodoviária principal em Portugal, constatando que a agressividade, de cada tipo de eixo, considerada na conversão em eixo padrão deve ser mais conservadora relativamente ao que estudos mais antigos sugerem. Por um lado, na aplicação das expressões (2.3) e (2.4), Lima et al. [6] sugere que a potenciação deverá ser de 5, no sentido de empolar a agressividade dum eixo padrão de 130kN relativamente a um eixo de 80 kN. Por outro lado, no que concerne à conversão das diferentes tipologias de eixos em eixos simples, o mesmo estudo sugere que esta transformação seja direta, considerando o processo mais consistente e simples. Ou seja, é sugerido que um eixo duplo de peso P dê lugar, diretamente, a dois eixos simples de peso P/2 e, por sua vez, um eixo triplo de peso P origine três eixos simples de peso P/3.

Não obstante a consistência do estudo de Lima et al. [6], até confirmação oficial dos seus resultados, as inferências supracitadas têm caráter meramente indicativo e não constituirão fundamentos base nesta dissertação.

Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, o MACOPAV indica valores para os fatores de agressividade relativos ao eixo padrão de 80kN, em função da classe de tráfego, definida a partir do TMDA_p previsto para o ano de abertura, por sentido e via mais solicitada. Estes valores "(...) resultaram da análise de valores obtidos em estações de pesagem, e tiveram em atenção a ocorrência de eixos sobrecarregados, sobretudo nos itinerários de maior volume de tráfego pesado." [2].

Há que referir que não foi possível obter informação relativa aos dados que serviram de base de cálculo dos fatores de agressividade propostos no MACOPAV.

O Quadro 5 indica os fatores de agressividade do tráfego para o eixo padrão de 80 kN preconizados no Manual.

Quadro 5 – Fatores de agressividade de tráfego para o eixo padrão de 80 kN a adotar no dimensionamento de pavimentos flexíveis de acordo com o MACOPAV [2]

Classe de tráfego	TMDA _p	Fator de agressividade
T ₆	50 – 150	2,0
T ₅	150 – 300	3,0
T ₄	300 – 500	4,0
T ₃	500 – 800	4,5
T ₂	800 – 1200	5,0
T ₁	1200 – 2000	5,5

NÚMERO ACUMULADO DE EIXOS PADRÃO

A partir do fator de agressividade determina-se o número de eixos padrão acumulado no período de dimensionamento, pela expressão (2.5):

$$N_{dim} = 365 \times (TMDA)_p \times C \times \alpha \times p \quad (2.5)$$

onde:

N_{dim} é a o número acumulado de passagens de eixos padrão

$(TMDA)_p$ é o tráfego médio diário anual de pesados

α é o fator de agressividade do tráfego pesado

p é o período de dimensionamento (20 anos)

C é o fator de crescimento de tráfego, o qual tem em conta o período de dimensionamento p e a taxa média de crescimento anual do tráfego pesado t , e que é dado por:

$$C = \frac{((1+t)^p - 1)}{(p \times t)} \quad (2.6)$$

Na generalidade dos casos, consultando o Quadro 6, obtém-se direta e rapidamente o número acumulado de eixos padrão para uma qualquer classe de tráfego.

Quando algum dos elementos de tráfego da expressão (2.5) for diferente dos adotados no Quadro 2.6 ou quando se pretenda fazer uma construção faseada, o MACOPAV sugere que o número acumulado de eixos padrão seja calculado por aplicação da expressão (2.5) e não por consulta do Quadro 2.6.

Quadro 6 – Elementos de tráfego para o dimensionamento de pavimentos flexíveis e solitação do eixo padrão de 80 kN de acordo com o MACOPAV [2]

Classe	TMDA _p	Fator de agressividade α	N_{dim} (20 anos)
T ₇		estudo específico	
T ₆	50 – 150	2,0	2×10^6
T ₅	150 – 300	3,0	8×10^6
T ₄	300 – 500	4,0	2×10^7
T ₃	500 – 800	4,5	4×10^7
T ₂	800 – 1200	5,0	7×10^7
T ₁	1200 – 2000	5,5	10^8
T ₀		estudo específico	

2.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

A importância dos fatores climáticos no dimensionamento de pavimentos depende da localização geográfica de cada país [1]. Países com invernos rigorosos (Península Escandinava, por exemplo) têm em consideração os efeitos do gelo, da neve e do degelo no dimensionamento de pavimentos rodoviários. Estes fenómenos comprometem a resistência destas estruturas, pelo que devem ser devidamente acautelados com recurso a metodologias de dimensionamento específicas [1].

Países com chuvas muito intensas, tais como Irlanda, Reino Unido, Países Baixos, Bélgica, têm em conta a variação das condições hidrológicas no processo de dimensionamento de pavimentos [1].

Em Portugal, como em vários países da Europa, os métodos de dimensionamento de pavimentos focam-se nos efeitos da variação sazonal da temperatura e da variação das condições hídricas, por se tratarem dos fenómenos climáticos aí existentes com maior expressividade para a temática em causa [1]. A ação destes fatores sobre as estruturas de pavimento, constituídas por camadas betuminosas e granulares expressivas, como é o caso dos pavimentos flexíveis, é determinante para o comportamento e evolução destas estruturas.

CONDIÇÕES HÍDRICAS

De um modo geral, pode dizer-se que a quantidade de água e a resistência mecânica das camadas granulares e dos solos de fundação de um pavimento mantêm uma relação inversamente proporcional entre si, isto é, à medida que aumenta o teor em água diminui a resistência destas camadas.

A variação do teor em água nas camadas com suscetibilidade à sua ação depende das condições climáticas, da permeabilidade das camadas betuminosas do pavimento e das condições de drenagem superficial e interna existentes na estrutura de pavimento.

Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de avaliar a resposta estrutural e funcional das camadas de materiais granulares e solos às variações das condições hídricas, nomeadamente a sua repercussão na variação dos módulos de deformabilidade das referidas camadas. No entanto, o comportamento das camadas granulares face a estes agentes é ainda difícil de caracterizar, devido à elevada quantidade de parâmetros que envolve. Assim, é aconselhável, para efeitos práticos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, a adoção de procedimentos simples na abordagem deste assunto [6].

A abordagem proposta pelo MACOPAV considera que as estruturas de pavimento, quer sejam flexíveis, semirrígidas ou rígidas, são dotadas de um eficiente sistema de drenagem interna e externa não comprometendo o seu comportamento mecânico.

CONDIÇÕES TÉRMICAS

A variação da temperatura reveste-se de particular importância especialmente no que diz respeito aos pavimentos flexíveis, uma vez que afeta as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, logo influencia a resposta estrutural do pavimento face à ação da passagem dos rodados dos veículos.

Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis é fundamental a definição da "temperatura de cálculo", que se considera representativa do regime anual de temperaturas a que o pavimento em serviço está sujeito. De entre os vários métodos existentes para a determinação desta temperatura, em Portugal, recorre-se habitualmente à metodologia prevista pelo manual de dimensionamento de pavimentos da Shell [12]. Sumariamente, este e outros métodos com a mesma finalidade, assentam no seguinte procedimento:

- i. determinação da temperatura média anual de cálculo das misturas betuminosas com base na espessura destas camadas e nas temperaturas médias mensais do ar na zona onde o pavimento se insere;
- ii. criação de relações empíricas entre as temperaturas do ar e das camadas betuminosas, baseadas nos valores dos danos induzidos em estruturas de pavimento consideradas típicas de acordo com os respetivos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas.

Deste modo, a temperatura de cálculo do pavimento é aquela que corresponde ao módulo de deformabilidade das misturas betuminosas para o qual se obtém um dano anual idêntico ao obtido pelo somatório dos danos registados mensalmente na análise mês a mês [6].

O MACOPAV, para atender à influência da temperatura considera o território nacional continental dividido em três zonas climáticas: zona quente, zona média e zona temperada. Este zonamento (Figura 3) foi feito tendo em conta as isotérmicas de temperatura máxima do ar no período estival. A diferença entre a Figura 3 e o zonamento previsto no MACOPAV é que este considera a zona média como uma só zona.

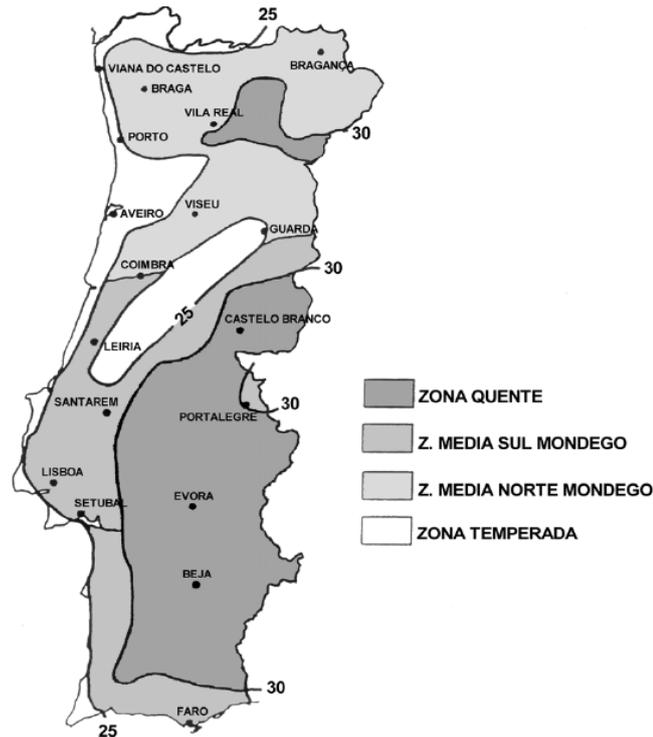


Figura 3 – Zonas climáticas de Portugal, definindo zonas com idêntica “temperatura de serviço” [13]

O objetivo deste zonamento é indicar o tipo de betume que se deve utilizar, uma vez que para a mesma zona climática se prevê o mesmo comportamento dos pavimentos flexíveis, em termos de dano. Sendo que o dano depende da “temperatura de serviço” das misturas betuminosas, betumes mais viscosos devem ser aplicados nas zonas mais quentes, por exemplo, um betume da classe 40/50 será preferencialmente aplicado na zona quente.

Assim, para cada zona climática e, em função do tipo de camada do pavimento e do nível de tráfego, o MACOPAV indica as classes de betume a empregar em misturas betuminosas fabricadas a quente. Para as camadas de desgaste é recomendado betume da classe 60/70 e para as camadas de regularização e base o que se indica no Quadro 7. Estas recomendações baseiam-se na experiência de aplicação de betumes tradicionais em misturas betuminosas.

Para além deste zonamento, o Manual definiu as estruturas de pavimento flexíveis para uma temperatura média de serviço de 25 °C, impondo desta forma que as estruturas propostas sejam independentes da localização da obra.

Mais uma vez, ressalta referir que para as estruturas de pavimento flexíveis propostas pelo MACOPAV o betume considerado nas misturas betuminosas das camadas do mesmo material, é da classe 60/70. Caso se pretenda adotar betumes de classes inferiores ou betumes modificados com polímeros, devem corrigir-se, após a realização de estudos específicos, as espessuras das estruturas de pavimentos catalogadas em consequência da alteração dos módulos de deformabilidade das misturas.

Quadro 7 – Classes de betume a empregar em misturas betuminosas a quente de acordo com o MACOPAV [2]

Classe de tráfego	Zona térmica		
	Temperada	Média	Quente
T1	60/70	40/50	40/50
T2	60/70	60/70	40/50
T3	60/70	60/70	60/70
T4	60/70	60/70	60/70
T5	60/70	60/70	60/70
T6	60/70	60/70	60/70

2.3. FUNDAÇÃO DO PAVIMENTO

A fundação do pavimento deve ter uma estrutura tal que lhe permita [9]:

- garantir, a curto prazo, uma superfície regular com capacidade de suporte que viabilize a construção da primeira camada do pavimento com as características geométricas e de compactação pretendidas;
- garantir, a longo prazo, a capacidade de suporte necessária para o conveniente funcionamento estrutural do pavimento;
- viabilizar, sem degradação, a drenagem das águas pluviais e a circulação do equipamento de obra sem prejuízo durante a fase de construção.

A capacidade de suporte da fundação é essencial para o dimensionamento de pavimentos, uma vez que as suas características mecânicas condicionam as das camadas granulares como adiante se explica.

No MACOPAV, são definidas quatro classes para o terreno de fundação, às quais está associado um intervalo de valores de módulo de deformabilidade. Estas classes podem ser identificadas, de modo simplificado, pelo CBR dos solos e pelas classes do solo (S_0 a S_5).

Às classes de fundação associam-se ainda as classes de tráfego, de forma a definir as condições mínimas mais exigentes no caso da via mais solicitada.

O Quadro 8 apresenta as classes de fundação propostas pelo Manual.

Quadro 8 – Classes de fundação ou "plataformas" propostas pelo MACOPAV [2]

Classe de fundação	Módulo de fundação (MPa)		Classe de tráfego
	Gama	Valor de cálculo	
F ₁	> 30 a ≤ 50	30	T ₅ , T ₆
F ₂	> 50 a ≤ 80	60	T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆
F ₃	> 80 a ≤ 150	100	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆
F ₄	> 150	150	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆

Por questões que se prendem com a segurança e simplificação do processo, para efeito de cálculo no dimensionamento dos pavimentos, o MACOPAV propõe que se use o módulo médio nominal de cada intervalo, definido para cada classe de solo de fundação. O coeficiente de Poisson considerado é 0,40 para todas as classes

Para as classes de tráfego menos solicitadas (T_5 e T_6) recomenda-se o uso da fundação com menor módulo de deformabilidade. Note-se que, à medida que aumenta o $TMDA_p$, aumenta também a exigência para a resistência mecânica da plataforma.

Na definição da capacidade de suporte da plataforma é de extrema importância a definição da estrutura de leito de pavimento no que se refere ao tipo de solo constituinte, à sua resistência e, conseqüentemente, espessura definida. Tal pode ser feito, de modo simplificado, recorrendo ao Quadro 2.9 proposto pelo MACOPAV, ou, de modo rigoroso, através dos Manuais do LCPC [3].

A título de exemplo, perante um solo de fundação S_3 , para obter uma fundação da classe F_3 é necessário, de acordo com as disposições do MACOPAV, realizar um leito de pavimento com solo S_4 e com espessura de 20 cm.

No Quadro 9 mostra-se a relação entre a classe de fundação e as características do leito de pavimento a adotar perante um determinado tipo de solo de fundação.

Quadro 9 – Definição das camadas de leito de pavimento em materiais não aglutinados e classes de fundação em função da classe de solo de fundação de acordo com o MACOPAV [2]

		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
	E (MPa)	> 30 a ≤ 50	> 50 a ≤ 80	> 80 a ≤ 150	> 150
	CBR (%)				
S ₀	< 3	Estudo específico			
S ₁	≥ 3 a < 5	30 S ₂ ou 20 S ₃	60 S ₃ ou 40 S ₄		
S ₂	≥ 5 a < 10	(1)	30 S ₃ ou 15 S ₄	30 S ₄	(2)
S ₃	≥ 10 a < 20	-	(1)	20 S ₄	
S ₄ ; S ₅	≥ 20	-	-	(1)	

espessuras definidas em cm

- (1) – Em escavação deve ser escarificado e recompactado na profundidade necessária à garantia de uma espessura final de 30 cm bem compactada; em aterro as condições de fundação estão garantidas.
- (2) – Em pedraplenos ou em aterros com materiais do tipo solo-enrocamento, com uma camada de leito de pavimento em material pétreo de espessura não inferior a 15 cm.

Nota: Em escavação em rocha, e tendo em vista a fundação do tipo F₄, é necessário realizar uma regularização em material pétreo devidamente compactado com cilindros de pneus, e colocar uma camada do mesmo tipo de material com a espessura mínima de 15 cm.

Para a correta definição das classes de terrenos (S_i), deve consultar-se a Classificação Unificada de Solos contida na especificação ASTM D 2487 [14].

2.4. MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO

2.4.1. MATERIAIS GRANULARES

Relativamente aos materiais granulares, o MACOPAV considera materiais naturais ou britados, a serem aplicados em camadas de sub-base e base.

O comportamento mecânico destes materiais é influenciado por vários fatores, nomeadamente pelas suas características intrínsecas. Particularizando para o módulo de deformabilidade, este é fortemente afetado pelas condições de estado (compacidade, teor em água, estado de tensão), donde se destaca o teor em água uma vez que o comportamento das camadas materiais é altamente dependente dele.

Para fazer face a esta questão, tal como anteriormente referido, o Manual considera a existência não só de um sistema de drenagem eficiente como também da impermeabilização das camadas de pavimento, como forma de prevenir os efeitos nefastos da água sobre estas estruturas.

Os materiais granulares previstos no Manual caracterizam-se pelos seus parâmetros de resistência mecânica, módulo de deformabilidade, E , e coeficiente de Poisson, ν . Este documento considera que os materiais granulares apresentam comportamento elástico linear. No entanto, é sabido que o comportamento mecânico destes materiais é elastoplástico.

No entanto, considerando-se o comportamento elástico linear dos materiais granulares, pode estimar-se o módulo de deformabilidade das camadas granulares colocadas sobre a fundação a partir do módulo da camada inferior numa relação do tipo [1]:

$$\begin{aligned} E_{i+1} &= k \cdot E_i \\ E_{i+1} &\leq E_{m\acute{a}x} \end{aligned} \quad (2.7)$$

sendo que, para materiais granulares britados, k assume, geralmente, valores compreendidos entre 2 e 4.

As características de deformabilidade dos materiais granulares preconizados pelo MACOPAV são as que constam no Quadro 10.

Quadro 10 – Características de deformabilidade dos materiais granulares de acordo com o MACOPAV [2]

Código	E	ν
BGr	2,5 × E camada inferior	0,35
BG	2 × E camada inferior	0,35
SbG	2 × E camada inferior	0,35

Refere-se que os materiais granulares são designados pelos respetivos códigos estabelecidos pelas rúbricas de trabalhos rodoviários, como se indica no Quadro 11.

Quadro 11 – Materiais granulares constituintes das estruturas de pavimento flexíveis propostas pelo MACOPAV [2]

Código	Designação	Aplicação
BGr	material britado recomposto em central	camada de base
BG	material britado sem recomposição (tout-venant)	camada de base
SbG	material britado sem recomposição (tout-venant)	camada de sub-base

2.4.2. MATERIAIS BETUMINOSOS

As misturas betuminosas constituem as camadas superiores do pavimento: camada de desgaste (em contacto direto com os agentes solicitadores), camada de regularização e camada de base. Estas misturas devem ser concebidas de maneira a que cumpram a sua função quer ao nível da fase de construção do pavimento quer na fase posterior de entrada em serviço. Assim, as misturas devem exibir adequadas características de:

- trabalhabilidade;
- deformabilidade;
- resistência à fadiga;
- resistência à deformação permanente;
- durabilidade.

Para a conceção de pavimentos flexíveis, o MACOPAV prevê dois tipos de materiais betuminosos: misturas betuminosas fabricadas a quente ou misturas com ligantes hidráulicos.

No que se refere às misturas com ligantes hidráulicos para aplicação em pavimentos flexíveis, o Manual considera misturas de solo-cimento (Sc) fabricadas em central. Este material pode aplicar-se em camada de base ou sub-base e caracteriza-se mecanicamente pelo módulo de deformabilidade de valor 2000 MPa e coeficiente de Poisson 0,30.

No Quadro 12 indicam-se os materiais betuminosos preconizados por este Manual de dimensionamento.

Quadro 12 – Materiais betuminosos aplicados nas camadas das estruturas de pavimento flexíveis catalogadas pelo MACOPAV [2]

	Código	Designação	Aplicação
	BD	betão betuminoso	camada de desgaste
Misturas betuminosas	MBD	mistura betuminosa densa	camada de regularização
	MB	macadame betuminoso	camada de base ou regularização

A tipologia das misturas indicadas no Quadro 12 está devidamente caracterizada no MACOPAV. Desta caracterização consta também a espessura recomendável para as camadas betuminosas de pavimento em função do material betuminoso a empregar.

Por simplificação, e por se tratar de um manual de conceção, é considerado um único módulo de deformabilidade para os vários tipos de camadas betuminosas. Assim, para as estruturas de pavimento flexíveis previstas no MACOPAV deve considerar-se o valor de 4000 MPa para o módulo das camadas betuminosas e 0,35 para o coeficiente de Poisson. A este valor do módulo de deformabilidade corresponde uma temperatura média do ar de 17 °C e uma velocidade de circulação de 60 km/h. Como referido anteriormente, considera-se que a temperatura média de serviço das misturas betuminosas é de 25 °C e que o respetivo betume é da classe 60/70, prevendo-se a redução da penetração para 65% após entrada em serviço.

2.5. CRITÉRIOS DE RUÍNA

De acordo com o método empírico-mecanicista para dimensionamento de pavimentos flexíveis, depois de calculada a resposta estrutural das estruturas de pavimento em estudo, para obter o número acumulado de eixo padrão admissíveis (eixo padrão de 80 kN para o dimensionamento de pavimentos flexíveis de acordo com o MACOPAV) aplicam-se modelos de desempenho de pavimentos associados a critérios de ruína. De acordo com a metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis usada quer em Portugal quer na generalidade dos países europeus [1], consideram-se dois critérios de ruína:

- i. o critério de fadiga das camadas betuminosas, medido pela extensão radial de tração (ϵ_t) ao nível da base destas camadas (Figura 1);
- ii. o critério de deformação permanente, associado às camadas granulares e controlado pela extensão vertical (elástica) máxima de compressão (ϵ_{dp}) no topo do solo de fundação (Figura 1).

O pavimento está corretamente dimensionado no caso de o rácio entre o número acumulado de passagens de eixos-padrão previstos (N_p ou N_{dim} como anteriormente designado) e o número acumulado de

passagens de eixos-padrão admissíveis (N_{adm}) estar compreendido entre 80% e 100%. Este rácio é comumente designado por dano, D , e avalia-se em percentagem, como indica a expressão (2.8).

$$80\% \leq D = \frac{N_p}{N_{adm}} \times 100 \leq 100\% \quad (2.8)$$

Se $D < 80\%$ haverá sobredimensionamento e se $D > 100\%$ haverá subdimensionamento da estrutura de pavimento.

