



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

# **Análise e Aplicação do Método de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

**Autor**

**João Pedro Lemos Rodrigues**

**Orientador**

**Professor Doutor Adelino Jorge Lopes Ferreira**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Julho, 2013**

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio nos mais diversos âmbitos de alguns elementos que não poderei deixar de mencionar nesta fase.

Quero desde já agradecer ao Professor Doutor Adelino Ferreira, meu orientador, pela preocupação e motivação na realização deste trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Fábio Simões, pela transmissão de conhecimentos, elementos, e pela disponibilidade que em muito ajudaram para que fosse possível concluir a tese. Agradeço também ao Filipe disponibilidade e ajuda nesta última fase.

Um eterno agradecimento aos meus pais que partilharam todos os momentos, todas as decisões, e que me proporcionaram ser quem sou e chegar onde cheguei.

Uma palavra também aos meus avós, à minha irmã, ao meu cunhado e à minha sobrinha, à restante família, a todos os que me acompanharam e acompanham, que me dão força, agradeço por estarem presentes na minha vida.

Um especial agradecimento aos meus amigos, que partilharam comigo momentos que nunca irei esquecer e que me acompanharam também durante todo este tempo, que me dão apoio e incentivam.

A todos, Obrigado.

*João Pedro Lemos Rodrigues*

Coimbra, Julho de 2013

## RESUMO

Devido ao custo associado à construção e manutenção de uma rede rodoviária e à sua importância na sociedade e no seu desenvolvimento, vários métodos de cálculo têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados, procurando uma otimização do dimensionamento para que o comportamento previsto se aproxime cada vez mais do comportamento real do pavimento quando sujeito às ações.

O trabalho apresentado tem como objetivo principal a análise de metodologias de dimensionamento de pavimentos rodoviários existentes, procurando uma possível melhoria na abordagem realizada para as condições Portuguesas. Recentemente surgiu um novo método, o método da AASHTO, cuja pretensão é tornar-se uma referência a nível mundial em termos de dimensionamento de pavimentos. Seguidamente é feita uma abordagem a três métodos de dimensionamento. São explicadas algumas das diferenças entre cada um, são abordados os parâmetros principais e as diferentes considerações necessárias para que possamos implementar o método. No caso de estudo é feita uma análise dos resultados da aplicação deste novo método às estruturas definidas pelo MACOPAV e verificada a compatibilidade e validade dos mesmos.

Este trabalho pretende ser um preâmbulo para a utilização desta nova metodologia e demonstrar que o mesmo permite de forma intuitiva e célere, testar inúmeras combinações tendo em conta a variabilidade de cada parâmetro necessário para o dimensionamento.

## **ABSTRACT**

Due to the cost associated with the construction of a road network and its importance in society and in its development, various calculation methods have been developed and refined, looking for an optimized design for the expected behavior in getting closer to the actual behavior of the pavement when subjected to the actions.

The presented work has as main objective the analysis of methodologies for design of existing road pavements, looking for a possible improvement in the approach taken for the Portuguese conditions. Recently has emerged a new method, the AASHTO method, whose pretension is to become a world reference in terms of pavement design. Then an approach is made to three design methods. Some differences between each one are explained, the main parameters and different considerations necessary to implement the method are discussed. In the case study, results from the application of this new method to the defined structures of MACOPAV are analyzed and verified the compatibility of the results.

This work intends to be a preamble to the use of this new methodology and to demonstrate that it allows for an intuitive and quick way to test numerous combinations taking into account the variability of each parameter required for the pavement design.

**ÍNDICE**

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Estrutura do Trabalho .....	2
2.	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO.....	3
2.1	Generalidades .....	3
2.2.	Metodologia de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis .....	5
2.3	Previsão do Módulo de Deformabilidade de Misturas Betuminosas.....	7
2.3.1	Método da Shell.....	8
2.3.2	Método da AASHTO.....	14
2.3.3	Método da AUSTROADS.....	16
2.4	Tratamento de Tráfego Pesado .....	16
2.4.1	Pré-dimensionamento pelo MACOPAV.....	17
2.4.2	Método da SHELL.....	20
2.4.3	Método da AASHTO .....	20
2.4.4	Método da AUSTROADS.....	22
2.5	Temperatura de Serviço .....	28
2.5.1	Método do MACOPAV .....	29
2.5.2	Método da SHELL.....	29
2.5.3	Método da AASHTO .....	30
2.5.4	Método da AUSTROADS.....	30
2.6	Critérios de Rotura de Pavimentos Flexíveis .....	30
2.6.1	Critério de fadiga da SHELL.....	32
2.6.2	Critério de deformação permanente da SHELL .....	33
2.6.3	Critério de fadiga da AASHTO .....	34
2.6.4	Critério de deformação permanente da AASHTO .....	35
2.6.5	Critério de fadiga da AUSTROADS .....	38
2.6.6	Critério de deformação permanente da AUSTROADS .....	39
2.7	Patologias dos pavimentos .....	40
3.	CASO DE ESTUDO .....	41
3.1	Introdução.....	41
3.2	Aplicação do MEPDG aos Pavimentos do MACOPAV .....	41
3.2.1.	Definição dos parâmetros de dimensionamento utilizados .....	41
3.2.2	Tráfego .....	42
3.3.3	Clima.....	43

---

3.3.4	Dimensionamento estrutural do pavimento .....	43
3.2.7	Nível de confiança nos dados e dos resultados obtidos .....	45
3.3	Análise de Resultados .....	45
4.	CONCLUSÕES .....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
	ANEXO A .....	A-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pavimento Rodoviário – constituição e ações (Branco <i>et al.</i> , 2006) .....	5
Figura 2.2 – Organigrama de dimensionamento de pavimentos flexíveis (AASHTO, 2008) ...	7
Figura 2.3 – Abaco Van der Poel para determinação da rigidez do betume (AUSTROADS, 2008).....	9
Figura 2.4 – Relação entre $E_m$ e $E_b$ para as classes S1 e S2 do manual de dimensionamento da SHELL.....	12
Figura 2.5 – Diagrama de Bonnaure (1982) para determinação do módulo de deformabilidade .....	13
Figura 2.6 – Esquema adotado para a ação de um eixo padrão sobre um pavimento (Picado-Santos <i>et al.</i> , 2006).....	20
Figura 2.7 – Zonas Climáticas em Portugal (Baptista, 1999) .....	29
Figura 2.8 – Relação entre tensão instalada e carregamento (AUSTROADS, 2008) .....	39
Figura 3.1 – Evolução do fendilhamento longitudinal durante o tempo de vida útil .....	47
Figura 3.2 – Evolução da pele de crocodilo durante o tempo de vida útil .....	48
Figura 3.3 – Evolução do valor das rodeiras totais durante o tempo de vida útil.....	48
Figura 3.4 – Evolução do valor das rodeiras nas camadas betuminosas durante o tempo de vida útil (CB) .....	49
Figura 3.5 – Evolução do valor do IRI durante o tempo de vida útil .....	49

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Parâmetros A e VTS recomendados e baseados na penetração do betume asfáltico Dias (2009) .....	16
Quadro 2.2 – Caracterização do tráfego segundo o MACOPAV (adaptado de JAE, 1995)....	19
Quadro 2.3 – Classificação dos Veículos pesados de acordo com a disposição dos eixos (Fonseca <i>et al.</i> , 1999) .....	21
Quadro 2.4 – Categorização do tráfego segundo a AUSTROADS (2008) .....	23
Quadro 2.5 – Fator de distribuição de tráfego por via (LDF) .....	24
Quadro 2.6 – CGF – fator de crescimento cumulativo para valores inferiores à capacidade de fluxo de tráfego, adaptado de AUSTROADS (2008) .....	25
Quadro 2.7 – Valores presumíveis de grupos de eixos de veículos pesados por veículo pesado NHVAG.....	26
Quadro 2.8 – Carregamento de grupo de eixos de provocam um dano semelhante ao eixo-padrão .....	27
Quadro 2.9 – Expoentes para o dano das cargas específico para cada tipo de dano .....	27
Quadro 2.10 – Grau de confiança estabelecido (AUSTROADS, 2008) .....	32
Quadro 2.11 – Fatores de confiança sugeridos para a fadiga do asfalto (AUSTROADS, 2008) .....	38
Quadro 3.1 – Valores limite para os parâmetros de estado .....	41
Quadro 3.2 – Distribuição de veículos por classe de tráfego .....	42
Quadro 3.3 – Classes de Tráfego e valores para o TMDAp (MACOPAV, 1995) .....	42
Quadro 3.4 – Distribuição horária do Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados na zona de Coimbra (%). .....	42
Quadro 3.5 – Temperatura de serviço (°C) .....	43
Quadro 3.6 – Estruturas dos pavimentos definidos pelo MACOPAV .....	44
Quadro 3.7 – Características granulométricas dos solos granulares utilizados .....	45
Quadro 3.8 – Quadro resumo dos resultados obtidos .....	46
Quadro A.1 – Quadro dos resultados obtidos.....	A-1

## SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

A – Parâmetro de modelo

AASHTO – American Association of State Highways and Transportation Officials

AUSTROADS – Association of Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities.

B – Parâmetro de modelo

CBR – Califórnia Bearing Ratio

E – Módulo de Deformabilidade

$E_m$  – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (símbolo genérico)

F – Frequência em Hz

f – factor de equivalência

$t_m$  – Espessura das camadas betuminosas

$t_{sb}$  – Espessura da sub-base granular

$t_{sf}$  – Espessura do solo de fundação

I<sub>pen</sub> – índice de penetração do betume

IRI – International Roughness Index

JAE – Junta Autónoma de Estradas

$K_0$  – Coeficiente de impulso em repouso

$K_i$  – Genericamente parâmetro de modelo com  $i=1,2,3\dots$

L – Distância entre rodas num mesmo eixo

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

MEPDG – Mechanical-Empirical Pavement Design Guide

$N_{80}^{dim}$  – Número acumulado de Eixos-Padrão

NAVP – Número Acumulado de Veículos Pesados

P – Carga descarregada por cada roda

p – Pressão de enchimento de um pneu

pen<sub>25</sub> – penetração do betume a 25°

r – Raio

S<sub>b</sub> – Rigidez do betume

SI – Sistema Internacional

Sm<sub>3109</sub>/ Sm<sub>108</sub>/ S<sub>68</sub> – parâmetros do modelo

T<sub>ab</sub> – temperatura de amolecimento

TMDA – Tráfego Médio Diário Anual

TMDA<sub>p</sub> – Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados

t – Taxa de crescimento anual

T – Temperatura dos materiais

$T_{ab}$  – Temperatura de amolecimento do betume determinada pelo método de anel e bola

$T_{ar}$  – Temperatura do ar

$T_c / t_r$  – tempo de carregamento

$t_{cb}$  – Espessura da camada betuminosa de base

$t_{cp}$  – Espessura da camada de desgaste

$t_{csb}$  – Espessura da camada de sub-base

$v_t$  – velocidade média da corrente de tráfego

$V_a$  – Percentagem de vazios

$V_b$  – percentagem volumétrica de betume

$V_{agg}$  – Percentagem em volume do agregado da mistura

$V_{be}$  – Percentagem efetiva de betume

$V_{beff}$  – Percentagem volumétrica efetiva de betume

VTS – Coeficiente angular de regressão

$V_v$  – Volume de vazios

w – Água nas camadas granulares de fundação

$\sigma$  – tensão instalada (símbolo genérico)

$\varepsilon$  – Extensão (símbolo genérico)

$\tau$  – Força tangencial na superfície do pavimento

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$\rho$  – Percentagem de retidos no peneiro

$\beta, \delta, \alpha, \gamma$  – Parâmetros do modelo

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O objetivo deste trabalho consiste num estudo de viabilidade de aplicação do método de dimensionamento da AASHTO para as condições verificadas em território nacional. Para tal será realizada uma abordagem a outras metodologias de dimensionamento utilizadas atualmente. A utilização de metodologias mais eficazes ou a melhoria das utilizadas contribuirá para uma economia de meios e recursos.

A rede rodoviária é a infraestrutura de transporte mais importante no desenvolvimento de um país, sendo possível desenvolver-se em vias de diferente importância hierárquica, possibilitando o acesso a praticamente todos os pontos do território. As primeiras orientações para promover uma reestruturação da rede rodoviária nacional surgem em 1945, e desde aí várias evoluções houve no sentido de modernizar esta ferramenta essencial, tanto ao nível de concepção de pavimentos como dos materiais utilizados, práticas construtivas e metodologias de dimensionamento.

Se inicialmente os pavimentos eram dimensionados determinando as espessuras das camadas para que suportassem os efeitos das ações, cedo se verificou que a abordagem não era a correcta. Durante a Segunda Grande Guerra Mundial, verificada a rápida degradação dos pavimentos quando sujeitos às cargas dos aviões, torna-se evidente a necessidade de desenvolver métodos de previsão do comportamento dos pavimentos mais eficazes, que culmina em 2008 com a apresentação do método de dimensionamento da AASHTO, com uma vertente empírico-mecanicista, conjugando a experiência e a análise crítica dos projetistas, o resultado de ensaios efectuados a pavimentos sujeitos às mais variadas condições climáticas e de tráfego e ao conhecimento cada vez mais aprofundado dos materiais utilizados. Juntamente com o manual de dimensionamento é lançado um software, o MPEDG, uma plataforma rápida e intuitiva que permite realizar a modelação do comportamento dos pavimentos, reduzindo de forma significativa o tempo dispendido para tal e tornando-se uma mais-valia no dimensionamento de pavimentos. Uma vez que os resultados devolvidos pelo programa são referentes às patologias verificadas à superfície do pavimento, é possível aferir o grau de desgaste do mesmo a cada instante, permitindo planejar intervenções de manutenção, caso seja necessário.

O presente trabalho privilegia os pavimentos flexíveis dada a sua representatividade na rede nacional. Para a sua realização foram utilizados dados climáticos referentes à região de Coimbra.

Os métodos de dimensionamento analisados na realização deste trabalho serão os métodos de dimensionamento da Shell apresentado em Capitão (2003) e Branco et al. (2006), a metodologia da AASHTO (American Association for State Highway and Transport Officials), uma metodologia frequentemente utilizada nos EUA e apresentada em AASHTO (2008) e a metodologia da AUSTROADS apresentada em AUSTROADS (2008) e utilizada na Austrália e na Nova Zelândia. Esta última será apenas apresentada como metodologia utilizada, mas no presente trabalho não será explorada.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está dividido em 4 capítulos. No primeiro capítulo é apresentado resumidamente o conteúdo do trabalho e é realizada uma explicação da importância que deverá ser dada a este tema.

No segundo capítulo estão resumidas informações sobre os métodos de dimensionamento utilizados, orgânicas necessárias para a realização dos dimensionamentos, assim como a explicação de alguns princípios e conceitos base.

No terceiro capítulo são apresentados os resultados da aplicação do novo método da AASHTO aos pavimentos definidos pelo MACOPAV, admitindo pavimentos genéricos na área geográfica de Coimbra e admitindo as várias classes de tráfego e os vários solos de fundação que poderemos encontrar. É feita uma análise crítica dos resultados obtidos para as diferentes patologias consideradas em função dos limites inicialmente definidos.

No quarto capítulo são apresentadas as conclusões a que se chegou com o presente estudo e é feita uma proposta de melhoria futura, procurando explorar as potencialidades do programa de dimensionamento e a celeridade que ele permite.

No anexo A são apresentados os resultados para todas as combinações possíveis entre a classe de tráfego e a classe de fundação.

## 2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

### 2.1 Generalidades

De acordo com os materiais utilizados e a sua deformabilidade, podem distinguir-se três tipos de pavimentos: flexíveis, rígidos e semi-rígidos. No presente trabalho, vamos centrar o objeto de estudo sobre pavimentos flexíveis, visto serem os mais empregues de uma forma generalizada. Estes pavimentos distinguem-se dos demais por apresentarem uma deformabilidade superior aos restantes.

Um pavimento rodoviário é um sistema multiestratificado, apoiado num solo de fundação. As diferentes camadas de espessura finita encontram-se dispostas em ordem decrescente, de acordo com as suas características qualitativas e resistentes e de acordo com a progressiva redução de esforços verificada com o aumento de profundidade, por sua vez apoiadas no solo de fundação constituído por solo natural (maciço semi-indefinido). A constituição de um pavimento flexível pode variar em função da localização, do tipo de tráfego previsto, do solo de fundação, do tipo de material utilizado na sua construção (normalmente função dos materiais disponíveis) e das condições climáticas a que esteja sujeito, variáveis que de uma forma geral influenciam o seu comportamento.

A principal função de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície confortável e segura para a circulação automóvel. O seu dimensionamento é efetuado para que estas condições se mantenham durante um determinado período de tempo, o tempo de vida útil da obra, quando sujeito às ações que potenciam a sua degradação. Apesar da simplicidade da descrição, a sua aplicação torna-se mais complexa devido à variabilidade e complexidade de caracterização das ações a que está sujeito. O tráfego solicitante é composto por uma amplitude de veículos que varia desde os veículos ligeiros até aos veículos pesados articulados com reboques de diversos eixos e cargas por eixo. As condições climáticas (temperatura e teor em água) determinantes no comportamento dos materiais são também muito variáveis e difíceis de caracterizar. Dada a complexidade dos modelos de comportamento dos materiais e do facto de a sua validade depender fortemente da aproximação que se obtém para as cargas atuantes, a caracterização mecânica torna-se difícil devido à amplitude de comportamentos que se podem obter, resultado das variáveis temperatura e teor em água.

Os pavimentos podem ser caracterizados relativamente às suas qualidades superficiais (textura, cor, qualidades antiderrapantes e qualidades associadas à geração de ruído de

rolamento, rugosidade) e ao comportamento estrutural do pavimento, verificando-se também a sua integridade, regularidade e desempenho da superfície (ausência de covas, fendas, deformações permanentes). Devem ser exigidas qualidades funcionais e qualidades estruturais, estando as primeiras relacionadas com as exigências associadas à condução/utilização (conforto e segurança na circulação) e as segundas relacionadas com a capacidade do pavimento quando sujeito às ações sem que sofra deformações superiores aos valores máximos admissíveis, o que colocaria em causa a garantia de qualidade.

Nas sucessivas camadas de um pavimento podem distinguir-se pelas funções que desempenham a camada superficial, denominada por camada de desgaste e cuja função passa por assegurar as características funcionais do pavimento assim como de impermeabilização do pavimento evitando a entrada de água exterior para as camadas inferiores, solo de fundação e o corpo do pavimento. O corpo do pavimento, sendo o principal responsável pela capacidade em suportar as cargas aplicadas, pode compreender camadas estabilizadas com ligantes betuminosos ou hidráulicos e também camadas granulares. Este encontra-se dividido em várias camadas de espessura finita, considerando-se em sentido descendente as seguintes camadas: camada de regularização, camada de base (que pode ser ligada ou não), e camada de sub-base ou camada inferior do corpo do pavimento, realizada sobre o solo de fundação e normalmente constituída por materiais granulares estabilizados por compactação através de processos mecânicos, ou solo tratado com cimento em alguns casos. A fundação é constituída pelo terreno natural, que no caso de não possuir as características desejadas é sobreposta por uma camada de solo tratado com ligantes de forma a melhorar e homogeneizar as suas características resistentes (leito do pavimento). Este último faz parte integrante da fundação.

Procura-se um comportamento unificado das camadas betuminosas ao serem aplicadas regas de colagem com ligantes betuminosos entre camadas. Nestas condições, num plano vertical, as camadas betuminosas estão sujeitas a estados de tensão de compressão máxima na face superior da camada de desgaste até um valor máximo de tensão de tração localizado na face inferior da última camada betuminosa. Evita-se assim um estado de degradação mais severo minimizando a presença de tensões máximas de compressão em cada uma das faces superiores e tensões máximas de tração em cada uma das faces inferiores das camadas betuminosas. As tensões e as extensões horizontais de tração ( $\sigma_t$ ;  $\epsilon_t$ ) resultantes da aplicação de cargas no pavimento são esforços instalados nas camadas estabilizadas com ligantes, obtendo-se valores máximos nas suas faces inferiores, geralmente no eixo de simetria de aplicação das cargas. Os esforços que determinam as extensões de compressão ( $\sigma_z$ ;  $\epsilon_z$ ) encontram-se nas camadas granulares e na fundação, também na vertical da carga, Figura 2.1.

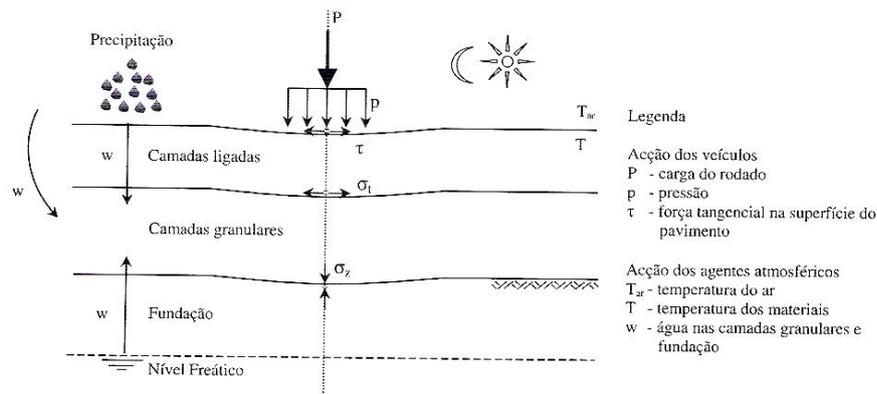


Figura 2.1 – Pavimento Rodoviário – constituição e ações (Branco *et al.*, 2006)

Relativamente às ações, consideram-se dois grupos: as resultantes da aplicação de cargas por parte dos veículos circulantes e as ações resultantes dos agentes climáticos representadas pela temperatura e pela água. As primeiras (expressas por pressões verticais, uniformes e aplicadas numa área circular na superfície do pavimento, por uma ação tangencial aplicada no plano entre o pneu e o pavimento corresponde à ação necessária para o movimento do veículo e as ações que ocorrem durante as mudanças de velocidade e direção) determinam diferentes comportamentos dos pavimentos, devido ao facto de muitos materiais terem comportamentos que variam conforme a sua solicitação (caso dos materiais betuminosos). No caso das ações de origem climática, a temperatura do ar determina a temperatura de cada camada em cada instante, condicionando a sua rigidez que é inversamente proporcional à temperatura.

Para cada metodologia de dimensionamento existem diferentes abordagens relativamente aos critérios de rutura, o que leva a diferentes resultados finais. A prevenção da rutura estrutural é feita através do dimensionamento do pavimento, sendo a rutura funcional prevenida através de uma escolha cuidada dos materiais utilizados na realização da camada de desgaste. Uma vez seleccionada uma estrutura e verificados os critérios construtivos e económicos, tem-se a estrutura final do pavimento. Mais á frente apresentar-se-á o organigrama de dimensionamento de pavimentos.

## 2.2. Metodologia de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

O dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis é sustentado numa relação entre uma modelação empírica e uma modelação mecanicista, baseada na teoria da elasticidade. Procura-se assim conceber uma estrutura capaz de resistir a um determinado tipo de ações e em determinados ambientes, garantindo as condições de utilização previamente estabelecidas. O

dimensionamento é feito para determinados graus de confiança que poderão variar segundo a importância da via em questão.

O método da AASHTO tal como o método da AUSTROADS utiliza um novo conceito de dimensionamento de pavimentos. O processo inicia-se por uma avaliação das condições locais (clima, tráfego, leito do pavimento ou condições do pavimento existente no caso de uma reabilitação). Estes dois métodos permitem uma categorização do conhecimento do projetista relativamente aos parâmetros a utilizar, hierarquizados e divididos em níveis distintos em função da fiabilidade dos dados disponíveis. Os resultados do processo de dimensionamento são devolvidos em valores representativos das tensões instaladas e da regularidade do pavimento (“suavidade”, vulgarmente avaliada pelo ruído provocado pelo rolamento sobre o mesmo, cientificamente avaliada pelo IRI – *International Roughness Index*) e não da espessura das camadas. Finalizado o pré-dimensionamento, se as tensões instaladas estiverem dentro dos limites impostos para que o pavimento tenha o tempo de vida útil esperado, então pode-se realizar uma otimização caso seja possível. No caso das condições não serem verificadas, o processo repete-se até que tal aconteça.

O processo de dimensionamento é realizado admitindo um grau de confiança que depende da importância da via no sistema rodoviário em que está integrada. Estes graus representam a probabilidade de um pavimento, dimensionado e executado de acordo com os critérios definidos, ultrapassar o tempo de vida útil quando sujeito às ações estimadas sem que seja necessário proceder a trabalhos de manutenção. A título de exemplo, o método da AUSTROADS estabelece cinco níveis de confiança no processo de dimensionamento que serão apresentados posteriormente.

Apresenta-se de seguida um diagrama representativo das fases de dimensionamento de um pavimento.

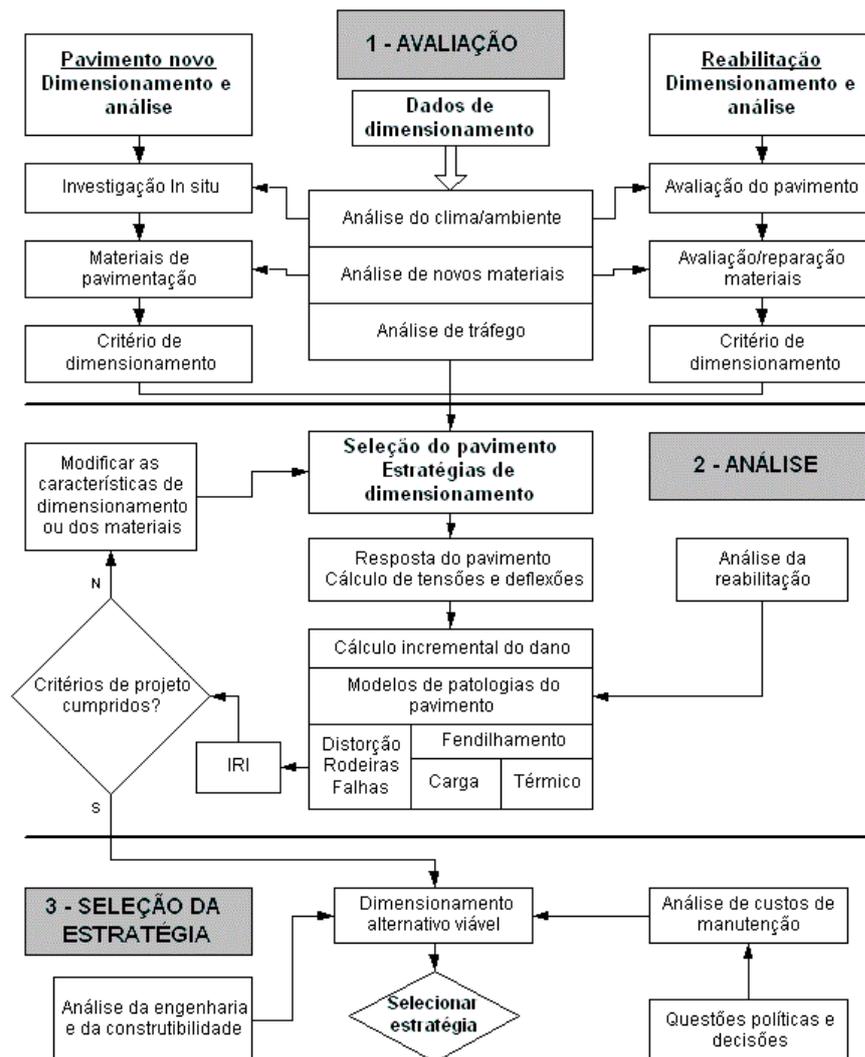


Figura 2.2 – Organograma de dimensionamento de pavimentos flexíveis (AASHTO, 2008)

### 2.3 Previsão do Módulo de Deformabilidade de Misturas Betuminosas

O valor do módulo de deformabilidade,  $E_m$ , é a característica mecânica mais condicionante dos materiais betuminosos, conforme é indicado em Branco *et al.* (2006). Deste facto, a escolha do coeficiente de Poisson é efetuada de forma menos rigorosa uma vez que não tem uma influência significativa na distribuição de tensões. O MACOPAV admite um valor de  $\nu = 0,35$  para camadas betuminosas. Outros autores sugerem valores de  $\nu = 0,40$  não sendo esta diferença de valores significativa em termos de resultados, qualquer que seja o material em estudo.

O comportamento tensão-deformação de um material betuminoso é muito dependente da temperatura de serviço, do tempo de carregamento e da sua composição. O módulo de deformabilidade de uma mistura betuminosa, função da velocidade de carregamento e da temperatura de serviço, exprime a relação entre o carregamento,  $\sigma_0$ , e a amplitude da extensão,  $\varepsilon_0$ , resultante desse carregamento e expressa pela Equação 1 (Capitão, 2003).

$$E_m(t, T) = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

onde,

$E_m$  - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa para uma determinada temperatura de serviço T;

$\sigma$  - tensão instalada;

$\varepsilon$  - extensão instalada;

Os métodos de dimensionamento empírico-mecanicistas incluem tradicionalmente fórmulas de previsão dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas determinados através de regressões dos resultados obtidos nos ensaios de cargas repetidas. Este valor traduz de forma aproximada a forma como o material faz a degradação das cargas (relação entre tensão e extensão) e traduz a influência da temperatura e da frequência de aplicação de cargas.

### 2.3.1 Método da Shell

Utiliza-se neste cálculo um conceito introduzido por Van der Poel, retirado de Branco *et al.* (2006), denominado de rigidez do betume,  $Sb$ , que traduz a relação entre tensão e extensão sob determinadas condições de temperatura e tempo de carregamento. Este valor pode ser calculado através da Equação 2 retirada de Branco *et al.* (2006), que representa o ábaco de Van der Poel (Figura 2.3), mas de utilização mais restrita.

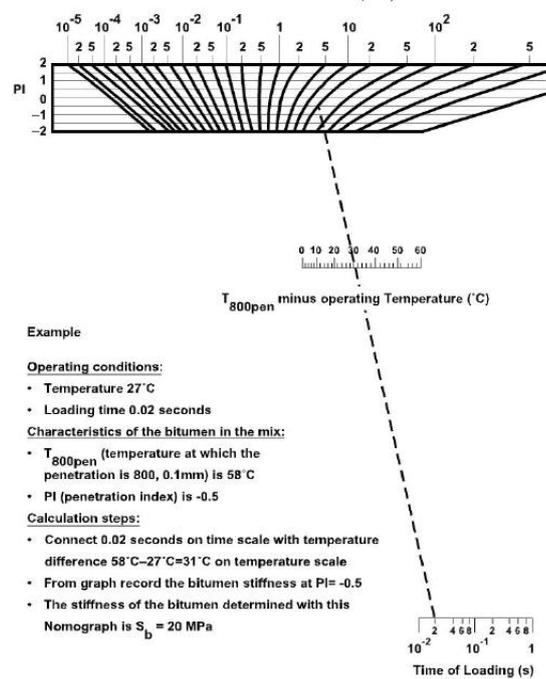


Figura 2.3 – Abaco Van der Poel para determinação da rigidez do betume (AUSTROADS, 2008)

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \cdot t_c^{-0,368} \cdot 2,718^{-IPen} \cdot (Tab - T)^5 \quad (2)$$

onde:

- S<sub>b</sub> - rigidez do betume (MPa);
- T<sub>c</sub> - tempo de carregamento (s);
- IPen - índice de penetração do betume;

O valor de *IPen* pode ser calculado pela Equação 3, desenvolvida por Pfeiffer e Van Dormal, retirada de Branco *et al.* (2006), sendo apenas válida nas condições referidas.

$$IPen = \frac{20 \cdot Tab + 500 \cdot \log(\text{pen}25) - 1955,55}{Tab - 50 \cdot \log(\text{pen}25) + 120,15} \quad (3)$$

onde:

- 20°C ≤ (Tab-T) ≤ 60°C
- 0,01 s ≤ t ≤ 0,1s
- 1 ≤ IPen ≤ 1

onde:

Tab - temperatura de amolecimento (°C) pelo método do anel e bola, sendo também uma medida empírica, indireta, da viscosidade do betume;

pen25 - penetração ( $10^{-1}$ mm) do betume a 25°C, sendo também uma medida empírica da viscosidade do betume;

T - temperatura a que se encontra a material (°C);

Há que ter em conta no dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos flexíveis, utilizando o ábaco de Van der Poel ou a Equação 2, que a caracterização do betume deve corresponder à situação de serviço, ou seja, considerando que já ocorreu um endurecimento referente ao fabrico e colocação das misturas betuminosas em obra e que é representado pelo índice “r”. Para que tal seja considerado, pode adotar-se por aproximação a indicação deduzida para condições inglesas (Kennedy, 1985), também verificada em algumas situações em Portugal segundo Branco *et al.* (2006).

$$pen25_r = 0,65 \cdot pen25 \quad (4)$$

$$Tab_r = 99,13 - 26,35 \cdot \log(pen25_r) \quad (5)$$

O tempo de carregamento necessário para a determinação da rigidez do betume pode ser calculado pela Equação 6 proposta pela Universidade de Nottingham em 1986 (Branco *et al.*, 2006).

$$tc = 1/v_t \quad (6)$$

onde  $v_t$  indica a velocidade média da corrente de tráfego pesado em km/h. Para o tráfego “para-arranca” a gama de valores relativamente ao tempo de carregamento pode variar entre 0,10 e 1,0 segundos correspondendo a 10 km/h e 1 Km/h respetivamente. Para parques de estacionamento a gama de valores encontra-se entre 1 minuto e 10 horas.