O MACOPAV baseia-se nas leis de ruína da Shell [12], traduzidas pelas expressões (2.9) e (2.10), para obter o valor de N_{adm} . Na expressão (2.9) considera-se que a fadiga das misturas solicitadas à flexão pelos rodados dos veículos pesados se relaciona com a extensão máxima de tração, ε_t . Por sua vez, na expressão (2.10) admite-se que a deformação permanente das camadas de solos se relaciona com a extensão máxima de compressão, ε_{dp} .

$$\varepsilon_t = K_t \cdot N_{at}^{-0,20} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{dp} = K_s \cdot N_{dp}^{-0,25} \quad (2.10)$$

Note-se que, na expressão (2.9) considera-se que K_t pode variar entre 3 e $3,5 \times 10^{-3}$ e, na expressão (2.10) ao valor de K_s corresponde uma probabilidade de sobrevivência 95%. No caso da probabilidade ser de 95%, considera-se $K_s = 1,8 \cdot 10^{-2}$ (valor comumente usado no dimensionamento para a RRN).

2.6. ESTRUTURAS DE PAVIMENTO SEGUNDO O MACOPAV

O manual de dimensionamento [2] propõe, para os pavimentos flexíveis, três estruturas tipo, que se ilustram na Figura 4.

Atentando na geometria das estruturas propostas denota-se que, a espessura das camadas betuminosas é função da classe de tráfego da rodovia para a qual o pré-dimensionamento se destina e daí aparecer com *valor variável*. Assim, quanto maior for o TMDA_p, previsto para o ano de abertura da rodovia, maior será a espessura da camada betuminosa.

Relativamente às camadas granulares, a primeira estrutura (Figura 4 a) é constituída apenas por uma camada que formaliza a camada de base. A segunda estrutura (Figura 4 b) é constituída por duas camadas granulares, sendo a mais superficial a camada de base e a subjacente a camada de sub-base. A estrutura III (Figura 4 c) não apresenta camada de sub-base e a camada de base é solo-cimento.

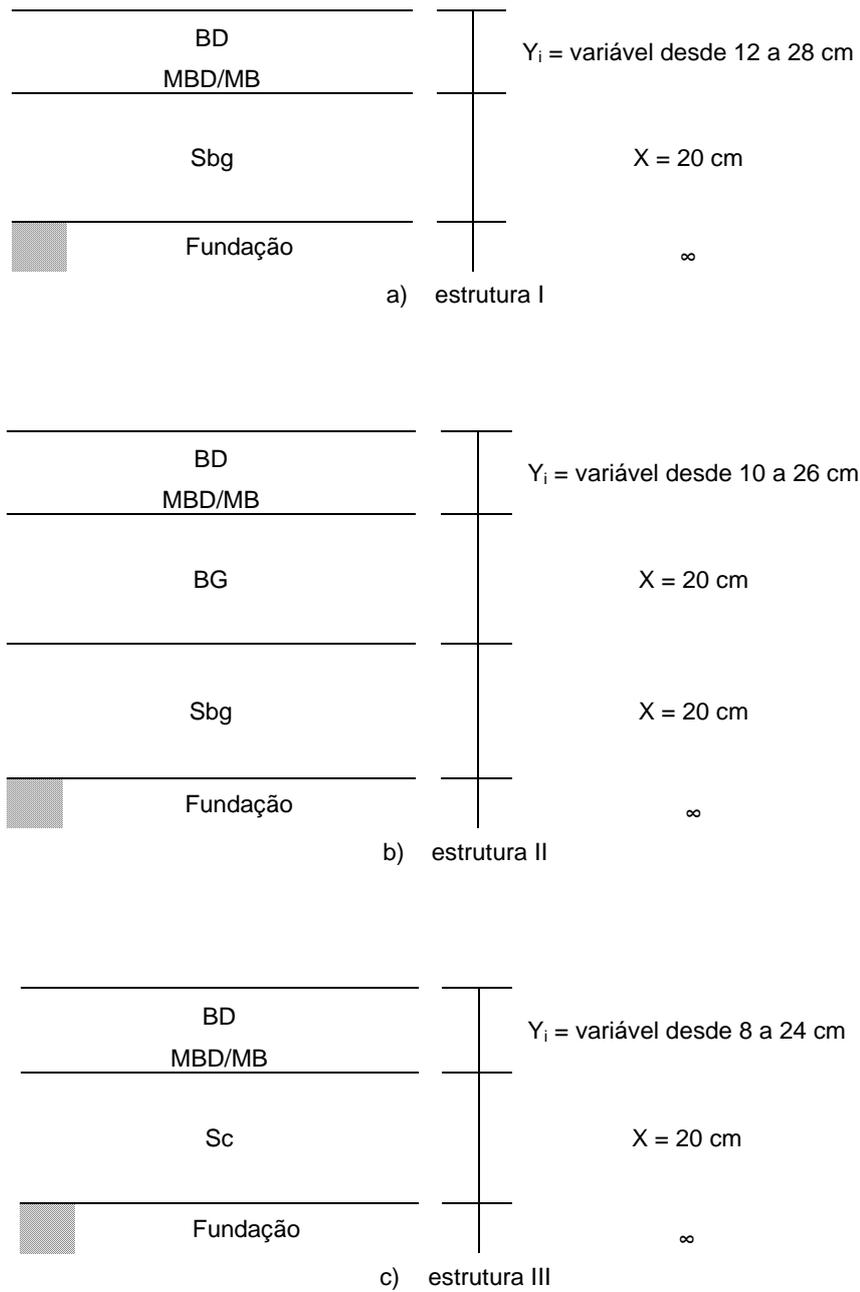


Figura 4 – Geometria das estruturas de pavimento consideradas no catálogo do MACOPAV [2]

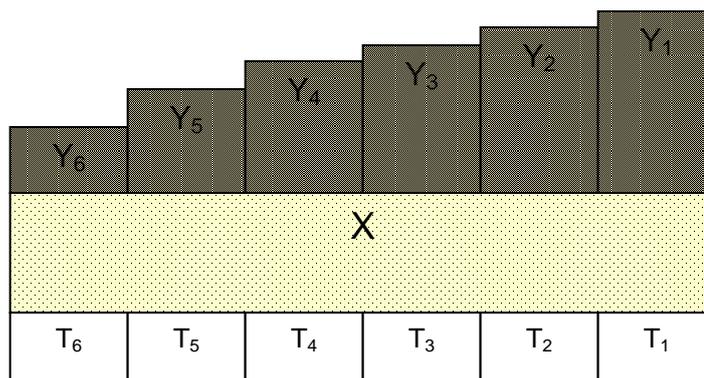


Figura 5 – Estrutura de pavimento tipo catálogo de acordo com o MACOPAV [2]

O significado das siglas BD, MBD, MB está indicado no Quadro 12 e o das siglas Sbg e BG, no Quadro 11. Na estrutura III, Sc significa *solo-cimento*.

A Figura 5 exemplifica uma estrutura de pavimento tipo catálogo. As camadas superficiais correspondem às camadas betuminosas com espessura Y_i com i a variar de 1 a 6 consoante a classe de tráfego correspondente. À camada de espessura X corresponde a camada granular cuja espessura é fixa e de 20 cm como indicado na Figura 4.

No Quadro 13 sumariza-se as espessuras a adotar para as camadas betuminosas em cada uma das estruturas de pavimento flexíveis, em função da classe de tráfego. Estas espessuras correspondem a estruturas de pavimento flexíveis colocadas sobre uma plataforma de classe F₃ ($80 \text{ MPa} < E \leq 150 \text{ MPa}$). No caso de se adotar outras classes de plataforma é necessário proceder a correções da espessura, como se indica no Quadro 14.

Quadro 13 – Espessura total das camadas betuminosas para cada uma das estruturas de pavimento flexíveis, em função da classe de tráfego, para a classe de fundação F3 [2]

Estrutura de pavimento	Espessuras das camadas betuminosas (cm)					
	Classe de tráfego					
	T ₆	T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁
I	12	18	21	24	26	28
II	10	16	19	22	24	26
III	8	12	16	19	22	24

Quadro 14 – Correção da espessura total das camadas betuminosas para classes de plataforma diferentes de F₃, segundo o MACOPAV [2]

Estrutura de pavimento	Espessura das camadas betuminosas relativamente à considerada com plataforma F ₃ (cm)		
	Classe de plataforma		
	F ₁	F ₂	F ₄
I	não adequado	+ 4	- 2
II	+ 5 (T ₅ , T ₆)	+ 2	não adequado
III	não adequado	+ 4	não adequado

2.7. O MACOPAV E OUTROS CATÁLOGOS DE DIMENSIONAMENTO

Tal como em Portugal, também outros países europeus adotam uma metodologia de dimensionamento de pavimentos sob a forma de catálogo.

Nesta secção é feita uma breve apresentação dos guias de dimensionamento vigentes em Espanha e em França.

O guia de dimensionamento de pavimentos Espanhol foi pela primeira vez publicado em 1975 e revisado em 1986. Em 2003, este documento sofreu nova revisão que deu origem à atual edição em vigor [4].

A versão mais recente do Catálogo de Estruturas de Pavimento Francês data de 2003 [3], após várias revisões e atualizações desde a sua primeira versão de 1977, desenvolvida pelo LCPC-SETRA.

Relativamente ao dimensionamento de pavimentos flexíveis, tanto o MACOPAV como os guias de dimensionamento Espanhol e Francês, consideram o modelo multicamada elástico linear (teoria de Burmister) no cálculo da resposta estrutural dos pavimentos. No entanto, ao contrário do MACOPAV, que considera a ação de um eixo padrão de 80 kN, os catálogos Espanhol e Francês consideram já a solicitação de um eixo padrão de 130 kN.

O Quadro 15 apresenta a classificação de tráfego, em função do TMDA_p, proposta por cada um dos documentos.

Quadro 15 – Classes de tráfego segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos

MACOPAV [2]		Instrucción de Carreteras 6.1 y 6.2 IC [4]		LCPC [3]	
Classificação	TMDA _p	Classificação	TMDA _p	Classificação	TMDA _p
T ₇	< 50	T ₄₂	< 25	T ₅	< 25
T ₆	50 – 150	T ₄₁	25 – 50	T ₄	25 – 50
T ₅	150 – 300	T ₃₂	50 – 100	T ₃ ⁻	50 – 85
T ₄	300 – 500	T ₃₁	100 – 200	T ₃ ⁺	85 – 150
T ₃	500 – 800	T ₂	200 – 800	T ₂	150 – 300
T ₂	800 – 1200	T ₁	800 – 2000	T ₁	300 – 750
T ₁	1200 – 2000	T ₀	2000 – 4000	T ₀	750 - 2000
T ₀	> 2000	T ₀₀	> 4000	T _S	2000 – 5000
-	-	-	-	T _{exp}	> 5000

No que concerne à classificação dos solos de fundação dos pavimentos, as propostas também diferem em cada um dos catálogos, como se indica no Quadro 16.

Quadro 16 – Classes de fundação segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos

MACOPAV [2]		Instrucción de Carreteras 6.1 y 6.2 IC [4]		LCPC [3]	
Classificação	Valor de cálculo (MPa)	Classificação	Valor de cálculo (MPa)	Classificação	Valor de cálculo (MPa)
F ₁	30	E ₁	≥ 60	PF ₁	20
F ₂	60	E ₂	≥ 120	PF ₂	50
F ₃	100	E ₃	≥ 300	PF ₃	120
F ₄	150	-	-	PF ₄	200

O Quadro 17 indica as características mecânicas dos materiais de pavimentação considerados nos três manuais de dimensionamento.

Quadro 17 – Características mecânicas dos materiais de pavimentação segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos

	MACOPAV [2]	Instrucción de Carreteras 6.1 y 6.2 IC [4]	LCPC [3]
Camadas betuminosas	E = 4000 MPa v = 0,35	3000 MPa ≤ E ≤ 10000 MPa v = 0,35	5400 MPa ≤ E ≤ 17000 MPa v = 0,35
Camadas granulares	60 MPa ≤ E ≤ 600 MPa v = 0,35	180 MPa ≤ E ≤ 480 MPa v = 0,35	40 MPa ≤ E ≤ 600 MPa v = 0,35
Misturas com ligantes hidráulicos (solo-cimento)	E = 2000 MPa v = 0,30	E = 6000 MPa v = 0,25	12000 MPa ≤ E ≤ 7200 MPa v = 0,25

Nota: indicam-se apenas os valores máximos e mínimos entre os quais variam os módulos de deformabilidade das camadas. Para aplicação de um valor concreto aos materiais compreendidos em cada camada, devem ser consultados os respetivos Catálogos.

* O módulo de deformabilidade dos materiais betuminosos depende da consideração da temperatura média de serviço de 10 °C ou 15 °C

Finalmente, o Quadro 18 apresenta a caracterização geométrica das estruturas de pavimento flexíveis, propostas pelos catálogos português, espanhol e francês para a classe de fundação cujo módulo de deformabilidade é de 100 MPa (classe F₃, E₁ e PF₂ nos catálogos português, espanhol e francês, respetivamente).

Quadro 18 – Características geométricas das camadas constituintes das estruturas de pavimento flexíveis dos materiais de pavimentação segundo cada um dos guias de dimensionamento de pavimentos

	Espessura total camadas betuminosas (cm)			Espessura total camadas granulares (cm)		
	MACOPAV [2]	Instrucción 6.1 y 6.2 IC [4]	LCPC [3]	MACOPAV [2]	Instrucción 6.1 y 6.2 IC [4]	LCPC [3]
Estrutura I	12 28	5 28	14 22	20	35 40	18 25
Estrutura II	10 26	*	*	40	*	*
Estrutura III	8 24	5 18	20 25	20	25 30	20 25

Nota: indicam-se apenas os valores máximos e mínimos entre os quais variam as espessuras das camadas. Para aplicação, consoante a classe de tráfego afeta ao caso em estudo, devem ser consultados os respetivos Catálogos.

* a estrutura II do MACOPAV não tem correspondência com as estruturas propostas no outros catálogos

2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O MACOPAV constitui um método expedito de dimensionamento de estruturas de pavimentos rodoviários, cuja aplicação é particularmente indicada para efeitos de pré-dimensionamento em fase de estudo prévio.

A metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis proposta pelo Manual, inclui várias considerações simplificadas, destacando-se as relativas a:

- i. condições climáticas (condições térmicas e hidrológicas) enquanto ações de dimensionamento;
- ii. características dos materiais de pavimentação, principalmente o que diz respeito às camadas betuminosas;

Relativamente ao ponto i, a consideração de uma temperatura média de serviço uniforme para todo o território nacional continental, deve ser avaliada com atenção em cada caso em estudo, uma vez que a variação da temperatura tem grande influência no comportamento mecânico dos materiais betuminosos.

Sobre o ponto ii, importa referir que o MACOPAV considera para os materiais betuminosos, o módulo de deformabilidade de 4000 MPa para todas as camadas betuminosas indiscriminadamente. De acordo com o procedimento do Manual, não se considera a diminuição do módulo de deformabilidade destes materiais com o aumento da profundidade da camada.

Adicionalmente, fez-se uma breve comparação do Manual português com outros guias de dimensionamento europeus para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, tendo-se verificado que:

- i. o MACOPAV considera a solicitação do eixo padrão de 80 kN, enquanto que os manuais francês e espanhol consideram a ação do eixo padrão de 130 kN;
- ii. os Guias de dimensionamento francês e espanhol, comparativamente com o MACOPAV, consideram mais classes de tráfego;
- iii. o MACOPAV, relativamente às características mecânicas dos materiais betuminosos, adota valores mais baixos quando comparado com os outros guias de dimensionamento;
- iv. os Guias de dimensionamento espanhol e francês consideram uma gama maior de valores para as características dos materiais de pavimentação e solos de fundação.

As estruturas flexíveis apresentadas no MACOPAV devem ser entendidas como elementos base numa fase preliminar do dimensionamento. Tal como o próprio manual recomenda, é fundamental que em fase de projeto de execução sejam justificadas, por meio de cálculos, as estruturas projetadas, para que estas sejam coerentes com as condições de projeto e se adaptem o melhor possível ao caso em estudo.

3

INFLUÊNCIA DOS FATORES DE AGRESSIVIDADE NO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sendo o tráfego pesado o principal fator de dimensionamento dos pavimentos rodoviários, é essencial atender quer à sua magnitude e configuração das cargas sobre o pavimento quer ao número de repetições dessas cargas, estimado para o período de dimensionamento da estrutura (20 anos, no caso dos pavimentos flexíveis).

Neste capítulo do trabalho, avalia-se, primeiramente, os fatores de agressividade do tráfego, considerando-se três situações de solicitação de veículos pesados: carga típica, carga limite legal e carga máxima. Neste estudo, teve-se por base o trabalho realizado pelo Instituto da Construção, em 1993 [7]. De seguida, é feita a comparação dos fatores de agressividade obtidos com os previstos MACOPAV no sentido de, por um lado, identificar a tipologia de carga de pesados considerada neste manual e, por outro lado, inferir sobre a adoção de fatores de agressividade mais severos do que os propostos no MACOPAV no cálculo do número acumulado de eixos padrão para o período de dimensionamento.

3.2. FATORES DE AGRESSIVIDADE

No presente trabalho, considerou-se o espectro de cargas por eixo dos veículos pesados exposto no documento do IC [7] relativo à conceção e dimensionamento de pavimentos rodoviários. Este documento quantifica a agressividade do tráfego para dois cenários prováveis, A e B, sendo o primeiro o mais severo e, por esta razão, o cenário analisado nesta dissertação.

Em termos de projeto, o ideal seria conhecer-se informação oficial para estabelecer um "modelo previsional de tráfego pesado". Nesta impossibilidade, recorreu-se a um estudo [7] que, apesar de antigo, se reveste de consistência suficiente para credibilizar os resultados que da sua aplicação resultem.

O estudo do IC [7] apresenta um espectro modelizado de cargas por eixo de veículos pesados para um nível de tráfego (Quadro 19), por categoria de veículos, de acordo com a classificação da ex-JAE anteriormente apresentada no Quadro 1.

Quadro 19 – Espectro modelizado de cargas por eixo (toneladas) [7]

Categoria	Nível de carga considerado		
	Carga típica	Próximo limite legal	Carga máxima
f1	pb – 14 4s + 10s	pb – 16 4s + 12s	pb – 22 6s + 16s
f2	pb – 20 4s + 16t	pb – 24 4s + 20t	pb – 36 6s + 30t
g1	pb – 30 4s + 10s + 8s + 8s	pb – 40 4s + 12s + 12s + 12s	pb – 54 6s + 16s + 16s + 16s
g2	pb – 30 4s + 10s + 6s + 10t	pb – 40 4s + 12s + 9s + 15t	pb – 54 6s + 16s + 12s + 20t
g3	pb – 36 4s + 14t + 9s + 9s	pb – 48 4s + 20t + 12s + 12s	pb – 66 6s + 28t + 16s + 16s
h2	pb – 30 4s + 9s + 17t	pb – 34 4s + 10s + 20t	pb – 56 6s + 16s + 34t
h3	pb – 30 4s + 8s + 18tr	pb – 38 4s + 8s + 18tr	pb – 60 6s + 16s + 38tr
h5	pb – 36 4s + 16t + 16t	pb – 45 5s + 20t + 20t	pb – 66 6s + 29t + 31t
i1	pb – 14 5s + 9s	pb – 17 5s + 12s	-

onde:

pb – peso bruto do veículo

s – eixo simples

t – eixo duplo ou tandem

tr – eixo triplo ou tridem

A repartição percentual do tráfego pesado por categoria de veículos, de acordo com o IC [7], é a que se apresenta na Figura 6. Desta análise verifica-se que os veículos pesados da classe *f1* constituem, em média, a maioria dos pesados em circulação.

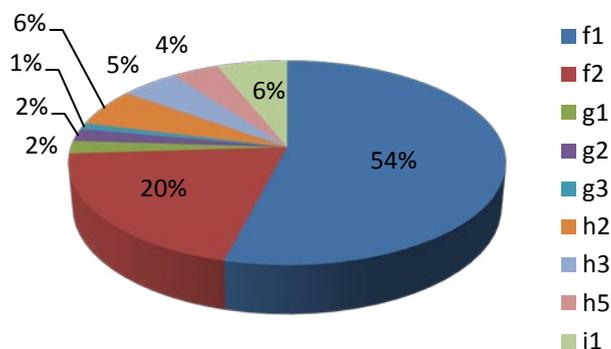


Figura 6 – Distribuição, média para o território nacional, dos veículos pesados por categoria [7]

Estas categorias de veículos apresentam-se distribuídas por tipologia de carga dos seus eixos. No universo de cada categoria, a carga por eixo com que cada veículo circula varia, registando-se uma preferência global por certo nível de carga. O Quadro 20 apresenta a repartição dos tipos de pesados por três níveis de carga por eixo, os preconizados pelo estudo do IC: carga típica, carga próximo do limite legal e carga máxima.

Quadro 20 – Distribuição percentual do tráfego pesado por nível de carga por eixo [7]

Categoria de pesados	Carga por eixo (%)		
	carga típica	próximo limite legal	carga máxima
f1	90	9,5	0,5
f2	85	14	1
g1	80	18	2
g2	80	18	2
g3	80	18	2
h2	75	22	3
h3	70	26	4
h5	65	30	5
i1	95	5	-

Do Quadro 20 resulta que, de acordo com o modelo do IC, considera-se que a maioria dos veículos pesados circula nas estradas portuguesas com um nível de carga por eixo correspondente a valores inferiores aos limites legais: carga típica (Figura 7).

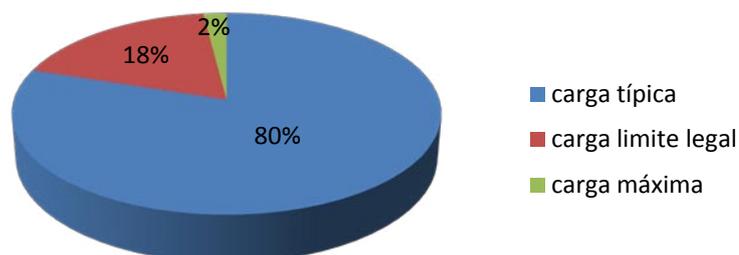


Figura 7 – Distribuição do tráfego pesado por nível de carga por eixo [7]

Com base nos dados apresentados, calcularam-se, para cada categoria de pesados e nível de carga, os correspondentes fatores de agressividade α quer para o eixo-padrão de 80 kN, quer para o de 130 kN.