No método da Shell (Bonnaure *et al.*, 1977) a previsão do módulo de deformabilidade,  $E_m$ , indicada em Branco *et al.* (2006) para uma rigidez do betume,  $S_b$ , numa gama de valores entre os 5 e os 1000 MPa, é efetuada com base na Equação 7 dada por:

$$E_m = 10^A \quad (7)$$

onde:

$$A = \frac{S_{89} + S_{68}}{2} \cdot (\log S_b - 8) + \frac{S_{89} - S_{68}}{2} \cdot |\log S_b - 8| + S_{m108} \quad (8)$$

Para uma rigidez do betume a variar entre 1000 e 3000 MPa, o módulo de deformabilidade é calculado de acordo com a Equação 9, dado por:

$$E_m = 10^B \quad (9)$$

onde:

$$B = (S_{m3109} - S_{m108} - S_{89}) \cdot \frac{\log S_b - 9}{\log 3} + S_{m108} + S_{m89} \quad (10)$$

em que:

$$S_{89} = 1,12 \cdot \frac{(S_{m3109} - S_{m108})}{\log 30} \quad (11)$$

$$S_{68} = 0,6 \cdot \log \frac{1,37 \cdot v_b^2 - 1}{1,33 \cdot v_b - 1} \quad (12)$$

$$S_{m3109} = 10,82 - \frac{1,342 \cdot (100 - v_a)}{v_a + v_b} \quad (13)$$

$$S_{m108} = 8 + 5,68 \cdot 10^{-3} \cdot v_a + 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot v_a^2 \quad (14)$$

onde:

V<sub>a</sub> - cociente do volume do agregado pelo volume total (%), ou percentagem volumétrica do agregado;

V<sub>b</sub> - cociente do volume de betume pelo volume total (%), ou percentagem volumétrica do betume;

E<sub>m</sub> - módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (Pa);

S<sub>b</sub> - Rigidez do betume (Pa);

Para valores de rigidez do betume fora do intervalo considerados pelas Equações 7 e 9, o módulo deverá ser determinado em cada caso recorrendo a ensaios apropriados. Os valores de  $E_m$  para valores de  $S_b$  inferiores a 5 MPa, correspondentes a uma situação de não linearidade do material, são determinados através de um procedimento baseado no método da Shell, expresso pela relação entre o módulo de deformabilidade de misturas betuminosas e a rigidez do betume. O manual de dimensionamento apresenta, para as classes típicas desse módulo, duas curvas designando por S1 as misturas densas com teor em betume acima de 4,5% e S2 misturas abertas com teor de betume abaixo de 4%, representando a generalidade das misturas betuminosas. Apresentam-se na Figura 2.4 as curvas que se traduzem numa escala bilogarítmica, na qual a relação é linear para valores de  $S_b$  abaixo de 10 MPa. Desta forma, é aceitável a utilização da Equação 7 quando  $S_b$  toma valores inferiores a 5 MPa.

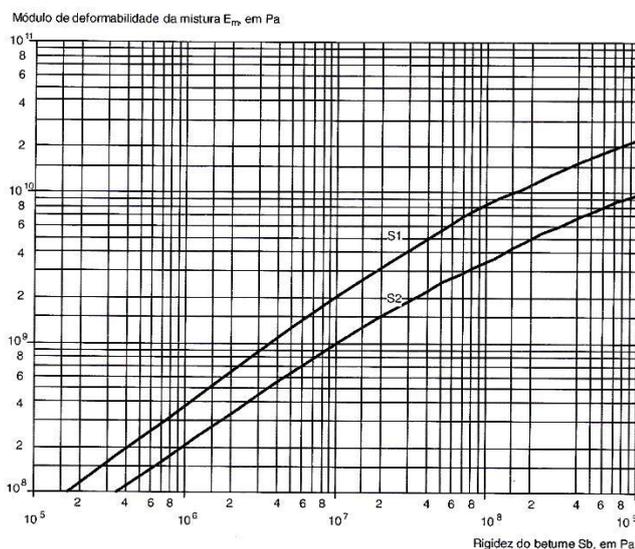


Figura 2.4 – Relação entre  $E_m$  e  $E_b$  para as classes S1 e S2 do manual de dimensionamento da SHELL

Quando o valor de  $E_m$  determinado através da fórmula previsional e este for inferior a 100 MPa, verificando-se geralmente para temperaturas elevadas nas misturas o que implica baixa viscosidade do betume, deve admitir-se este valor como referência.

Como alternativa às Equações 7 e 9, a Shell no seu manual de dimensionamento (Shell, 1977) apresenta um ábaco que auxilia a aproximação do valor do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, com base nas variáveis assinaladas na Figura 2.5 ( $S_b$ ,  $V_a$ ,  $V_b$ ).

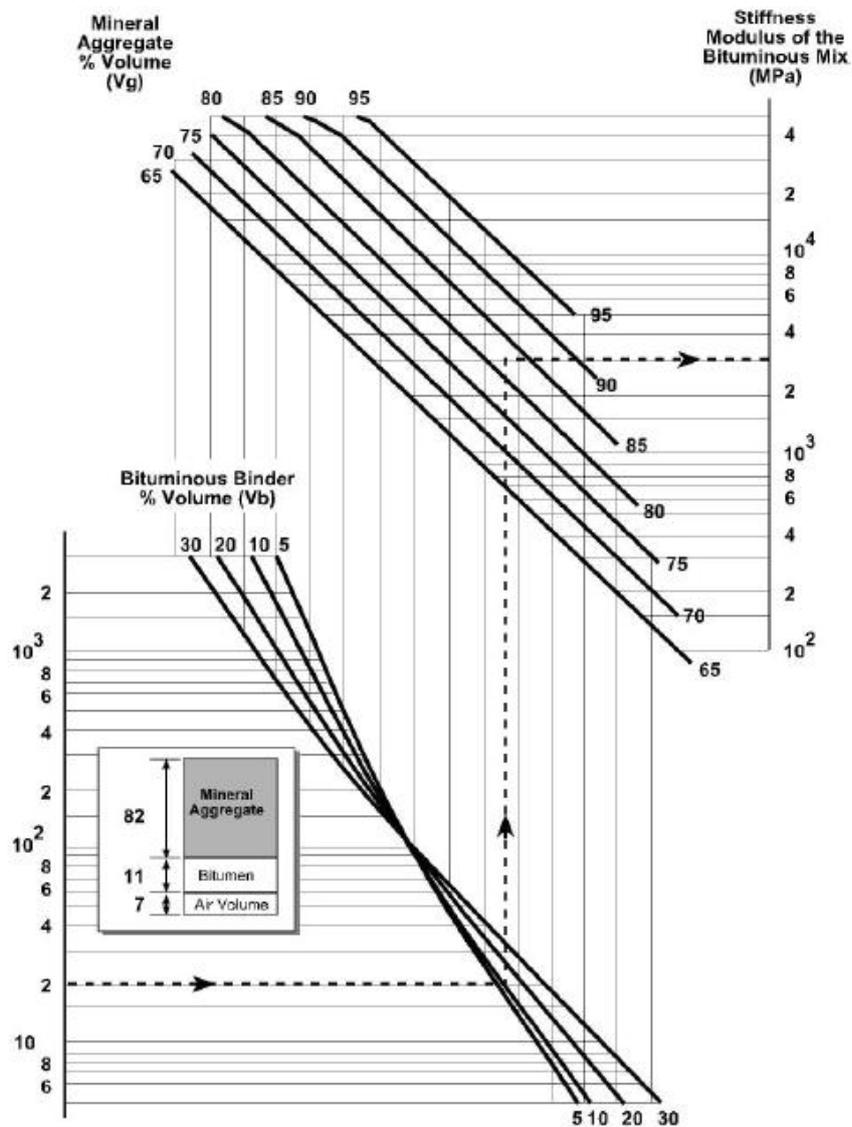


Figura 2.5 – Diagrama de Bonnaure (1982) para determinação do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas (AUSTROADS, 2008)

Para este último diagrama necessitamos de conhecer:

- $E_{bit}$  - módulo do betume à temperatura de serviço e carga submetida, resultante do diagrama de Van der Poel;
- $V_b$  - percentagem, em volume, do betume na mistura betuminosa. Para uma mistura tradicional de 5% em termos de massa, este parâmetro toma o valor de 11%.

- $V_{agg}$  - percentagem em volume do agregado na mistura. Para uma mistura tradicional de 5% em termos de massa, e compactado de forma a ficar com 6% em espaços vazios, este parâmetro toma o valor de 83%.

### 2.3.2 Método da AASHTO

Relativamente ao método da AASHTO, o valor é definido partindo de uma curva construída a partir de uma temperatura de referência. A Equação 15 representa a função genérica que caracteriza este valor.

$$\log(E_m) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad (15)$$

onde:

- $E_m$  - Módulo de deformabilidade das camadas betuminosas;
- $t_r$  - Tempo de carregamento à temperatura de referência;
- $\delta, \alpha$  - Parâmetros de ajuste; para certo conjunto de dados  $\delta$  representa o menor dos valores de  $E_m$  e  $\delta + \alpha$  representa o maior valor de  $E_m$ ;
- $\beta, \gamma$  - Parâmetros que descrevem a forma da função sigmoide;

Os parâmetros de ajuste  $\delta$  e  $\alpha$  dependem da granulometria do agregado, do volume de vazios e do material ligante. Os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  dependem das características do material ligante e de  $\delta$  e  $\alpha$ .

O tempo de carregamento determinado pela Equação 16 pode ser calculado para qualquer tempo de carregamento e qualquer temperatura.

$$t_r = \frac{t}{\alpha(t)} \quad (16)$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \log[\alpha(T)] \quad (17)$$

onde:

- $t_r$  - Tempo de carregamento (s) à temperatura de referência;
- $t$  - Tempo de carregamento (s) à temperatura de serviço;
- $\alpha(T)$  - Fator em função da temperatura;
- $T$  - Temperatura de serviço, em °F;

As curvas mestras, ou curvas características, podem ser desenvolvidas a partir de testes de laboratório ou desenvolvidas pela equação de previsão do módulo de deformabilidade, ajustada a uma determinada gama de temperaturas, carregamentos e condições climáticas, compatíveis com as condições que se pretendem utilizar em determinado estudo. Estas representam o comportamento de deformabilidade das misturas para determinadas temperaturas de referência. No caso em estudo, a determinação do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa é determinado automaticamente pelo programa de dimensionamento utilizado. A equação de previsão do módulo de deformabilidade revista é apresentada seguidamente pela Equação 18, segundo Dias,(2009).

$$\log(E_m) = -1,249937 + 0,029232 \cdot \rho_{200} - 0,001767 \cdot (\rho_{200})^2 - 0,002481 \cdot \rho_4 - 0,058097 \cdot V_v - 0,802208 \cdot \frac{V_{beff}}{(V_{beff} + V_v)} + \frac{3,871977 - 0,0021 \cdot \rho_4 + 0,000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0,005470 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \cdot \log(f) \cdot \log(\eta))}} \quad (18)$$

onde:

- $E_m$ - Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, em  $10^5$  psi;
- $\eta$  - Viscosidade do betume, em  $10^6$  P;
- $f$  - Frequência em Hz;
- $V_v$  - Volume de vazios;
- $V_{beff}$  - Percentagem volumétrica efectiva de betume;
- $\rho_{34}$ - Percentagem de retido no peneiro  $3/4$  em relação ao peso total;
- $\rho_{38}$ - Percentagem de retido no peneiro  $3/8$  em relação ao peso total;
- $\rho_4$  - Percentagem de retido no peneiro 4 em relação ao peso total;
- $\rho_{200}$ - Percentagem de retido no peneiro 200 em relação ao peso total;

A viscosidade do betume depende da temperatura de serviço, influenciando de forma permanente o módulo de deformabilidade da mistura e dos fatores atrás referidos que dela dependem. Em condições ótimas, a viscosidade do betume pode ser determinada pela Equação 19 Dias,(2009).

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_r \quad (19)$$

onde:

- $\eta$  - Viscosidade, em cP;
- $T_r$  - Temperatura, em °Ra;
- $A$  - Parâmetro que define o coeficiente linear de regressão ( $Y=A+BX$ );
- $VTS$  - Coeficiente angular de regressão exprimindo a relação da viscosidade com a temperatura;

De acordo com as indicações do NCHRP (2004), os parâmetros A e VTS podem ser obtidos através dos dados de testes com o reómetro dinâmico de corte (“Dynamic Shear Rheometer Test Data”) garantindo a possibilidade de trabalhar no nível hierárquico 1, ou seja, o que devolve os valores mais próximos dos reais. Em alternativa, e para casos onde não seja possível dispor destes dados (situação onde são utilizados os restantes níveis hierárquicos), poderão ser admitidos valores para A e VTS resultantes de testes convencionais que incluam no seu estudo os parâmetros de viscosidade, ponto de amolecimento e penetração. Contudo, para temperaturas baixas e níveis altos de carregamentos, a viscosidade máxima não deverá ultrapassar os  $2,7 \times 10^{10}$  Poise.

Quadro 2.1 – Parâmetros A e VTS recomendados e baseados na penetração do betume asfáltico Dias (2009)

FRACÇÕES GRANULOMÉTRICAS	A	VTS
40-50	11.0525	-3.5047
60-70	10.6508	-3.5537
85-100	11.9232	-3.621
120-150	11.0897	-3.7252
200-300	11.8107	-4.0068

### 2.3.3 Método da AUSTROADS

O método da AUSTROADS utiliza duas metodologias para determinação do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas. Este valor pode ser determinado através de ensaios de tração indirecta, ajustados à temperatura de serviço e à frequência de aplicação de carregamentos, ou através do método da Shell. No caso em que nenhuma dos métodos acima indicados seja aplicável, poderão ser utilizados valores indicados em outras publicações, ficando ao critério do projetista a seleção dos valores que mais se adequem.

## 2.4 Tratamento de Tráfego Pesado

Uma das ações fundamentais a considerar no dimensionamento de um pavimento é o tráfego. Assim sendo, a sua correta caracterização como ação mecânica predominante torna-se essencial.

A variedade de cargas que podemos considerar dentro dos limites estabelecidos como legais para as estradas Portuguesas torna-se uma dificuldade acrescida, pois resulta da instalação no

pavimento de estados de tensão e de deformação muito variados. Considerando toda a diversidade de fatores, uniformiza-se toda a informação relativa ao tráfego num valor equivalente ao número de passagens de um eixo simples designado por “eixo-padrão”.

O eixo-padrão é um eixo simples, considerando-se ter duas rodas iguais em cada extremidade, afastadas entre si pela distância  $L$ . Considere-se uma área  $A$  dada por  $P/4p$ , referente à área de contacto entre o pneu e o pavimento, de forma circular de raio  $r$ , uma pressão  $p$  de contacto considerada igual à pressão de enchimento dos pneus, e uma carga  $P$  que se distribui igualmente pelos 4 pneus e toma o valor de  $P/4$  para cada um deles (Branco *et al.*, 2006).

#### 2.4.1 Pré-dimensionamento pelo MACOPAV

O tipo de veículos considerado pelo MACOPAV - Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995) encontra-se agrupado em 11 categorias diferentes, nomeadas de  $a$  a  $k$ , das quais apenas se considerando para efeitos de dimensionamento as classes posteriores à classificação  $f$ .

O MACOPAV utiliza um eixo-padrão de 80 KN (utilizado na análise dos resultados do ensaio AASHO e na metodologia da SHELL) para pavimentos flexíveis. Noutros países utilizam-se referências para eixo-padrão de outros valores, não sendo relevante uma vez que é possível converter o número de passagens do eixo-padrão de 80 KN para o número de passagens de um eixo de outros valores assim como o contrário, utilizando para tal a Equação 20.

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^x = f \quad (20)$$

Este fator,  $f$ , denominado por “coeficiente de equivalência” entre dois eixos, representa o número de passagens do eixo  $P_1$  necessárias para provocar um dano semelhante a uma passagem do eixo  $P_2$ . Outros estudos defendem uma atitude mais conservadora relativamente a este fator de agressividade e respetiva transformação em valores de eixo-padrão. Quer-se com isto dizer que os valores deverão ser agravados, nomeadamente nos valores traduzidos pela Equação 20. Segundo este estudo, conforme indicado Branco *et al.* (2006), resume-se a seguinte informação:

- A potenciação da Equação 20 deverá ser 5, o que resulta num agravamento da agressividade em cerca de 62% de um eixo de 130 KN relativamente a um eixo de 80KN comparativamente com o ensaio da AASHO;

- A transformação de eixos duplos e triplos deverá ser direta, ou seja, ou eixo duplo ou triplo dá origem a dois e três eixos simples respetivamente, o que resulta num aumento de 43% do número de eixos simples considerados para representar um eixo duplo. Usualmente considerava-se, tendo em conta o princípio da sobreposição dos efeitos, que a ação de um eixo duplo de peso  $P$  correspondia a 1,4 eixos simples de peso  $P/2$  e um eixo triplo de peso  $P$  equivalia a 2,3 eixos simples de peso  $P/3$ .
- Poderão ser utilizados os fatores de agressividade definidos no MACOPAV (JAE, 1995) até confirmação das conclusões do estudo, depois da sua aplicação a um número superior de postos de pesagem da rede rodoviária Portuguesa.