Refere-se que a transformação de eixos tandem e tridem em eixos simples equivalentes, baseou-se nos fatores de conversão, k , propostos pelo documento do IC [7], conforme o Quadro 21.

Quadro 21 – Coeficiente de conversão de eixos tandem e tridem em eixos simples equivalentes [7]

Tipo de eixo	k
tandem	0,57
tridem	0,50

As Figuras 8, 9 e 10 ilustram os resultados obtidos para os três níveis de carga: carga típica, carga limite legal e carga máxima. Naturalmente, à medida que se evolui para uma condição de carga por eixo mais severa, os fatores de agressividade são de magnitude superior.

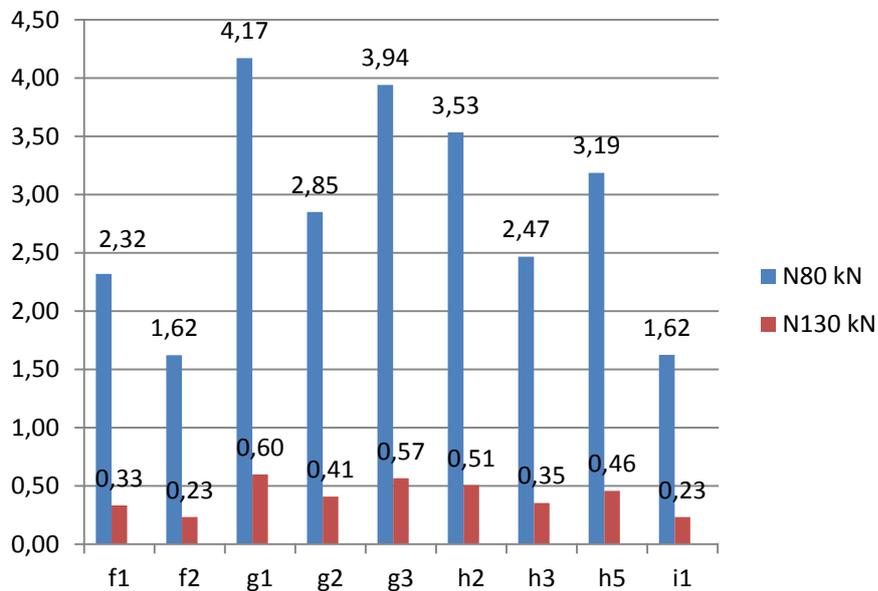


Figura 8 – Fatores de agressividade considerando a 100% a carga típica por eixo

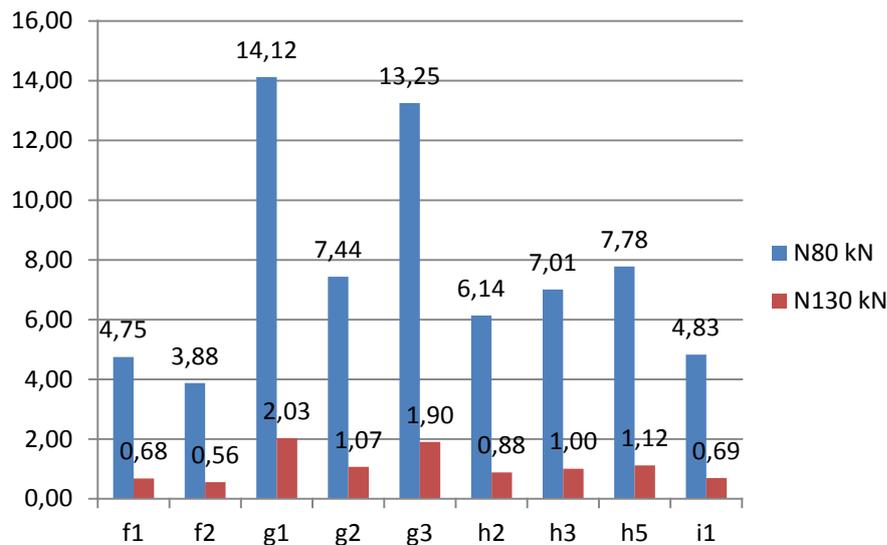


Figura 9 – Fatores de agressividade considerando a 100% a carga por eixo próximo do limite legal

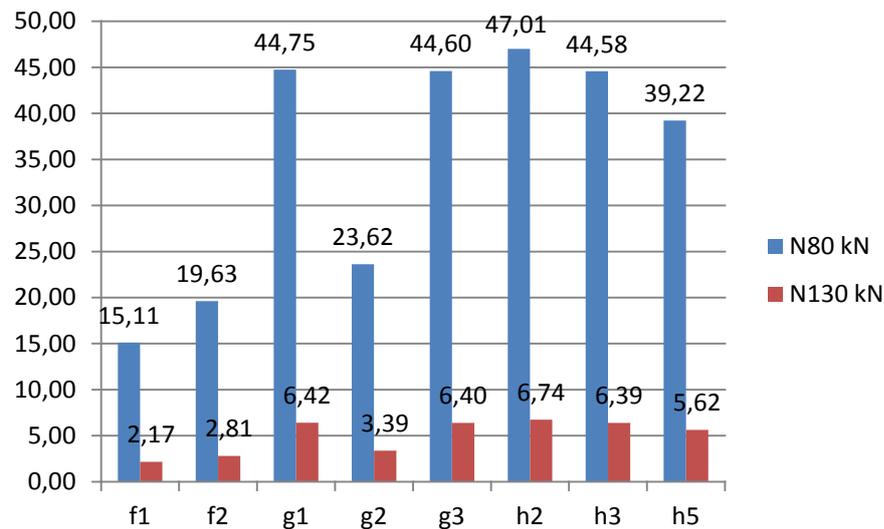


Figura 10 – Fatores de agressividade considerando a 100% a carga máxima por eixo

Pela análise das Figuras 8, 9 e 10, constata-se que, para as condições de carga típica e de carga próxima do limite legal por eixo, a categoria de pesados *g1* é a que devolve maior fator de agressividade e a categoria *f2* regista o menor fator. Daqui resulta que, dentro do leque de veículos pesados que circula com estes dois níveis de carga por eixo, os pesados da categoria *g1* são aqueles que provocam o maior dano sobre os pavimentos, podendo considerar-se a categoria globalmente mais condicionante para efeitos de dimensionamento.

No que diz respeito ao nível de carga máxima por eixo, a categoria *h2* é a que regista a maior agressividade e a *f1*, a menor.

Neste trabalho, utilizaram-se apenas os resultados máximo e mínimo registados para cada uma das condições de carga consideradas, a fim de se analisar dois cenários extremos, correspondentes ao maior e menor dano provocado nos pavimentos flexíveis. Embora as categorias de veículos destacadas não correspondam às dominantes no universo dos veículos pesados que, em média, circulam em Por-

tugal, são aquelas que constituem a base do presente estudo. Assim, ignorando as distribuições representadas nas Figuras 6 e 7, idealizou-se um cenário em que, para cada nível de carga por eixo considerado, existem duas possibilidades extremas:

- i. 100% dos veículos em circulação são da categoria de pesados com maior agressividade para o pavimento;
- e
- ii. 100% dos veículos em circulação pertencem à categoria com menor fator de agressividade.

Este pressuposto permitiu definir, conseqüentemente, um espectro bastante alargado de passagens acumuladas de eixos padrão, a usar na posterior validação das estruturas de pavimento catalogadas no MACOPAV.

O MACOPAV considera o eixo padrão de 80 kN para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Porém, como já vem sendo dito, neste trabalho integra-se o eixo padrão de 130 kN, uma vez que é o nível de carga considerado para dimensionamento de pavimentos flexíveis em países como França e Espanha, onde se usa uma metodologia de dimensionamento de pavimentos sob a forma de catálogo, semelhante ao Manual Português [1]. Além disso, em Portugal, as estruturas de pavimento flexíveis mais recentes já são dimensionadas para o eixo padrão de 130 kN.

Uma vez que nesta secção é feita a comparação entre os resultados obtidos (na secção anterior) e os dispostos no MACOPAV, importa referir que, não dispondo o manual de valores de fatores de agressividade de eixos padrão de 130 kN para a abordagem dos pavimentos flexíveis, determinou-se estes coeficientes por conversão dos resultados existentes para o eixo padrão de 80 kN, de acordo com a expressão (3.1):

$$\alpha_{130} = \alpha_{80} \times \left(\frac{80}{130}\right)^4 \quad (3.1)$$

Da aplicação da expressão (3.1) obtiveram-se os fatores de agressividade para cada uma das classes de tráfego constantes do Quadro 22.

Quadro 22 – Fatores de agressividade para o eixo padrão de 130 kN

Classe de tráfego	α_{130}
T ₆	0,3
T ₅	0,4
T ₄	0,6
T ₃	0,6
T ₂	0,7
T ₁	0,8

Nos Quadros 23 e 24, apresentam-se os resultados obtidos para os fatores de agressividade para a consideração do eixo padrão de 80 kN e do 130 kN respetivamente. Note-se que os valores do fator de crescimento de tráfego C são aqui apresentados com quatro casas decimais mas, para efeitos de cálculo do N_{dim} , usou-se precisão às nove casas decimais.

Quadro 23 – Elementos relativos ao tráfego para o eixo-padrão de 80 kN

Classe de tráfego	Taxa de crescimento (%)	C	Fator de agressividade α_{80}								
			MACOPAV [2]	Carga típica		Próx. limite legal		Carga máxima			
				Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx		
T ₇	< 50		estudo específico								
T ₆	50	3	1,3435	2,0	1,6	4,2	3,9	14,2	15,2	47,0	
	150										
T ₅	150	4	1,4889	3,0	1,6	4,2	3,9	14,2	15,2	47,0	
	300										
T ₄	300	5	1,6533	4,0	1,6	4,2	3,9	14,2	15,2	47,0	
	500										
T ₃	500			4,5	1,6	4,2	3,9	14,2	15,2	47,0	
	800										
T ₂	800			5,0	1,6	4,2	3,9	14,2	15,2	47,0	
	1200										
T ₁	1200			5,5	1,6	4,2	3,9	14,2	15,2	47,0	
	2000										
T ₀	> 2000			estudo específico							

Quadro 24 – Elementos relativos ao tráfego para o eixo-padrão de 130 kN

Classe de tráfego	TMDA _p	Taxa de crescimento (%)	C	Fator de agressividade α_{130}						
				MACOPAV*	Carga típica		Próx. limite legal		Carga máxima	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
T ₇	< 50			estudo específico						
T ₆	50	3	1,3435	0,3	0,3	0,6	0,6	2,0	2,2	6,8
	150									
T ₅	150	4	1,4889	0,4	0,3	0,6	0,6	2,0	2,2	6,8
	300									
T ₄	300	5	1,6533	0,6	0,3	0,6	0,6	2,0	2,2	6,8
	500									
T ₃	500			0,6	0,3	0,6	0,6	2,0	2,2	6,8
	800									
T ₂	800			0,7	0,3	0,6	0,6	2,0	2,2	6,8
	1200									
T ₁	1200			0,8	0,3	0,6	0,6	2,0	2,2	6,8
	2000									
T ₀	> 2000			estudo específico						

Valores α obtidos por conversão dos α_{80} do MACOPAV para pavimentos flexíveis em α_{130} conforme a expressão (3.1)

Ao observar o Quadro 23, é importante lembrar que os valores do manual correspondem a valores médios resultantes da análise de pesagens de eixos sobrecarregados, realizadas em estações para o efeito, nos itinerários com maiores volumes de tráfego pesado. Comparando os valores de α calculados com os propostos pelo MACOPAV, verifica-se que, para as três primeiras classes de tráfego, bem como para o conjunto das três últimas, o manual propõe um incremento constante dos valores de α , de tal maneira que, aumentando o TMDA_p aumenta a agressividade induzida pelos seus eixos nos pavimentos.

Pelos resultados obtidos, é notório que:

- o fator de agressividade α é tanto maior quanto maior for o TMDA_p;
- a diferença entre os valores calculados e os propostos pelo MACOPAV é tanto maior quanto maior for o TMDA_p;
- os fatores de agressividade α calculados e propostos pelo MACOPAV são semelhantes para a classe T₆ (correspondente ao menor TMDA_p) para a configuração de carga típica;
- o MACOPAV propõe fatores de agressividade α diferentes para todas as classes de tráfego e os valores calculados são iguais para todas as classes;

Atentando no Quadro 24, relativo à proposta de consideração do eixo-padrão de 130 kN na conversão do TMDA_p para definição do número acumulado de eixos padrão N_{dim} , verifica-se que a flutuação dos valores calculados em torno daqueles que se definiram como sendo os do MACOPAV (uma vez que derivam da conversão dos α_{80} do manual em α_{130} , como explicado nesta secção) é semelhante à verificada para os valores de α_{80} (Quadro 23).

3.3. NÚMERO ACUMULADO DE EIXOS PADRÃO PARA 20 ANOS

Por aplicação da expressão (2.5), e para cada uma das três condições de carregamento e fatores de agressividade mínimo e máximo, obtiveram-se os números acumulados de eixos padrão, $N_{dim\ 80\ kN}$ e $N_{dim\ 130\ kN}$, e que se apresentam, respetivamente, nos Quadros 25 e 26. Para cada classe de tráfego, definida por um intervalo de TMDA_p, calcularam-se os N_{dim} considerando os extremos do intervalo, de forma a balizar completamente a gama de valores para cada classe de tráfego. Por exemplo: a classe T₄ na configuração de carga típica e para o fator de agressividade máximo, é definida por um intervalo de $N_{dim\ 80\ kN}$ [1,400E+07; 2,300E+07].

Com os N_{dim} calculados vai, posteriormente no Capítulo 4, verificar-se a adequação das estruturas flexíveis propostas no MACOPAV, em termos de capacidade de carga, para este nível de solitação.

Quadro 25 – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN para o período de dimensionamento 20 anos

Classe de tráfego	TMDA _p	MACOPAV [2]	Carga típica		Carga próx. limite legal		Carga máxima	
			α Min	α Máx	α Min	α Máx	α Min	α Máx
T ₇	< 50		estudo específico					
T ₆	50	2,000E+06	7,900E+05	2,100E+06	2,000E+06	7,000E+06	7,500E+06	2,400E+07
	150		2,400E+06	6,200E+06	5,800E+06	2,100E+07	2,300E+07	7,000E+07
T ₅	150	8,000E+06	2,400E+06	6,200E+06	5,800E+06	2,100E+07	2,300E+07	7,000E+07
	300		4,800E+06	1,300E+07	1,200E+07	4,200E+07	4,500E+07	1,400E+08
T ₄	300	2,000E+07	5,300E+06	1,400E+07	1,300E+07	4,700E+07	5,000E+07	1,600E+08
	500		8,700E+06	2,300E+07	2,200E+07	7,800E+07	8,300E+07	2,600E+08
T ₃	500	4,000E+07	8,700E+06	2,300E+07	2,200E+07	7,800E+07	8,300E+07	2,600E+08
	800		1,400E+07	3,700E+07	3,400E+07	1,300E+08	1,400E+08	4,100E+08
T ₂	800	7,000E+07	1,600E+07	4,100E+07	3,800E+07	1,400E+08	1,500E+08	4,600E+08
	1200		2,400E+07	6,100E+07	5,700E+07	2,100E+08	2,300E+08	6,900E+08
T ₁	1200	1,000E+08	2,400E+07	6,100E+07	5,700E+07	2,100E+08	2,300E+08	6,900E+08
	2000		3,900E+07	1,100E+08	9,500E+07	3,500E+08	3,700E+08	1,200E+09
T ₀	> 2000		estudo específico					

Quadro 26 – Número acumulado de eixos padrão de 130 kN para o período de dimensionamento 20 anos

Classe de tráfego	TMDA _p	MACOPAV*	Carga típica		Carga próx. limite legal		Carga máxima	
			α Min	α Máx	α Min	α Máx	α Min	α Máx
T ₇	< 50		estudo específico					
T ₆	50	1,500E+05	1,500E+05	3,000E+05	3,000E+05	9,900E+05	1,100E+06	3,400E+06
	150	4,500E+05	4,500E+05	8,900E+05	8,900E+05	3,000E+06	3,240E+06	1,100E+07
T ₅	150	5,900E+05	4,500E+05	8,900E+05	8,900E+05	3,000E+06	3,240E+06	1,100E+07
	300	1,200E+06	8,900E+05	1,800E+06	1,800E+06	5,900E+06	6,480E+06	2,100E+07
T ₄	300	2,000E+06	1,000E+06	2,000E+06	2,000E+06	7,000E+06	7,200E+06	2,300E+07
	500	3,300E+06	1,700E+06	4,000E+06	4,000E+06	1,100E+07	1,200E+07	3,700E+07
T ₃	500	3,300E+06	1,700E+06	4,000E+06	4,000E+06	1,100E+07	1,200E+07	3,700E+07
	800	5,300E+06	2,700E+06	6,000E+06	6,000E+06	1,800E+07	2,000E+07	6,000E+07
T ₂	800	6,800E+06	3,000E+06	6,000E+06	6,000E+06	2,000E+07	2,200E+07	6,600E+07
	1200	1,100E+07	5,000E+06	9,000E+06	9,000E+06	3,000E+07	3,200E+07	9,900E+07
T ₁	1200	1,200E+07	5,000E+06	9,000E+06	9,000E+06	3,000E+07	3,200E+07	9,900E+07
	2000	2,000E+07	8,000E+06	1,500E+07	1,500E+07	5,000E+07	5,400E+07	1,700E+08
T ₀	> 2000		estudo específico					

Valores α obtidos por conversão dos α₈₀ do MACOPAV para pavimentos flexíveis em α₁₃₀ conforme a expressão (3.1)

Analisando os resultados indicados no Quadro 25, conclui-se que:

- a previsão de $N_{dim\ 80\ kN}$, a partir do fator de agressividade correspondente ao mínimo para a configuração de carga típica de veículos pesados, conduz a valores menores do que os proposto pelo MACOPAV, podendo induzir a uma estrutura de pavimento subdimensionada;
- a gama de valores calculados de $N_{dim\ 80\ kN}$, para as classes de tráfego associadas a um menor TMDA_p (T₆ a T₄), inclui os valores indicados pelo MACOPAV; no entanto, para as classes de tráfego com maior TMDA_p (T₃ a T₁), esta situação já não se verifica;
- o $N_{dim\ 80\ kN}$, obtido com os fatores de agressividade associados a carga próxima do limite legal e carga máxima, são superiores (entre 9% a 97%) aos indicados no MACOPAV.

A análise dos resultados da proposta de uniformização do TMDA_p em eixos padrão de 130 kN (Quadro 26), deve ser feita com maior reserva uma vez que o manual não prevê o dimensionamento de pavimentos flexíveis para esta carga.

Comparando os resultados de N_{dim} para as duas propostas de eixo padrão, verifica-se que:

- os resultados obtidos para $N_{dim\ 130\ kN}$ são menores do que os obtidos para $N_{dim\ 80\ kN}$; tal deve-se ao valor mais baixo dos coeficientes de agressividade associados ao eixo padrão de 130 kN relativamente ao de 80 kN, porque a fatores de agressividade menores corresponde um número de eixos padrão igualmente menor (veja-se a expressão (2.5));

- i. os valores de $N_{dim\ 130\ kN}$ do MACOPAV, ao serem menores do que os obtidos para as condições extremas dos três níveis possíveis de solicitação, podem conduzir a estruturas de pavimento subdimensionadas;
- ii. o valor de $N_{dim\ 130\ kN}$ aumenta à medida que $\alpha_{calculado} > \alpha_{MACOPAV}$.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de analisar a influência da variação dos fatores de agressividade no dimensionamento de pavimentos flexíveis, calcularam-se fatores de agressividade mais e menos conservativos relativamente aos do MACOPAV, com base num estudo de tráfego do IC [7].

No cálculo dos fatores de agressividade de tráfego, considerou-se quer ação do eixo padrão de 80 kN quer a do 130 kN. A partir da análise dos resultados do estudo do IC [7], calcularam-se os fatores de agressividade para três configurações de carga por eixo: carga típica, carga próximo do limite legal e carga máxima. Em cada configuração de carga identificaram-se as categorias de veículos com maior e menor fator de agressividade, definindo-se dois cenários extremos em cada configuração: fator de agressividade máximo e fator de agressividade mínimo. Ao comparar os resultados obtidos com os previstos no MACOPAV verificou-se que:

- i. a agressividade de um eixo é sempre relativa uma vez que depende do pavimento em questão e, como compara os danos (número de passagens) provocados por dois eixos, o eixo em estudo (relativo à categoria de veículo pesado em causa) e outro considerado como padrão, devolve, logo à partida, resultados diferentes;
- ii. o cálculo do número acumulado de eixos padrão para efeitos de dimensionamento ou de verificação estrutural varia consoante o eixo que se define como sendo o eixo padrão equivalente.

A aplicação dos fatores de agressividade calculados na determinação do número acumulado de passagens de eixos padrão previsto para o período de dimensionamento N_{dim} , permitiu definir, para cada classe de tráfego, um intervalo fechado de valores.

Comparando os resultados de $N_{dim\ 80\ kN}$ e $N_{dim\ 130\ kN}$ entre si constatou-se que:

- i. a mesma classe de tráfego pode ser definida por um intervalo de N_{dim} diferente consoante se considere o eixo padrão de 80 kN ou 130 kN;
- ii. o número acumulado de passagens de eixos padrão previstas para o eixo padrão de 80 kN é superior ao previsto para o eixo padrão 130 kN, analisando a mesma classe de tráfego para a mesma configuração de carga;

Finalmente, importa referir que os valores presentes no MACOPAV relativamente ao número acumulado de eixos padrão para o tempo de vida útil dos pavimentos flexíveis, foram determinados com base em coeficientes de agressividade médios resultantes de pesagens em estações específicas e cujos resultados se desconhecem. Assim, não seria de esperar que estes resultados e os do presente estudo coincidissem, uma vez que se está a usar como base um estudo de tráfego diferente. O objetivo foi, de acordo com os cenários extremos definidos para as várias situações de carga por eixo tomadas, enquadrar os valores do manual com os resultantes da experiência. Deste procedimento conclui-se que, se por um lado ser mais conservativo na adoção dos fatores de agressividade se obtém soluções de N_{dim} que primam pela segurança, por outro lado, estas mesmas soluções podem ser antieconómicas e conduzir ao sobredimensionamento das estruturas ou falsear a validação das estruturas de pavimento catalogadas no manual em análise.

4

VALIDAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS DO MACOPAV

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo apresenta-se os resultados obtidos com a modelação das estruturas de pavimentos flexíveis catalogadas no capítulo 6 do MACOPAV.

O objetivo essencial é verificar se o dimensionamento destas estruturas é económico quando se faz variar a agressividade dos eixos padrão de 80kN e 130 kN por meio da consideração de fatores de agressividade diferentes daqueles usados no MACOPAV aquando da previsão do número de eixos padrão passíveis de solicitar a estrutura num horizonte de 20 anos.

Primeiramente, descreve-se todos os pressupostos que estiveram na base da modelação: método de cálculo e modelos estrutural, material e de carregamento. É também feita uma breve introdução aos programas de cálculo automático utilizados na avaliação da resposta estrutural de sistemas *multicamadas*. A modelação das estruturas flexíveis em estudo foi feita com recurso ao *ALIZE*. No entanto, a fim de validar os resultados obtidos com este software, recorreu-se a um segundo programa de cálculo, *ELSYM 5*, baseado no mesmo método de cálculo e modelo estrutural.

Seguidamente, são apresentados os resultados da modelação, considerando a ação quer do eixo padrão de 80 kN quer do eixo padrão de 130 kN:

- i. extensões de tração (medidas na base das camadas betuminosas)
- ii. extensões de compressão (medidas no topo do solo de fundação).

Aplicando as leis de ruína aos resultados obtidos, identifica-se o critério determinante para o dimensionamento, isto é, aquele que devolve o número máximo total de eixos padrão que podem solicitar o pavimento no seu período de vida útil (20 anos), fazendo cumprir, simultaneamente, os critérios de fadiga das camadas betuminosas e deformação permanente dos solos de fundação.

Finalmente, é feita a validação das estruturas de pavimento flexíveis do MACOPAV, baseada na quantificação do dano induzido nestas estruturas por diferentes configurações de carga por eixo de pesados. Os diferentes níveis de carregamento expressam-se sob a forma de coeficientes de agressividade. Desta forma, avalia-se também a influência dos fatores de agressividade no dimensionamento de pavimentos e, neste caso em particular, o impacto que a consideração de cenários de agressividade extremos tem sobre as estruturas previstas no MACOPAV.

4.2. DESCRIÇÃO DA MODELAÇÃO

4.2.1. MÉTODO DE CÁLCULO

Existem vários métodos para avaliar a resposta da estrutura de pavimento face à ação duma carga rolante, tais como a *Teoria Multicamada*, o *Método dos Elementos Finitos* e o *Método dos Elementos Discretos* [1].

Neste trabalho foi utilizada a metodologia mais simples, que se baseia na teoria de Burmister (Burmister, D.; 1945), que considera, para representar as estruturas de pavimentos, um sistema multicamada composto por camadas horizontais semi-infinitas, contínuas, homogéneas, de espessura constante e constituídas por materiais isotrópicos com comportamento elástico-linear, assentes sobre um meio espaço semi-infinito (meio espaço de Boussinesq) [6].

Os modelos de resposta, habitualmente usados na análise estrutural de pavimentos flexíveis, para efeitos de dimensionamento, baseiam-se na Teoria Multicamada [6].

Este método de cálculo inclui uma série de simplificações, nomeadamente no que se refere aos modelos materiais e aos modelos de carregamento considerados. Assim, considera-se que os materiais apresentam comportamento elástico linear, sendo o seu comportamento mecânico caracterizado pelo módulo de rigidez, E , e coeficiente de Poisson, ν .

Quanto aos modelos de carregamento, adota-se uma tensão de contacto uniforme, aplicada sobre uma área circular. Considera-se ainda que a solitação apresenta distribuição temporal uniforme, isto é, não se tem em conta o carácter dinâmico da carga

Não obstante a sua grande aplicabilidade, o modelo de cálculo, baseado na Teoria Multicamada, apresenta algumas desvantagens. Assim, este modelo não considera:

- a distribuição espacial das propriedades dos materiais dos pavimentos;
- a presença de descontinuidades no pavimento, tais como fendas ou juntas;
- o comportamento não-linear dos solos e dos materiais granulares não ligados;
- o comportamento visco-elástico dos materiais betuminosos;
- a anisotropia dos materiais constituintes dos pavimentos;
- as ações dinâmicas induzidas pelos veículos;
- as distribuições reais da pressão de contacto entre os pneus dos veículos e os pavimentos. [1]

São vários os programas de cálculo automático que implicitamente adotam a Teoria Multicamada, podendo citar-se os programas *ALIZE*, desenvolvido no LCPC (França), e o *ELSYM5* desenvolvido pela Universidade de Berkeley (EUA).

Nesta secção relativa à modelação das estruturas de pavimento catalogadas nos MACOPAV, foram usados os programas de cálculo supracitados.

Para além dos referidos programas de cálculo automático existem outros igualmente baseados no modelo de Burmister, entre os quais o *BISAR* desenvolvido pela Shell, o *CIRCLY* desenvolvido pelo centro de Investigação Commonwealth (Austrália), o *NOAH*, o *VEROAD* desenvolvido na Universidade de Delft (Holanda), e o programa *CHEVIT* desenvolvido pela petrolífera Chevron.

No que se refere ao *Método dos Elementos Finitos*, pode dizer-se que é uma técnica versátil de análise da resposta estrutural dos pavimentos rodoviários.

Este método possibilita o estudo de modelos estruturais geometricamente elaborados, isto é, permite a consideração da variação da espessura das camadas, a localização de descontinuidades como fendas ou juntas, bem como a distribuição espacial das propriedades dos materiais.

O comportamento não-linear dos materiais granulares e o comportamento visco-elástico dos materiais betuminosos podem ser considerados.

Além disso, o Método dos Elementos Finitos representa de forma mais realista os modelos de carregamento, uma vez que considera a ação dinâmica das cargas e a sua distribuição temporal não-linear, a distribuição da pressão de contacto entre os pneus dos veículos e o pavimento, entre outros [1].

No entanto, este método de cálculo apresenta também algumas desvantagens tais como:

- a precisão dos resultados depende do grau de discretização da estrutura;
- o cálculo é demorado e quando associado a programas de cálculo automático não é de fácil manuseio. [1]

A título de exemplo referem-se, alguns dos softwares de elementos finitos: o MICHPAV, desenvolvido pela Universidade do Estado do Michigan (EUA), o DIANA, desenvolvido pelo TNO Instituto de Pesquisa da Construção de Delft (Holanda), entre outros.

Finalmente, o *Método dos Elementos Discretos* é um método complexo e cuja aplicação a estruturas de pavimentos ainda não está muito difundida [6]. No entanto, reveste-se de grande interesse uma vez que permite modelar meios descontínuos, tais como camadas granulares ou pavimentos fendilhados [6].

Comparativamente com o Método dos Elementos Finitos, permite uma modelação dos materiais constituintes do pavimento muito mais realista já que os materiais são descritos pelo tamanho, forma e angulosidade das suas partículas, grau de compactação, rigidez das partículas e coeficiente de atrito e coesão entre partículas [1]. Daqui resulta que o Método poderá ter um interesse de aplicação acrescido na análise de um meio essencialmente condicionado pelos fenómenos que se registam nas interfaces entre os elementos, uma vez que permite simular de forma mais realista as interações que se verificam entre as partículas de diferentes camadas [6].

Embora com um carácter muito promissor, o Método dos Elementos Discretos ainda não está acessível ao ponto de permitir a total modelação de uma estrutura de pavimento.

Nesta tese, o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Elementos Discretos, não são considerados. Na fase de optar por uma metodologia de cálculo, a simplicidade e facilidade da metodologia multicamada prevaleceu, constituindo a metodologia usada.

4.2.2. MODELO ESTRUTURAL

Neste trabalho, para realizar a análise estrutural de pavimentos, considerou-se o *Modelo Axissimétrico*.

A aplicação de modelos axissimétricos destina-se a estruturas de pavimento com geometria simétrica em relação a um eixo de revolução. O carregamento deve ser também simétrico em relação ao referido eixo de simetria, implicando que a área na qual a carga é descarregada seja circular ou anelar.

Dada a existência de um eixo de revolução, os problemas axissimétricos podem ser definidos em coordenadas cilíndricas, como se indica na Figura 11.

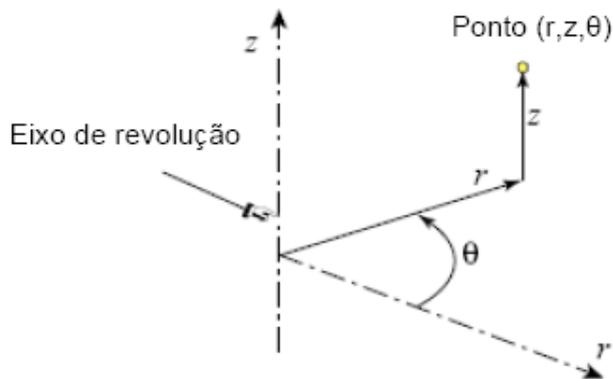


Figura 11 – Coordenadas cilíndricas

A capacidade do modelo axissimétrico reduzir um modelo complexo de três-dimensões (mais realista) num modelo a duas dimensões confere-lhe uma simplicidade que faz dele um dos modelos atualmente mais usado para dimensionamento de pavimentos.

Note-se que, os programas de cálculo automático usados neste trabalho, *ALIZE* e *ELSYM 5*, consideram o modelo estrutural axissimétrico no dimensionamento de pavimentos.

Os pavimentos podem ainda ser representados por modelos tridimensionais que permitem a consideração de:

- carregamentos não simétricos;
- carregamentos devidos à ação de rodados duplos;
- área de contacto pneu-pavimento de forma retangular (mais próxima da forma elíptica real do que a área circular geralmente adotada).

Ressalta referir que os modelos tridimensionais apenas se aplicam a modelos de cálculo de elementos finitos ou de elementos discretos. Os modelos axissimétricos podem ser usados em qualquer dos três modelos de cálculo descritos.

4.2.3. MODELO MATERIAL

Tanto para os materiais betuminosos como para os materiais granulares e solo de fundação considerou-se, neste trabalho, porque:

- a utilização do método de cálculo, baseado na teoria de Burmister, condiciona a escolha do modelo material para os constituintes do pavimento;
- o dimensionamento proposto pelo MACOPAV considera que o comportamento dos materiais de pavimentação é caracterizado pela elasticidade linear e como, neste trabalho, se pretende validar as estruturas de pavimento propostas por este manual não faria sentido considerar diferentes modelos materiais.

Relativamente aos materiais betuminosos, note-se que, nas condições habituais de serviço, estes apresentam comportamento altamente dependente da temperatura e do tempo de aplicação das cargas, comportamento que é descrito pelo modelo elástico linear. No entanto, dado que, para fins de dimensionamento é o modelo elástico-linear que usualmente se adota, para colmatar esta simplificação procura-se adotar diferentes valores para o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson, variá-

veis em função das condições de temperatura e tempo de aplicação das cargas. Porém, neste estudo, este aspeto não foi tido em conta, dado que o MACOPAV também não o considera. Assim, para se estar em concordância com os pressupostos do MACOPAV, assumiu-se, como já referido, um valor constante para o módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson dos materiais que compõem as camadas betuminosas, 4000 MPa e 0,35 respetivamente.

Também a modelação dos materiais granulares e solos de fundação como camadas homogéneas, contínuas, isotrópicas e elástico-lineares corresponde a uma simplificação da realidade. Contudo, nos modelos de previsão do comportamento dos pavimentos comumente usados, bem como no contexto do Manual em análise é assim que estas camadas são idealizadas.

4.2.4. MODELO DE CARREGAMENTO

Neste trabalho considerou-se para o cálculo estrutural uma formulação estática de distribuição uniforme no tempo.

A carga em causa refere-se à ação induzida pelos pneus no pavimento, sendo a área de carregamento definida pela área de contacto pneu pavimento, que se adota circular.

Considera-se também que a magnitude da componente vertical da carga é igual à pressão de enchimento dos pneus.

Uma vez que é feita a análise para a passagem de veículos pesados homogeneizados em número de eixos padrão quer de 80 como de 130 kN, os dados relativos à área de contacto pneu-pavimento e pressão de enchimento dos pneus são variáveis, tal como se indica no Quadro 27.

Quadro 27 – Síntese dos dados relativos ao carregamento

	Eixo padrão (kN)	
	80	130
Raio (cm)	10,50	12,50
Área de contacto (cm ²)	346,36	490,87
Pressão de contacto pneu-pavimento (MPa)	6,00	6,62

4.2.5. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO PARA ANÁLISE DA RESPOSTA ESTRUTURAL

Para estudar a resposta estrutural das secções de pavimento flexíveis catalogadas no MACOPAV, recorreu-se a dois programas de cálculo automático, como já referido, os programas *ALIZE* e o *ELSYM 5*. Ambos são de fácil utilização e de cálculo rápido.

Ambos os programas se baseiam, como anteriormente referido, no modelo de Burmister assumindo a estrutura do pavimento como um conjunto de camadas horizontais de espessura uniforme, largura infinita nessa direção e compostas por material homogéneo, isotrópico e com comportamento elástico-linear de acordo com a Lei de Hooke.

As camadas do pavimento são caracterizadas pela sua espessura, módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson.

Estes programas consideram um equilíbrio axissimétrico na análise estrutural, fazem a transformação de coordenadas cilíndricas para coordenadas retangulares e, uma vez que tratam de modelos lineares, fazem a sobreposição dos efeitos de várias cargas.

Por serem programas desenvolvidos por entidades diferentes (*ALIZE* – LCPC e *ELSYM 5* – Universidade de Berkeley), as unidades em que trabalham são diferentes. No Quadro 28 sumariza-se as unidades usadas em cada um dos programas bem como a respetiva conversão.

Quadro 28 – Síntese comparativa das unidades usadas pelos programas de cálculo automático

Software	Unidades		Conversão de unidades
	Distância e comprimento (r, L, e)	Pressão e tensão (p, N, E, σ)	
ALIZE	cm	bar	1 inch = 2,5400 cm 1 psi = 0,0689 bar
ELSYM 5	inch	psi (pound per square inch)	

onde:

r – raio da carga

L – distância entre o centro das rodas gêmeas dos extremos do eixo padrão

e – espessura das camadas de pavimento

p – pressão de contacto pneu-pavimento ou pressão de enchimento dos pneus

N – carga que cada roda induz no pavimento

E – módulo de deformabilidade dos materiais consituíntes das camadas dos pavimentos

σ – tensão

Os dados a introduzir nos programas de cálculo referem-se às propriedades das camadas (espessura, coeficiente de Poisson e módulo de deformabilidade), ao carregamento e aos pontos/coordenadas onde se pretende obter a avaliação da resposta estrutural (este ponto apenas no caso do *ELSYM 5*)

Em ambos os programas, o output consiste numa tabela sumário com as respostas calculadas em cada ponto pré-definido, ou pelo utilizador (*ELSYM 5*) ou pelo próprio programa (*ALIZE*). Os resultados obtidos referem-se a tensões (normais, principais e de corte), extensões e deslocamentos. Ambos os programas devolvem estes resultados nas direções ortogonais xx, yy e zz. A resposta estrutural é avaliada na base das camadas betuminosas e no topo do solo de fundação, como se indicou na Figura 1.

4.3. VALIDAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS DO MANUAL

4.3.1. VALIDAÇÃO DOS PROGRAMAS DE CÁLCULO

Nesta secção do trabalho modelaram-se as três estruturas de pavimento flexíveis, catalogadas pelo MACOPAV, estruturas já apresentadas no Capítulo 2 (Figura 4).

A análise da resposta estrutural centrou-se apenas nos resultados obtidos com o *ALIZE* uma vez que, como foi o software lecionado no 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil no ramo de especialização em Vias de Comunicação, havia um maior conhecimento e domínio desta ferramenta informática, o que levou à sua preferência.

No entanto, para validar-se os resultados obtidos com o *ALIZE*, modelaram-se três das estruturas de pavimento flexíveis em estudo com o *ELSYM 5* e compararam-se os resultados obtidos com os dois softwares.

Tal como estudos anteriores comprovaram [15], a resposta estrutural de uma estrutura de pavimento obtida por meio de programas de cálculo automático, difere de programa para programa, isto é, depende do método de cálculo e modelo estrutural em que cada programa se baseia. Com base no mesmo estudo [15], os autores constataram que modelando uma estrutura de pavimento com programas baseados nos mesmos princípios de modelação (método de cálculo e modelo estrutural), bem como considerando as mesmas condições de interface entre camadas, as respostas da estrutura, nomeadamente as extensões, obtêm-se valores aproximados mas não necessariamente coincidentes.

Razões que se prendem com a definição dos pontos de aplicação das cargas ou com a definição dos pontos onde se pretende obter a resposta estrutural, bem como questões relacionadas com a complexidade das expressões de cálculo inerentes a cada programa, podem também justificar diferenças nos resultados obtidos com diferentes modelos de cálculo.

Tendo presentes as conclusões do referido estudo [15] analisaram-se os resultados da modelação realizada com o *ALIZE* e o *ELSYM 5* para a solicitação de uma roda simples de raio 12,5 cm, a qual induz uma pressão pneu-pavimento de 0,662 MPa correspondente a um eixo de 130 kN. Note-se que a consideração de roda simples (Figura 12) é diferente de eixo-padrão, uma vez que o conceito de eixo-padrão remete para a existência de duas rodas gémeas em cada uma das extremidades do eixo.

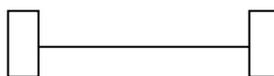


Figura 12 – Roda simples

As secções de pavimento flexíveis modeladas referem-se às estruturas I, II e III, propostas no MACOPAV para a classe de tráfego T_3 ($TMDA_p$ entre 500 e 800). As interfaces entre camadas subjacentes foram consideradas coladas.

No Quadro 29 apresentam-se os resultados obtidos para as três estruturas com os dois programas de cálculo automático.

Quadro 29 – Resultados obtidos para as três estruturas considerando diferentes programas de cálculo automático para a solicitação de uma roda simples

camada	valor	Estrutura 1		Estrutura 2		Estrutura 3	
		software					
		ALIZE	ELSYM 5	ALIZE	ELSYM 5	ALIZE	ELSYM 5
base da camada	$\varepsilon_{xx} (10^{-6})$	93,00	92,93	86,10	85,91	42,50	43,50
betuminosa	σ_{xx} (kPa)	548,00	548,130	488,00	487,39	160,00	166,78
topo do solo	$\varepsilon_{zz} (10^{-6})$	-191,00	-187,60	-137,00	-133,30	-167,00	-161,00
de fundação	σ_{zz} (kPa)	-19,60	-19,22	-13,30	-12,97	-17,40	-16,75

Analisando as extensões ε_{xx} e ε_{zz} obtidas para a base das camadas betuminosas e para o topo dos solos de fundação respetivamente, verifica-se que a diferença entre os resultados obtidos com um e outro programa é bastante reduzida. Com exceção da estrutura III, as extensões quer em xx como em zz avaliadas com o *ALIZE* são superiores às obtidas com o *ELSYM 5*. O erro médio associado aos resultados em ε_{xx} é de 0,88% e para os resultados em ε_{zz} é de 2,69% (em relação aos resultados do *ALIZE*). Estas diferenças reduzidas podem dever-se ao facto de os programas trabalharem com unidades diferentes.

Desta análise pode concluir-se que, para o modelo de carga analisado, referente à consideração de roda simples, os resultados em extensões obtidos com os dois programas são semelhantes. Uma vez que o comportamento dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos em análise é considerado elástico-linear, então, por aplicação do princípio da sobreposição de efeitos, os resultados obtidos com os dois softwares serão também idênticos no caso de solicitação correspondente a um eixo padrão (duas cargas relativas às rodas gêmeas na extremidade dos rodados)

Note-se que não é objetivo do presente trabalho comparar resultados entre programas de cálculo nem inferir sobre a influência dos métodos de cálculo na análise estrutural de pavimentos. Assim, a análise estrutural que se segue é feita com recurso apenas ao programa *ALIZE*, pelas razões anteriormente citadas.

4.3.2. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS CATALOGADOS NO MACOPAV

Nesta secção, com recurso ao software *ALIZE*, modelaram-se as estruturas de pavimento flexíveis catalogadas no Manual em análise e que se apresentaram na Figura 4 do Capítulo 2 deste trabalho. As características mecânicas e geométricas dos materiais constituintes das camadas destas estruturas são as que constam no referido capítulo, tendo sido já indicadas no Quadro 10, as relativas aos materiais granulares, sendo que as restantes se encontram no corpo do texto.

O cálculo destas estruturas foi realizado para a solicitação do eixo padrão de 80 kN, tal como previsto pelo MACOPAV para os pavimentos flexíveis. Adicionalmente, foi feita a modelação das mesmas estruturas para a solicitação do eixo padrão de 130 kN.

Relativamente às condições de interface entre camadas adjacentes consideraram-se camadas ligadas entre si, isto é, assumiu-se aderência total entre camadas.

Os Quadros 30 a 32 apresentam os resultados obtidos em extensões de tração e compressão (respetivamente para a base das camadas betuminosas e para o topo do solo de fundação) para as estruturas de pavimento I a III tendo em conta as classes de tráfego definidas pelo Manual e solicitação relativa a um eixo padrão de 80 kN.