A Equação 21 traduz um somatório, onde  $TDMA_1$  se refere ao tráfego médio diário anual no primeiro ano e  $t$  a taxa de crescimento (que pode variar no tempo e conduz a um cálculo de  $N_{pes}$  para cada intervalo de tempo).

$$N_{pes} = TDMA_1 \frac{(1 + t)^n - 1}{t} \times 365 \quad (21)$$

A EP define no MACOPAV as classes de tráfego através do número de veículos pesados acumulados em 20 anos na via de projeto ( $N_p$ ), transformando-os em valores equivalentes de eixo-padrão,  $N_{80}^{dim}$ , através de um fator de agressividade,  $\alpha$ .

Através da Equação 21 e dos valores das taxas de crescimento apresentadas do Quadro 2.2, definem-se as classes de tráfego do MACOPAV. A partir destes valores, e afetado-os do fator de agressividade utilizando a Equação 22, determina-se o número de eixos-padrão que solicitam o pavimento durante o tempo de vida útil estabelecido. No caso de pavimentos flexíveis, admitem-se os 20 anos.

$$N_{80}^{dim} = N_{pes} \times \alpha \quad (22)$$

Quadro 2.2 – Caracterização do tráfego segundo o MACOPAV (adaptado de JAE, 1995)

Classe	TMDAp	Taxa de Crescimento (t)	Pavimentos Flexíveis		
			Fator de Agressividade $\alpha$	$N_{80}^{dim}$ 20 anos ( $10^6$ )	$N_p$ 20 anos ( $10^6$ )
T7	<50	Estudo específico			
T6	50-150	3	3	2	0,5-2,5
T5	150-300			8	1,5-2,9
T4	300-500	4	4	20	3,3-5,4
T3	500-800		4,5	40	5,4-8,7
T2	800-1200	5	5	70	9,7-14,5
T1	1200-2000		5,5	100	14,5-24,1
T0	>2000	Estudo específico			

Este número resulta de estudos de previsão de tráfego realizados por questões de dimensionamento do pavimento como das características geométricas da via, ou mesmo das interseções existentes no seu desenvolvimento. Para tal, é necessária informação sobre o tráfego existente e do tráfego que a via possa vir a atrair depois de construída e cujos valores poderão ser obtidos nas estatísticas quinquenais publicadas pela EP ou por outros estudos realizados pontualmente. Com base nesta informação é determinada uma taxa de crescimento anual esperada e determinado o somatório de veículos que solicitam o pavimento durante o intervalo de tempo definido.

No caso de uma estrada com uma faixa de rodagem e dois sentidos, considera-se uma igual distribuição em cada sentido. Para estradas com duas faixas de rodagem, uma em cada sentido, e de duas vias cada, admite-se 45% do tráfego para a via da exterior e 5% do tráfego na via interior. Conhecido o tráfego na via de projeto  $N_{pes}$ , determina-se o número de eixos-padrão através da Equação 22 caso se conheça a distribuição do tráfego de pesados por tipo de veículo, por tipo de eixo e respetivas cargas. Como na maioria dos casos não temos informação suficiente para o fazer, é usual definirem-se as cargas dos veículos pesados pelos fatores de agressividade, ou seja, pelo número de eixos-padrão que representa cada veículo pesado. Quanto maior for o número de eixos-padrão a solicitar um pavimento, menor será o tempo de repouso entre cada carregamento, o que se traduz numa menor capacidade de recuperar da ação induzida. A probabilidade de termos veículos sobrecarregados é também maior.

### 2.4.2 Método da SHELL

Tal como nos restantes métodos de dimensionamento, o método da AASHTO permite a utilização de um eixo padrão de 80 KN, e assume uma esquematização da ação de um eixo-padrão semelhante, de acordo com as seguintes indicações.

$$L=105\text{mm}, p=0,6 \text{ Mpa e } r \approx 105\text{mm}$$

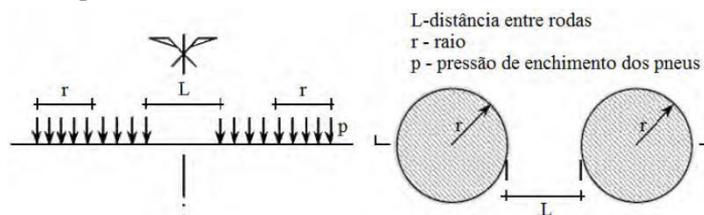


Figura 2.6 – Esquema adotado para a ação de um eixo padrão sobre um pavimento (Picado-Santos *et al.*, 2006)

### 2.4.3 Método da AASHTO

O método da AASHTO utiliza uma grande variedade de informação relativa às ações resultantes do tráfego. No caso de não estarem disponíveis estes dados, poderá ser utilizada uma aproximação, através de dados de estradas localizadas na mesma região, uma vez que este método considera a utilização da hierarquização qualitativa de dados já referida anteriormente.

A análise ao tráfego de veículos pesados seguida pela AASHTO (2008) define o número total de veículos pesados por dia no primeiro ano através da Equação 23, permitindo o cálculo de veículos num determinado incremento de tempo.

$$TT_{1,j,t} = (AADTT_1)(MDF_j)(HDF_i)(DDF)(LDF)(n^{\circ} \text{ dias}) \quad (23)$$

onde:

$AADTT_1$  - número médio anual de pesados por dia no ano base;

$MDF_j, HDF_i, DDF$  e  $LDF$  – fatores de distribuição mensais, horários, do design e da via;

$n^{\circ} \text{ dias}$  - número de dias correspondentes ao período em causa;

Não tendo sido efetuado o levantamento e calculados os fatores horários, diários e mensais, assume-se o valor devolvido pela Equação 21. Determinado o valor, procede-se à divisão do

mesmo nas diversas classes de tráfego apresentadas no Quadro 2.4 (Dias, 2009) através da Equação 24.

Quadro 2.3 – Classificação dos Veículos pesados de acordo com a disposição dos eixos (Fonseca *et al.*, 1999)

Tipo de Veículo	Classe	Subclasse	Tipo de Veículo	Classe	Subclasse
	F	F1		H	H1
		F2			H2
		F3			H3
		F4			H4
Não conformidade		F5			H5
	G	G1			H6
		G2	Não conformidade		H7
		G3		I	I1
Não conformidade		G4			I2
			Não conformidade	I3	

$$T_{1,j,l,k} = (TT_{1,j,l})(NTP_K) \tag{24}$$

onde:

$T_{1,j,l,k}$  - número total de tráfego pesado para cada classe de tráfego;

$TT_{1,j,l}$  - número total de tráfego pesado, no incremento de tempo  $l$  e no mês  $j$  do ano 1;

$NTP_K$  - percentagem de tráfego pesado normalizada para determinada classe de tráfego  $k$ .

No caso de estudo, assumem-se as indicações apresentadas em Fonseca *et al.* (1999) assumindo-se que representam as percentagens verificadas em Portugal. Após este cálculo, passamos ao cálculo do número total de eixos para cada tipo de eixo, simples, duplo ou triplo, de cada classe de tráfego pesado através da Equação 25;

$$NA_{1,j,l,k,a} = (T_{1,j,l,k})(NAT_{k,a}) \tag{25}$$

onde:

$NA_{1,j,l,k,a}$  - número total de eixos para cada tipo de eixo,  $a$ , de cada classe de tráfego;

$T_{1,j,l,k}$  - número total de tráfego pesado para cada classe de tráfego;

$NAT_{k,a}$  - número médio de eixos por cada tipo de eixo para cada classe de pesados (valor independente do fator tempo).

Obtido o número total de eixos por cada tipo de eixo, poderemos obter o número total de eixos (por tipo de eixo) de cada grupo de carga de uma classe de pesados específica, multiplicando pela carga normalizada por eixo para determinados grupos de carga, através da Equação 26;

$$AL_{1,j,l,k,a,w} = (NWP_{a,w})(NA_{1,j,l,k,a}) \quad (26)$$

onde:

$AL_{1,j,l,k,a,w}$  - número total de eixos por tipo de eixo, de cada grupo de carga de uma classe de pesados;

$NWP_{a,w}$  - percentagem normalizada de carga por eixo de um determinado grupo de carga;

$NA_{1,j,l,k,a}$  - número total de eixos para tipo de eixo, a, de cada classe de trafego pesado.

No final do processo somam-se para todas as classes de pesados e para cada incremento de tempo os valores por eixo e para cada tipo de eixo, obtendo-se assim o número total de aplicações de eixos de cada grupo de carga por tipologia de eixos para o mesmo incremento.

#### 2.4.4 Método da AUSTROADS

A AUSTROADS considera dois métodos distintos de dimensionamento. O primeiro, para um nível reduzido de tráfego, considera um pavimento com espessura inferior a 40 mm sobre base granular, onde só é estudado um tipo de rotura manifestando-se sobretudo pela regularidade do pavimento/pele de crocodilo. No caso de pavimentos com uma ou mais camadas ligadas são considerados três tipos de dano: o dano por fadiga, o dano por fadiga das camadas granulares tratadas e a perda de regularidade do pavimento/pele de crocodilo.

À semelhança dos outros métodos, a informação disponível sobre os valores de tráfego pode não ser suficiente para realizar o dimensionamento, o qual é baseado na repetição de eixos-padrão. O pavimento é então analisado para determinar o número de solicitações de um eixo-padrão para cada um dos tipos de danos. Este valor (SAR – “Standard Axle Repetitions”) deverá ser igual ou superior ao valor do tráfego solicitante.

Quando o pavimento é composto por diferentes materiais com diferentes modos de rutura, a carga admissível do pavimento como um todo será determinada pelo modo de rotura para o qual a carga admissível é a primeira a ser ultrapassada pela previsão de tráfego. A exceção a esta indicação poderá acontecer em pavimentos com bases melhoradas com ligantes, podendo

ser verificada a limitação por fadiga da camada melhorada mas mantendo as características necessárias de serviço.

O tráfego pode ser categorizado em função do comprimento, número de eixos e tipo de veículo, numa classificação que se divide em 12 conjuntos, considerando-se apenas os últimos 10, que se apresentam no Quadro 2.4, para efeitos de dimensionamento.

Quadro 2.4 – Categorização do tráfego segundo a AUSTROADS (2008)

VEICULOS PESADOS					
MÉDIO 5,5m a 14,5m	2	2	Veículo ou autocarro de 2 eixos	3	$d(1) > 3,2\text{m}$ ; eixos=2
	3	2	Veículo ou autocarro de 3 eixos	4	Eixos=3 e conjuntos=2
	>3	2	Veículos 4 eixos	5	Eixos>3 e conjuntos=2
LONGO 11,5 m a 19,0 m	3	3	Articulado 3 eixos Veículo articulado 3 eixos ou veículo rígido e reboque	6	$d(1) > 3,2\text{ m}$ eixos=3 e conjuntos=3
	4	>2	Articulado 4 eixos Veículo articulado 4 eixos ou veículo rígido e reboque	7	$d(1) < 2,1\text{ m}$ eixos=3 e conjuntos=3 eixos=4 e conjuntos >2
	5	>2	Articulado 5 eixos Veículo articulado 5 eixos ou veículo rígido e reboque	8	$d(1) < 2,1\text{ m}$ eixos=3 e conjuntos=3 eixos=5 e conjuntos >2
	6 >6	>2 3	Articulado 6 eixos Veículo articulado 5 eixos (ou mais) ou veículo rígido e reboque	9	Eixos=6 e conjuntos>2 Ou Eixos>6 e conjuntos=3
COMBINAÇÃO MÉDIA 17,5 m a 36,5 m	>6	4	Duplo B Duplo B ou veículo pesado e reboque	10	Conjuntos =4 e eixos>6
	>6	5 ou 6	Comboio duplo Comboio duplo ou veículo pesado e dois reboques	11	Conjuntos =5 ou 6 e eixos>6
COMBINAÇÃO LONGA >33 m	>6	>6	Comboio duplo Comboio duplo ou veículo pesado e três reboques	12	Conjuntos > 6 e eixos>6

onde:

Axle group - eixos adjacentes com um afastamento máximo de 2.1m;

Groups - número de conjuntos de eixos;

Axles - número de eixos – afastamento máximo de 10m;

d(1) - distancia entre o primeiro e o segundo eixo;

d(2) - distancia entre o segundo e terceiro eixo.

As pressões de enchimento de pneus consideradas variam entre os 500 e os 1200 kPa. Relativamente às distribuições por via em estradas com mais do que uma via em cada sentido, o método considera uma distribuição igual evitando assim em fase de dimensionamento e construtiva os efeitos dos ressaltos no pavimento e uniformizando todo o processo construtivo. A caracterização do tráfego solicitante inicia-se por calcular o número total de veículos pesados (HVAG – “Heavy vehicle axle groups”) no tempo de vida útil, partindo dos seguintes elementos: peso médio do tráfego diário no primeiro ano do projeto, previsão das mudanças durante o período de utilização e combinação de ambos os elementos para estimar a carga total que solicita o pavimento.

A equação utilizada para obter o tráfego total de dimensionamento (NDT – “Design Traffic”) em grupos por eixos de veículos pesados que solicitam a via no tempo útil do projeto é:

$$N_{DT} = 365 \times AADT \times DF \times \%HV/100 \times LDF \times CGF \times N_{HVAG} \quad (27)$$

onde:

*AADT* - tráfego médio diário anual em veículos por dia no primeiro ano;

*DF* - fator de proporção que considera os dois sentidos;

*%HV* - percentagens médias de veículos pesados;

*LDF* - fator de proporção de tráfego em cada via;

*CGF* - fator de crescimento cumulativo;

*N<sub>HVAG</sub>* - número médio de eixos por veículo pesado.

O fator de distribuição de tráfego por via (LDF – “Lane design factor”) é indicado no Quadro 2.5. Este valor é sugerido como limite para cada via, e poderá ser reduzido se estudos de tráfego indicarem que um número inferior é mais apropriado.

Quadro 2.5 – Fator de distribuição de tráfego por via (LDF)

LOCALIZAÇÃO	Nº DE VIAS EM CADA DIRECÇÃO	LDF		
		VIA ESQUERDA	VIA CENTRAL	VIA DIREITA
RURAL	2 VIAS	1.00*	n/a	0.50
	3 VIAS	0.95	0.65	0.30
URBANA	2 VIAS	1.00*	n/a	0.50
	3 VIAS	0.65	0.65	0.50

Para determinar o HVAG total na via de projeto, é necessário ter uma estimativa do número médio de veículos pesados na mesma via para o primeiro ano, minimizando assim o efeito das variações diárias. Existem outros métodos com graus de precisão diferentes que poderão ser escolhidos de acordo com a importância da via em projeto. Poderão também ser utilizados dados recolhidos com registo de pesagem em movimento (WIM – “weight in motion”) que fornecem o número de eixos por veículo pesado necessário para o cálculo de HVAG e a distribuição dos tipos de grupo de eixos e cargas necessárias para calcular o tráfego de projeto. A contagem efetiva fornece o número de veículos de diferentes tipos e número de eixos por veículo mas não fornece a carga dos mesmos (TLD – “traffic load distribution”). Um terceiro método consiste numa utilização menos detalhada, contabilizando o número de eixos e determinando uma percentagem estimada de veículos pesados, sendo da responsabilidade do projetista a análise crítica destes valores (formulação semelhante à utilizada no presente trabalho).

A taxa de crescimento é dada pela fórmula seguinte:

$$\text{Comulative Growth Factor (CGF)} = \begin{cases} \frac{(1+0.01R)^P - 1}{0.01R}, & R > 0 \\ P, & R = 0 \end{cases} \quad (28)$$

onde:

$R$  - taxa anual de crescimento (%);

$P$  - Tempo de vida útil do projeto (anos).

Os valores do CFG poderão ser consultados no Quadro 2.6 e em casos em que seja previsível a alteração da taxa de crescimento deverá ser utilizado o método apresentado no Appendix C da publicação AUTROADS (2008).

Quadro 2. 6 – CGF – fator de crescimento cumulativo para valores inferiores à capacidade de fluxo de tráfego, adaptado de AUSTROADS (2008)

Tempo de Vida Útil (P) Anos	Taxa de Crescimento Anual (R) %							
	0	1	2	3	4	6	8	10
5	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,9	6,1
10	10,0	10,5	10,9	11,5	12,0	13,2	14,5	15,9
15	15,0	16,1	17,3	18,6	20,0	23,3	27,2	31,8
20	20,0	22,0	24,3	26,9	29,8	36,8	45,8	57,3

Para estimarmos o número de eixos acumulados na via de projeto para o tempo de vida útil, é necessário conhecer o número de eixos médio por veículo pesado ( $N_{HVAG}$ ). Os métodos atrás

descritos são de possível aplicação, devendo ser escolhido o método em função da importância da via, dos dados disponíveis e dos meios disponíveis para recolha dos mesmos. Na ausência de informação necessária, existem indicadores para a determinação de valores admissíveis, apresentados na tabela seguinte. O método também contempla indicações para estimativas de valores em casos de previsão de aumentos de cargas por eixo ao longo do tempo de vida útil da via.