Quadro 30 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura I prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 80 kN

		Estrutura I					
Camada	Valor	Classes tráfego					
		T ₆	T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁
Base da camada betuminosa	$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	215	141	117	98,6	88,4	79,6
Topo do solo de fundação	$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	-490	-312	-257	-216	-193	-174

Quadro 31 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura II prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 80 kN

		Estrutura II					
Camada	Valor	Classes tráfego					
		T ₆	T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁
Base da camada betuminosa	$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	176	120	103	87,7	79,3	71,9
Topo do solo de fundação	$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	-308	-220	-189	-163	-149	-136

Quadro 32 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura III prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 80 kN

		Estrutura III					
Camada	Valor	Classes tráfego					
		T ₆	T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁
Base da camada betuminosa	$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	42	45,6	42,8	39	36,2	34,3
Topo do solo de fundação	$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	-307	-250	-206	-179	-158	-145

Analisando os resultados obtidos para as estruturas I e II (Quadros 30 e 31) verifica-se que:

- 1) as extensões de tração e as de compressão diminuem à medida que aumenta o $TMDA_p$, ou seja, as extensões diminuem de T_6 para T_1 , dado que a espessura das camadas betuminosas aumenta com o aumento de tráfego esperado. Ao aumento do $TMDA_p$ (de T_6 para T_1) corresponde o aumento da espessura das camadas betuminosas, implica que aumenta a capacidade de suporte destas camadas e diminui o dano associado. Nestas condições, para a mesma solicitação as extensões admissíveis são menores;
- 2) a geometria da estrutura II confere-lhe maior resistência uma vez que apresenta uma espessura em material granular duas vezes superior à espessura da mesma camada da estrutura I.

Analisando os resultados obtidos com a estrutura III (Quadro 32), verifica-se uma evolução das extensões de tração na base das camadas betuminosas, diferente da registada para as outras estruturas.

Para a camada betuminosa de menor espessura (correspondente à classe T_6) a extensão de tração é menor do que a medida para a camada de maior espessura (correspondente à classe T_1). Além disso, de T_6 para T_3 há um crescimento das extensões em ϵ_{xx} e a partir de T_3 estes valores diminuem até T_1 .

De seguida, apresenta-se, nos Quadros 33 a 35, os resultados da modelação das três estruturas I, II e III, considerando a solicitação do eixo padrão de 130 kN.

Quadro 33 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura I prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 130 kN

Estrutura I							
Camada	Valor	Classes tráfego					
		T_6	T_5	T_4	T_3	T_2	T_1
Base da camada betuminosa	$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	282	191	162	138	125	113
Topo do solo de fundação	$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	-690	-453	-376	-318	-286	-259

Quadro 34 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura II prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 130 kN

Estrutura II							
Camada	Valor	Classes tráfego					
		T_6	T_5	T_4	T_3	T_2	T_1
Base da camada betuminosa	$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	220	161	137	120	110	100
Topo do solo de fundação	$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	-450	-328	-282	-245	-224	-205

Quadro 35 – Resultados obtidos para a modelação da Estrutura II prevista no MACOPAV sob a ação de um eixo padrão de 130 kN

		Estrutura III					
Camada	Valor	Classes tráfego					
		T ₆	T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁
Base da camada betuminosa	$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	41,1	53,3	54,9	52,1	48,4	46,2
Topo do solo de fundação	$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	-427	-352	-294	-259	-229	-212

As conclusões a retirar da análise dos Quadros 33 a 35 são análogas às citadas para a consideração da sollicitação do eixo padrão de 80 kN.

No entanto, comparando para a mesma estrutura o nível de extensões registadas para a consideração do eixo padrão de 80 kN com o eixo padrão de 130 kN, constata-se que as extensões associadas ao eixo de 130 kN apresentam valores superiores. Não é de estranhar este facto, uma vez que, ao impor uma sollicitação de magnitude superior, a resposta das estruturas (neste caso, extensões) tem de ser maior.

4.3.3. NÚMERO ACUMULADO DE EIXOS PADRÃO ADMISSÍVEIS PARA AS ESTRUTURAS MODELADAS

Com base nos resultados da modelação calculou-se o número acumulado de eixos padrão, N_{adm} , que cada estrutura I, II e III admite de acordo com as suas características geométricas e materiais.

Tal como proposto pelo MACOPAV, consideram-se os critérios de ruína (fadiga e deformação permanente) da Shell para obtiver-se o número acumulado de eixos padrão admissíveis, considerando-se $K_t = 3,5 \times 10^{-3}$ e $K_s = 1,8 \times 10^{-2}$.

Relativamente ao critério de fadiga, por aplicação da expressão (2.9) obteve-se o número acumulado de eixos padrão admissíveis, N_{at} , associado à extensão máxima de tração (ϵ_t ou ϵ_{xx}).

Aplicando a expressão (2.10), relativa à deformação permanente das camadas das camadas granulares, obteve-se o número acumulado de eixos padrão admissíveis, N_{dp} , associados à extensão máxima de compressão (ϵ_{dp} ou ϵ_{zz}).

Os Quadros 36 e 37 apresentam os resultados obtidos para a consideração do eixo padrão de 80 kN e para a consideração do eixo padrão de 130 kN, respetivamente. Os valores a negrito indicam o critério condicionante em cada classe de tráfego e para cada estrutura.

Quadro 36 – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissíveis para as estruturas de pavimento flexíveis catalogadas no MACOPAV

Estr.	Crit. ruína	Classes de tráfego					
		T ₆	T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁
I	(*)	1,3 × 10⁶	10,8 × 10⁶	27,5 × 10 ⁶	64,8 × 10 ⁶	112,0 × 10 ⁶	189,2 × 10 ⁶
	(**)	1,8 × 10 ⁶	11,0 × 10 ⁶	24,0 × 10⁶	48,2 × 10⁶	75,6 × 10⁶	114,5 × 10⁶
II	(*)	3,5 × 10⁶	24,3 × 10⁶	52,1 × 10⁶	116,5 × 10⁶	192,8 × 10⁶	314,6 × 10 ⁶
	(**)	11,6 × 10 ⁶	44,8 × 10 ⁶	82,2 × 10 ⁶	148,7 × 10 ⁶	212,9 × 10 ⁶	306,8 × 10⁶
III	(*)	4,6 × 10 ⁹	3,0 × 10 ⁹	4,2 × 10 ⁹	6,7 × 10 ⁹	9,7 × 10 ⁹	12,7 × 10 ⁹
	(**)	11,8 × 10⁶	26,8 × 10⁶	58,2 × 10⁶	102,2 × 10⁶	168,4 × 10⁶	237,4 × 10⁶

(*) critério de fadiga

(**) critério de deformação permanente

Quadro 37 – Número acumulado de eixos padrão de 130 kN admissíveis para as estruturas de pavimento flexíveis catalogadas no MACOPAV

Estr.	Crit. ruína	Classes de tráfego					
		T ₆	T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁
I	(*)	3,3 × 10⁵	2,3 × 10⁶	5,4 × 10 ⁶	12,0 × 10 ⁶	19,8 × 10 ⁶	32,8 × 10 ⁶
	(**)	4,6 × 10 ⁵	2,4 × 10 ⁶	5,2 × 10⁶	10,2 × 10⁶	15,6 × 10⁶	23,3 × 10⁶
II	(*)	1,1 × 10⁶	5,5 × 10⁶	12,5 × 10⁶	24,3 × 10⁶	37,5 × 10⁶	60,4 × 10 ⁶
	(**)	2,5 × 10 ⁶	9,0 × 10 ⁶	16,5 × 10 ⁶	29,1 × 10 ⁶	41,6 × 10 ⁶	59,4 × 10⁶
III	(*)	5,1 × 10 ⁹	1,4 × 10 ⁹	1,2 × 10 ⁹	1,5 × 10 ⁹	2,2 × 10 ⁹	2,8 × 10 ⁹
	(**)	3,1 × 10⁶	6,8 × 10⁶	14,0 × 10⁶	23,3 × 10⁶	38,1 × 10⁶	51,9 × 10⁶

Nota: os valores a negrito indicam o critério condicionante em cada classe de tráfego e para cada estrutura

Pela análise dos Quadros 36 e 37, constata-se que:

- 1) para as estruturas I e II, à medida que se intensifica o tráfego (progressão de T₆ para T₁) admite-se um maior número acumulado de eixos padrão quer seja de 80 kN quer seja de 130 kN;
- 2) para a estrutura I, nas classes de tráfego menos intensas (T₆ e T₅) o critério de ruína condicionante é o critério de fadiga associado às camadas betuminosas, invertendo-se o cenário da classe T₄ em diante onde prevalece o critério de deformação permanente;
- 3) para a estrutura II, à exceção da secção de pavimento correspondente à classe de tráfego mais intensa (T₁), em todas as classes é o critério de fadiga que determina o dimensionamento.
- 4) na estrutura III o critério de ruína condicionante é o critério de deformação permanente.

Relativamente ao ponto 1), como as extensões e o número acumulado de eixos padrão admissíveis variam na razão inversa de acordo com os critérios de ruína da Shell (expressões (2.9) e (2.10)), à medida que as extensões medidas diminuem o número de cargas solicitantes que a estrutura admite aumenta.

No que se refere ao ponto 2), as primeiras classes de tráfego (T_6 e T_5) são dominadas pelo critério de fadiga, podendo isto associar-se à maior espessura das camadas granulares relativamente às betuminosas. As secções de pavimento correspondentes a estas classes de tráfego apresentam maior capacidade de suporte das camadas granulares comparativamente com as camadas betuminosas. À medida que aumenta a espessura das camadas betuminosas a situação inverte-se, passando a verificar-se $N_{dp} < N_{at}$ com o critério de deformação permanente a controlar o dimensionamento.

O ponto 3) é justificável com facto de a estrutura II apresentar camadas granulares de elevada espessura, o que incrementa consideravelmente o nível de tensão que admite sem prejuízo de ruína. Daqui decorre o elevado número acumulado de eixos padrão que admite, ficando a integridade da estrutura de pavimento limitada pela fadiga das camadas betuminosas.

Em relação ao ponto 4), importa referir que as camadas betuminosas e solo-cimento apresentam uma elevada resistência com o módulo de deformabilidade da camada solo-cimento a merecer especial destaque (2000 MPa). Face a estas características é o critério de deformação permanente associado às camadas de solos que condiciona o comportamento mecânico da estrutura, o que está de acordo com os resultados de ϵ_{xx} .

Como esperado, o número acumulado de eixos padrão que as estruturas analisadas podem suportar é maior para a solicitação de eixos padrão de 80 kN. Naturalmente, para uma mesma estrutura, quando solicitada por uma carga maior, menor será o número de passagens dessa mesma carga que irá suportar.

4.3.4 DANO

Nesta secção é feita a validação estrutural das estruturas de pavimento flexíveis catalogadas no MACOPAV, através da percentagem de dano.

A quantificação da percentagem de dano é feita com base no número acumulado de eixos padrão admissíveis, N_{adm} , calculados na secção anterior, e no número acumulado de eixos padrão previstos, N_p ou N_{dim} , determinados por dados de tráfego no Capítulo 3 considerando diferentes níveis de agressividade de veículos pesados.

Tendo presente que o dano é uma medida da percentagem de desgaste do pavimento ao fim da sua vida útil, um pavimento economicamente dimensionado deverá ter o seu dano situado entre 80% e 100%.

Para cada uma das estruturas I, II e III analisam-se sete situações de agressividade de tráfego (N_p ou N_{dim}) correspondentes a:

- 1) fator de agressividade proposto pelo MACOPAV (no caso do eixo padrão de 80 kN);
- 2 e 3) fatores de agressividade mínimo e máximo associados à configuração de carga típica por eixo;
- 4 e 5) fatores de agressividade mínimo e máximo associados à configuração de carga por eixo próxima do limite legal;
- 6 e 7) fatores de agressividade mínimo e máximo associados à configuração de carga máxima por eixo.

Como já referido, o dano calculado será dado pela razão dos referidos dados de tráfego previstos (Quadros 3.7 e 3.8) pelos dados de tráfego associados ao critério de ruína condicionante em cada estrutura e para cada classe de tráfego (valores a negrito nos Quadros 4.10 e 4.11).

Nos Quadros 38 a 40 apresenta-se a verificação do dano (%) para as estruturas de pavimento flexíveis em análise, considerando a solicitação do eixo padrão de 80 kN.

Para tornar a leitura dos quadros mais elucidativa foi usada a *formatação condicional*, onde é feita a seguinte correspondência:

-  secção de pavimento subdimensionada
-  secção de pavimento sobredimensionada
-  secção de pavimento economicamente dimensionada

Quadro 38 – Dano da estrutura I para a solicitação do eixo padrão de 80 kN (%)

Classes de tráfego	TMDA _p	MACOPAV	Carga típica		Carga limite legal		Carga máxima	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
T ₆	50	152	60	160	152	532	570	1823
	150	152	182	471	441	1596	1747	5318
T ₅	150	74	22	57	53	194	212	645
	300	74	44	120	111	387	415	1290
T ₄	300	83	22	58	54	195	208	665
	500	83	36	96	91	324	345	1080
T ₃	500	83	18	48	46	162	172	539
	800	83	29	77	71	270	290	850
T ₂	800	93	21	54	50	185	198	608
	1200	93	32	81	75	278	304	912
T ₁	1200	87	21	53	50	183	201	602
	2000	87	34	96	83	306	323	1048

Quadro 39 – Dano da estrutura II para a solicitação do eixo padrão de 80 kN (%)

Classes de tráfego	TMDA _p	MACOPAV	Carga típica		Carga limite legal		Carga máxima	
			Min	Max	Min	Max	Max	Min
T ₆	50	56	22	59	56	196	209	670
	150	56	67	173	162	587	642	1955
T ₅	150	33	10	26	24	86	95	288
	300	33	20	53	49	173	185	576
T ₄	300	38	10	27	25	90	96	307
	500	38	17	44	42	150	159	498
T ₃	500	34	7	20	19	67	71	223
	800	34	12	32	29	112	120	352
T ₂	800	36	8	21	20	73	78	239
	1200	36	12	32	30	109	119	358
T ₁	1200	33	8	20	19	68	75	225
	2000	33	13	36	31	114	121	391

Quadro 40 – Dano da estrutura III para a solicitação do eixo padrão de 80 kN (%)

Classes de tráfego	TMDA _p	MACOPAV	Carga típica		Carga limite legal		Carga máxima	
			Min	Max	Min	Max	Max	Min
T ₆	50	16,924	6,685	17,770	16,924	59,233	63,464	203,084
	150	16,924	20,308	52,463	49,079	177,698	194,622	592,327
T ₅	150	29,769	8,931	23,071	21,582	78,143	85,585	260,476
	300	29,769	17,861	48,374	44,653	156,286	167,449	520,952
T ₄	300	34,309	9,092	24,016	22,301	80,626	85,773	274,473
	500	34,309	14,924	39,455	37,740	133,805	142,383	446,018
T ₃	500	39,118	8,508	22,493	21,515	76,281	81,171	254,270
	800	39,118	13,691	36,185	33,251	127,135	136,915	400,965
T ₂	800	41,556	9,499	24,34	22,559	83,113	89,049	273,084
	1200	41,556	14,248	36,213	33,839	124,669	136,542	409,626
T ₁	1200	42,110	10,106	25,687	24,003	88,430	96,852	290,557
	2000	42,110	16,423	46,321	40,004	147,384	155,806	505,316

Da análise dos Quadros 38 a 40, no que se refere à validação das propostas de estruturas de pavimento flexíveis do MACOPAV, pode-se concluir:

- 1) as secções de pavimento da estrutura I, definidas para as classes com maior TMDA_p definidas pelo MACOPAV (classes T₄ a T₁), encontram-se economicamente dimensionadas, ou seja, a espessura proposta conduz a um valor de dano entre 80 e 100%;
- 2) a espessura adotada para a estrutura I, proposta para a classe de tráfego mais reduzido, é insuficiente face ao tráfego previsto pelo MACOPAV;
- 3) as secções de pavimento propostas para as estruturas II e III apresentam-se sobredimensionadas para o tráfego previsto pelo MACOPAV, o que pode representar uma margem de segurança em termos de dimensionamento.

Relembra-se que, no estudo apresentado na secção 3 desta tese, para cada uma das três configurações de carga por eixo de pesados (carga típica, carga próximo do limite legal e carga máxima), foram considerados dois cenários extremos:

- 1) 100% dos veículos pesados são da categoria que induz menor agressividade no pavimento;
- 2) 100% dos veículos pesados pertencem à categoria que induz maior agressividade nos pavimentos.

Como seria de esperar, ao variar os coeficientes de agressividade relativamente aos propostos pelo Manual, os resultados obtidos para a percentagem de dano são diferentes, como se verifica pela análise dos Quadros 38 a 43. Assim, as estruturas tendem para o subdimensionamento quando $\alpha_{\text{manual}} > \alpha_{\text{calculado}}$ e, para o sobredimensionamento quando $\alpha_{\text{manual}} < \alpha_{\text{calculado}}$.

Assim, admitindo que todos os veículos pesados circulam com níveis de carga por eixo próximo do limite legal ou da carga máxima, as estruturas de pavimento flexíveis previstas no Manual não têm capacidade de suporte, verificando-se, nestes casos, a sua ruína.

Salienta-se que, na situação extrema de configuração de carga máxima por eixo, correspondente ao maior fator de agressividade, o dano na estrutura de pavimento chega a assumir valores da ordem de 1000 %, no caso da estrutura I. Este é um cenário claramente irreal e que conduziria ao dimensionamento de estruturas de pavimento com espessuras antieconómicas e exageradas para aquela que é a média da realidade. No entanto, considerou-se interessante definir ordens de grandeza para cenários de carga que, segundo o estudo do IC [7] podem consistir em 2 % da distribuição de tráfego numa estrada.

A título de proposta, apresentam-se nos Quadros 41 a 43 a verificação do dano para as estruturas em estudo no caso de eixo padrão de 130 kN. Note-se que o MACOPAV não propõe fatores de agressividade relativos ao eixo padrão de 130 kN na abordagem aos pavimentos flexíveis, apenas o faz para os pavimentos rígidos. Nestes Quadro, os coeficientes de agressividade para o eixo padrão de 130 kN com a designação MACOPAV foram obtidos, como se mostrou no Capítulo 3, por conversão dos resultados existentes para o eixo de 80 kN (expressão (3.7)).

Quadro 41 – Dano da estrutura I para a solicitação do eixo padrão de 130 kN (%)

Classes de tráfego	TMDA _p	MACOPAV	Carga típica		Carga limite legal		Carga máxima	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
T ₆	50	44	44	88	88	292	324	1003
	150	133	133	262	262	885	956	3244
T ₅	150	25	19	37	37	126	136	462
	300	50	37	76	76	248	272	883
T ₄	300	38	19	38	38	133	137	438
	500	63	32	76	76	209	228	704
T ₃	500	32	17	39	39	107	117	360
	800	52	26	58	58	175	195	584
T ₂	800	43	19	38	38	127	140	421
	1200	70	32	57	57	191	204	631
T ₁	1200	51	21	39	39	129	137	424
	2000	86	34	64	64	214	231	729

Quadro 42 – Dano da estrutura II para a solicitação do eixo padrão de 130 kN (%)

Classes de tráfego	TMDA _p	MACOPAV	Carga típica		Carga limite legal		Carga máxima	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
T ₆	50	13	13	26	26	84	94	290
	150	38	38	76	76	256	276	938
T ₅	150	11	8	16	16	54	58	197
	300	21	16	32	32	106	116	376
T ₄	300	16	8	16	16	56	57	184
	500	26	14	32	32	88	96	295
T ₃	500	14	7	16	16	45	49	152
	800	22	11	25	25	74	82	247
T ₂	800	18	8	16	16	53	59	176
	1200	29	13	24	24	80	85	264
T ₁	1200	20	8	15	15	50	54	167
	2000	34	13	25	25	84	91	286

Quadro 43 – Dano da estrutura III para a solicitação do eixo padrão de 130 kN (%)

Classes de tráfego	TMDA _p	MACOPAV	Carga típica		Carga limite legal		Carga máxima	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
T ₆	50	4,75	4,75	9,5	9,5	31,351	34,835	107,671
	150	14,251	14,251	28,185	28,185	95,004	102,605	348,349
T ₅	150	8,628	6,581	13,016	13,016	43,873	47,383	160,869
	300	17,549	13,016	26,324	26,324	86,284	94,767	307,114
T ₄	300	14,234	7,117	14,234	14,234	49,819	51,243	163,692
	500	23,486	12,099	28,468	28,468	78,287	85,404	263,33
T ₃	500	14,146	7,287	17,146	17,146	47,152	51,439	158,603
	800	22,719	11,574	25,719	25,719	77,158	85,731	257,194
T ₂	800	17,814	7,859	15,718	15,718	52,394	57,633	172,9
	1200	28,817	13,099	23,577	23,577	78,591	83,83	259,351
T ₁	1200	23,091	9,621	17,318	17,318	57,726	61,575	190,497
	2000	38,484	15,394	28,863	28,863	96,211	103,908	327,116

A análise dos Quadros 41 a 43 mostra que, para os coeficientes de agressividade relativos ao eixo padrão de 130 kN (valores obtidos com base nos considerados pelo MACOPAV), as estruturas propostas pelo Manual, apresentam uma percentagem de dano inferior à verificada anteriormente considerando a solicitação do eixo padrão de 80 kN.

Para as configurações de carga típica por eixo e carga próximo do limite legal, verifica-se que, para as três estruturas, as estruturas de pavimento estão sobredimensionadas com a exceção de três casos.

Tal como verificado para o eixo padrão de 80 kN, o dano, obtido considerando distribuição de tráfego relativa a carga máxima, é inadmissível para o coeficiente de agressividade máximo.

Com base nos resultados, pode-se concluir-se que, para incluir o eixo padrão de 130 kN na metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis, será necessário ajustar as espessuras das estruturas catalogadas no sentido de promover o dimensionamento económico, evitando desperdícios.

Ainda analisando os Quadros 41 a 43, de acordo com o critério de ruína condicionante em cada estrutura de pavimento I, II e III, as alterações de espessuras a efetuar poderiam ser:

- na estrutura I, aumento da espessura da camada granular no caso de subdimensionamento verificado para a condição de carga máxima e, eventual diminuição da espessura desta camada nos casos de sobredimensionamento;
- na estrutura II, aumento da espessura das camadas betuminosas subdimensionadas na condição de fatores de agressividade muito severos (carga máxima). Diminuição da espessura das mesmas camadas nas situações de sobredimensionamento, verificado essencialmente para a condição de carga próximo do limite legal;
- na estrutura III, diminuição da espessura da camada de solo cimento na generalidade dos casos, à exceção da consideração de agressividade do tráfego igual à máxima.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do comportamento estrutural de pavimentos através de softwares baseados na *Teoria Multicamada* é uma opção válida, simples e muito habitual nos projetos de dimensionamento de pavimento reais.

Os resultados da modelação das estruturas de pavimento flexíveis do MACOPAV, com recurso ao software *ALIZE*, as extensões ϵ_{xx} e ϵ_{zz} , permitiram obter o número máximo admissível de passagens de eixos padrão quer de 80 kN quer de 130 kN para o período de dimensionamento previsto, 20 anos.

Para a estrutura III, verificou-se uma evolução das extensões ϵ_{xx} contrária à tendência prevista: as extensões são mínimas para a camada betuminosa de menor espessura (correspondente à menor classe de tráfego T_6), ao invés deste cenário se registar para a estrutura com maior espessura betuminosa. Ainda que não tenha sido possível aferir a razão por detrás deste resultado, possivelmente associado a erros numéricos intrínsecos ao programa de cálculo, verificou-se que, estes resultados não comprometeram o dimensionamento. Para a estrutura III, o critério de ruína condicionante para o dimensionamento é o que se associa à deformação permanente das camadas granulares, não sendo influenciado pela "anormal" evolução das extensões ϵ_{xx} registadas para as camadas betuminosas.

A validação das estruturas flexíveis do MACOPAV foi feita com base na quantificação da percentagem de dano das estruturas, considerando o número máximo admissível de eixos padrão calculado nesta secção, e, o número acumulado de eixos padrão previsto para os 20 anos de vida útil obtidos para

quatro níveis de carga por eixo diferentes: carga típica, carga próximo do limite legal, carga máxima e o correspondente ao MACOPAV.

Os resultados obtidos mostraram que, para ação do eixo do eixo padrão de 80 kN:

- as estruturas II e III, para o tráfego previsto no MACOPAV, estão sobredimensionadas, representando este resultado uma margem de segurança em termos de dimensionamento;
- a estrutura I, para o tráfego previsto no MACOPAV, se encontra economicamente dimensionada para as classes de maior TMDA_p e subdimensionada para a classe de tráfego mais reduzido;
- as estruturas I, II e III do MACOPAV, não têm capacidade de suporte para níveis de carga por eixo de veículos pesados do tipo próximo do limite legal ou carga máxima.

Relativamente aos resultados obtidos para o eixo padrão de 130 kN, verificou-se que:

- para as configurações de carga típica e carga próximo do limite legal, as três estruturas de pavimento estão sobredimensionadas na sua generalidade;
- para a configuração de carga máxima e respetivos fatores de agressividade, tal como verificado para o eixo padrão de 80 kN, o dano assume valores inadmissíveis.

O MACOPAV não admite o dimensionamento de pavimentos flexíveis para o eixo padrão de 130 kN. No entanto, para o dimensionamento das estruturas I, II e III catalogadas com base neste nível de carregamento, devem ser reajustadas. Conforme o nível de agressividade prevista para a via rodoviária a dimensionar, a redefinição das espessuras das camadas deve ser efetuada de acordo com o critério de ruína condicionante.

5

PROPOSTAS PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas duas propostas (Proposta I e Proposta II) para pré-dimensionamento da espessura das camadas betuminosas de pavimentos flexíveis, tendo por base as estruturas do tipo I, II e III indicadas no MACOPAV.

O principal objetivo destas propostas de pré-dimensionamento é possibilitar a definição da espessura das camadas betuminosas de pavimentos flexíveis a partir de i) o número de eixos-padrão acumulado (na vida útil do pavimento), em vez do TMDA_p no ano zero e da consideração de uma taxa de crescimento fixa como propõe o MACOPAV; ii) percentagem de dano.

Importa referir que ambas as metodologias permitem ao utilizador pré-dimensionar as estruturas de pavimento flexíveis quer para o eixo padrão de 80 kN, quer para o de 130 kN.

A Proposta I permite fazer o pré-dimensionamento da espessura a adotar para as camadas betuminosas (e_B) em estruturas de pavimento flexível (I, II ou III a, partir de: 1) número máximo admissível de eixos padrão esperado durante a vida útil; 2) percentagem de dano; 3) tipo de eixo padrão. São apresentados, de seguida, três ábacos (I_1 , I_2 e I_3), correspondentes às estruturas I, II e III, a partir dos quais esta metodologia pode ser posta em prática. Deve referir-se que estes ábacos foram definidos, considerando como fator de agressividade os sugeridos pelo MACOPAV.

A Proposta II permite definir a espessura para as camadas betuminosas (e_B) das mesmas três estruturas tipo (I, II ou III) a partir de: 1) número máximo admissível de eixos padrão esperado durante a vida útil; 2) percentagem de dano; 3) tipo de eixo padrão; 4) fator de agressividade. Também para esta metodologia são apresentados ábacos. A cada estrutura (I a III) corresponde quatro ábacos:

- 1) dois para o dimensionamento com o eixo padrão de 80 kN e para a consideração do dano de 100% e 80% - ($II_{i, 80 \text{ kN}}$, com $i = 1$ a 3);
- 2) outros dois para o dimensionamento com o eixo padrão de 130 kN e para a consideração do dano de 100% e 80% - ($II_{i, 130 \text{ kN}}$, com $i = 4$ a 6).

Depois da descrição das duas metodologias, faz-se uma aplicação das propostas a um projeto de pavimentos.

5.2. METODOLOGIAS PROPOSTAS PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO

5.2.1 PROPOSTA I

O princípio base desta proposta é permitir a definição da espessura das camadas betuminosas (e_B) para as estruturas I, II e III, independentemente do conhecimento de dados tráfego no ano de abertura da via rodoviária de projeto fixados pelo MACOPAV, tais como o TMDA_p, a sua taxa de crescimento t e o fator de agressividade do tráfego.

Conhecendo o número máximo admissível de eixos padrão (N_{adm}), o utilizador tem que definir o tipo de eixo padrão (80 kN ou de 130 kN) para o qual pretende pré-dimensionar a espessura das camadas betuminosas.

Tendo em conta o critério de ruína condicionante nas estruturas I, II e III (Quadros 4.10 e 4.11), o dano das estruturas é avaliado, em função do número máximo admissível de eixos padrão, que depende apenas das características geométricas e mecânicas das estruturas. Quer isto dizer que, à gama de espessuras das camadas betuminosas propostas pelo MACOPAV para as estruturas I, II e III, corresponde uma banda de número máximo admissível de eixos padrão (N_{adm}), definida pelos danos de 80% e 100%, para a qual dimensionamento é económico:

- $D = 100\% > N_{adm} = N_{real}$;
- $D = 80\% > N_{adm} = 0,8 \times N_{real}$.

Note-se que esta proposta só é válida para as estruturas de pavimento flexíveis definidas pelo MACOPAV (Figura 2.5) considerando:

- 1) classe de plataforma F₃ ($E_{cálculo} = 100$ MPa);
- 2) camadas granulares com a geometria e as características mecânicas (Quadro 2.10) previstas no MACOPAV para as estruturas I, II e III (Figura 2.4);
- 3) camadas betuminosas com módulo de deformabilidade (E_b) igual a 4000 MPa e coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,35.

Na Figura 13, o organigrama apresenta, sinteticamente, o procedimento de pré-dimensionamento relativo à Proposta I.

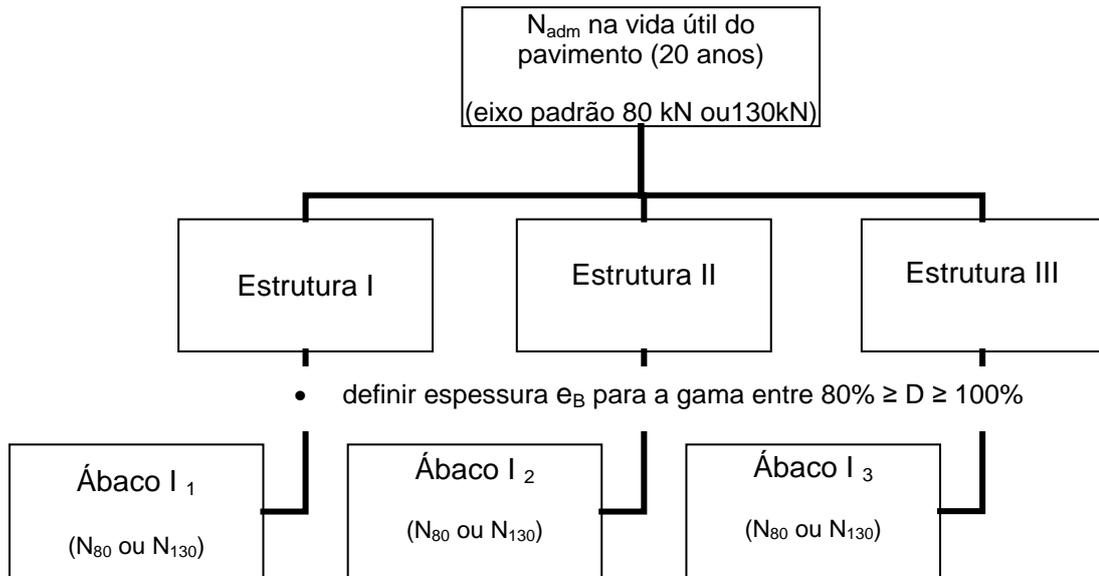
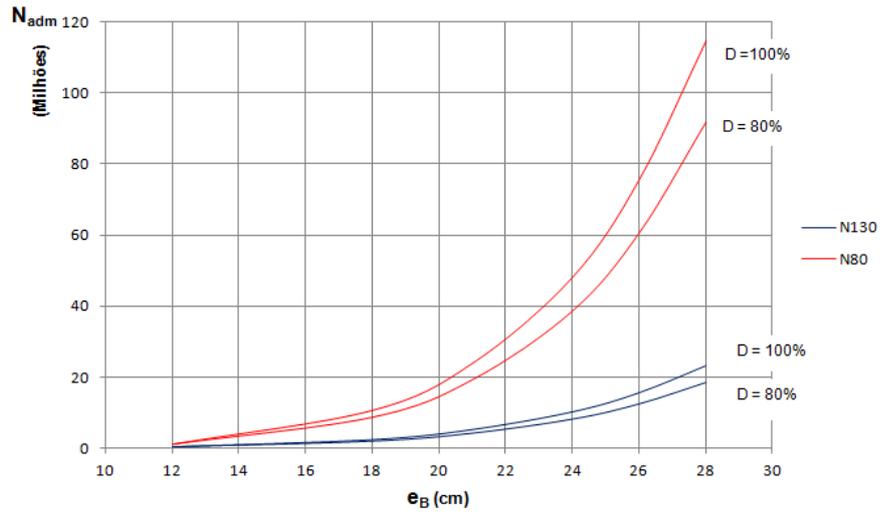
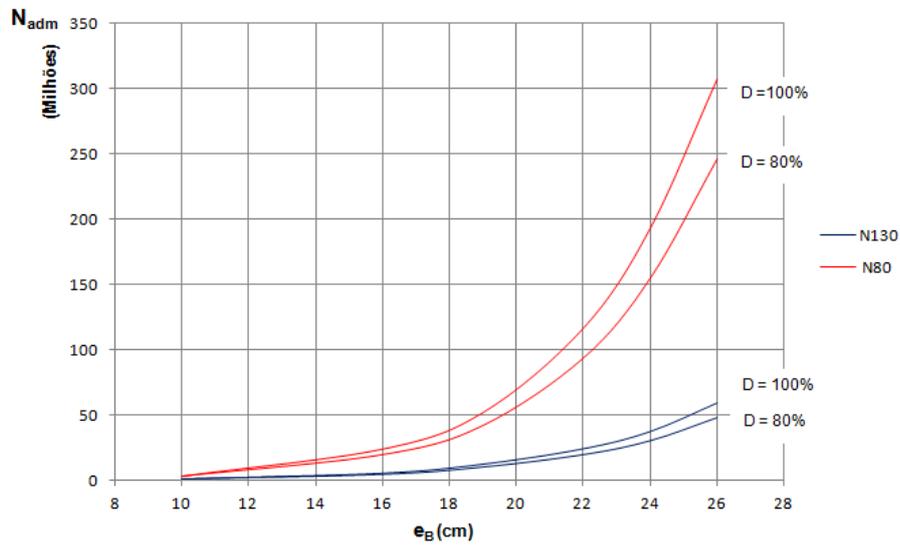


Figura 13 – Organograma sobre a metodologia de pré-dimensionamento da Proposta I

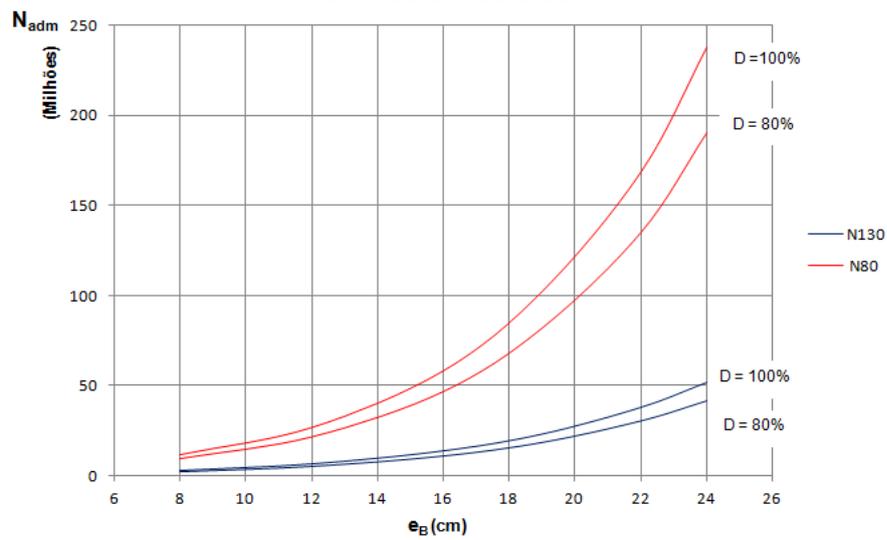
Na Figura 14, apresenta-se, para cada estrutura de pavimento flexível, o ábaco a considerar para o pré-dimensionamento da espessura total das camadas betuminosas (e_B).



a) Ábaco I₁: estrutura I



b) Ábaco I₂: estrutura II



c) Ábaco I₃: estrutura III

Figura 14 – Proposta I

A aplicação dos ábacos I_1 , I_2 e I_3 , implica que, para um determinado número acumulado admissível de eixos padrão:

- 1) a adoção de uma espessura e_B , cujo valor se situa na gama de espessuras delimitada por linhas de igual cor, corresponde a um dimensionamento económico das camadas betuminosas, cujo dano se situa entre 80 e 100 %;
- 2) a adoção de uma espessura e_B , para a qual corresponde um número acumulado de eixos padrão inferior àquele que induz um dano de 80% na estrutura de pavimento, conduz a sobre-dimensionamento da estrutura;
- 3) a adoção de uma espessura e_B , para a qual corresponde um número acumulado de eixos padrão superior àquele que induz um dano de 100 % na estrutura de pavimento, implica o subdimensionamento da estrutura.

Pela análise das Figuras, é curioso notar que o declive da tangente da curva, definida para o eixo padrão de 80 kN, é maior, em cada espessura, do que o declive da reta que tangencia a curva definida para o eixo padrão de 130 kN.

Refere-se também que, dimensionando as camadas betuminosas para a ação do eixo padrão de 80 kN, permite-se que a estrutura de pavimento seja solicitada por um número maior de eixos padrão acumulados (ao longo de 20 anos) sem que ocorra a ruína do pavimento.

Note-se ainda que, para a mesma espessura e_B , a diferença entre o número de eixos padrão acumulados admissíveis de 130 kN para um dano de 80 % e de 100 % é menor do que a verificada para o eixo padrão de 80 kN. Por exemplo, considerando a estrutura III (ábaco I_3) e para a ação do eixo padrão de 80 kN, a adoção de uma espessura e_B compreendida num intervalo de [20; 24] cm, é economicamente viável para uma gama de número acumulado de eixos padrão compreendida entre [100; 245] milhões enquanto que, ao considerar o eixo padrão de 130 kN, essa gama de variação varia entre 25 e 50 milhões.

5.2.2 PROPOSTA II

Esta proposta apresenta-se como continuação da proposta I, permitindo retificar a solução proveniente da proposta I relativa à espessura das camadas betuminosas (e_B) das três estruturas tipo do MACOPAV (I, II ou III) a partir de: 1) número máximo admissível de eixos padrão esperado durante a vida útil 2) percentagem de dano; 3) tipo de eixo padrão; 4) fator de agressividade.

O objetivo principal desta proposta é permitir definir, para as espessuras das camadas betuminosas das estruturas flexíveis do MACOPAV, o número de veículos pesados que solicitam o pavimento no período de 20 anos $\Sigma N_{20 \text{ anos}}$, independentemente da sua tipologia de carga.

Nesta proposta, além dos fatores de agressividade previstos no MACOPAV para o dimensionamento de pavimentos flexíveis sob a ação do eixo padrão de 80 kN, dá-se a possibilidade de considerar o fator de agressividade relativa a 100% de veículos com configuração de carga típica por eixo. Lembra-se que esta é a configuração mais frequente em Portugal, como se indicou na Figura 7.

Assim, nesta metodologia, são considerados os coeficientes de agressividade mínimo e máximo para a configuração de carga típica, quer para o eixo padrão de 80 kN quer para o de 130 kN, tal como indicado no Quadro 44.

Quadro 44 – Coeficientes de agressividade considerados na Proposta II de pré-dimensionamento

Classe de tráfego	Eixo padrão					
	α MACOPAV [2]	80 kN		130 kN		
		α Carga típica		α MACOPAV*	α Carga típica	
		Min	Máx		Min	Máx
T ₆	2	1,6	4,2	0,3	0,3	0,6
T ₅	3	1,6	4,2	0,4	0,3	0,6
T ₄	4	1,6	4,2	0,6	0,3	0,6
T ₃	4,5	1,6	4,2	0,6	0,3	0,6
T ₂	5	1,6	4,2	0,7	0,3	0,6
T ₁	5,5	1,6	4,2	0,8	0,3	0,6

Como demonstrado na Figura 8, nesta configuração de carga por eixo, o menor fator de agressividade corresponde ao veículo pesado de categoria f_2 , enquanto que os veículos associados ao maior fator de agressividade são os pertencentes à categoria g_1 .

A espessura e_B das camadas betuminosas propostas nas estruturas I, II e III, correspondem a uma classe de tráfego, definida por um intervalo de TMDA_p e uma taxa de crescimento t .

A definição dos ábacos II₁ a Ábaco II₆, foi feita com base no número máximo admissível de eixos padrão (N_{adm}) das estruturas I, II e III. Por aplicação da expressão (5.1) e fazendo variar o coeficiente de agressividade nas três gamas indicadas, determinou-se o número total de veículos pesados (quaisquer) que solicitam o pavimento no período de dimensionamento.

$$N_{adm} = \Sigma N_{20 \text{ anos}} \times \alpha \quad (5.1)$$

Adotando as estruturas de pavimento flexíveis do MACOPAV, este procedimento permite obter o número total de veículos pesados que a estrutura pode suportar ao longo do período de dimensionamento, sem entrar em ruína e assumindo diferentes níveis de agressividade induzidos no pavimento pela passagem dos veículos. O número máximo admissível de eixos padrão (N_{adm}) pode ser associado ao intervalo de dano considerado económico [80% - 100%], permitindo definir, para uma espessura das camadas betuminosas, uma gama de veículos totais passados no pavimento em 20 anos em função de três fatores de agressividade.

A Figura 15, apresenta o organigrama que sintetiza a metodologia inerente à Proposta II. A cada um dos ábacos indicados corresponde um determinado eixo padrão (80 kN ou 130 kN).