Quadro 2. 7 – Valores presumíveis de grupos de eixos de veículos pesados por veículo pesado NHVAG

Localização	$N_{HVAG}$
Vias Rurais	2.8
Vias Urbanas	2.5

Para calcular o SAR relativo a cada tipo de dano conforme foi referido anteriormente, é necessário um método que relacione o dano associado a cada grupo de eixos de cada tipo de eixo relativamente ao dano causado por um eixo-padrão. As cargas por tipo de eixo que causam o mesmo dano que um eixo-padrão são apresentadas no Quadro 2.8. O número de repetições do eixo-padrão para o dano é avaliado pela Equação 2.9, quer para o carregamento do conjunto de eixos (que causa o mesmo dano que um eixo-padrão) quer para o carregamento padrão do grupo de eixos ( $SL_i$  – *axle group's standard load*).

$$SARm_{ij} = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i}\right)^m \quad (29)$$

onde:

$SARm_{ij}$  - número de repetições de eixo-padrão que causa o mesmo dano que uma passagem de um grupo de eixos do tipo  $i$  com a carga  $L_{ij}$  onde o expoente do dano da carga é  $m$ ;

$SL_i$ - carregamento standard para o tipo de grupo de eixos  $i$  (Quadro 2.8);

$L_{ij}$  - magnitude do carregamento  $j$  do grupo de eixos  $i$ ;

$m$  - expoente do dano do carregamento para o tipo de dano (Quadro 2.9);

Consideram-se os carregamentos que resultam numa flexão máxima na superfície do pavimento. Seguidamente apresentamos os valores recomendados (Quadro 2.9).

Quadro 2.8 – Carregamento de grupo de eixos de provocam um dano semelhante ao eixo-padrão

TIPO DE CONJUNTOS DE EIXOS	CARREGAMENTO (KN)
Eixo simples com rodado simples (SAST)	53
Eixo simples com rodado duplo (SADT)	80
Eixo duplo de rodado simples (TAST)	90
Eixo duplo de rodado duplo (TADT)	135
Eixo triplo de rodado duplo (TRDT)	181
Eixo quádruplo de rodado duplo (QADT)	221

Quadro 2.9 – Expoentes para o dano das cargas específico para cada tipo de dano

Método de dimensionamento	Tipo de pavimento	Tipo de dano	Expoente m para o dano do carregamento	Unidade do dano
Empírico	Pavimento granular com revestimento betuminoso	Dano total do pavimento	4	ESA
Mecanicista	Pavimento com uma ou mais camadas ligadas	Fadiga do asfalto	5	SAR5
		Fendilhamento e perda de regularidade	7	SAR7
		Fadiga de camadas ligadas	12	SAR12

Para os pavimentos granulares dimensionados para um revestimento betuminoso fino, o valor de SAR (calculado com expoente 4 segundo o Quadro 2.9) são muitas vezes referidos como ESA (Equivalent Standard Axles). Este valor de expoente foi obtido a partir de análises mecanicistas.

Para calcular o dano do SAR, determina-se o tráfego de dimensionamento em eixos equivalentes (ESA) utilizando a Equação 27. Este cálculo requer a estimativa do número médio de ESA por grupo de eixos de veículos pesados (ESA/HVAG) a partir da distribuição de carregamentos do tráfego. O valor de dimensionamento de eixo-padrão equivalentes do carregamento de tráfego (*DESA*) é realizado a partir de:

$$DESA = ESA/HVAG \times N_{DT} \quad (30)$$

onde:

*DESA* - eixo-padrão equivalente de dimensionamento;

*ESA/HVAG* - eixo-padrão equivalentes médios por grupo de veículos pesados;

*N<sub>DT</sub>* - Grupo de eixos de veículos pesados totais no tempo de vida útil.

O dimensionamento do número de repetições de eixos-padrão é calculado através de

$$DSMA_m = SAR_m / ESA \times DESA \quad (31)$$

onde:

$SAR_m / ESA$  - número médio de repetições do eixo-padrão por eixo-padrão equivalente

para o expoente de dano  $m$ ;

$DESA$  - carregamento do trafego de dimensionamento em ESA;

$m$  - expoente do dano da carga por tipo de dano.

## 2.5 Temperatura de Serviço

A temperatura é outro fator condicionante do desempenho do pavimento. O valor adotado como temperatura a que se encontra em serviço, e que leva à denominação de Temperatura de Serviço, condiciona a rigidez das camadas betuminosas e a sua deformabilidade. Assim sendo, para um estudo correto deverá ser conhecida a distribuição do tráfego ao longo do dia assim como a distribuição das temperaturas no mesmo período.

Em estudos de dimensionamento mais precisos, estas variações são consideradas e é avaliada a distribuição horária do tráfego de pesados e a variação horária da temperatura nas diversas camadas. Existem estudos realizados para esse efeito (Picado-Santos, 1995) que resultam num modelo de determinação das distribuições em causa. Este estudo conclui a necessidade de transcrever com mais rigor a distribuição de tráfego e temperaturas para maior fiabilidade na simulação do comportamento do pavimento. Poderão ser utilizados dois métodos para a modelação da temperatura representativa dos pavimentos. O método PETE (Processo de temperatura equivalente) assume uma distribuição horária da temperatura equivalente mensal para o conjunto de todas as camadas betuminosas e o método PATED (Processo de distribuição de temperatura equivalente) assume uma distribuição horária de uma temperatura mensal, função da profundidade nas camadas betuminosas. Este último método devolve uma maior aproximação do comportamento real dos pavimentos. No caso das temperaturas nos meses mais frios, novembro a março, poderá ser utilizada uma temperatura mensal devido a um valor reduzido do dano nestes meses.

O procedimento mais comum para simplificação de todo o processo de dimensionamento considera uma temperatura de serviço equivalente anual, que traduz a variabilidade das temperaturas ao longo de um ciclo, anual, completo. Pretende-se que a modelação do

comportamento das misturas betuminosas seja equivalente também à variedade de comportamentos no mesmo ciclo. O valor da temperatura apresentado como valor único, deverá representar as diferentes temperaturas verificadas a diferentes profundidades nas camadas. No entanto, esta simplificação poderá implicar erros consideráveis.

### 2.5.1 Método do MACOPAV

O MACOPAV subdivide o país em 3 zonas climáticas com o intuito de escolha de betume a utilizar em cada uma delas, devendo ser mais viscoso nas zonas mais quentes. Estas zonas estão separadas pelas linhas isotérmicas de temperatura máxima do ar no período de verão, situação mais condicionante em termos de dano nos pavimentos flexíveis. Segundo a Figura 2.7 (Baptista, 1999), o país encontra-se dividido em 4 zonas climáticas, onde a única diferença relativamente à divisão do MACOPAV consiste na separação da Zona Média em Zona Média Sul Mondego e Zona Média Norte Mondego. Nestas zonas climáticas o comportamento dos pavimentos flexíveis em termos de dano é semelhante.

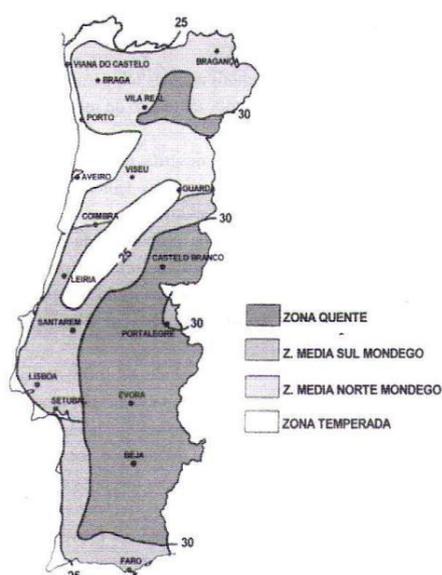


Figura 2.7 – Zonas Climáticas em Portugal (Baptista, 1999)

### 2.5.2 Método da SHELL

No método da Shell pode-se considerar a simplificação da variação da temperatura de serviço, assumindo uma temperatura de serviço equivalente anual. Assim sendo, a temperatura utilizada no dimensionamento é obtida a partir da espessura do pavimento e da temperatura do ar equivalente anual (temperatura média mensal do ar para o mês representativo do ano

conseguida através da aplicação de fatores de transformação sobre as temperaturas médias mensais do ar) (Branco et al, 2006). Considera-se a utilização de um pavimento dividido em três subcamadas betuminosas e utiliza-se o ponto central de cada uma delas para o cálculo da rigidez do betume.

### **2.5.3 Método da AASHTO**

No método do AASHTO, a formulação utilizada é conseguida através da medição das temperaturas do pavimento em três zonas representativas do país. As considerações são semelhantes ao método da Shell relativamente à divisão do pavimento em três subcamadas e à utilização do ponto central de cada camada como ponto crítico para cálculo da deformação permanente. No caso da determinação de rotura por fadiga, os pontos críticos analisados situam-se nas extremidades das camadas betuminosas.

No presente trabalho foi utilizada uma complexa base de dados climatéricos que será apresentada posteriormente, tal como a profundidade dos dados considerados.

### **2.5.4 Método da AUSTROADS**

O efeito da temperatura neste método é contabilizado estimando o módulo de elasticidade à temperatura do pavimento. Não sendo considerado no método de dimensionamento o modo de rotura por deformação permanente verificado a temperaturas mais elevadas, minimiza-se este risco recorrendo a misturas betuminosas mais estáveis. Se o tráfego ocorrer sobretudo em alturas de temperaturas inferiores, pode-se verificar um maior desgaste resultante de fissuras por flexão. Se tal acontecer para temperaturas superiores, não teremos a mesma resistência à flexão e o esforço será suportado pelas camadas inferiores caso estas sejam ligadas, resultando num desgaste mais acelerado de toda a estrutura do pavimento.

No dimensionamento de pavimentos, a temperatura pode ser caracterizada em Temperatura Média Anual Ponderada do Pavimento (WMAPT - Weighted Mean Annual Pavement Temperature) que tem em consideração a relação entre a temperatura dos pavimentos e a durabilidade do mesmo relativamente à fadiga e que resulta do método da Shell 1978 (AUSTROADS, 2008).

## **2.6 Critérios de Rotura de Pavimentos Flexíveis**

Os critérios de rutura de um pavimento estão associados a um valor representativo do dano do pavimento, quando sujeito as ações que provocam a sua deterioração, quer sejam as ações climáticas como as ações resultantes do tráfego. Estes critérios definem os estados limite relativamente às quais os pavimentos são dimensionados para resistir. Com as sucessivas passagens de veículos, dá-se uma degradação progressiva dos materiais, resultando assim numa redução de qualidade do pavimento. Nos casos mais simples, esta degradação é traduzida por fendilhamento das camadas com coesão, devido a um processo de rutura por fadiga, associada a repetidas extensões de tração instaladas nestas camadas.

A fadiga é representada por um fendilhamento excessivo com início nas zonas mais tracionadas das camadas ligadas, geralmente localizada na base das camadas betuminosas, controlada pela extensão radial de tração,  $\varepsilon_t$ . Os fatores que influenciam o desempenho do pavimento quanto a este critério são: a rigidez proporcionada às camadas betuminosas pelas camadas inferiores assim como a contribuição das camadas betuminosas na rigidez do conjunto, o tipo de ligante da mistura (o seu módulo de elasticidade e sua variação com o tempo), o tipo de carga do tráfego e a temperatura de serviço. Para a caracterização dos pavimentos relativamente à fadiga, são efetuados ensaios acelerados à escala real em pista de ensaios e/ou ensaios de laboratório que estudam a flexão e tração indirecta, dos pavimentos.

Outro critério estudado é o critério de deformação permanente, que representa um assentamento excessivo à superfície do pavimento. Os assentamentos provêm do adensamento das camadas inferiores e do solo de fundação, resultado das sucessivas ações de extensão por compressão sobre estas camadas. Este assentamento é controlado pela extensão vertical de compressão,  $\varepsilon_{dp}$ , no topo do solo de fundação.

Obtido o número de eixos-padrão que solicitam a via sem que entre em rutura,  $N_a$ , e conhecendo o número de eixos que previsivelmente irão solicitar a estrutura,  $N_p$ , poderemos aferir a percentagem de resistência gasta e assim determinar a confiança do projeto através do cálculo do dano,  $D$ , através da Equação 32. Se o dano for superior a 100% estaremos na presença de um caso de subdimensionamento. Se o dano for inferior a 80% estaremos na presença de um caso de sobredimensionamento, e portanto uma solução menos económica. O método da AUSTROADS estabelece diferentes níveis de confiança a utilizar, dependendo da importância da via em causa no sistema viário, Quadro 2.10.

$$D = \frac{N_p}{N_a} \times 100 \quad (32)$$

Quadro 2. 10 – Grau de confiança estabelecido (AUSTROADS, 2008)

CLASSE DA VIA	GRAU DE CONFIANÇA (%)
AUTOESTRADA	95-97.5
ESTRADA PRINCIPAL AADT>2000	90-97.5
ESTRADA PRINCIPAL AADT≤2000	85-95
VIA SECUNDARIA	85-95
OUTRAS VIAS	80-90

Existem outras formas de degradação dos pavimentos, descritas em literatura associada. Todas essas variáveis são importantes para uma maior aproximação do comportamento real dos pavimentos, mas algumas delas ainda não estão devidamente consolidadas.

### 2.6.1 Critério de fadiga da SHELL

O método da SHELL admite como pontos críticos dos pavimentos flexíveis os pontos inferiores das camadas betuminosas, onde se verificam as maiores extensões de tração que resultam na rotura por fadiga destas camadas, e os solos de fundação como os que mais contribuem para a deformação permanente do pavimento uma vez que é o mais fraco quanto à resistência à deformabilidade. A Equação utilizada para relacionar a extensão radial de tração,  $\varepsilon_t$ , e a vida útil, representada por  $N_{80}$ , é dada por:

$$\varepsilon_t = (0,856 \cdot v_b + 1,08) \cdot E_m^{-0,36} \cdot N_{80}^{-0,2} \quad (33)$$

onde:

- $\varepsilon_t$  – extensão de tração (adimensional);
- $N_{80}$  – número de eixos padrão de 80 KN;
- $V_b$  – percentagem volumétrica de betume no volume total;
- $E_m$  – modulo de deformabilidade das misturas betuminosas (Pa).

Para a utilização desta Equação, deveremos proceder a ajustes necessários para que a aproximação conseguida seja próxima da realidade, uma vez que esta é determinada através de resultados de testes realizados em laboratório. Para tal, deve-se considerar:

- Distribuição lateral do tráfego, multiplicando a vida útil por 2,5;

- Efeito benéfico que têm os tempos de repouso entre carregamentos: para misturas densas com grande teor em betume deve multiplicar-se a vida útil por 10. Para misturas abertas e pobres em betume deve multiplicar-se a vida útil por 1,25;
- Efeito dos gradientes de temperatura uma vez que na sua formulação original, a temperatura é caracterizada num valor equivalente anual. Assim, deve dividir-se a vida útil por 2 para situações em que se verifiquem temperaturas altas e/ou camadas espessas de betão betuminoso;

Para o caso de pavimentos mais espessos deve-se considerar uma distribuição lateral ( $2,5 \times N_{80}$ ) associada a uma situação intermédia relacionada com o tempo de recuperação do carregamento não continuado ( $5 \times N_{80}$ ). Para os pavimentos menos espessos em que a camada determinante do dimensionamento é uma mistura betuminosa densa para a camada de regularização, enquanto nos restantes é geralmente um macadame betuminoso, deve considerar-se um desempenho melhor para a situação correspondente ao tempo de recuperação do carregamento não continuado. Considera-se então neste caso uma distribuição do tipo  $6 \times N_{80}$ .

### 2.6.2 Critério de deformação permanente da SHELL

O método da Shell estabelece que a relação entre a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação e a vida útil é dada por:

$$\varepsilon_{dp} = K_s \cdot N_{80}^{-0,25} \quad (34)$$

onde:

$\varepsilon_{dp}$  – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação;

$N_{80}$  – número de eixos padrão de 80 KN;

$k_s$  – parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Toma valores de  $2,8 \times 10^{-2}$  para 50% de probabilidade de sobrevivência, de  $2,1 \times 10^{-2}$  para 85% e  $1,8 \times 10^{-2}$  para 95%.

Este método baseia-se nos resultados conseguidos pelo AASHTO Road Test, que na versão completa faz ainda uma verificação complementar à deformação permanente (Branco *et al.*, 2006) estudando a influência dos períodos em que as camadas têm um comportamento não linear na expressão da rodagem no fim da vida útil. No entanto, quando se utiliza a Equação 34 admite-se que todo o assentamento é apenas devido à contribuição do solo de fundação. Esta

simplificação é ultrapassada considerando uma probabilidade de sobrevivência de 95% na análise deste critério para o dimensionamento de uma obra nacional.

### 2.6.3 Critério de fadiga da AASHTO

A lei da fadiga definida pela AASHTO, denominada por Load related cracking, subdivide-se em dois tipos de manifestação com diferentes origens. O facto de o pavimento atingir o ponto de rutura por fadiga pode ser identificado pela verificação no pavimento do efeito usualmente denominado por pele de crocodilo, ou *bottom-up* fatigue cracking, iniciando-se como o nome sugere, nas camadas inferiores e prolongando-se até à superfície devido à contínua ação de cargas após o aparecimento da mesma. A fendilhação longitudinal assume-se como iniciada à superfície e prolongando-se até às camadas inferiores, *top-down* fatigue cracking, quando o pavimento é sujeito às mesmas ações após o aparecimento dos mesmos efeitos.

Para cada tipo de fendilhamento, será calculado o valor correspondente ao número de eixos padrão admissíveis para repetição da carga. Este método é semelhante ao método da SHELL, embora os pontos críticos em análise sejam diferentes.

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}} \quad (35)$$

onde:

$N_{f-HMA}$  - número de eixos-padrão admitidos;

$\varepsilon_t$  - extensão de tração nos pontos críticos;

$E_{HMA}$  - módulo de deformabilidade à compressão das camadas betuminosas, em psi;

$k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}$  - parâmetros obtidos de regressões para aferição do método ( $k_{f1} = 0,007566$ ,  $k_{f2} = -3,9492$ ,  $k_{f3} = -1,281$ );

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$  - constantes de calibração locais ou específicas quando referentes a uma mistura de uma amostra. No caso de calibração global, estas constantes assumem o valor de 1,0;

$C_H$  - coeficiente de correção de espessura dependente do tipo de fendilhamento.

$$C = 10^M \quad (36)$$

$$M = 4,84 \left( \frac{V_{beff}}{V_v + V_{beff}} - 0,69 \right) \quad (37)$$

onde:

$M$  - potência da Equação 33 dada por 34;

$V_{beff}$  - percentagem volumétrica efetiva de betume;

$V_v$  - volume de vazios (expresso em %).

Os estados limite para a manifestação do fendilhamento do tipo *bottom-up* que se inicia na face inferior das camadas betuminosas e que se manifesta pela pele de crocodilo, e para a manifestação do fendilhamento do tipo *top-down* que tem início na face superior do pavimento descendo posteriormente até a face inferior, são determinados pelas expressões 38 e 39 respetivamente, onde o parâmetro  $H_{HMA}$  define a espessura total das camadas betuminosas do pavimento, em “inches” (polegadas).

$$C_H = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49H_{HMA})}}} \quad (38)$$

$$C_H = \frac{1}{0,01 + \frac{12,00}{1 + e^{(15,676 - 2,8186H_{HMA})}}} \quad (39)$$

Este método permite uma aproximação do índice de dano presente num pavimento, quer a nível superficial como na face inferior das camadas betuminosas. Existem também curvas obtidas através de regressões, que relacionam a área de fendilhamento com o dano de fadiga existente.

#### 2.6.4 Critério de deformação permanente da AASHTO

A deformação permanente, vulgarmente denominada por *rodeira*, é causada por deformações verticais permanentes nas camadas betuminosas, camadas granulares e solo de fundação. A metodologia utilizada consiste no cálculo incremental da deformação em cada subcamada. Ou seja, a deformação é estimada para cada período de tempo a meia altura de cada subcamada, correspondendo o seu valor à soma dos valores parciais obtidos em cada uma delas.

A metodologia utilizada para determinar a deformação permanente utiliza valores de extensões verticais, determinadas em condições específicas do pavimento para um determinado número de eixos, as quais têm uma variação mensal, sendo por isso necessária uma aproximação denominada de “strain hardening” (ASSHTO, 2008) ou extensão de

endurecimento que registre essas variações, garantindo que essas extensões verticais parciais são consideradas num estudo referente às deformações totais do pavimento.

A percentagem ou deformação permanente do pavimento é determinada em laboratório, através de ensaios triaxiais para misturas betuminosas e solos granulares, recorrendo a carregamentos contínuos para que sejam registadas as deformações. A Equação conseguida é depois ajustada para que devolva valores semelhantes aos obtidos em condições normais. A Equação 40 é a utilizada para misturas betuminosas.

$$\Delta_{p(HMA)} = \varepsilon_{p(HMA)} h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \varepsilon_{r(HMA)} 10^{k_{1r}} N_p^{k_{2r} \beta_{2r}} T^{k_{3r} \beta_{3r}} \quad (40)$$

onde:

$\Delta_{p(HMA)}$  - deformação vertical plástica ou permanente acumulada nas camadas ou subcamadas betuminosas, em in;

$\varepsilon_{p(HMA)}$  - extensão axial permanente ou plástica acumulada nas camadas ou sub-camadas betuminosas, em in/in;

$\varepsilon_{r(HMA)}$  - extensão elástica ou resiliente calculada através do modelo da resposta estrutural à profundidade média de cada subcamada betuminosa, em in/in;

$h_{(HMA)}$  - espessura das camadas ou sub-camadas betuminosas em in;

$n$  - número de repetições de carga por eixo definido;

$T$  - temperatura do pavimento, em °F;

$k_z$  - fator de confinamento da profundidade;

$k_{1r}, k_{2r}, k_{3r}$  - Parâmetros indicadores que advêm de observações no campo; ( $k_{1r} = -3,35412, k_{2r} = 0,4791$  e  $k_{3r} = -1,281$ );

$\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$  - Constantes de calibração locais (da mistura medida no campo) ou globais (em que se assume o valor 1,0).

$$k_z = (C_1 + C_2 D) 0,328196^D \quad (41)$$

$$C_1 = 0,1039 (H_{HMA})^2 + 2,4868 H_{HMA} - 17,342 \quad (42)$$

$$C_2 = 0,0172 (H_{HMA})^2 + 1,7331 H_{HMA} + 27,428 \quad (43)$$

onde:

$D$  - profundidade abaixo da superfície, em in;

$H_{(HMA)}$  - espessura total das camadas betuminosas, em in.

Segundo o manual da AASHTO, para o caso das camadas granulares e solos de fundação, utiliza-se a Equação 44,

$$\Delta_{p(soil)} = \beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{soil} \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{\left( \frac{\rho}{N_p} \right)^\beta} \quad (44)$$

onde:

$\Delta_{p(soil)}$  - deformação permanente ou elástica das camadas ou sub-camadas, em in;

$N_p$  - número de repetições de carga por eixo definido;

$\varepsilon_0$  - coeficiente de regressão na origem, determinado através de ensaios laboratoriais de deformação permanente com cargas repetidas, em in/in;

$\varepsilon_r$  - extensão elástica imposta para conduzir os testes de laboratório de onde se obtêm as propriedades  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$  e  $\rho$  do material, em in/in;

$\varepsilon_v$  - extensão vertical média plástica ou resiliente nas camadas/ sub-camadas e calculada pelo modelo de resposta estrutural, em in/in;

$h_{soil}$  - espessura das camadas /subcamadas não ligadas, em in;

$k_{s1}$  - coeficientes de calibração;  $k_{s1} = 1,673$  para sub-base granular e  $k_{s1} = 1,35$  para o solo de fundação;

$\beta_{s1}$  - constantes de calibração locais ou da mistura medida no campo; estas constantes tomam o valor unitário no caso de calibração global.

$$\text{Log } \beta = -0,61119 - 0,017638.(W_c) \quad (45)$$

$$\rho = 10^9 \left( \frac{C_0}{(1-(10^9)\beta)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (46)$$

$$C_0 = \text{Ln} \left( \frac{a_1 E_r^{b_1}}{a_9 E_r^{b_9}} \right) \quad (47)$$

$$W_c = 51,712 \left[ \left( \frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 \times GWT^{0,1192}} \quad (48)$$

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} = \frac{(e^{(\rho)^\beta} \times a_1 E_r^{b_1}) + (e^{(\rho/10^9)^\beta} \times a_9 E_r^{b_9})}{2} \quad (49)$$

onde:

$W_c$  - teor em água, expresso em %;

$GWT$  - profundidade do nível freático, em ft;

$E_r$  - módulo de deformabilidade das camadas ou sub-camadas não ligadas, em psi;

$a_{1,9}$  - constantes de regressão,  $a_1 = 0,15$  e  $a_9 = 20,0$ ;

$b_{1,9}$  - constantes de regressão,  $b_1 = 0,0$  e  $b_9 = 0,00$ .

Esta metodologia admite uma gama de valores para este campo que varia entre 0,1 e 0,5 in., durante os 20 anos para os quais o pavimento é dimensionado. Este limite resulta em valores bastante mais conservativos que os utilizados atualmente em Portugal.

### 2.6.5 Critério de fadiga da AUSTROADS

Segundo o método da AUSTROADS, o teste que traduz com maior proximidade o comportamento de uma camada betuminosa quando sujeita ao carregamento para a caracterização das propriedades de fadiga do asfalto são testes à flexão em vigas de asfalto. Para tal, são utilizadas amostras recolhidas ou elementos laboratoriais ( $C = 390$  mm,  $A = 50$  mm,  $L = 63$  mm) sendo os ensaios realizados a  $20^\circ\text{C}$ .

Para pavimentos convencionais a relação entre a tensão de tração máxima no pavimento e o número de carregamentos admissíveis é dada por:

$$N = RF \left[ \frac{6918 \cdot (0.856V_b + 1.08)}{S_{mix}^{0.36} \cdot \mu\epsilon} \right]^5 \quad (50)$$

onde:

$N$  - número de carregamentos admissíveis;

$\mu\epsilon$  - tensão elástica resultante do carregamento;

$V_b$  - percentagem em volume de betume no asfalto (%);

$S_{mix}$  - módulo do asfalto (Mpa);

$RF$  - Fator de confiança pretendido para o critério apresentado no Quadro 2.11.

Quadro 2. 11 – Fatores de confiança sugeridos para a fadiga do asfalto (AUSTROADS, 2008)

NÍVEL DE CONFIANÇA PRETENDIDO					
	80%	85%	90%	95%	97.5%
RF	2.5	2.0	1.5	1.0	0.67

Estes fatores ajustam as variações entre os resultados obtidos em laboratório e os verificados *in-situ* e traduzem duas considerações principais: um fator de desvio que relaciona o tempo

médio de vida útil dum pavimento segundo este critério em condições laboratoriais e nas condições “reais”, tendo em consideração as diferenças entre as condições de testes laboratoriais e as condições de serviço reais, e um fator de confiança que traduz a diferença entre o tempo de vida útil previsto e o verificado. Na Figura 2.8 é apresentada a relação entre tensão instalada e os carregamentos aplicados, mostrando os efeitos da rigidez do pavimento e composição do betume para a confiança prevista no dimensionamento (esta relação é válida para um grau de confiança de 95%).

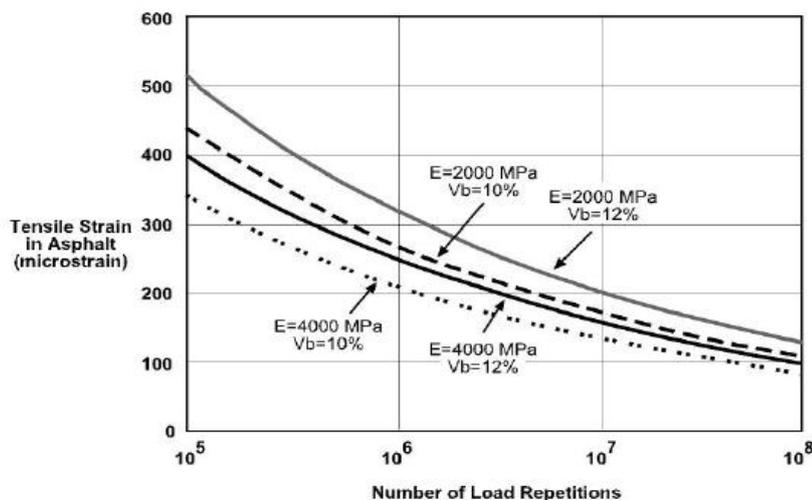


Figura 2.8 – Relação entre tensão instalada e carregamento (AUSTROADS, 2008)

### 2.6.6 Critério de deformação permanente da AUSTROADS

Não é admissível que se diga que este processo de dimensionamento possua uma metodologia eficaz na consideração do efeito da temperatura dada a disparidade de comportamento que pode existir numa camada betuminosa dependendo da mesma. Este erro pode ser minimizado através da adoção de uma temperatura anual equivalente para o cálculo na verificação dos critérios de ruína descritos. Essa temperatura obtém-se multiplicando a temperatura média anual do ar por um fator constante, que depende do critério analisado. O objetivo do cálculo desta temperatura é mitigar os erros que surgem se não se puder recorrer a este valor, ou em alternativa, a um conjunto de valores respeitantes a temperaturas mensais equivalentes para cada mês do ano. Desta forma consegue-se uma caracterização dos ciclos anuais de temperaturas mais fiel. É de referir ainda que estes valores representam as diferentes temperaturas que são medidas na realidade a várias profundidades em cada camada. O seu valor tem grande influência na resposta estrutural de um pavimento às solicitações que lhe são impostas.

## 2.7 Patologias dos pavimentos

O processo de degradação dos pavimentos rodoviários inicia-se logo após a sua construção, estando sujeito desde o instante inicial às ações dos agentes climáticos. Este processo de degradação apoia-se no “princípio da cadeia de consequências”, princípio que indica que uma degradação não evolui isoladamente no tempo, dando origem a novos tipos de degradação que por sua vez interferem com as características das primeiras (Branco *et al.*, 2006).

Neste processo consideram-se dois grupos de fatores responsáveis pela degradação: os fatores passivos que se resumem às características do pavimento construído e os fatores ativos que compreendem as ações aplicadas sobre os pavimentos (tráfego e agentes climáticos).

Segundo Branco *et al.* (2006), as principais causas de degradação dos pavimentos flexíveis devem-se à intensidade de tráfego e ações climáticas, mas também à qualidade dos materiais e qualidade de execução. As degradações, à semelhança das funções dos pavimentos, podem ser caracterizadas como estruturais e funcionais.

Para efeitos de dimensionamento, serão analisados as seguintes patologias: o fendilhamento e as rodeiras ou deformações permanentes. As rodeiras, como patologia mais frequente, são consequência de um mau desempenho das camadas betuminosas e granulares, mas principalmente do solo de fundação, e são resultantes de tráfego pesado intenso e/ou condições climáticas adversas. O seu aparecimento verifica-se na zona de passagem do rodado de veículos pesados. O fendilhamento, sendo a patologia mais frequente em pavimentos flexíveis, pode ser de vários tipos dependendo da sua localização, origem e evolução. Verifica-se após fadiga do pavimento e ocorre nas camadas betuminosas, fragilizando a estrutura devido à anulação da função de impermeabilização da camada de desgaste, e potenciando o enfraquecimento das camadas granulares e do solo de fundação. As primeiras fendas, de uma forma geral, surgem no sentido do tráfego dando origem ao fendilhamento longitudinal, mas podem propagar-se noutras direções dando origem ao fendilhamento transversal e pele de crocodilo. Este último indica um estado avançado de degradação do pavimento, sendo por isso o tipo de fendilhamento ao qual deverá ser dada especial atenção. O IRI é um parâmetro utilizado para quantificar o nível de irregularidade longitudinal do pavimento à superfície do pavimento, que representa o desvio entre o perfil dimensionado e o verificado “in-situ”. Esta irregularidade tem influência direta nas qualidades funcionais inicialmente previstas.

### 3. CASO DE ESTUDO

#### 3.1 Introdução

Para o presente caso de estudo será aplicado o novo método de dimensionamento da AASHTO aos pavimentos definidos no MACOPAV e será verificada a sua aplicabilidade e compatibilidade através da análise dos resultados obtidos, utilizando para tal os limites admitidos pela metodologia da SHELL no dimensionamento de pavimentos, limites esses utilizados na definição das estruturas definidas pelo MACOPAV. Algumas simplificações serão efetuadas e identificadas atempadamente.

Como já havia sido referido, o estudo é direcionado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, dada a sua representatividade na rede rodoviária nacional, cujo tempo de vida útil usualmente considerado é de 20 anos.

#### 3.2 Aplicação do MEPDG aos Pavimentos do MACOPAV

##### 3.2.1. Definição dos parâmetros de dimensionamento utilizados

Nesta fase do processo, são definidos os valores admissíveis para os critérios de dimensionamento. Os valores adotados para cada um dos critérios de rotura estão de acordo com os definidos em várias obras da especialidade (Picado-Santos *et al.*, 2006) e são apresentados no Quadro 3.1. Quanto ao grau de confiança utilizado para o dimensionamento, utilizou-se o valor de 85% por uma questão de uniformização, sendo um valor admitido pela AUSTROADS que permite a sua utilização para todos os níveis de tráfego. Existe uma verificação inicial relativa ao fendilhamento, feita logo após a construção do pavimento, e que não deve ultrapassar os 1000 mm/km.