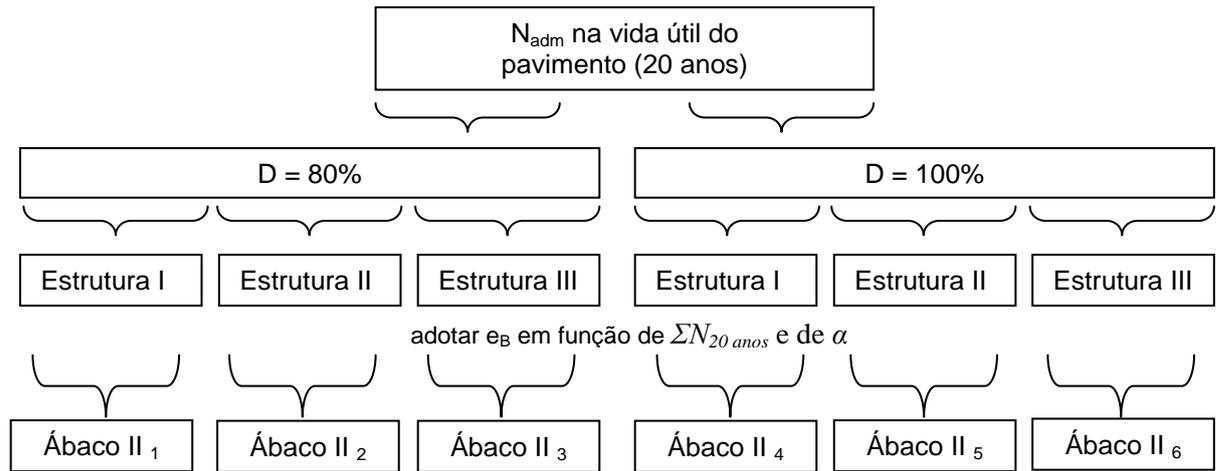
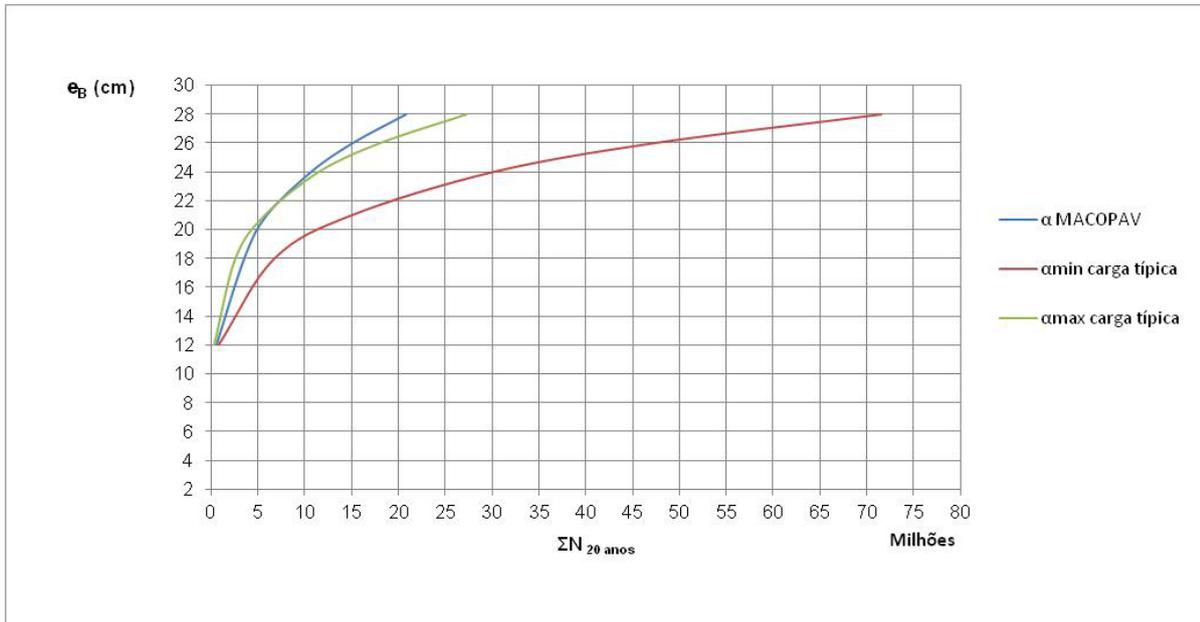


Figura 15 – Organograma sobre a metodologia de pré-dimensionamento da Proposta II

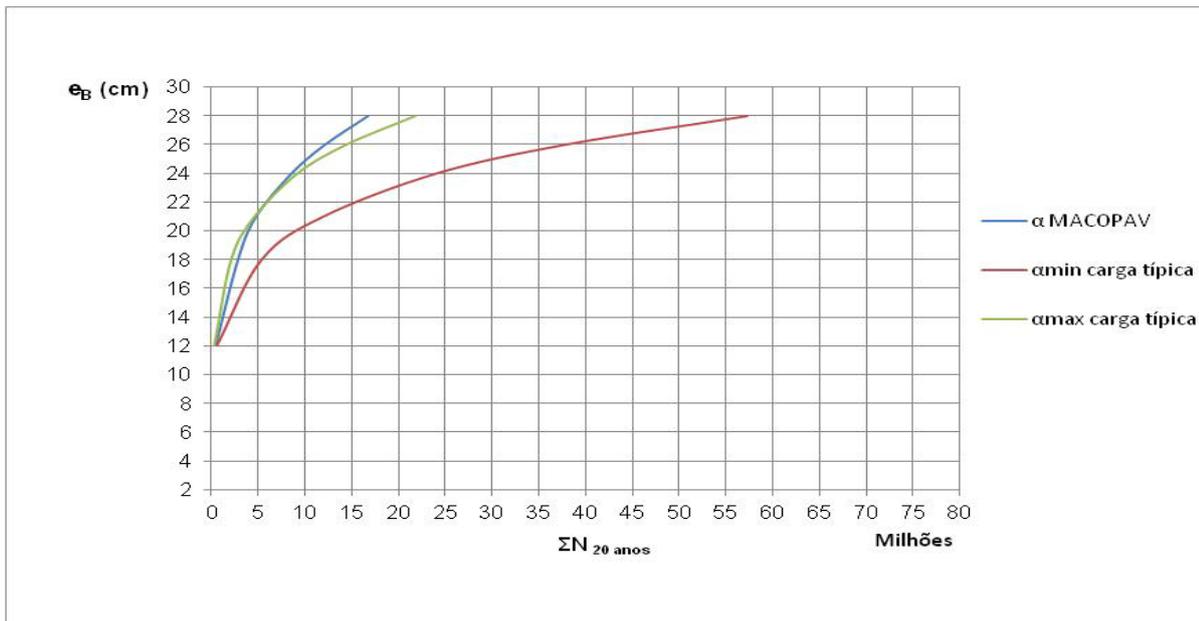
As Figuras 16 , 17 e 18, apresentam os ábacos relativos às estruturas I, II e III, respetivamente, para a ação do eixo padrão de 80 kN e danos de 80% e 100%.

De seguida, as Figuras 19, 20 e 21, apresentam os ábacos relativos às estruturas I, II e III, respetivamente, para a ação do eixo padrão de 130 kN e danos de 80% e 100%.

Note-se que, como já referido anteriormente, para este nível de carga a designação α MACOPAV diz respeito aos coeficientes de agressividade que foram obtidos por meio dos α MACOPAV 80 kN através da expressão (3.7), uma vez que o Manual por si só não prevê o dimensionamento de pavimentos flexíveis para este nível de carga por eixo (130 kN).