Quadro 3.1 – Valores limite para os parâmetros de estado

Fendilhamento Longitudinal (m/km)	Pele de Crocodilo %	Rodeiras (mm)		IRI (mm/km)
		CB	TOTAL	
200	20	15	20	3500

### 3.2.2 Tráfego

Relativamente ao tráfego, considerou-se uma velocidade de 30 km/h para um veículo pesado numa estrada nacional, segundo indicações sugeridas por Picado-Santos *et al.* (2006). Para o cálculo da percentagem de tráfego pesado normalizado considerou-se a distribuição apresentada no Quadro 3.2, representativa dos valores nacionais, ajustados através de dados de tráfego da empresa Estradas de Portugal, S.A. Os valores das classes de tráfego e a taxa de crescimento, necessários para a determinação do  $TMDA_p$  são apresentados no Quadro 3.3. A distribuição horária de veículos pesados considerada é apresentada no Quadro 3.4. Para estes parâmetros considerou-se o terceiro nível de informação (o menos preciso), uma vez que não dispomos de dados pormenorizados correspondentes aos outros níveis de informação.

Quadro 3.2 – Distribuição de veículos por classe de tráfego

Classe	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
%	2,9	20,0	24,0	22,0	1,1	13,5	15,0	0,5	0,8	0,2

Quadro 3.3 – Classes de Tráfego e valores para o  $TMDA_p$  (MACOPAV, 1995)

Classe	$T_6$	$T_5$	$T_4$	$T_3$	$T_2$	$T_1$
$TMDA_p$	50-150	150-300	300-500	500-800	800-1200	1200-2000
Taxa de Crescimento (%)	3	3	4	4	5	5

Quadro 3.4 – Distribuição horária do Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados na zona de Coimbra (%)

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$TMDA$ (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,9	4,4	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$TMDA$ (%)	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,0	3,8	2,6	1,5	1,5

Estes dados são necessários para determinar a forma como a carga é transmitida ao pavimento através dos eixos sob a forma do eixo-padrão já caracterizado anteriormente.

Outros dados necessários para introdução no software, relativos às misturas betuminosas, são as temperaturas de referência, cujos valores admitidos foram as temperaturas de serviço das camadas betuminosas, definidas pelo MACOPAV para cada área geográfica. Apenas foram

definidos valores para as classes de fundação F2 e F3, considerando os valores da classe de fundação F4 iguais ao da classe F3. Estes valores são apresentados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Temperatura de serviço (°C)

Classe de Fundação	Classe de Tráfego					
	T6	T5	T4	T3	T2	T1
F2	27,5	28,2	27,7	27,3	27,4	27,1
F3/F4	27,0	27,1	27,9	27,6	27,3	27,0

É também necessário admitir valores para a largura média da via (3,05 m), sendo que a referência para colocação do eixo padrão se define a partir da guia exterior (considerada 0,34 m desde a linha exterior) e considerando um desvio padrão uma vez que as cargas não serão aplicadas sempre sobre a mesma vertical (0,25 m). É necessário definir também distâncias entre eixos direcionais e portantes, necessárias para a distribuição em forma percentual de veículos curtos, médios ou longos e definir as pressões de enchimento dos pneus (120 psi).

### 3.3.3 Clima

Para este estudo foi utilizada uma base de dados onde estão reunidas informações climáticas da zona de Coimbra. Em Portugal não existe um levantamento desta informação padronizada para que possa ser utilizada diretamente pelo programa, pelo que a preparação do ficheiro é extremamente morosa. O ficheiro do tipo ICM está dividido por secções representativas de cada dia. Numa primeira linha é apresentado o dia, o mês, o ano, a hora de nascer e a hora de pôr-do-sol e a radiação solar. No seguimento dessa primeira linha, são apresentadas outras 24, cada uma relativa a cada hora do dia, onde são apresentados: a hora do dia, a temperatura em Fahrenheit, a precipitação em polegadas, a velocidade do vento em milhas por hora, o nível de céu limpo em percentagem (100% corresponde a céu limpo) e a profundidade do nível freático em pés.

### 3.3.4 Dimensionamento estrutural do pavimento

Após a introdução dos dados relativos às ações, inicia-se a introdução dos dados relativos às estruturas do pavimento. A análise foi feita para as 18 combinações estruturais de pavimentos que conjugam as diferentes classes de tráfego e as diferentes classes de fundação, apesar do MACOPAV apenas considerar 16 pavimentos diferentes.

Para a camada de desgaste considerou-se um teor em betume de 5,2%, correspondendo a uma percentagem efetiva ( $V_{be}$ ) de 10,86% e uma percentagem de vazios ( $V_a$ ) de 4,1%. As

espessuras variam em função da combinação analisada e a temperatura em função do tipo de classe de fundação.

Quadro 3.6 – Estruturas dos pavimentos definidos pelo MACOPAV

Pavimento	Camada de Desgaste			Camada de Base (Betuminosa)			Camada Sub-Base (Granular)			Solo de Fundação			Camada Semi-Infinita	
	$t_{CD}$ (cm)	$E$ (MPa)	$\nu$	$t_{CB}$ (cm)	$E$ (MPa)	$\nu$	$t_{CSB}$ (cm)	$E$ (MPa)	$\nu$	$t_{SF}$ (cm)	$E$ (MPa)	$\nu$	$E$ (MPa)	$\nu$
P1	4	4000	0,35	6	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P2	4	4000	0,35	8	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P3	4	4000	0,35	12	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P4	4	4000	0,35	14	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P5	5	4000	0,35	14	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P6	5	4000	0,35	16	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P7	4	4000	0,35	18	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P8	5	4000	0,35	17	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P9	5	4000	0,35	19	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P10	6	4000	0,35	18	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P11	5	4000	0,35	20	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P12	6	4000	0,35	20	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P13	5	4000	0,35	23	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P14	6	4000	0,35	22	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P15	6	4000	0,35	24	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35
P16	6	4000	0,35	26	4000	0,35	20	200	0,35	100	60-150	0,35	1000	0,35

Para a camada de base definiu-se um teor de betume de 4,1%, o que corresponde a uma percentagem efetiva de 8,18% e uma percentagem de vazios de 7,9% (Branco *et al.*, 2006) As espessuras variam em função da combinação analisada e a temperatura em função da classe de fundação.

Relativamente às camadas granulares, são consideradas duas camadas. A camada superior apresenta as mesmas características em todos os pavimentos. O módulo de deformabilidade da fundação varia consoante o tipo de pavimento, assumindo os valores de 60 MPa para a classe F2, de 100 MPa para a classe F3 e de 150 MPa para a classe F4. A classe de fundação F1 não é considerada uma vez que o manual não permite a sua utilização no dimensionamento de pavimentos flexíveis com camadas betuminosas, salvo casos excecionais que serão alvo de estudo próprio. As características granulométricas de cada uma das camadas são apresentadas no Quadro 3.7. Admitem-se para todas as camadas um coeficiente de Poisson de 0,35.

Quadro 3.7 – Características granulométricas dos solos granulares utilizados

Pen.	3 ½"	2 ½"	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#200
SbG	100	-	100	100	87,5	70	55	47	40	33,5	19,5	13	6
Fun.	100	95	91,6	85,8	78,8	72,7	63,1	57,2	47,5	33,8	20	12,9	7,5

### 3.2.7 Nível de confiança nos dados e dos resultados obtidos

Neste trabalho, o nível de confiança dos dados utilizados foi o nível 3, traduzindo uma primeira abordagem à utilização do método. No entanto, sempre que possível, para uma aproximação mais realista do desempenho de um pavimento, a caracterização dos materiais, do tráfego e do clima deverá ser feita com maior rigor.

O nível de confiança nos resultados traduz a probabilidade de um pavimento, executado de acordo com os critérios definidos inicialmente, desempenhar as suas funções durante o tempo de vida útil estabelecido sem necessidade de intervenção. Conforme já referido anteriormente, adotou-se um valor de 85%, permitindo a utilização deste valor, segundo a AUSTROADS (2008), independentemente do tipo de via e tráfego.

### 3.3 Análise de Resultados

No Quadro 3.8 são apresentados os resultados dos dimensionamentos, segundo os critérios definidos anteriormente, para as 18 combinações possíveis entre classes de tráfego e classes de fundação.

As estruturas consideradas pelo MACOPAV foram definidas com limites iguais para o dano acumulado a variar entre os 80 e os 100%, pelo que será expectável obter valores semelhantes utilizando este novo método. Apresenta-se nas Figuras 3.1 a 3.5 uma compilação dos valores relativos a cada parâmetro de estado e a sua evolução ao longo do tempo de vida útil do pavimento, cujos valores são apresentados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Quadro resumo dos resultados obtidos

Tráf.	Fund.	Pav.	TMDAp	t (%)	NAVP (20 anos)	IRI (mm/km)	Fendilhamento Longitudinal (m/km)	Pele Crocodilo (%)	Rodeiras (mm)	
									CB	Total
T6	F2	C1	150	3	$1,47 \times 10^6$	1617,17	20,19	1,8	5,08	12,95
	F3	C2	150	3	$1,47 \times 10^6$	1640,69	42,98	4,8	5,84	12,70
	F4	C3	150	3	$1,47 \times 10^6$	1651,67	30,38	6,9	5,84	11,94
T5	F2	C4	300	3	$2,94 \times 10^6$	1634,42	5,56	0,9	6,86	13,97
	F3	C5	300	3	$2,94 \times 10^6$	1623,44	35,01	1,8	7,37	13,21
	F4	C6	300	3	$2,94 \times 10^6$	1614,03	50,39	2,6	7,62	12,45
T4	F2	C7	500	4	$5,44 \times 10^6$	1679,91	3,74	0,9	8,89	15,75
	F3	C8	500	4	$5,44 \times 10^6$	1692,45	34,09	1,7	10,41	16,00
	F4	C9	500	4	$5,44 \times 10^6$	1686,18	63,73	2,3	10,92	15,49
T3	F2	C10	800	4	$8,70 \times 10^6$	1711,28	1,63	0,8	10,41	17,02
	F3	C11	800	4	$8,70 \times 10^6$	1723,83	21,12	1,4	12,19	17,53
	F4	C12	800	4	$8,70 \times 10^6$	1709,71	52,06	1,8	12,95	17,27
T2	F2	C13	1200	5	$1,45 \times 10^7$	1687,75	0,85	1,0	9,40	16,00
	F3	C14	1200	5	$1,45 \times 10^7$	1708,14	12,88	1,4	11,68	16,76
	F4	C15	1200	5	$1,45 \times 10^7$	1734,81	45,02	1,8	13,46	17,78
T1	F2	C16	2000	5	$2,42 \times 10^7$	1719,12	0,82	1,2	10,67	17,27
	F3	C17	2000	5	$2,42 \times 10^7$	1767,74	12,39	1,6	13,97	19,05
	F4	C18	2000	5	$2,42 \times 10^7$	1778,72	42,24	1,9	15,24	19,56

Analisando os valores referentes ao fendilhamento longitudinal, verifica-se uma grande amplitude de valores, entre os 0,82 e os 63,73 mm, mas ainda distantes do seu limite máximo admissível de 200 mm/km para os 20 anos. Para a mesma classe de tráfego, verificam-se aumentos deste parâmetro para classes de fundação com maior resistência à deformação. Esta situação ocorre porque a contribuição da fundação para absorção das deformações impostas pelas cargas aplicadas é inferior. A maior amplitude deste parâmetro para a mesma classe de tráfego verifica-se para a classe de tráfego T4, onde assume também o maior valor na totalidade dos dimensionamentos efetuados. A sua variação não é linear e a evolução pode ser verificada na Figura 3.1

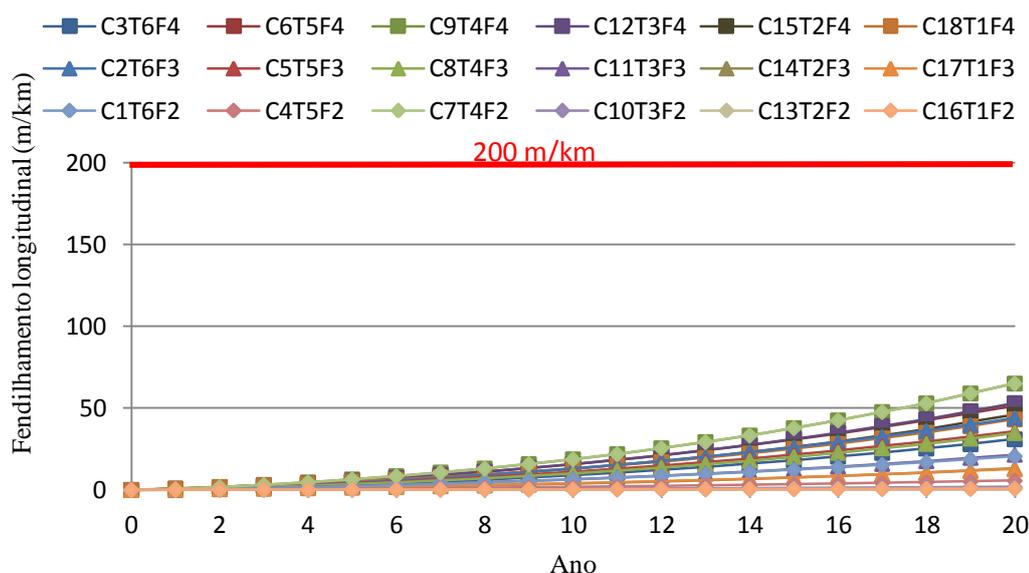


Figura 3.1 – Evolução do fendilhamento longitudinal durante o tempo de vida útil

No caso da pele de crocodilo, os valores verificados são muito reduzidos face aos limites considerados. Verificam-se para estas combinações e condicionantes valores que oscilam entre os 0,8 e os 6,9%, sendo o limite imposto de 20%. À semelhança do fendilhamento longitudinal, verifica-se um aumento dos valores dentro da mesma classe de tráfego, com o aumento da resistência da classe de fundação. A sua variação não é linear ao longo do tempo de vida útil e a evolução pode ser analisada na Figura 3.2. Estamos perante um caso de sobredimensionamento relativamente a este parâmetro.

Relativamente às rodeiras, são analisados duas vertentes. Uma delas considerando apenas a contribuição das camadas betuminosas (CB) e outra que engloba o efeito de todas as camadas do pavimento (total). No caso em que se considera apenas o efeito das camadas betuminosas, temos como valores limite 5,08 e 15,24mm, sendo este último verificado na combinação que considera a classe de tráfego T1 e classe de fundação F4, ultrapassando o valor máximo admitido de 15,00 mm. Não se poderá então afirmar com 85% de confiança que o pavimento cumpra este critério de dimensionamento ao final de 20 anos de utilização. Para a análise das rodeiras que consideram a contribuição de todo o pavimento, os valores máximos são 11,94 e 19,56 mm, ficando abaixo dos 20 mm em qualquer combinação entre classe de tráfego e classe de fundação. A dimensão das rodeiras não varia muito dentro das mesmas classes de tráfego, cuja evolução pode ser verificada nas Figuras 3.3 e 3.4. Verifica-se uma maior linearidade no final do tempo útil considerado.