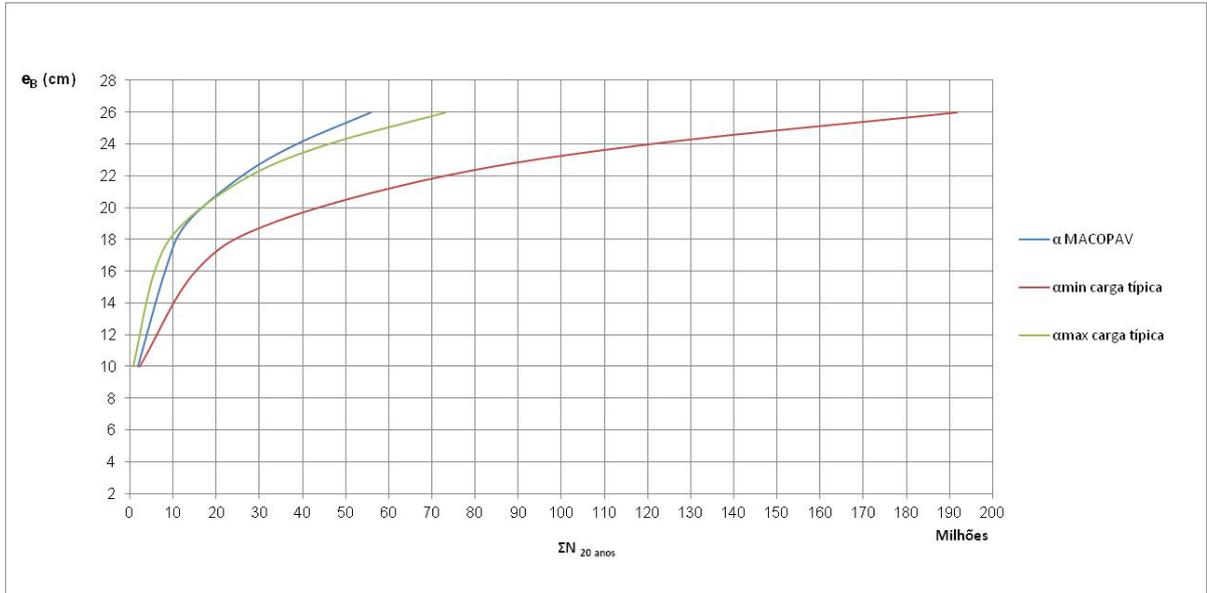


a) $D=100\%$

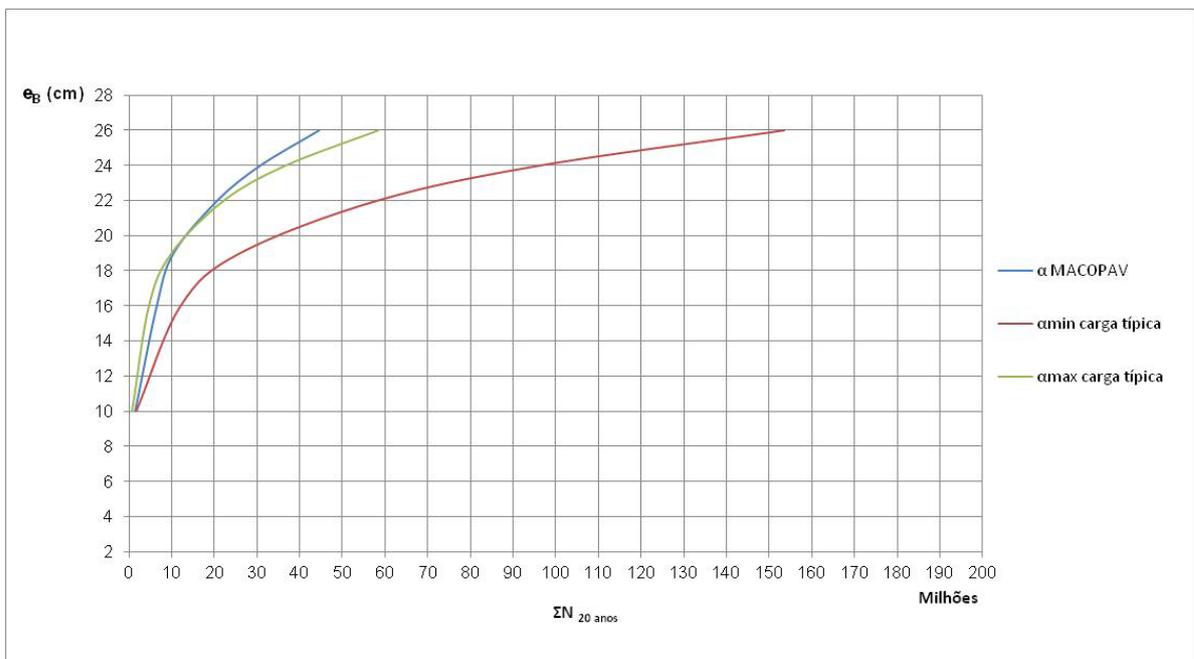


b) $D=80\%$

Figura 16 – Ábaco II_{180kN} : estrutura I

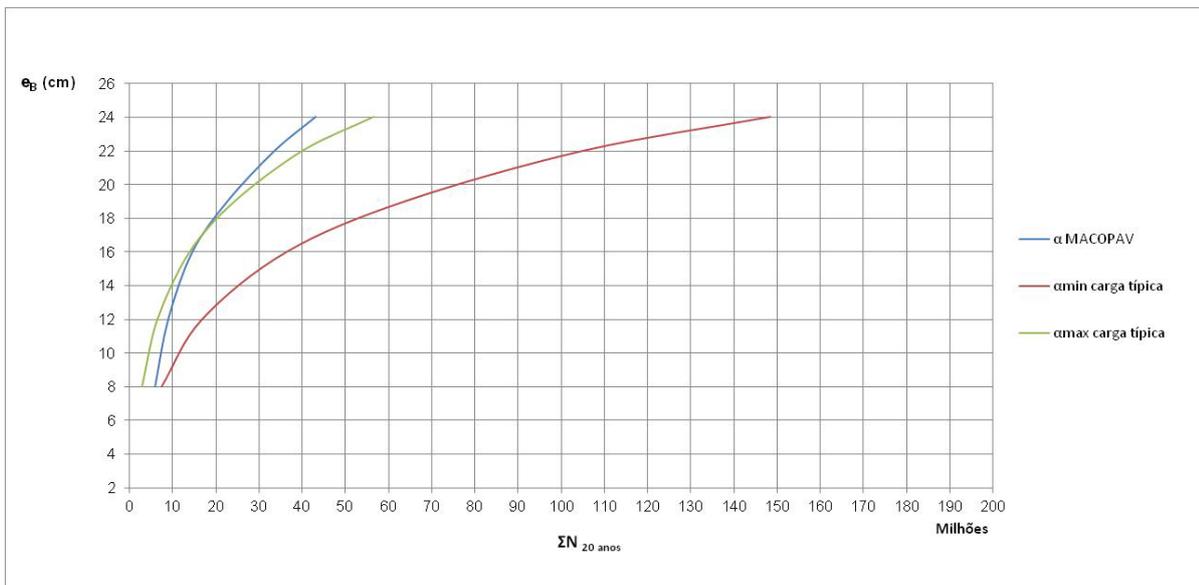


a) D= 100%

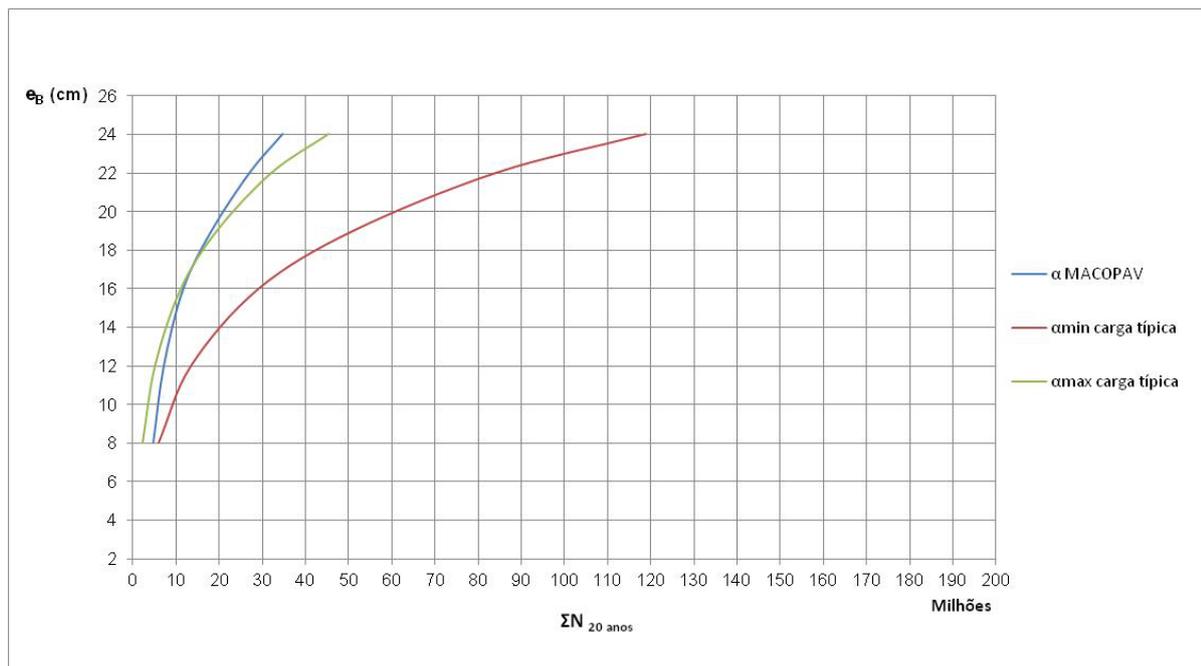


b) D= 80%

Figura 17 – Ábaco II_{2 80kN}: estrutura II

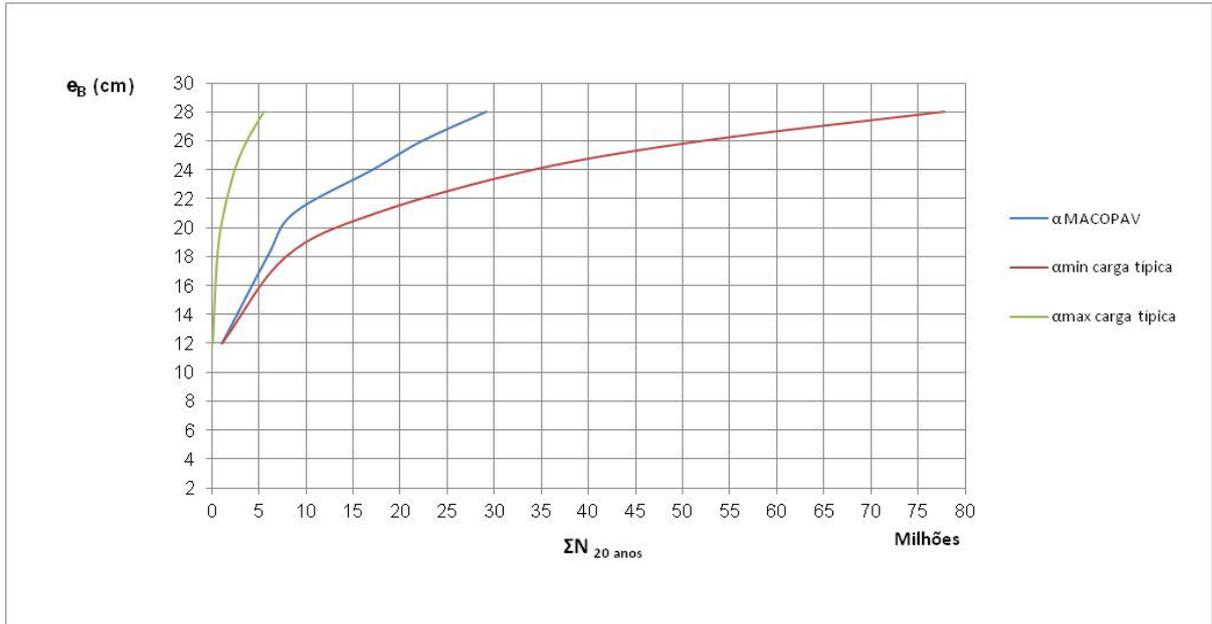


a) $D=100\%$

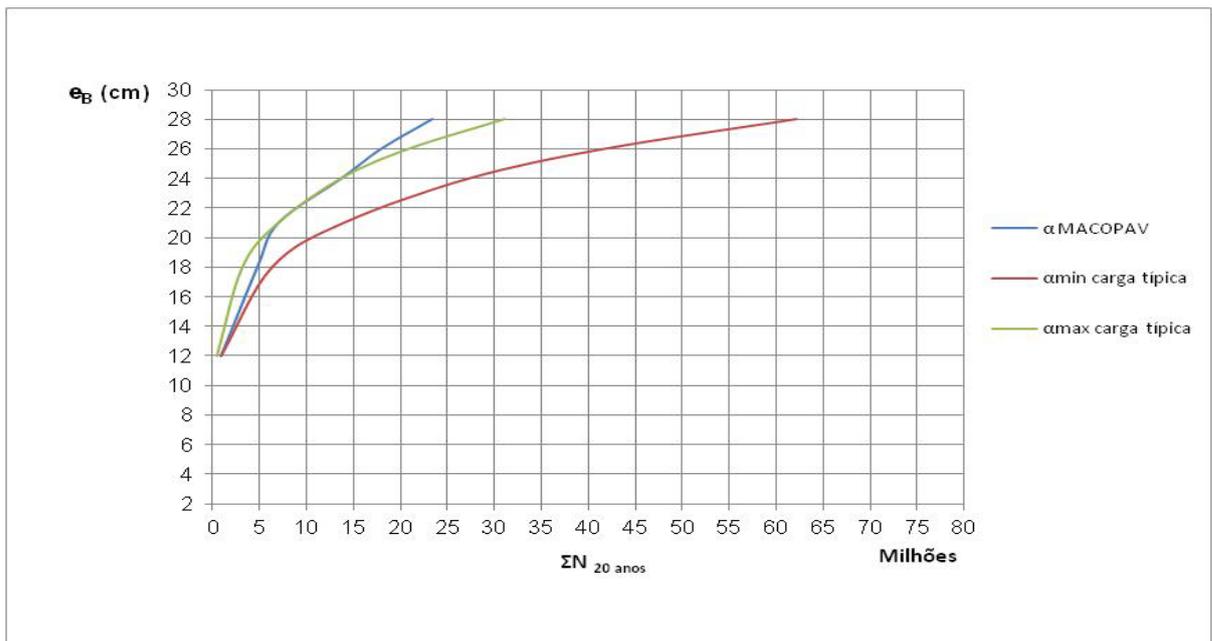


b) $D=80\%$

Figura 18 – Ábaco $II_{3 \text{ 80kN}}$: estrutura III

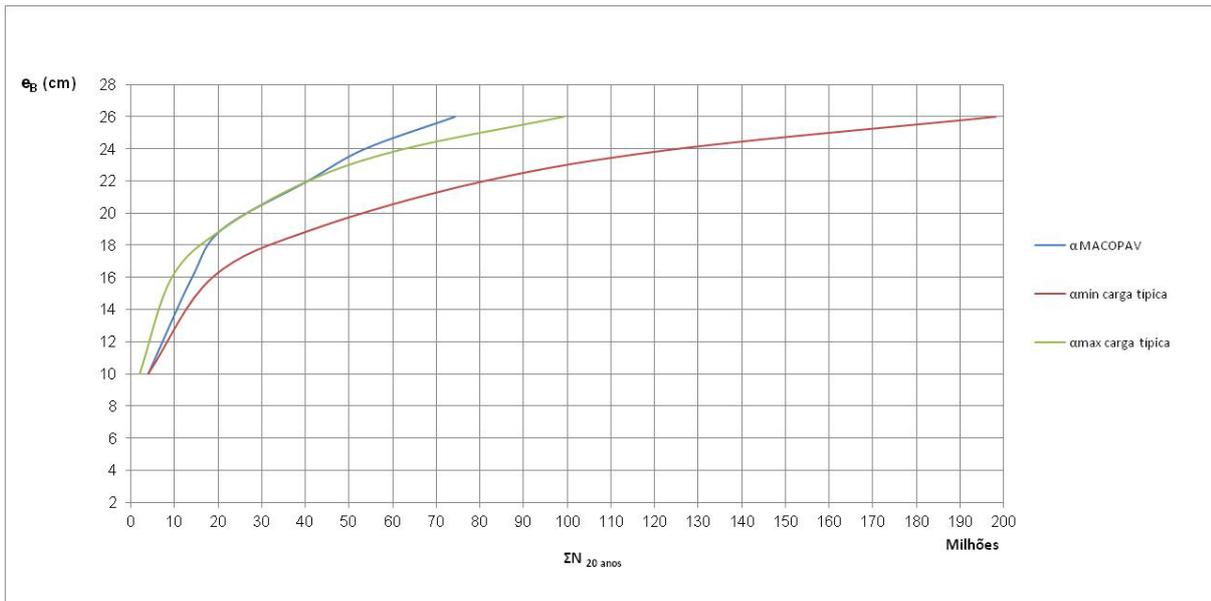


a) $D=100\%$

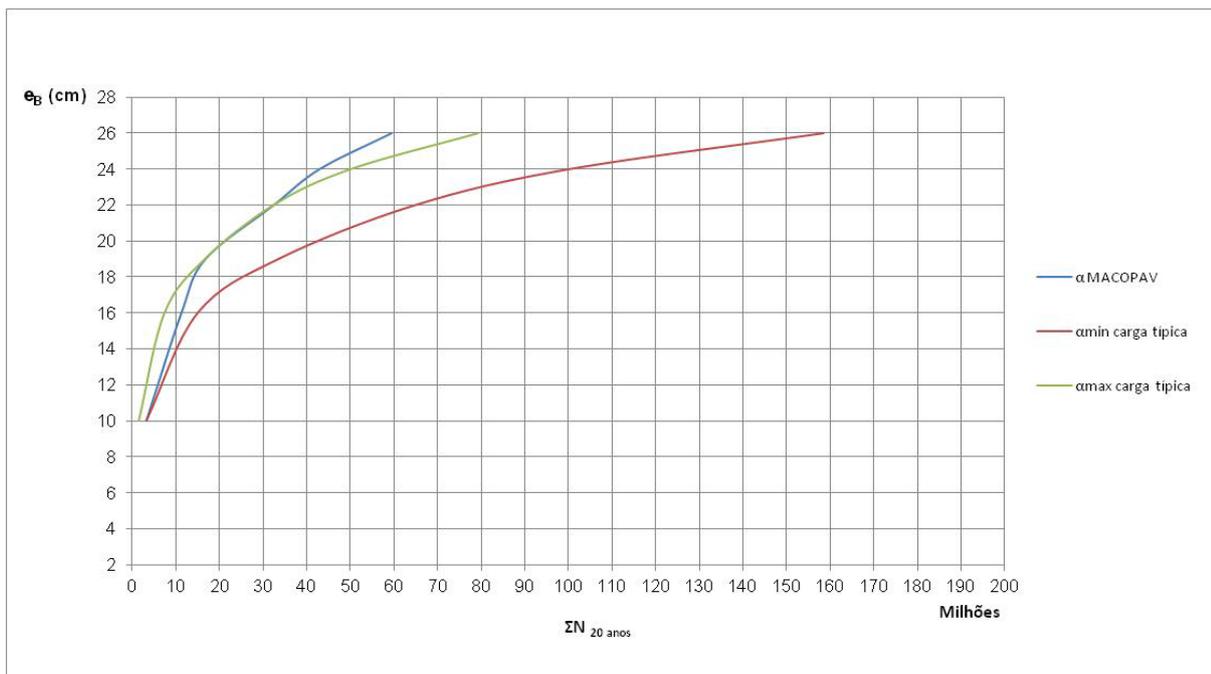


b) $D=80\%$

Figura 19 – Ábaco $II_4 130kN$: estrutura I

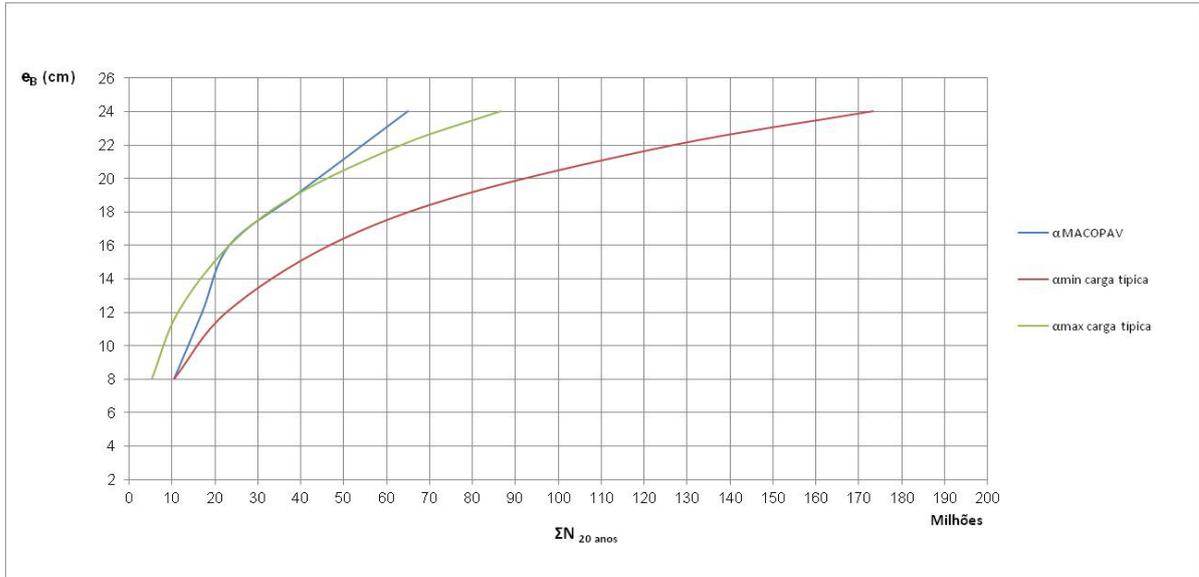


a) D= 100%

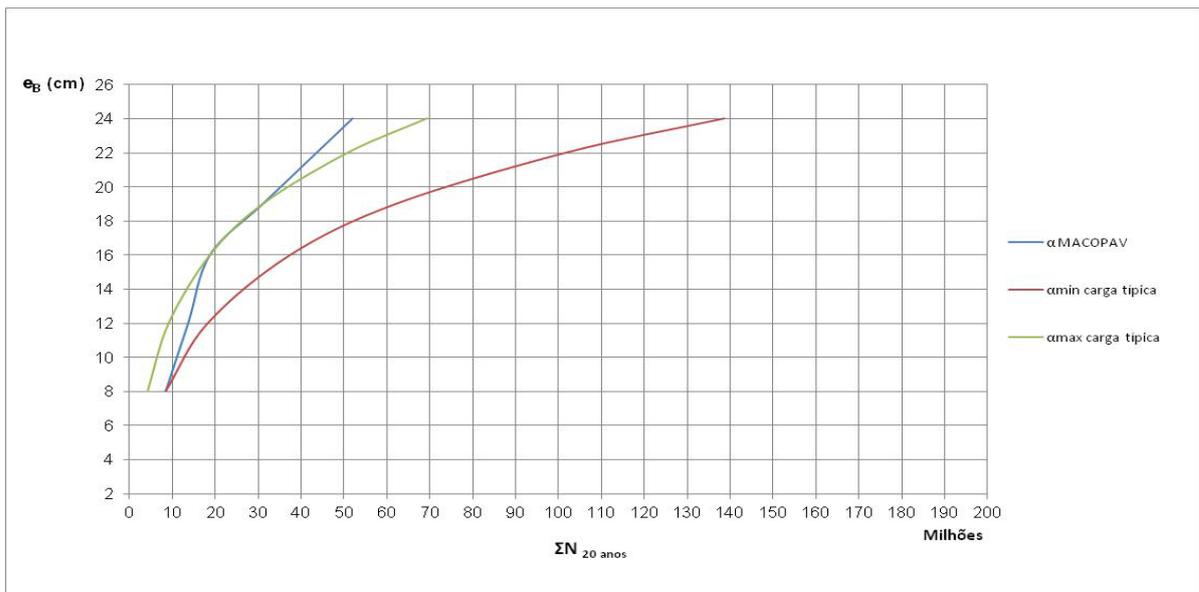


b) D= 80%

Figura 20 – Ábaco II_{5 130kN}: estrutura II



a) $D=100\%$



b) $D=80\%$

Figura 21 – Ábaco Il_6 130kN: estrutura III

Analisando os ábacos apresentados verifica-se que:

- 1) para a mesma espessura e_B selecionada, quanto maior é o fator de agressividade do tráfego, menor é o tráfego de pesados acumulado (definido pelo $TMDA_p$ e taxa de crescimento) que a estrutura de pavimento poderá suportar ao longo da sua vida útil;
- 2) para a mesma estrutura de pavimento e para a mesma espessura das camadas betuminosas e_B , ao dano de 100% corresponde um $\Sigma N_{20 \text{ anos}}$ superior ao obtido ao considerar com um dano de 80%;
- 3) para a mesma estrutura de pavimento e para a mesma espessura e_B , considerando o mesmo valor de dano mas solicitações de eixos padrão diferentes, o $\Sigma N_{20 \text{ anos}}$ que a espessura e_B admite é superior no caso de eixo padrão 130 kN.

Sumariamente com procedimento, tendo uma primeira aproximação do número acumulado de passagens de veículos pesados em 20 anos, o utilizador pode definir uma gama de três espessuras possíveis para as camadas betuminosas, conforme considera os três fatores de agressividade diferentes em causa. Tomando em atenção a percentagem de dano considerada (80% e 100%), para uma espessura e_B , define-se uma gama de passagens acumuladas de veículos pesados para 20 anos, limitada por fatores de agressividade diferentes. Ou seja, o $\Sigma N_{20 \text{ anos}}$ refere-se a pesados de qualquer categoria de pesados, não sendo necessário saber de antemão a agressividade associada ao tráfego de dimensionamento.

Para o dimensionamento da estrutura I para o eixo padrão de 80 kN, considerando a espessura 28 cm (correspondente à classe de tráfego T_1) e o coeficiente de agressividade do tráfego correspondente ao do MACOPAV, define-se, pelos limites do dano (80% e 100%), um intervalo de valores para o $\Sigma N_{20 \text{ anos}}$ [17 - 56] milhões, para o qual a espessura selecionada oferece resistência estrutural no período de 20 anos. Existe uma folga de aproximadamente 60 milhões de veículos pesados, dentro da qual é possível diminuir a espessura se se considerar uma menor agressividade de tráfego.

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas duas propostas para o pré-dimensionamento da espessura das camadas betuminosas de pavimentos flexíveis que permitam a definição da espessura das camadas betuminosas de pavimentos flexíveis a partir de i) o número de eixos padrão acumulado (na vida útil do pavimento), em vez do $TMDA_p$ no ano zero e da consideração de uma taxa de crescimento fixa como propõe o MACOPAV; ii) percentagem de dano.

As duas metodologias, descritas neste capítulo, têm por base as estruturas tipo definidas pelo MACOPAV. Segundo o ponto de vista da Autora, trata-se de uma abordagem avançada e mais flexível do que a do MACOPAV, porque permite definir a espessura total das camadas betuminosas, a partir do número acumulado de eixos padrão e da percentagem de dano no final da vida útil, parâmetros mais objetivos do que as classes de tráfego, propostas pelo MACOPAV que consideram, o $TMDA_p$, a taxa de crescimento de tráfego e o fator de agressividade, parâmetros constantes e independentes do projeto a pré-dimensionar.

6

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, primeiramente, apresenta-se as principais conclusões referentes aos assuntos abordados em cada um dos capítulos desta tese.

Por fim, apresenta-se perspectivas para investigação futura sobre os temas abordados nesta tese.

6.2. CONCLUSÕES

Nesta secção apresenta-se uma síntese das conclusões retiradas em cada um dos capítulos.

Começa-se por referir as conclusões relativas ao Capítulo 2 "Conceção de pavimentos flexíveis segundo o MACOPAV".

- O MACOPAV apresenta um formato tipo catálogo organizado lógica e sequencialmente, permitindo facilmente realizar o pré-dimensionamento de estruturas de pavimento flexível para a ação de eixos padrão de carga 80 kN;
- A adoção de uma das três estruturas flexíveis catalogadas no MACOPAV, deve ser antecedida, em fase de estudo prévio, por uma análise das condições de tráfego, classe de fundação, e disponibilidade em materiais de pavimentação, de acordo com a metodologia proposta no Manual;
- O pré-dimensionamento deve ser feito tendo por base: i) a definição das estruturas tipo de pavimentos flexíveis de acordo com associação de materiais para as camadas constituintes; ii) consideração das condições extremas mais desfavoráveis das classes de tráfego e de fundação, para determinação das espessuras propostas para as camadas de pavimento; iii) consideração de uma fundação base de classe F_3 ($E = 100$ MPa), indicando-se a correção de espessuras para outros tipos de fundação; iv) variação das espessuras das camadas de acordo com a classe de tráfego (T_1 a T_6);
- O MACOPAV tem particular aplicação em fase de pré-dimensionamento, pretendendo dar uma primeira indicação sobre a geometria e mecânica da solução estrutural a adotar em projeto de execução. As estruturas tipo apresentadas pelo MACOPAV devem ser entendidas como elementos base para o estudo da solução estrutural e economicamente viável, devendo ser analisadas com algum criticismo;
- O MACOPAV, comparativamente com os catálogos de dimensionamento de estruturas de pavimento Francês e Espanhol, é mais simplista nas considerações que faz, principalmente no que se refere às propriedades dos materiais betuminosos.

De seguida, analisa-se o Capítulo 3, "Influência de fatores de agressividade no dimensionamento de estruturas de pavimento flexíveis".

- A configuração de carga por eixo dos veículos pesados em circulação é bastante variada sendo difícil definir um padrão de carregamento. A configuração de carga por eixo predominante corresponde à denominada *carga típica* que apresenta níveis de carga por eixo abaixo dos limites legais;

- Avaliaram-se os coeficientes de agressividade máximo e mínimo para as três tipologias de carga por eixo, quer para o eixo de carga de 80 kN como para o de 130 kN: carga típica, carga próximo do limite legal e carga máxima. A associação destes fatores de agressividade às classes de tráfego permitiu obter o número acumulado de eixos padrão $N_{dim\ 80\ kN}$ e $N_{dim\ 130\ kN}$ que solicitarão os pavimentos na vida útil de 20 anos.

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- o fator de agressividade é tanto maior quanto maior é o $TMDA_p$; também com o aumento do $TMDA_p$ aumenta a diferença entre os valores dos coeficientes de agressividade calculados e os propostos pelo MACOPAV;
- a previsão de $N_{dim\ 80\ kN}$, a partir do fatores de agressividade menores do que os considerados no MACOPAV pode induzir numa estrutura de pavimento subdimensionada;
- a gama de valores calculados de $N_{dim\ 80\ kN}$, para as classes de tráfego associadas a um menor $TMDA_p$, inclui os valores indicados pelo MACOPAV; no entanto, para as classes de tráfego com maior $TMDA_p$, esta situação já não se verifica;
- os resultados obtidos para $N_{dim\ 130\ kN}$ são menores do que os obtidos para $N_{dim\ 80\ kN}$; tal deve-se ao facto de a fatores de agressividade menores corresponder um número de eixos padrão igualmente menor;
- os valores de $N_{dim\ 130\ kN}$ propostos para inclusão no MACOPAV, ao serem menores do que os obtidos para as condições extremas dos três níveis possíveis de solicitação, podem conduzir a estruturas de pavimento subdimensionadas;
- o valor de $N_{dim\ 130\ kN}$ aumenta à medida que $\alpha_{calculado} > \alpha_{MACOPAV}$.

No que concerne ao Capítulo 4, "Validação das estruturas de pavimentos flexíveis do MACOPAV", constatou-se que:

- a análise do comportamento estrutural de pavimentos através de softwares baseados na *Teoria Multicamada* é uma opção válida, simples e muito habitual nos projetos de dimensionamento de pavimento reais;

- o uso de diferentes programas de cálculo automático, baseados no mesmo modelo de cálculo e estrutural, conduz a resultados muito semelhantes, pelo que, valida a sua utilização;

- o comportamento estrutural analisado com o programa de cálculo *ALIZE*, extensões ϵ_{xx} e ϵ_{zz} , para as estruturas I, II e III, evolui de acordo com as leis de ruína: quanto maiores as extensões menor o número máximo admissível de passagens de veículos;

- a validação das estruturas flexíveis do MACOPAV, feita com base na quantificação da percentagem de dano das estruturas, considerando o número máximo admissível de eixos padrão calculado nesta secção, e, o número acumulado de eixos padrão previsto para os 20 anos de vida útil obtidos para diferentes níveis de agressividade de veículos pesados (diferentes dos previstos pelo MACOPAV), induz em soluções sobre e subdimensionadas.

Os resultados obtidos para o dano das estruturas I, II e III mostraram que, para ação do eixo padrão de 80 kN e para os fatores de agressividade considerados no MACOPAV, o dimensionamento não corresponde, na sua generalidade, a um dimensionamento económico. As estruturas II e III, por exemplo, encontram-se sobredimensionadas, representando este resultado uma margem de segurança.

Por outro lado, para o tráfego previsto na configuração de carga próximo do limite legal e carga máxima, as estruturas flexíveis do MACOPAV, entram em ruína, uma vez que a percentagem de dano registada iguala valores inadmissíveis de 1000%, por exemplo.

A título de proposta de inclusão no MACOPAV o eixo padrão de 130 kN no dimensionamento de pavimentos flexíveis, do cálculo da percentagem de dano das estruturas para este nível de carga, verificou-se que:

- para as configurações de carga típica e carga próximo do limite legal, as três estruturas de pavimento estão sobredimensionadas na sua generalidade;
- para a configuração de carga máxima e respetivos fatores de agressividade, tal como verificado para o eixo padrão de 80 kN, o dano assume valores inadmissíveis.

Destes resultados concluiu-se que, conforme o nível de agressividade de tráfego prevista para a via rodoviária a dimensionar, as espessuras das camadas de pavimento das estruturas do MACOPAV devem ser alteradas. No sentido de saber sobre que camada material atuar, deve avaliar-se a percentagem de dano em função dos critérios de ruína, redefinindo a espessura das camadas a que esteja associada a lei de fadiga condicionante.

Finalmente, no Capítulo 5 "Propostas para pré-dimensionamento de pavimentos flexíveis", as principais conclusões a destacar são:

- as propostas para pré-dimensionamento apresentadas (Proposta I e Proposta II), baseadas na aplicação das estruturas de pavimento I, II e III do MACOPAV, permitem ao utilizador definir a espessura das camadas betuminosas de pavimentos flexíveis em função de parâmetros de tráfego independentes do projeto a pré-dimensionar;
- as Propostas I e II são mais objetivas e flexíveis que a metodologia preconizada pelo MACOPAV, uma vez que permitem uma antevisão da solução a adotar sem necessidade de sistematizar dados de tráfego que possam ser desconhecidos numa fase inicial do estudo, tais como classes de tráfego, tipologia de carga de veículos dominante (fatores de agressividade), taxa de crescimento de tráfego anual;
- o utilizador pode optar por pré-dimensionar estruturas de pavimentos flexíveis quer para o eixo padrão de 80 kN como para o eixo padrão de 130 kN.

6.3. PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA

Apresenta-se, de seguida, perspetivas de investigação que poderão dar continuidade, em trabalhos futuros, à investigação apresentada nesta dissertação.

Relativamente às ações de dimensionamento de pavimentos flexíveis:

- análise mais descritiva do tráfego com inclusão de mais classes;
- consideração da distribuição percentual do tráfego por categoria de veículos pesados;
- adoção de modelos simplificados de consideração do fator de agressividade do tráfego;
- consideração rigorosa da temperatura média anual de cada região do território nacional.

Relativamente aos materiais betuminosos:

- distinção das características mecânicas das camadas betuminosas e sua análise independente;
- consideração da influência da temperatura no módulo de deformabilidade do betume;
- consideração de velocidades de tráfego adaptadas ao projeto a analisar.

No que concerne aos materiais granulares e solos de fundação, sugere-se uma descrição mais detalhada das suas características e adequação de aplicação.

BIBLIOGRAFIA

- [1] COST 333, 1999. *Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final Report of the Action*, European Commission, Directorate General Transport, Luxembourg.
- [2] JAE, 1995. *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas (JAE), Almada.
- [3] LCPC et SETRA, 1994. *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée – Guide technique*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Paris.
- [4] NORMA 6.1-IC. *Boletín Oficial del Estado núm. 297*. Viernes 12 de diciembre de 2003. Sec. I. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.
- [5] JORNAL DE NOTÍCIAS, 2011. Portugal pouparia com pavimentos mais espessos [Versão eletrónica] *Jornal de Notícias*. Em: <http://www.jn.pt>, acedido em 11 de novembro de 2011.
- [6] ANTUNES, M. L., 2005. *Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis*. LNEC. Junho de 2005. Lisboa.
- [7] INSTITUTO DA CONSTRUÇÃO, 1993. *Conceção/Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários*. Sousa-Melo, A., Miranda, C.M. e Ribeiro, J.Q.. Porto
- [8] Decreto-Lei nº 44/2005 de 23 de fevereiro. *Diário da República nº 38, Série I-A*, pp. 1585-1625. Ministério da Administração Interna. Lisboa.
- [9] BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. (2008). *Pavimentos Rodoviários*, Almedina, Coimbra.
- [10] AASHTO, 1993. *Guide for Design of Pavement Structure*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- [11] Portaria nº 254 de dia 3 mês novembro. *Diário da República nº 1092/97 - I Série - B*. Ministério da Administração Interna. Lisboa
- [12] SHELL, 1977. *Asphalt pavement design manual*. Shell International Petroleum Company (SHELL), London.
- [13] BAPTISTA, A.; 1999. *Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Aplicabilidade em Portugal dos Métodos Existentes*. Dept. Engenharia Civil da F.C.T. da U. de Coimbra, Tese de Mestrado em Engenharia Urbana, Coimbra.
- [14] ASTM, 1984. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. D 2487, American Society for Testing and Materials, EUA.
- [15] VALE, C. e SOUSA-MELO, A., 2004. *The Influence of the Structural Calculation Method and Model on Pavement Design*. In: Topping, B.H.V. (ed.). *Proceedings of 4th International Conference on Engineering Computational Technology*, Civil-Comp Press, Stirling, Scotland, paper 130.