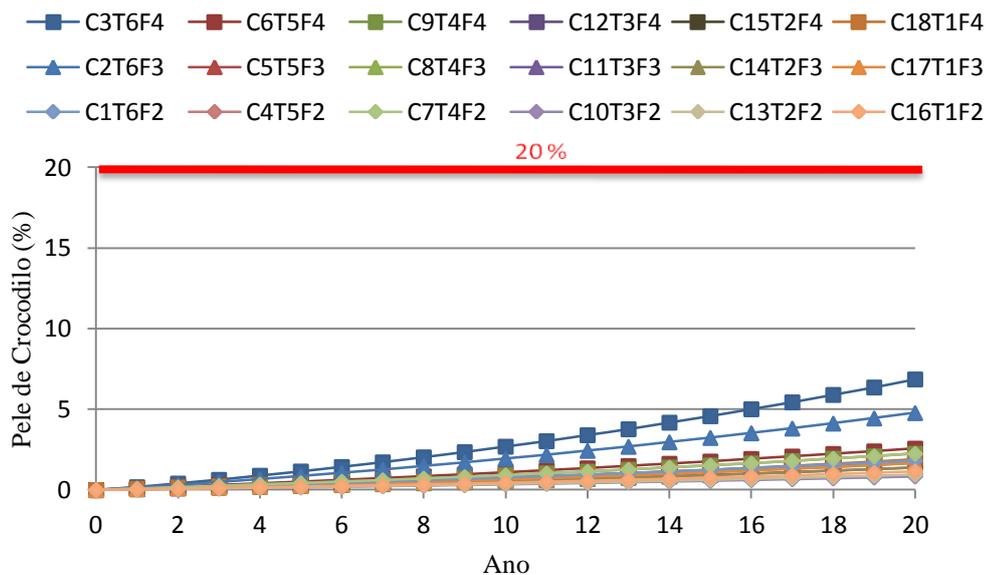


Figura 3.2 – Evolução da pele de crocodilo durante o tempo de vida útil

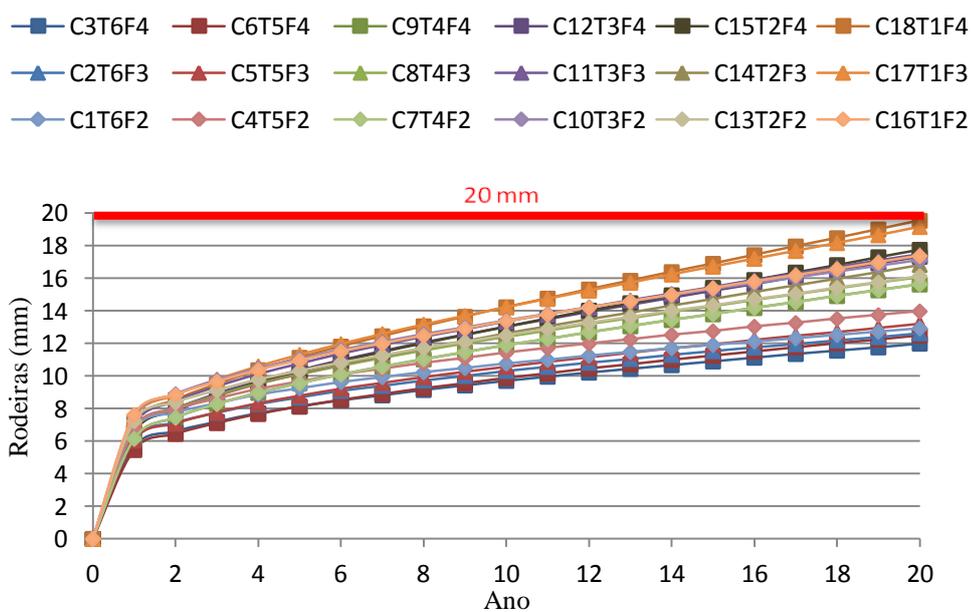


Figura 3.3 – Evolução do valor das rodeiras totais durante o tempo de vida útil

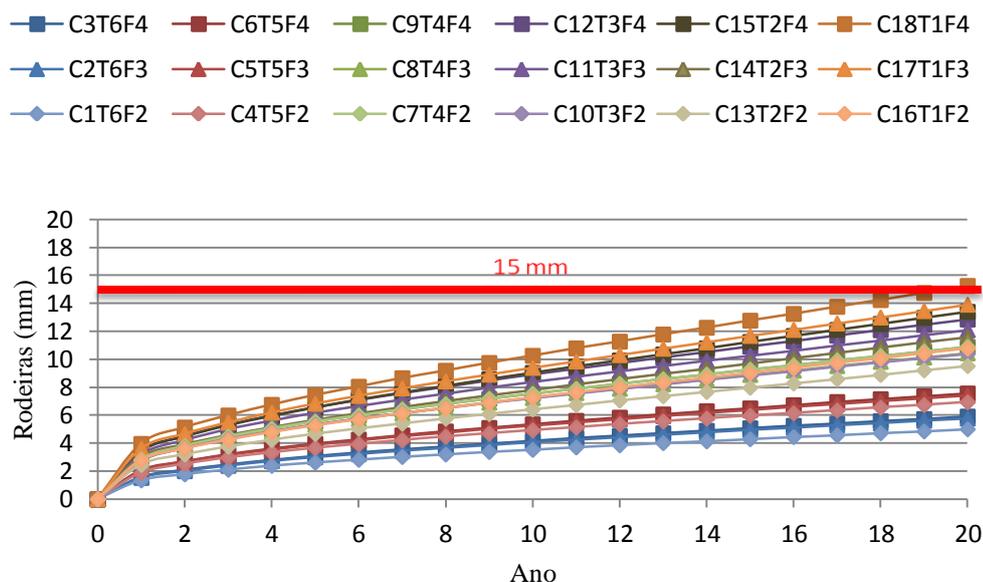


Figura 3.4 – Evolução do valor das rodeiras nas camadas betuminosas durante o tempo de vida útil (CB)

Relativamente ao parâmetro IRI, o seu valor varia entre os 1614,03 e os 1778,72 mm/km dependendo da combinação em causa, mas em qualquer dos casos, muito distantes dos limites máximos considerado (3500 mm/km). Estamos também perante um caso de sobredimensionamento relativamente a este parâmetro.

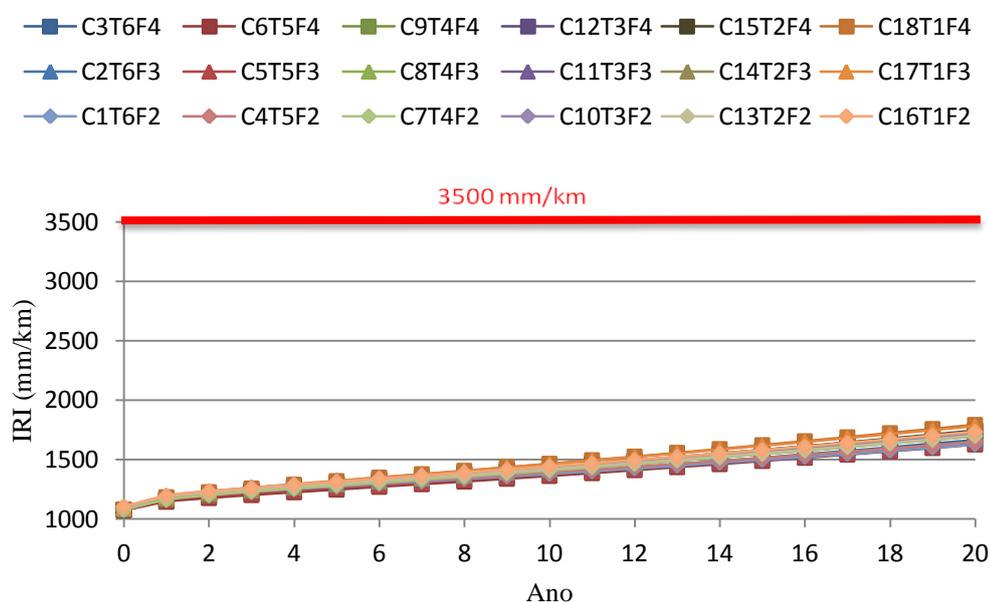


Figura 3.5 – Evolução do valor do IRI durante o tempo de vida útil

Estes resultados permitem concluir que, nas condicionantes em que foram efetuados os dimensionamentos, os parâmetros críticos de análise são as rodeiras por serem os parâmetros que mais se aproximam dos limites máximos considerados.

É então válido afirmar com um nível de confiança de 85%, que qualquer das estruturas definidas pelo MACOPAV manterá as condições exigíveis consideradas na fase de dimensionamento durante 20 anos, caso se verifiquem as taxas de crescimento, se mantenham as cargas dos veículos e não se verifiquem mudanças significativas das condições climáticas.

## 4. CONCLUSÕES

Em Portugal, o dimensionamento de pavimentos tem-se baseado num pré dimensionamento utilizando as estruturas definidos pelo MACOPAV e tem-se utilizado preferencialmente o método da Shell em fase posterior para a otimização das mesmas. O novo método da AASHTO, analisando as patologias previstas e suas manifestações à superfície dos pavimentos, poderá ser uma ferramenta para um melhor acompanhamento da evolução do desempenho dos pavimentos, permitindo um planeamento atempado das intervenções de conservação. O programa requer o conhecimento de dados em maior detalhe, para os quais já existem ferramentas, mas que ainda não estão preparadas para dar resposta e este tipo de solicitações, resultando numa morosidade acrescida para a realização da análise. Este método produz resultados que permitem limitar ou minimizar os danos provocados na estrutura, assegurando o cumprimento no limite dos critérios definidos e permitindo analisar os valores acumulados dos mesmos ao longo do tempo de vida útil definido. Permite, também, definir o nível de confiança que se pretende no dimensionamento, diferente para cada tipo de via e sua importância no sistema rodoviário em que se insere, assim como tem em conta o grau de conhecimento do projetista das variáveis a considerar, permitindo extrapolar a informação disponível, no caso de tal informação não ser concreta e relativa ao caso em estudo. Uma das possibilidades que pode ser explorada futuramente é a da otimização das estruturas de pavimento definidas pelo MACOPAV, reduzindo a sua dimensão, traduzindo-se desde logo numa redução de custos.

Na totalidade das combinações analisadas (18 embora o MACOPAV considere apenas 16 estruturas de pavimento diferentes) apenas um dos critérios de dimensionamento não foi verificado, nomeadamente a limitação da rodeira na análise em que é considerada apenas a contribuição das camadas betuminosas, para uma classe de tráfego T1 e uma classe de fundação F4. Dadas as simplificações admitidas, os dados utilizados, na maioria de nível 3, e o facto do critério ser cumprido para a análise em que todas as camadas do pavimento são consideradas, sendo a forma que melhor replica as condições reais, poderemos considerar o método da AASHTO válido para o dimensionamento de pavimentos, admitindo os limites impostos em território nacional.

Embora o fendilhamento seja a degradação mais frequente nos pavimentos flexíveis em Portugal, nas estruturas analisadas este valor ficou sempre longe do limite máximo considerado, pelo que poderemos admitir que para a área geográfica de Coimbra, o parâmetro mais limitativo corresponde às rodeiras

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, District of Columbia, USA, 1-204.
- AUSTROADS (2008). *Guide to Pavement Technology - Part 2: Pavement Structural Design*. Austroads, 1-249.
- Baptista, A. M. (1999). *Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, F.C.T.U.C., Coimbra, 1-195.
- CAPITÃO, S (2003). *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade*. Dissertação de Doutoramento na Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes.
- DIAS, J. (2009). *Estudo de Reforço do Pavimento da EN 333-3 entre a A25 e Oliveira de Frades*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, F.C.T.U.C., Coimbra, 1-89.
- EC@ (2010a). <http://www.engenhariacivil.com/pavimentos-rodoviaros-misturas-betuminosas-alto-modulo-mbam>. Caracterização de Pavimentos Rodoviários Betuminosos. Engenharia Civil.
- EC@ (2010b). <http://www.engenhariacivil.com/caracterizacao-pavimentos-rodoviaros-betuminosos>. Pavimentos Rodoviários com Misturas Betuminosas de Alto Módulo (MBAM). Engenharia Civil.
- EP (2006). *Tráfego 2005 - Rede Rodoviária Nacional*, Estradas de Portugal (EP), Almada, 1-12.
- Ferreira, A. (2013). *Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários da AASHTO - Aplicação a Portugal*. Reunião de Pavimentação Urbana, Cuiabá, 1-12.
- INMG @ (2012). <https://www.meteo.pt/pt/otempo/graficosobservacao> . Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG), Gráficos de Observação.
- JAE (1995). *Manual de Conceção de Pavimentos*. Junta Autónoma de Estradas (JAE), Lisboa, 1-54.
- Lopes, F. (2012). *Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO - Aplicação a Portugal*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, F.C.T.U.C., Coimbra, 1-80.
- MEPDG (2009). *User Instructions for MEPDG Software Flexible Pavement Design*. Mechanical-Empirical Pavement Design Guide, Indiana, 1-10.
- NCHRP (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Champaign, Illinois, 1-170.
- Picado-Santos, L (1993). *Método de Dimensionamento da SHELL para Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Adaptação às condições portuguesas*. Departamento de Engenharia Civil - F. C. T. U. C., 2ª edição, Coimbra, 1 vol., 1-174.

- Picado-Santos, L., Baptista, A. (2000). "*Paviflex - Programa de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Estrada 2000, 1-10.
- Picado-Santos, L., Branco, F., Pereira, P. (2006). *Pavimentos Rodoviários*, Coimbra, 1-388.
- Santos, J. e Ferreira, A. (2013). *Life-cycle cost analysis system for pavement management at project level*. International Journal of Pavement Engineering, 14 (1), 71-84.
- Shell (1977). *Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*. Shell International Petroleum Company Ltd., London, UK, 1-354.
- Simões, F., Ferreira, A. (2012). *Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários*. Coimbra, 1-12

# ANEXO A

Quadro A.1 – Quadro dos resultados obtidos

Código	Tráfego	Tipo de Fundação	TMDAp	I <sub>l</sub> (%)	NAVP (20 anos)	Camada de Desgaste			Camada de Base (Betuminosa)			Camada Sub-Base (Granular)			Solo de Fundação			Camada Semi-Infinita		IRI (mm/km)	Fendilhamento Longitudinal (m/km)	Pela Crocodilo (%)	Rodéiras (mm)			
						t <sub>cd</sub> (cm)	E (MPa)	v	T <sub>emp</sub> (°F)	t <sub>cs</sub> (cm)	E (MPa)	v	T <sub>emp</sub> (°F)	t <sub>cs</sub> (cm)	E (MPa)	v	t <sub>sp</sub> (cm)	E (MPa)	v					E (MPa)	v	E (MPa)
C1	F2	150	3	1,47×10 <sup>6</sup>	4	4000	0,35	81,50	12	4000	0,35	81,50	20	200	0,35	100	60	0,35	1000	0,35	1617,17	20,19	1,8	5,08	12,95	
C2	T6	F3	150	3	1,47×10 <sup>6</sup>	4	4000	0,35	80,60	8	4000	0,35	80,60	20	200	0,35	100	100	0,35	1000	0,35	1640,69	42,98	4,8	5,84	12,70
C3	F4	150	3	1,47×10 <sup>6</sup>	4	4000	0,35	80,60	6	4000	0,35	80,60	20	200	0,35	100	150	0,35	1000	0,35	1651,67	30,38	6,9	5,84	11,94	
C4	F2	300	3	2,94×10 <sup>6</sup>	4	4000	0,35	82,76	18	4000	0,35	82,76	20	200	0,35	100	60	0,35	1000	0,35	1634,42	5,56	0,9	6,86	13,97	
C5	T5	F3	300	3	2,94×10 <sup>6</sup>	4	4000	0,35	80,78	14	4000	0,35	80,78	20	200	0,35	100	100	0,35	1000	0,35	1623,44	35,01	1,8	7,37	13,21
C6	F4	300	3	2,94×10 <sup>6</sup>	4	4000	0,35	80,78	12	4000	0,35	80,78	20	200	0,35	100	150	0,35	1000	0,35	1614,03	30,39	2,6	7,62	12,45	
C7	F2	500	4	5,44×10 <sup>6</sup>	5	4000	0,35	81,86	20	4000	0,35	81,86	20	200	0,35	100	60	0,35	1000	0,35	1679,91	3,74	0,9	8,89	15,75	
C8	T4	F3	500	4	5,44×10 <sup>6</sup>	5	4000	0,35	82,22	16	4000	0,35	82,22	20	200	0,35	100	100	0,35	1000	0,35	1692,45	34,09	1,7	10,41	16,00
C9	F4	500	4	5,44×10 <sup>6</sup>	5	4000	0,35	82,22	14	4000	0,35	82,22	20	200	0,35	100	150	0,35	1000	0,35	1686,18	63,73	2,3	10,92	15,49	
C10	F2	800	4	8,70×10 <sup>6</sup>	5	4000	0,35	81,68	23	4000	0,35	81,68	20	200	0,35	100	60	0,35	1000	0,35	1711,28	1,63	0,8	10,41	17,02	
C11	T3	F3	800	4	8,70×10 <sup>6</sup>	5	4000	0,35	81,68	19	4000	0,35	81,68	20	200	0,35	100	100	0,35	1000	0,35	1723,83	21,12	1,4	12,19	17,53
C12	F4	800	4	8,70×10 <sup>6</sup>	5	4000	0,35	81,14	17	4000	0,35	81,14	20	200	0,35	100	150	0,35	1000	0,35	1709,71	52,06	1,8	12,95	17,27	
C13	F2	1200	5	1,45×10 <sup>7</sup>	6	4000	0,35	81,32	24	4000	0,35	81,32	20	200	0,35	100	60	0,35	1000	0,35	1687,75	0,85	1	9,40	16,00	
C14	T2	F3	1200	5	1,45×10 <sup>7</sup>	6	4000	0,35	81,14	20	4000	0,35	81,14	20	200	0,35	100	100	0,35	1000	0,35	1708,14	12,88	1,4	11,68	16,76
C15	F4	1200	5	1,45×10 <sup>7</sup>	6	4000	0,35	81,14	18	4000	0,35	81,14	20	200	0,35	100	150	0,35	1000	0,35	1734,81	45,02	1,8	13,46	17,78	
C16	F2	2000	5	2,42×10 <sup>7</sup>	6	4000	0,35	80,78	26	4000	0,35	80,78	20	200	0,35	100	60	0,35	1000	0,35	1719,12	0,82	1,2	10,67	17,27	
C17	T1	F3	2000	5	2,42×10 <sup>7</sup>	6	4000	0,35	80,60	22	4000	0,35	80,60	20	200	0,35	100	100	0,35	1000	0,35	1767,74	12,39	1,6	13,97	19,05
C18	F4	2000	5	2,42×10 <sup>7</sup>	6	4000	0,35	80,60	20	4000	0,35	80,60	20	200	0,35	100	150	0,35	1000	0,35	1778,72	42,24	1,9	15,24	19,56	